



**HAL**  
open science

# Evaluation et développement de la méthode IRIP de cartographie du ruissellement. Application au contexte ferroviaire (Version provisoire du PDF)

L.R. Lagadec

## ► To cite this version:

L.R. Lagadec. Evaluation et développement de la méthode IRIP de cartographie du ruissellement. Application au contexte ferroviaire (Version provisoire du PDF). Sciences de l'environnement. Doctorat de la Communauté Université Grenoble Alpes, Spécialité : Océan Atmosphère Hydrologie,, 2017. Français. NNT : 2017GREAU039 . tel-02607053v1

**HAL Id: tel-02607053**

**<https://hal.inrae.fr/tel-02607053v1>**

Submitted on 16 May 2020 (v1), last revised 5 Jul 2018 (v2)

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## **THÈSE**

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE LA COMMUNAUTE UNIVERSITE  
GRENOBLE ALPES**

Spécialité : **Océan Atmosphère Hydrologie**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

**Lilly-Rose LAGADEC**

Thèse dirigée par **Isabelle BRAUD**, Directeur de recherche,  
**Irstea**,

préparée au sein de l'**Unité de Recherche Hydrologie-  
Hydraulique de Irstea**

et du **Département Ligne-Voie-Environnement de  
Ingénierie et Projets de SNCF Réseau**

dans l'**École Doctorale Terre Univers Environnement**

# **Evaluation et développement de la méthode IRIP de cartographie du ruissellement. Application au contexte ferroviaire.**

Thèse soutenue publiquement le **05/12/2017**,  
devant le jury composé de :

**M. Guy DELRIEU**

Directeur de recherche CNRS, Grenoble (Examinateur, Président)

**M. Thierry JOLIVEAU**

Professeur UJM Saint-Etienne/Université de Lyon (Rapporteur)

**M. Yves LE BISSONNAIS**

Directeur de recherche INRA, Montpellier (Rapporteur)

**M. Johnny DOUVINET**

Maître de conférences Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse  
(Examinateur)

**Mme. Isabelle BRAUD**

Directeur de recherche Irstea, Lyon (Directrice)

**M. Pascal BREIL**

Chargé de recherche Irstea, Lyon (Encadrant)

**M. Loïc MOULIN**

Ingénieur Docteur, SNCF Réseau, Saint-Denis (Encadrant)





## REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier très chaleureusement mon équipe encadrante, grâce à qui j'ai pu réaliser cette thèse : Isabelle Braud, pascal Breil, Blandine Chazelle et Loïc Moulin. Depuis que je les ai rencontrés, ils n'ont cessé de m'aider, de m'encourager et de me challenger, toujours avec bienveillance et confiance. Malgré un schéma d'encadrement recherche/entreprise qui aurait pu être source de difficultés (diversité des objectifs, des langages), tous ont su rester constructifs, disponibles et motivés. Je sais la chance que j'ai eu d'avoir ces quatre personnes à mes côtés. Je remercie Isabelle pour ces encouragements et pour son aide dans les problématiques les plus techniques. Je remercie Pascal pour m'avoir transmis sa passion de l'Eco-hydrologie et pour les nombreuses visites terrain auxquelles j'ai pu participer. Je remercie Loïc pour son soutien dans la compréhension du monde ferroviaire et pour son engagement dans ma thèse et dans le projet IRIP Rail (merci d'avoir rejoint le projet en court de route et de t'y investir pleinement). Enfin, je remercie Blandine pour les conseils, l'ouverture d'esprit et les questionnements qu'elle m'a apportés (et qui me serviront encore longtemps).

Je souhaite également remercier les membres de mon comité de suivi de thèse pour leur intérêt envers mon travail et pour leurs conseils pertinents : Johnny Douvinet, Olivier Payrastra, Céline Luttoff, Pierre Javelle et Judicaël Dehotin. Je remercie tout particulièrement Judicaël, créateur de la méthode IRIP et développeur du logiciel du même nom, pour son aide et ses conseils techniques. Merci pour ta disponibilité malgré un emploi du temps très chargé.

Je tiens à remercier mes deux équipes d'accueil : le département HH (Hydrologie Hydraulique) à Irstea (Villeurbanne), et la division EGP (Etudes Générales et Projets), au sein du département LVE (Ligne Voie Environnement), de la direction de l'ingénierie de SNCF Réseau (Saint-Denis). J'ai toujours eu des conditions de travail optimales dans ces deux lieux. Je remercie vivement Eric Sauquet (responsable du département HH) et Serge Cadieu et Anita Brina (Responsables de la division EGP) pour leur accueil.

Je tiens également à remercier L'ANRT (Association Nationale pour la Recherche et les Technologies) pour avoir cofinancé mon doctorat avec SNCF Réseau, ainsi que l'école doctorale TUE (Terre Univers Environnement) de l'Université Grenoble Alpes pour la bonne gestion administrative de ma thèse.

Cette thèse ne serait certainement pas ce qu'elle est sans la contribution de nombreux acteurs que je tiens à remercier très sincèrement ici. Tout d'abord, je remercie Sixtine de Bejarry, archiviste à SNCF Réseau, avec qui j'ai travaillé pendant près d'une année. C'est grâce à son travail considérable et très minutieux qu'il a été possible de constituer la base de données d'impacts liés au ruissellement, qui a été le cœur du travail d'évaluation. Je remercie également Corentin Descours, en stage à SNCF Réseau, qui m'a été d'une grande aide pour constituer la base de données du patrimoine ferroviaire. Sa rigueur et son sérieux m'ont fait gagner un temps précieux. Je souhaite également remercier Cicely Pams-Capoccioni, responsable de l'équipe hydraulique-drainage à SNCF Réseau, pour sa clairvoyance, sa confiance et son soutien en mes recherches et au projet IRIP Rail. Cicely a fortement contribué au développement de mon esprit critique et à la construction de mon savoir-être en entreprise, je lui en suis très reconnaissante.

Je remercie vivement la « Team IRIP » d'Irstea, composée, entre autres, de Stanislas Bonnet-Carrier, Pierre Patrice, Alexia Chiavarino, Camille Fressignac, Oumaima Benarina, Amel Oucherif, Naouel Dali, Hélène Abekhzher et bien d'autres (stagiaires, CDD, thésards, etc.) qui ont contribué de près ou de loin à la méthode IRIP. Les échanges et l'entraide que nous avons pu avoir ont permis de faire avancer mes recherches à plusieurs reprises et de façon significative. Je remercie chacun d'entre eux. A Irstea, j'ai également eu la chance de travailler avec Christine Poulard, Hydrologue, et Etienne Leblois, Hydrologue –

Géostatisticien, qui m'ont tous deux éclairé sur de nombreux sujets de sciences et avec qui j'ai beaucoup aimé discuter et apprendre. Je les remercie chaleureusement.

J'ai également eu la chance de travailler avec des chercheurs en conception innovante de l'école des mines de Paris, Pascal Le Masson et Benoît Weil, ainsi qu'avec l'équipe associée, Dominique Laousse et Milena Klasing-Chen du département Innovation et Recherche de SNCF Réseau. Je les remercie pour m'avoir partagé leurs connaissances et pour m'avoir permis de constituer une problématique de thèse ambitieuse et porteuse d'avenir autant pour le laboratoire que pour l'entreprise.

Durant ma thèse, j'ai eu la chance de participer à de nombreux projets, je souhaite remercier notamment les personnes avec qui j'ai animé l'association des doctorants de la SNCF, les personnes avec qui j'ai fait les 24h chrono de l'entrepreneuriat, celles que j'ai rencontré durant l'école d'été d'Aberdeen... J'ai pris beaucoup de plaisir à travailler avec chacune d'entre elles.

Cette thèse m'a également permis de côtoyer des personnes formidables et de me lier d'amitié avec plusieurs d'entre elles. Merci à Emeline, Musaab, Chen et Alexis d'avoir partagé mon quotidien à Irstea et merci à Noura de l'avoir partager côté SNCF ! Plus largement, je tiens à remercier tous mes collègues des équipes HH, Poldiff et quelques autres pour avoir créé des moments inoubliables, du club ping-pong (pardon, tennis de table), au club jeux de société, en passant par les raclettes d'équipe, les fêtes des sports, les concours de cocktails, les apéros au parc de la Tête d'Or, ou encore pour tous les midis à la cantine (meilleur moment de la journée !). Un grand merci à tous les thésards, stagiaires, CDD et permanents d'Irstea que j'ai pu croiser pendant ma thèse ! Parce que j'ai vécu ma thèse dans deux univers aussi géniaux l'un que l'autre, je souhaite également remercier mes collègues et amis côté SNCF : Loïc M, Loubna, Morgane, Claire, Alexis, Alex P., Yoni, Julie, Dorine, Loïc R, Hugo, Alex G., Léa, Coco, Elodie, Maxime, Jeremy, Cécile SM, Cécile R... Je ne peux hélas pas citer tout le monde, mais ils se reconnaîtront !

Enfin, Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers mes proches et ma famille qui m'ont beaucoup encouragé. Je pense à mon père et à mes grands-parents qui m'ont accueilli avec grand plaisir chaque fois que je venais à Paris pour aller à mon bureau de la SNCF. Mille mercis à vous ! Je pense à ma mère, qui m'a encouragé durant toutes mes études (et toute ma vie en fait) et qui croit en moi (souvent plus que moi). Merci de me soutenir comme tu le fais. Merci à mes amis qui sont exceptionnels et qui me font voir toujours le côté positif de la vie ! (Et c'est vraiment important quand on fait une thèse !)

Je m'excuse si je n'ai pas cité toutes les personnes qui ont contribué à ce travail et à ma formation de près ou de loin, mais je vous en suis très reconnaissante. Je remercie par avance les lecteurs et autres personnes qui porteront de l'intérêt à mon travail.





## Résumé

Le ruissellement pluvial est à l'origine de phénomènes violents tels que des inondations, de l'érosion ou des coulées de boue. Les voies ferrées interceptent les écoulements de surface, ce qui peut engendrer une dégradation précoce de l'infrastructure ou la destruction d'éléments, tels que la plateforme ou les talus. La méthode IRIP, « Indicateur de Ruissellement Intense Pluviale », permet de représenter le ruissellement en trois cartes, la production, le transfert et l'accumulation. La méthode IRIP se veut simple et robuste, pour un usage sur tous types de territoires et sans calage. Comme tout modèle de ruissellement, l'évaluation de la méthode IRIP se heurte au manque de données. Pourtant, l'évaluation est une étape cruciale dans le développement de modèles. Pour un usage opérationnel ou pour poursuivre les développements, il est nécessaire d'estimer la valeur et la fiabilité des informations produites. L'objectif de la thèse est donc de proposer une méthode d'évaluation de la méthode IRIP par comparaison à des données d'impacts sur les voies ferrées. La difficulté réside dans la différence de fond et de forme des données à comparer et dans la nécessité de prendre en compte la vulnérabilité de l'infrastructure. La méthode d'évaluation proposée est basée sur le calcul de tableaux de contingence et d'indicateurs de performance, couplé à des analyses détaillées d'incidents. Après une estimation de la performance de la méthode IRIP, des développements sont testés et évalués grâce à la méthode d'évaluation élaborée. La lisibilité des cartes est finalement améliorée, tout en gardant de bons scores de performance. En appliquant la méthode IRIP à des contextes opérationnels, il est montré en quoi IRIP peut être considéré comme un outil d'aide à l'expertise. Différentes tâches du processus de gestion des risques sont testées, telles que les diagnostics de risques sur les voies ferrées, les retours d'expérience post-événement ou encore la réalisation de zonage réglementaire. De manière générale, cette thèse contribue à l'amélioration des connaissances sur le phénomène du ruissellement et propose des méthodes pour améliorer la gestion des risques liés au ruissellement dans le contexte ferroviaire.

Mots-clés : Ruissellement ; Evaluation ; IRIP ; Cartographie ; Infrastructure ferroviaire ; Impacts

## Abstract

Surface runoff is the source of severe hazards such as floods, erosion or mudflows. Railways can disturb natural surface water flow path, which can generate accelerated deterioration of the infrastructure, or the destruction of railway elements, such as the roadbed or the embankments. The IRIP method 'Indicator of Intense Pluvial Runoff' (French acronym) allows mapping surface runoff through three maps, generation, transfer and accumulation. The IRIP method aims to be simple and reliable, in order to be used on all types of lands, without calibration stage. As for others surface runoff models, the IRIP method evaluation faces the lack of data. However, evaluation is a crucial stage for the development of models. In the perspective of an operational use, or simply for the model development, it is essential to estimate the value and the reliability of the model outputs. The thesis objective is to provide an evaluation method using surface runoff impacts on railways. Difficulties lie in the fact that data to be compared differ in terms of form and content. Moreover, the infrastructure vulnerability must be characterized. The proposed evaluation method is based on the computation of contingency tables and of verification indicators, together with detailed analysis of specific impacts. After an estimation of the IRIP method performance, further developments can be tested and evaluated thanks to the proposed evaluation method. Finally, maps comprehensibility is enhanced, while preserving satisfying performance scores. By applying the IRIP method to operational contexts, it has been shown how the IRIP method can be used as a tool in expert appraisals. Different tasks of the risk management process have been studied such as risk analysis on railways, post-event investigation or the realisation of regulatory zonings. More generally, this thesis contributes to improve knowledge about surface runoff and provide methods for improving the risk management in the railway context.

Key words: Surface runoff ; Evaluation ; Mapping ; Railway infrastructure ; Impacts



# TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
I. PREMIERE PARTIE : CONTEXTE DE LA THESE ET ENJEUX SCIENTIFIQUES ET OPERATIONNELS	5
INTRODUCTION	5
1. CHAPITRE 1 : LE RUISSELLEMENT ET LES RISQUES ASSOCIES	7
1.1. LE RUISSELLEMENT DANS LE CYCLE DE L'EAU	7
1.2. LA GENESE DU RUISSELLEMENT	10
1.3. L'ECOULEMENT ET SES CONSEQUENCES	11
1.3.1. L'EROSION	11
1.3.2. LES ECOULEMENTS	12
1.3.3. LES DEPOTS	14
1.3.4. LES EFFONDREMENTS	14
1.4. LES FACTEURS DU RUISSELLEMENT	15
1.4.1. LES PRECIPITATIONS	15
1.4.2. LA MORPHOLOGIE DU BASSIN VERSANT	15
1.4.3. LE SOL ET SOUS-SOL	17
1.4.4. L'OCCUPATION DU SOL	19
1.5. LES ENJEUX DU RUISSELLEMENT	20
1.5.1. LES PERSONNES	21
1.5.2. LES BIENS	21
1.5.3. L'ENVIRONNEMENT	24
1.6. REGLEMENTATION POUR LA GESTION DU RUISSELLEMENT	25
1.6.1. EVOLUTION DE LA REGLEMENTATION	25
1.6.2. DEFINITION EVASIVE DU RUISSELLEMENT DANS LES TEXTES REGLEMENTAIRES	27
1.7. TERMINOLOGIE	28
1.7.1. DEFINITION DU RUISSELLEMENT	28
1.7.2. DEFINITIONS DES TERMES DU DOMAINE DES RISQUES	28
2. CHAPITRE 2 : LA GESTION DU RUISSELLEMENT DANS LE CONTEXTE FERROVIAIRE	31
2.1. LE SYSTEME FERROVIAIRE	31
2.2. L'INFRASTRUCTURE FERROVIAIRE	32
2.2.1. LES OUVRAGES EN TERRE	33
2.2.2. LA VOIE	34
2.2.3. LE RESEAU HYDRAULIQUE	35
2.3. LES DESORDRES LIES AU RUISSELLEMENT SUR L'INFRASTRUCTURE FERROVIAIRE	39
2.3.1. CONFIGURATION EN DEBLAI	39
2.3.2. CONFIGURATION EN REMBLAI	41
2.3.3. JONCTIONS DEBLAI-REMBLAI	42
2.4. LA GESTION DES RISQUES LIES AU RUISSELLEMENT A SNCF	43
2.4.1. CONCEPTION	44

2.4.2.	SURVEILLANCE	46
2.4.3.	MAINTENANCE	48
2.4.4.	EXPLOITATION	51
2.4.5.	GESTION DES DONNEES SUR LES INCIDENTS ET LE PATRIMOINE	52
2.5.	Limites actuelles	54
3.	CHAPITRE 3 : LA CARTOGRAPHIE DU RUISSELLEMENT	57
3.1.	ETAT DE L'ART DES METHODES DE CARTOGRAPHIE DU RUISSELLEMENT	57
3.1.1.	L'APPROCHE NATURALISTE	57
3.1.2.	L'APPROCHE TOPOGRAPHIQUE	58
3.1.3.	L'APPROCHE PAR CROISEMENT D'INDICATEURS	59
3.1.4.	L'APPROCHE PAR MODELISATION PHYSIQUE	61
3.1.5.	SYNTHESE	63
3.2.	LA METHODE IRIP	63
3.2.1.	HISTORIQUE ET CONCEPT DE LA METHODE IRIP	63
3.2.2.	PRESENTATION DE LA METHODE IRIP	64
3.2.3.	PRESENTATION DU LOGICIEL IRIP©	67
3.2.4.	DISCUSSION	72
3.3.	EVALUATION DES METHODES DE CARTOGRAPHIE DU RUISSELLEMENT	74
3.3.1.	DONNEES APPROCHEES	74
3.3.2.	EVALUATION PAR CONCERTATION AVEC DES ACTEURS LOCAUX	75
3.3.3.	EVALUATION PAR COMPARAISON A DES MESURES <i>IN SITU</i>	75
3.3.4.	EVALUATION PAR COMPARAISON A DES CARTES ISSUES D'AUTRES MODELES	76
3.3.5.	EVALUATION PAR COMPARAISON A DES DONNEES APPROCHEES	77
3.3.6.	SYNTHESE	83
	CONCLUSION ET DEMARCHE GENERALE DE LA THESE	85
II.	DEUXIEME PARTIE : EVALUATION ET DEVELOPPEMENT DE LA METHODE IRIP SUR LA LIGNE DE PARIS-SAINT-LAZARE AU HAVRE	87
	INTRODUCTION	87
1.	CHAPITRE 1 : CREATION D'UNE METHODE D'EVALUATION PAR COMPARAISON AVEC LES IMPACTS SUR LA VOIE FERREE	89
1.1.	INTRODUCTION	89
1.2.	MATERIELS ET METHODES	90
1.2.1.	DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE	90
1.2.2.	CREATION DES CARTES IRIP SUR LA ZONE D'ETUDE	93
1.2.3.	CREATION DE LA BASE DE DONNEES DES IMPACTS HISTORIQUES LIES AU RUISSELLEMENT	101
1.2.4.	METHODE DE COMPARAISON ENTRE LES CARTES IRIP ET LES DONNEES D'IMPACTS	111
1.3.	RESULTATS	120
1.3.1.	ANALYSE STATISTIQUE	120
1.3.2.	ANALYSE DETAILLEE	122
1.3.3.	SYNTHESE	123
1.4.	DISCUSSION	123
1.4.1.	CHOIX DU NIVEAU IRIP MINIMUM A CONSIDERER	123
1.4.2.	CHOIX DE PRISE EN COMPTE DES PIXELS IRIP ISOLES	125
1.4.3.	CHOIX DE LA DISTANCE TAMPON DE PART ET D'AUTRE DE LA VOIE FERREE ET DES IMPACTS	125
1.4.4.	CHOIX DE LA PRISE EN COMPTE D'UNE ZONE TAMPON AUTOUR DES PIXELS IRIP FORTS	125

1.4.5.	Méthode de comptage des corrélations _____	126
1.4.6.	SYNTHESE _____	127
1.5.	CONCLUSION _____	128
<b>2.</b>	<b>CHAPITRE 2 : PRISE EN COMPTE DE L'INFRASTRUCTURE FERROVIAIRE DANS LA METHODE D'EVALUATION _____</b>	<b>131</b>
2.1.	INTRODUCTION _____	131
2.2.	MATERIELS ET METHODES _____	132
2.2.1.	RECHERCHE ET CAPITALISATION DES DONNEES SUR L'INFRASTRUCTURE FERROVIAIRE _____	132
2.2.2.	CARACTERISATION DE LA VULNERABILITE DE LA VOIE FERREE _____	138
2.2.3.	PRISE EN COMPTE DE LA VULNERABILITE DANS LA METHODE DE COMPARAISON DES CARTES IRIP ET DES DONNEES D'IMPACTS _____	144
2.3.	RESULTATS _____	147
2.3.1.	ANALYSE STATISTIQUE _____	147
2.3.2.	ANALYSE DETAILLEE _____	149
2.3.3.	SYNTHESE _____	153
2.4.	DISCUSSION _____	153
2.4.1.	FAUX NEGATIF LIE A UN IMPACT NON INDUIT PAR DU RUISSELLEMENT _____	154
2.4.2.	FAUX NEGATIFS LIES A LA CONFIGURATION LOCALE DE L'INFRASTRUCTURE _____	155
2.4.3.	FAUX NEGATIFS LIES AUX CARTES IRIP PEU PERTINENTES _____	158
2.4.4.	SYNTHESE _____	164
2.5.	CONCLUSION _____	166
<b>3.</b>	<b>CHAPITRE 3 : PROPOSITIONS DE DEVELOPPEMENTS POUR LA METHODE IRIP _____</b>	<b>169</b>
3.1.	INTRODUCTION _____	169
3.2.	L'INDICATEUR DES RUPTURES DE PENTES _____	171
3.2.1.	DEFAUTS LIES A L'INDICATEUR DES RUPTURES DE PENTES _____	171
3.2.2.	COMPARAISON DE DEUX METHODES DE CALCUL DES RUPTURES DE PENTE _____	172
3.2.3.	RESULTATS SUR L'EVALUATION DE LA METHODE IRIP _____	176
3.2.4.	ANALYSE DES FAUX NEGATIFS _____	179
3.2.5.	CONCLUSION SUR L'INDICATEUR DES RUPTURES DE PENTES _____	182
3.3.	L'INDICATEUR DES AXES LINEAIRES AU SOL _____	183
3.3.1.	DEFAUTS LIES A L'INDICATEUR DES AXES LINEAIRES AU SOL _____	183
3.3.2.	L'ERODABILITE EN REMPLACEMENT DES AXES LINEAIRES AU SOL ? _____	184
3.3.3.	RESULTATS SUR L'EVALUATION DE LA METHODE IRIP _____	186
3.3.4.	ANALYSE DES FAUX NEGATIFS _____	188
3.3.5.	CONCLUSION SUR L'INDICATEUR D'ERODABILITE _____	193
3.4.	L'INDICATEUR DE COMPACITE _____	193
3.4.1.	DEFAUTS LIES A L'INDICATEUR DE COMPACITE _____	193
3.4.2.	L'AIRE DRAINEE EN REMPLACEMENT DE L'INDICE DE COMPACITE ? _____	195
3.4.3.	RESULTATS SUR L'EVALUATION DE LA METHODE IRIP _____	196
3.4.4.	ANALYSE DES FAUX NEGATIFS _____	199
3.4.5.	CONCLUSION SUR L'INDICATEUR D'AIRE DRAINEE _____	202
3.5.	L'INFLUENCE DE LA RESOLUTION DU MNT _____	203
3.5.1.	IMPORTANCE DE LA DONNEE TOPOGRAPHIQUE DANS LA METHODE IRIP _____	203
3.5.2.	COMPARAISON POUR CINQ RESOLUTIONS DIFFERENTES _____	205
3.5.3.	COMPARAISON DETAILLEE A 25 ET A 5 M _____	212
3.5.4.	SYNTHESE _____	216
3.6.	CONCLUSION _____	217

CONCLUSION ET PERSPECTIVES	220
III. TROISIEME PARTIE : CONTRIBUTION DE LA METHODE IRIP A LA GESTION DES RISQUES LIES AU RUISSELLEMENT	223
INTRODUCTION	223
1. CHAPITRE 1 : CONTRIBUTION DE LA METHODE IRIP A LA REALISATION DE PLANS DE PREVENTION DES RISQUES	225
1.1. INTRODUCTION	225
1.2. MATERIELS ET METHODES	226
1.2.1. LA ZONE D'ETUDE	226
1.2.2. LES ZONAGES REGLEMENTAIRES	227
1.2.3. PARAMETRAGE DE LA METHODE IRIP ET DONNEES D'ENTREE	228
1.2.4. METHODE DE COMPARAISON	229
1.3. RESULTATS	230
1.3.1. COMPARAISON ENTRE LA CARTES IRIP D'ACCUMULATION ET LE ZONAGE RUISSELLEMENT	230
1.3.2. COMPARAISON ENTRE LA CARTE IRIP DE TRANSFERT ET LE ZONAGE EROSION	232
1.3.3. SYNTHESE	234
1.4. DISCUSSION	235
1.4.1. ATOUTS	235
1.4.2. LIMITES	236
1.4.3. IRIP COMME UN OUTIL DE GESTION DES RISQUES ?	237
1.5. CONCLUSION	238
2. CHAPITRE 2 : CONTRIBUTION DE LA METHODE IRIP AUX RETOURS D'EXPERIENCE POST-EVENEMENTS	239
AVANT-PROPOS	239
USE OF POST-EVENT SURVEYS OF IMPACTS ON RAILWAYS FOR THE EVALUATION OF THE IRIP METHOD FOR SURFACE RUNOFF MAPPING	240
SYNTHESE	256
3. CHAPITRE 3 : CONTRIBUTION DE LA METHODE IRIP AUX DIAGNOSTICS DE LIGNE	259
AVANT-PROPOS	259
A SURFACE RUNOFF MAPPING METHOD FOR OPTIMIZING RISK ANALYSIS ON RAILWAYS	261
SYNTHESE	290
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	293
CONCLUSION GENERALE	295
Bibliographie	299
Table des figures	311
Table des tableaux	321
Annexes	325





## INTRODUCTION GENERALE

Le ruissellement est la part des précipitations qui ne s'infiltrer pas dans le sol et qui s'écoule à la surface en dehors des rivières. Le ruissellement est généré par la pluie, et lors d'évènement pluvieux exceptionnels, en intensité ou en durée, d'importants volumes d'eau peuvent être produits. L'eau qui ruissèle peut s'accumuler et gagner en puissance, elle peut éroder le sol et se densifier avec les matériaux qu'elle emporte sur son passage, jusqu'à produire des écoulements chargés ayant davantage de puissance pour réellement inciser le sol ou déplacer des matériaux importants. Selon les conditions climatiques, géomorphologiques ou de couverture du sol, le ruissellement peut prendre différentes formes. Il peut générer des inondations, des écoulements plus ou moins chargés tels que des coulées de boue, de l'érosion et des glissements superficiels, et peut produire des dépôts de boue ou de sédiments. Le ruissellement se caractérise par une échelle de temps et d'espace très réduite, c'est un phénomène fugace, mais il peut se produire en tout point du territoire.

Le ruissellement est un phénomène naturel, il fait partie du cycle de l'eau, mais en tant qu'écoulement de surface, il entre en interaction avec les éléments du territoire. Le ruissellement peut impacter les enjeux, qu'ils soient humains ou structurels, par les risques naturels qu'il induit. Mais les activités du territoire peuvent également impacter le ruissellement. En effet, en fonction des usages du sol, le flux du ruissellement peut être modifié. Il peut aussi se charger en pollution et les transférer dans le milieu naturel en s'infiltrant ou en rejoignant les rivières. Aujourd'hui le ruissellement est un phénomène assez peu étudié. De par ses caractéristiques fugaces, les observations du ruissellement et des phénomènes induits sont difficiles, et peu de données de mesures existent. Néanmoins, la réglementation tend à imposer sa prise en compte dans les documents de gestion et d'aménagement. Pour autant, la définition du phénomène à considérer ne fait pas consensus, et les limites physiques du ruissellement sont encore discutées dans la communauté scientifique. Des questions émergent alors actuellement pour savoir quels outils ou méthodes existent pour étudier et gérer le ruissellement sur les territoires.

Certains éléments du territoire, tels que les réseaux de transport au sol sont particulièrement exposés au ruissellement. De par leur structure linéaire et continue, les axes de communication quadrillent les bassins versants. Ces réseaux interceptent et redirigent les écoulements de surface. Parmi les axes de communication, les voies ferrées sont particulièrement vulnérables au ruissellement. L'assise érodable des voies et les talus meubles peuvent facilement être endommagés par la force de l'eau. Les voies ferrées sont néanmoins protégées du ruissellement via des dispositifs hydrauliques et des mesures de prévention, mais le ruissellement charrie des boues difficiles à gérer par les dispositifs classiques. De plus, les débits estimés pour les dimensionnements peuvent augmenter avec le temps et l'évolution de l'environnement. Des désordres sur l'infrastructure peuvent pourtant engendrer des perturbations pour

l'exploitation du réseau, ce qui peut avoir des conséquences sur la sécurité et générer des dommages économiques. Se pose alors, pour le gestionnaire d'infrastructure, la question des outils ou méthodes disponibles pour mieux appréhender le ruissellement et mieux le gérer.

C'est dans ce contexte global de besoin de mieux connaître le ruissellement et de mieux le gérer qu'a été créée la méthode IRIP de cartographie du ruissellement, pour « Indicateur de Ruissellement Intense Pluvial ». La méthode IRIP a été créée à Irstea (Dehotin et Breil, 2011a, 2011b) suite à l'identification d'un manque méthodologique pour prendre en compte le ruissellement dans les documents d'urbanisme et de planification. La méthode IRIP a été créée avec pour ambition d'être d'une méthode robuste, applicable sur tout type de territoire, sans calage *a priori* et nécessitant peu de données d'entrée. La méthode devait être simple à utiliser par les opérationnels et être simple à interpréter pour bien décider des mesures de gestion à mettre en œuvre. Pour répondre à ces exigences, il a été décidé de représenter le ruissellement via trois cartes, représentant trois étapes du ruissellement : la production, le transfert et l'accumulation. La carte de production présente les zones propices à la genèse du ruissellement, la carte de transfert présente les zones propices à l'accélération du ruissellement, et la carte d'accumulation présente les zones propices à la concentration des écoulements. Les cartes sont produites par combinaison géomatique d'indicateurs du paysage plus ou moins favorables au ruissellement. La construction des cartes est basée sur trois données d'entrée, la topographie, l'occupation du sol et le type de sol. Suite aux tests prometteurs des premières applications de la méthode IRIP dans un contexte de recherche, SNCF s'est approprié la méthode et l'a développé, sous forme de logiciel, pour les besoins de gestion du ruissellement sur les voies ferrées. Le besoin d'évaluation de la méthode IRIP est alors devenu crucial pour une mise en œuvre dans un contexte opérationnel.

C'est ainsi qu'a émergé la première problématique de la thèse : l'évaluation de la méthode IRIP. L'enjeu de l'évaluation est, d'une part, scientifique, afin de mieux appréhender les informations générées par cette méthode originale, et d'autre part, technique, afin de connaître la fiabilité des informations et leur valeur ajoutée, par rapport aux informations actuellement disponibles. La difficulté de l'évaluation réside dans le manque de données relatives au ruissellement. La complexité du phénomène rend difficile son observation et sa mesure, et peu de données existent à l'échelle du territoire pour comparer aux résultats de la méthode IRIP. Il est proposé dans la thèse, d'utiliser les données d'impacts liés au ruissellement sur les voies ferrées comme données d'évaluation. Les impacts sur les voies ferrées sont effectivement de bons indicateurs de problématiques de ruissellement en certains points puisque l'infrastructure ferroviaire est vulnérable aux écoulements de surface. Néanmoins, ces données d'impacts ne sont pas forcément exhaustives et possèdent un biais de représentativité. La comparaison de ces données avec les cartes IRIP pose donc une problématique méthodologique. Les cartes d'aléa et les données d'impacts sont différentes dans le fond et dans la forme. De plus, la comparaison entre un aléa et des données de risques effectifs que sont les impacts, pose la question de la prise en compte de la vulnérabilité. L'effet induit par le ruissellement sur l'infrastructure dépendra en effet du niveau de vulnérabilité de celle-ci. L'évaluation de la méthode IRIP nécessite donc de caractériser la vulnérabilité de la voie ferrée au ruissellement. Ceci nous amène au premier objectif de la thèse qui est de proposer une méthode d'évaluation de la méthode IRIP par comparaison aux données d'impacts sur les voies ferrées, tout en prenant en compte la vulnérabilité de l'infrastructure.

Par ailleurs, la méthode IRIP propose une méthode de construction des cartes assez originale, par combinaison d'indicateurs du paysage favorables ou non au ruissellement. La question se pose donc de la pertinence de cette méthode de construction et de la pertinence du choix des indicateurs ou des seuils de favorabilité pour construire chacune des trois cartes. La méthode IRIP peut-elle être consolidée ou améliorée ? La difficulté liée au développement de la méthode IRIP réside dans les très nombreuses possibilités de modifications. Tout ne peut être testé et il faut pouvoir juger en quoi une modification est

meilleure qu'une autre ou en quoi elle apporte une réelle amélioration par rapport à la méthode IRIP de base. Les réflexions menées sur l'évaluation permettront de générer de nouvelles connaissances sur le phénomène de ruissellement. Ces connaissances permettront d'affiner les messages qui doivent être transmis via les cartes IRIP et permettront donc de mieux cibler les modifications qui doivent être testées. Ceci nous amène au second objectif de la thèse qui est de proposer des pistes d'amélioration de la méthode IRIP.

Dans une optique d'utilisation de la méthode IRIP dans des contextes opérationnels, tels que le contexte ferroviaire, un travail doit également être mené sur l'intégration de la méthode IRIP au processus actuel de gestion des risques. Les cartes issues de la méthode IRIP sont des cartes brutes. Les informations contenues dans ces cartes ont besoin d'être adaptées afin d'être réellement utilisables par des acteurs opérationnels. Une partie du travail de thèse sera donc consacré à l'identification des besoins et des contraintes de la gestion des risques liés au ruissellement dans le contexte ferroviaire, dans le but de proposer des usages et des pistes d'adaptation pour favoriser l'utilisation de la méthode IRIP. Ceci constitue le troisième objectif de la thèse.

Pour répondre à ces trois objectifs d'évaluation, d'amélioration et d'adaptation de la méthode IRIP, la thèse se compose de trois parties. Dans un premier temps, le contexte de la thèse et les enjeux scientifiques et techniques seront présentés plus en détails. Il sera fait l'état des connaissances sur le phénomène de ruissellement. La gestion des risques liés au ruissellement dans le contexte ferroviaire sera présentée, ainsi que la méthode IRIP en regard d'autres méthodes de cartographie du ruissellement. A l'issue de cette partie, les objectifs de la thèse seront affinés et la démarche générale de la thèse sera présentée. La seconde partie de la thèse porte sur l'évaluation et l'amélioration de la méthode IRIP. Deux chapitres sont consacrés à l'élaboration de la méthode d'évaluation par comparaison aux données d'impacts et d'infrastructure et le troisième chapitre est consacré à l'amélioration de la méthode IRIP. Enfin, la troisième partie de la thèse présente différentes mises en contexte de la méthode IRIP afin d'évaluer sa contribution à différentes tâches de la gestion des risques liés au ruissellement dans le contexte ferroviaire et dans d'autres contextes.



# PREMIERE PARTIE : CONTEXTE DE LA THESE ET ENJEUX SCIENTIFIQUES ET OPERATIONNELS

## INTRODUCTION

Cette première partie se compose de trois chapitres. Les deux premiers chapitres présentent les contextes hydrologique et ferroviaire, le troisième chapitre fait l'état de l'art des méthodes de cartographie du ruissellement. Dans le premier chapitre, le phénomène de ruissellement est défini, ainsi que les phénomènes induits, tels que les écoulements chargés, l'érosion ou les dépôts. Les différents facteurs influençant le ruissellement sont présentés, tels que les précipitations, la topographie, le sol et l'occupation du sol. Ensuite, les enjeux du territoire pouvant être impactés par le ruissellement, tels que les personnes, les biens et l'environnement, sont présentés, ainsi que l'évolution de la réglementation. Enfin, la terminologie utilisée dans la thèse sera définie.

Le second chapitre présente le contexte ferroviaire. Tout d'abord, les éléments de l'infrastructure pouvant être impactés par le ruissellement sont décrits. Les différents types de désordres que peut induire le ruissellement sur l'infrastructure sont présentés, par type de configuration. Puis, la gestion des risques liés au ruissellement dans le contexte ferroviaire est présentée, suivant les différentes étapes de la vie d'une ligne, depuis la conception, jusqu'à la maintenance, la surveillance et l'exploitation, en passant par la gestion des données. Ce chapitre conclut sur les limites actuelles en termes de gestion des risques liés à l'eau.

Le troisième chapitre fait l'état de l'art des méthodes de cartographie du ruissellement selon différents types d'approches, naturaliste, topographique, par croisement d'indicateurs et par modélisation. Ensuite, la méthode IRIP est présentée en détails, ainsi que son implémentation sous la forme du logiciel iRIP©. Enfin, les méthodes d'évaluation des représentations cartographiques du ruissellement sont présentées, en regard des tests d'évaluation réalisés sur les méthodes existantes. Une attention particulière sera portée aux évaluations utilisant des données approchées. Cette première partie a pour but de fournir tous les éléments nécessaires à la compréhension du contexte dans lequel évolue le travail de thèse. A l'issue de la présentation du contexte de la thèse et des enjeux scientifiques et opérationnels, les objectifs seront affinés et la démarche globale sera présentée.



## CHAPITRE 1 : LE RUISSELLEMENT ET LES RISQUES ASSOCIES

Ce premier chapitre s'attache à définir le ruissellement, en tant que phénomène hydrologique naturel, mais aussi en tant qu'aléa naturel pouvant engendrer des phénomènes violents et des risques pour les enjeux se trouvant sur son chemin. Ainsi ce chapitre se compose de sept sections. La définition du ruissellement est initié par la description du cycle de l'eau et des différents types d'écoulements dans le réservoir sol, les mécanismes de genèse du ruissellement sont ensuite d'écrits, ainsi que les différentes formes que peut prendre le ruissellement lors de son écoulement vers l'aval. Les différents facteurs d'atmosphère et de surface du sol influençant le ruissellement sont également présentés. Ensuite, les différents enjeux du territoire pouvant être impactés par le ruissellement sont présentés et quelques chiffres sont fourni afin d'illustrer le coût du ruissellement sur la société. Suite à la présentation des enjeux, un retour sur l'évolution de la réglementation autour du ruissellement, depuis ces dernières décennies, est présenté, pour finir avec la définition des termes liés au domaine du risque utilisés dans la thèse.

### 1.1. LE RUISSELLEMENT DANS LE CYCLE DE L'EAU

Le cycle de l'eau représente les flux d'eau sur la planète tels qu'illustré sur ce premier schéma (Figure I-1). L'eau, sous ses différents états, liquide, solide, gazeux, circule entre trois grands réservoirs que sont les océans, l'atmosphère et la Terre. On peut distinguer trois processus majeurs qui ont lieu au niveau du réservoir terre: les précipitations, les écoulements et l'évapotranspiration. (Pidwirny, 2006)

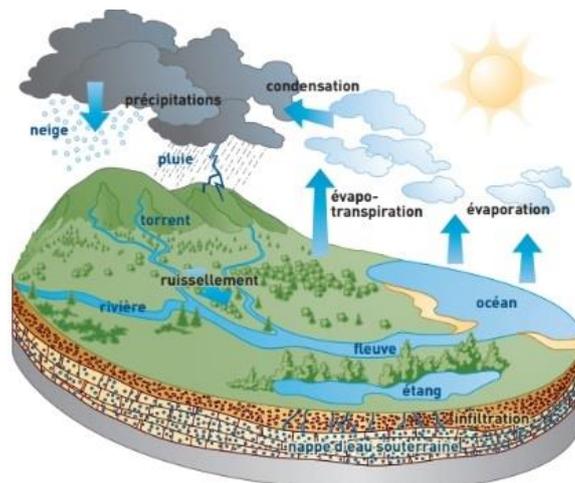


FIGURE I-1: MODELE CONCEPTUEL DU CYCLE DE L'EAU (SOURCE: AGENCE DE L'EAU SEINE-NORMANDIE)

Les processus d'écoulement peuvent se produire en surface, en subsurface ou en souterrain (Figure I-2). A chaque niveau, les échelles de temps et d'espace sont différentes. Les écoulements de surface (cours d'eau, ruissellement, etc.) sont les plus rapides et leur observation reste ponctuelle à l'échelle de la surface terrestre. Les écoulements de subsurface ne se restreignent pas aux cours d'eau et ont des

échelles spatiales et temporelles plus grandes. L'eau y arrive par infiltration, via des effets de gravité ou de pression, et les flux dépendent des caractéristiques du sol. L'eau peut quitter cette zone de subsurface pour rejoindre à nouveau la surface ou bien percoler en profondeur suivant cette fois les caractéristiques géologiques du substratum. L'eau en profondeur forme les aquifères avec des dynamiques spatiales et temporelles bien plus grandes.

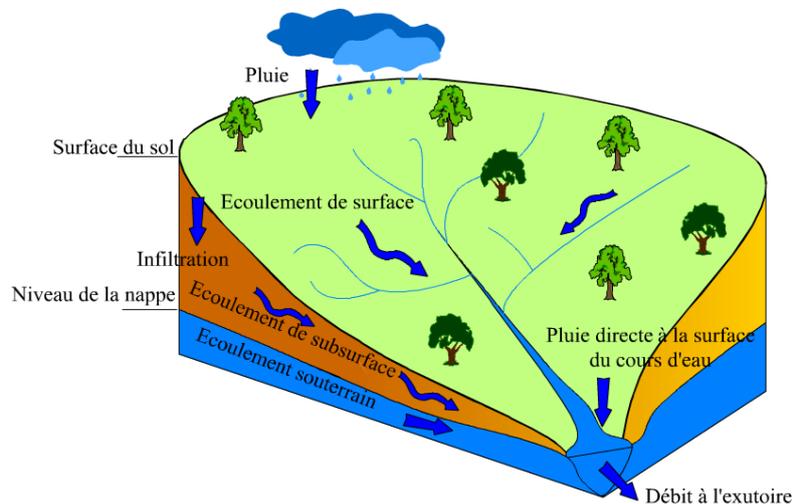


FIGURE I-2: LES TROIS GRANDS TYPES D'ÉCOULEMENT DE SURFACE, DE SUBSURFACE ET SOUTERRAIN (SOURCE : MUSY, 2005).

Concernant les écoulements de surface, on peut également différencier les écoulements au sein et hors du réseau hydrographique. Le réseau hydrographique est l'ensemble des chenaux, hiérarchisés et structurés, qui assurent le drainage superficiel, permanent ou temporaire d'un bassin versant (Larousse, 2010). Les limites du réseau hydrographique peuvent être difficiles à identifier puisqu'elles varient dans le temps et dans l'espace (Cudennec, 2000). Dans le réseau hydrographique, on distingue les écoulements pérennes, caractérisés par un apport soutenu et majoritaire en eau de subsurface ou en eau souterraine, et les écoulements intermittents, qui voient leur apport majoritaire fluctuer entre eau de surface et eau de subsurface, par exemple selon les saisons ou selon l'historique récent des précipitations. Ils sont à sec une partie du temps. Il peut se produire des écoulements de surface non connectés au réseau hydrographique. Les chemins d'écoulements ne sont alors pas toujours aisés à identifier. Les écoulements peuvent être diffus puis peuvent se concentrer et générer des chemins éphémères. Enfin, les écoulements peuvent aussi se concentrer selon la topographie et la microtopographie, dans les talwegs, les lignes rejoignant les points les plus bas des vallons.

L'échelle d'étude pour l'analyse des écoulements superficiels est le bassin versant. Le bassin versant est la surface sur laquelle l'ensemble des écoulements convergent vers un seul point appelé exutoire. Le découpage du bassin versant se fait suivant les lignes de partage des eaux et sa taille est donc relative au choix de l'exutoire (Figure I-3). Les limites géographiques d'un bassin versant peuvent être modifiées par des aménagements anthropiques (routes, drainages agricoles, etc.) ou par les caractéristiques du sous-sol, qui peut absorber les écoulements de surface et/ou produire des résurgences naturelles (Figure I-4). Par ailleurs, un bassin versant peut aussi être considéré relativement à un « linéaire exutoire ». Ceci permet de considérer tous les écoulements au sein de tous les bassins versants interceptés par ce linéaire (Figure I-5). Cette définition devient pertinente lorsque l'on raisonne à l'échelle du territoire. On peut ainsi considérer les écoulements interceptés par un axe linéaire au sol, une route ou une voie ferrée par exemple.



FIGURE I-3: SCHEMA D'UN BASSIN VERSANT ET D'UN SOUS-BASSIN VERSANT (SOURCE: COMMUNAUTE DE COMMUNES DU PAYS D'ANCENIS)

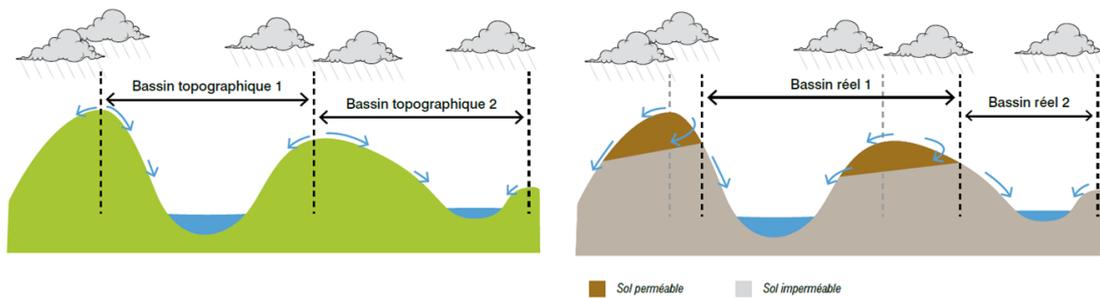


FIGURE I-4: SCHEMA DE BASSINS VERSANTS TOPOGRAPHIQUES ET DE BASSINS VERSANTS REELS TENANT COMPTE DES ECOULEMENTS SOUTERRAINS (SOURCE : CEPRI, 2015)

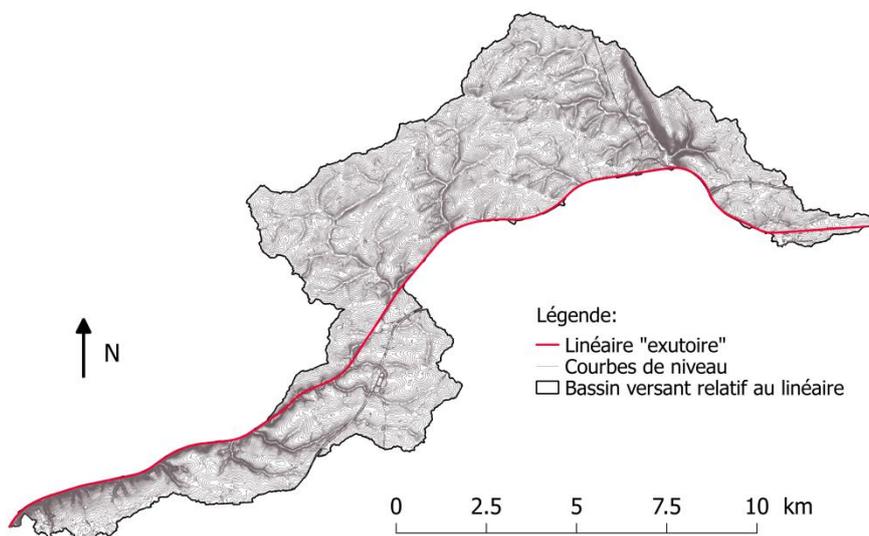


FIGURE I-5: ILLUSTRATION D'UN ENSEMBLE DE BASSINS VERSANTS INTERCEPTE PAR UN LINEAIRE

De manière générale, un bassin versant est le lieu de nombreux processus hydrologiques complexes. Il n'existe pas de modèle conceptuel de référence du fonctionnement d'un bassin versant et sa décomposition en processus élémentaires est encore discutée dans la communauté des hydrologues (Schmocker-Fackel et al., 2007; Tetzlaff et al., 2008). La difficulté se trouve dans le caractère continu des phénomènes dont les frontières varient dans le temps, dans l'espace, et selon le choix de l'échelle de

représentation. Les frontières varient également avec l'influence des contextes locaux (climat, géomorphologie, etc.).

## 1.2. LA GENESE DU RUISSELLEMENT

Deux paramètres jouent un rôle majeur sur la genèse du ruissellement : les caractéristiques des précipitations (liquide, solide, intensité, durée, historique récent, etc.) et la capacité d'infiltration du sol, qui dépend de nombreux paramètres (couvert végétal, porosité, humidité, etc.). Si le sol a une teneur en eau initiale importante, le temps de saturation est réduit et donc le temps d'apparition de ruissellement également (Nicolas, 2010). Lorsque le sol est très sec en surface, un temps d'humectation du sol est nécessaire avant que l'eau des précipitations ne puisse s'infiltrer, ce qui peut également générer du ruissellement. Durant, la phase d'imbibition, les aspérités du sol se remplissent d'eau, puis les flaques se connectent, en fonction de la microtopographie. L'eau commence à s'infiltrer dans le sol et à remplir les vides (ou pores) par capillarité. Lorsque le remplissage est suffisant, l'eau s'écoule ensuite par gravité dans le sol. L'eau continue de s'écouler vers le bas avec l'apport des précipitations. L'écoulement atteint alors sa vitesse maximale, appelée conductivité hydraulique à saturation, et qui dépend de la structure interne du sol. Si la quantité de précipitation est supérieure à la vitesse d'infiltration, il y aura un excédent d'eau en surface, on parle de ruissellement Hortonien, par dépassement de la capacité d'infiltration (Horton, 1933). Les précipitations peuvent également se faire sur un sol déjà saturé, par exemple par la présence d'une nappe d'eau affleurante (Hewlett et Hibbert, 1967), on parle alors de ruissellement sur surface saturée (Figure I-6).

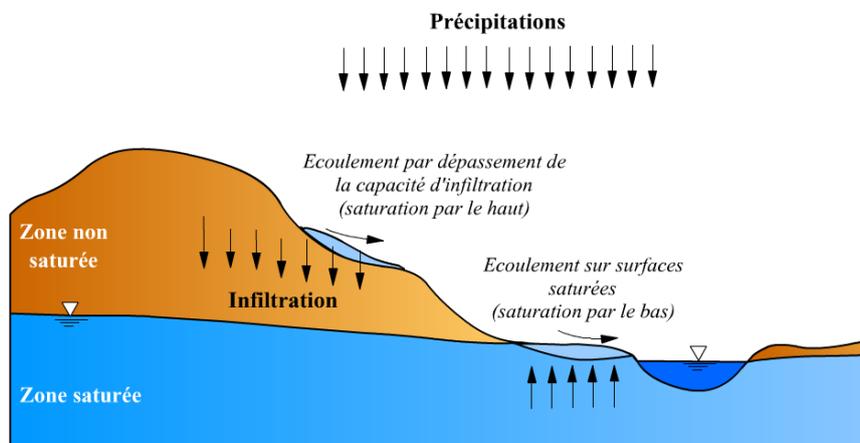


FIGURE I-6: REPRESENTATION DES DEUX PROCESSUS DE GENESE DU RUISSELLEMENT (SOURCE: MUSY, 2005)

La limite entre ces deux processus de genèse du ruissellement est difficile à observer en conditions naturelles car ils peuvent être très proches dans le temps et dans l'espace (Cros-Cayot, 1996; Dehotin et al., 2015). La Figure I-7 montre la détection théorique par mesures *in situ* des deux processus de genèse du ruissellement. A gauche, la quantité de précipitations dépasse la capacité d'infiltration. A droite, il y a un apport de précipitations sur un sol saturé.

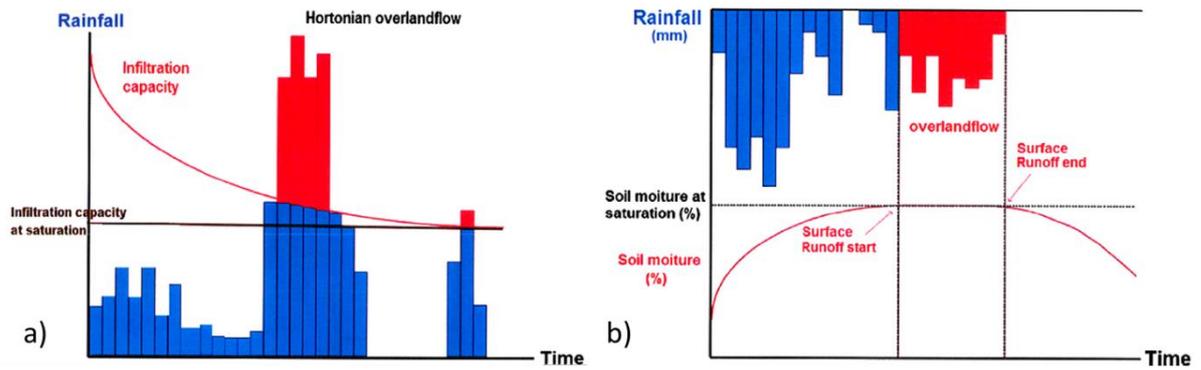


FIGURE I-7: DETECTION THEORIQUE PAR MESURE *IN SITU* DES DEUX PROCESSUS DE GENESE DU RUISSellement, HORTONIEN (A) ET SUR SURFACE SATUREE (B) (SOURCE : DEHOTIN ET AL., 2015)

### 1.3. L'ÉCOULEMENT ET SES CONSÉQUENCES

L'écoulement des eaux de ruissellement peut induire d'autres phénomènes selon les caractéristiques de surface du sol (pente, rupture de pente, type de sol, état de surface du sol, etc.). Ces phénomènes induits sont: l'érosion, les écoulements plus ou moins chargés en matière en suspension et en matériaux, les dépôts de boue et dans certains cas les effondrements.

#### 1.3.1. L'ÉROSION

Lorsque de l'eau est générée en surface, elle peut stagner, ou s'écouler. En s'écoulant, elle peut entraîner des particules de sols, on parle alors d'érosion hydrique. Le ruissellement peut engendrer de l'érosion diffuse ou concentrée. Dans le cas de l'érosion diffuse, c'est l'énergie des gouttes de pluie qui engendre de l'érosion et emporte des particules de sol. C'est le phénomène de saltation pluviale (Fort et al., 2015). La saltation pluviale désorganise et détache les particules de sols et est fonction de l'énergie cinétique des gouttes de pluie (Galevski, 1955) et de l'érodabilité du sol. Dans le cas de l'érosion concentrée, c'est l'énergie propre au ruissellement qui génère l'érosion. L'eau en devenant plus dense, acquiert de l'énergie et peut emporter davantage de particules, jusqu'à générer des ravines plus ou moins profondes (Figure I-8) (Cerdan et al., 2006; Horton, 1945; Hudson, 1995; Yves Le Bissonnais et al., 2002; Piney, 2009; Sarrazin, 2012). L'érosion peut se faire généralement à partir de 3 à 6 mm d'épaisseur, avec des rigoles de quelques centimètres à 10 cm (*rills*), et la pente à peu d'influence à ce stade (Fort et al., 2015). Puis, une hiérarchisation des rigoles se met en place en se déversant progressivement les unes dans les autres, générant des incisions plus profondes, parfois supérieures à 60 cm (*gullies*) (Fort et al., 2015). Ceci crée un réseau hydrographique éphémère. Il sera modifié au prochain événement pluvieux important ou si le terrain est exploité pour l'agriculture par exemple.



FIGURE I-8: PHOTOS D'EROSION PAR RUISSELLEMENT, A GAUCHE EN SEINE-MARITIME (SOURCE : SYNDICAT MIXTE DU PAYS PLATEAU DE CAUX MARITIME), A DROITE AU CANADA DANS LA REGION DU NOUVEAU-BRUNSWICK (SOURCE: AAC AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA)

### 1.3.2. LES ECOULEMENTS

Les écoulements peuvent être diffus ou concentrés, et plus ou moins chargés en particules de sol. Les eaux de ruissellement peuvent ne pas être chargées en sédiments si le ruissellement est généré et s'écoule sur des surfaces non érodable, comme des zones urbaines par exemple. Il arrive également d'observer, en fin d'évènement de ruissellement intense, de l'eau beaucoup plus claire, une fois que tous les matériaux disponibles ont été emportés. La Figure I-9 illustre une classification des écoulements. L'écoulement aura des propriétés mécaniques différentes, selon la teneur en eau et en concentration solide, selon que les matériaux de l'écoulement soient cohésifs ou granulaires, selon leur type et leur taille, et selon les conditions d'initiation et de maintien de l'écoulement (régé par la force de l'eau et ou par celle des matériaux) (Coussot, 1998; Coussot et Meunier, 1996; Dasgupta, 2003; Fort et al., 2015; Julien et Leon, 2000; Middleton et Hampton, 1973; Pierson et Costa, 1987; Sauret, 1987).

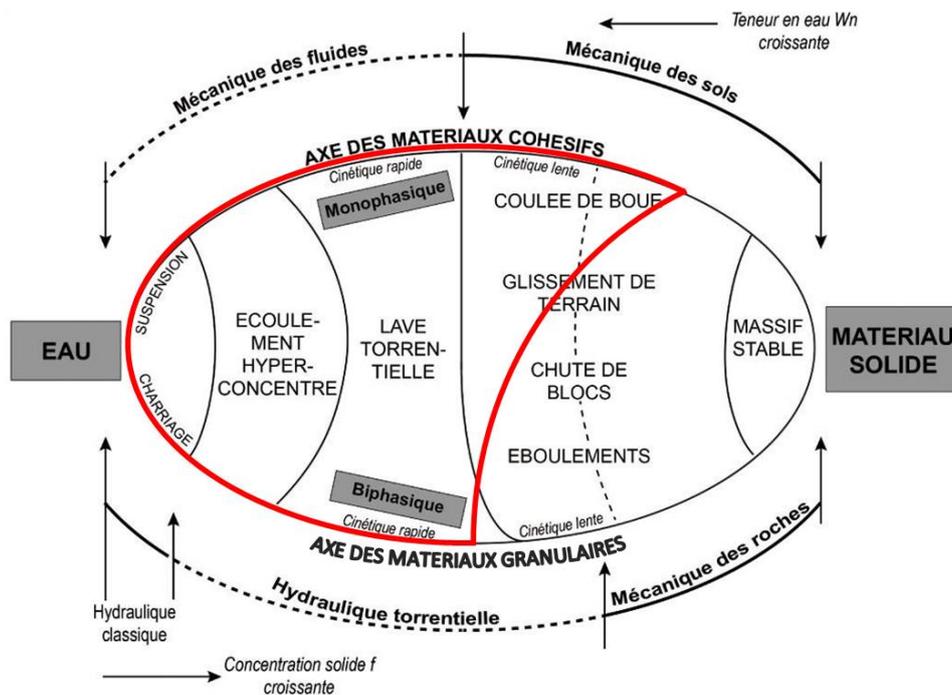


FIGURE I-9: CLASSIFICATION DES ECOULEMENTS CHARGES, LA LIGNE ROUGE MONTRE LES ECOULEMENTS CONSIDERES COMME INDUITS PAR LE RUISSELLEMENT (SOURCE : ADAPTE DE FORT ET AL., 2015 ET MEUNIER, 1991)

Dans leur livre, Fort et al. (2015) font une classification des types de glissements. L'ouvrage décrit également les mécanismes de mise en mouvement (chapitre 4) et montre comment la teneur en eau dans le sol peut déclencher un mouvement de masse. En résumé, les phénomènes considérés comme induits par le ruissellement, représentés par la ligne rouge (Figure I-9) sont (par concentration croissante en solide et pour des matériaux cohésifs) : les écoulements plus ou moins concentrés, les laves torrentielles, les coulées boueuses et les glissements superficiels (Figure I-10). La Figure I-9 montre également la complexité du phénomène de ruissellement puisque l'étude des écoulements induits fait appel aux propriétés de la mécanique des fluides et de la mécanique des solides. Cette diversité de formes que peut prendre les écoulements montre également l'influence des caractéristiques de la surface sur laquelle ils s'écoulent. Les écoulements sont induits par la pluviométrie mais également par ce que le ruissellement rencontrera au sol.



**FIGURE I-10: PHOTOS DE DIFFERENTS TYPES D'ECOULEMENTS INDUITS PAR LE RUISELLEMENT. A, ECOULEMENT HYPERCONCENTRE, PEROU, MARS 2017 (SOURCE: DAVID SIM, XANIA NEWS); B, LAVE TORRENTIELLE, VALAIS, SUISSE, JUILLET 2016 (SOURCE: DAVE PETLEY, YOUTUBE); C, COULEE DE BOUE, SAVOIE, SEPTEMBRE 2008 (SOURCE : SEBASTIEN GOMINET, IRMA) ; D, GLISSEMENT, ISERE, JUIN 2002 (SOURCE : SEBASTIEN GOMINET, IRMA)**

#### 1.3.2.1. LES ECOULEMENTS CHARGES

Un écoulement chargé est un écoulement qui transporte des matières en suspension ou charrie des particules de tailles diverses. La teneur en particules peut aller de l'écoulement clair à l'écoulement hyper-concentré. Une teneur en particules importante va conférer à l'écoulement plus de puissance. L'écoulement sera capable de détacher davantage de particules ou de transporter des obstacles, le rendant potentiellement plus dangereux.

#### 1.3.2.2. LA LAVE TORRENTIELLE

La lave torrentielle (*debris flow*) se caractérise par une forte teneur en eau mais un écoulement néanmoins visqueux et un régime d'écoulement turbulents. La lave torrentielle transporte des matériaux

hétérogènes en type et en taille et souvent accumulés sur le front de la lave. La lave torrentielle se canalise dans les talwegs contrairement à la coulée de boue qui est un phénomène de versant (Julien et Leon, 2000).

#### 1.3.2.3. LA COULEE DE BOUE

La coulée de boue (coulée boueuse, *mudflow*) se caractérise par un déplacement avec un comportement visqueux et un remaniement des matériaux internes détruisant la structure originelle. La coulée de boue correspond rhéologiquement à un écoulement entre le glissement et la lave torrentielle. L'écoulement se déplace moins vite qu'une lave torrentielle, il est en forme de langue, incorpore les matériaux qu'il rencontre, et érode la base et les flancs de la trajectoire. Ainsi la masse de la coulée augmente au cours de l'écoulement. Le déclenchement se fait par un apport brutal d'eau qui provoque la saturation et la liquéfaction des matériaux. Une coulée de boue peut parcourir des distances supérieures au kilomètre. Les coulées de boue se produisent généralement sur des sols de faibles cohésions.

#### 1.3.2.4. LE GLISSEMENT SUPERFICIEL PAR SATURATION HYDRIQUE

Le glissement translationnel (opposé au rotationnel) est un type de glissement dont un sous-type est le glissement superficiel par saturation hydrique (*shallow landslide*). Ce type de glissement superficiel se produit à la suite d'épisode pluvieux et sa surface de rupture se déplace à la base de l'horizon racinaire. Ce type de glissement impacte généralement de petites surfaces.

#### 1.3.3. LES DEPOTS

A la suite de l'écoulement on observe les dépôts. On retrouve principalement les zones de dépôts en aval du phénomène ainsi qu'au niveau des zones de replat et derrière les embâcles. On peut également observer une succession de plusieurs phénomènes d'érosion, d'écoulement et de dépôt, selon les caractéristiques de surface. Lorsque les écoulements sont chargés, ils sont plus dangereux car ils sont plus denses et ont plus de puissance, mais aussi parce qu'à la suite de ce type d'évènement la partie liquide s'écoule pour rejoindre les cours d'eau et il reste les matériaux déposés (Figure I-11), ce qui est plus coûteux pour la remise en état.



FIGURE I-11: DEPOTS DE BOUE ; A GAUCHE, EN BELGIQUE (SOURCE : EVRARD, 2008) ; A DROITE, A VALDAMPIERRE (OISE) EN 2014 (SOURCE: FRANCE 3 PICARDIE / JEAN-LOUIS CROCI)

#### 1.3.4. LES EFFONDEMENTS

Dans certains cas on peut observer des effondrements de terrain (appelés aussi fontis ou bétoire, Figure I-12). L'eau de ruissellement en s'infiltrant dans le sol au niveau d'une cavité souterraine, d'origine

naturelle ou anthropique, peut engendrer une érosion progressive du plafond de la cavité jusqu'à l'effondrement du terrain porteur (Didier et Salmon, 2010; Rianza et al., 2004; White et al., 1986). Le lien entre ces phénomènes et le ruissellement n'est pas toujours évident, les effondrements peuvent être déclenchés à la suite de périodes pluvieuses, de passage ou de stagnation de ruissellement, mais leur occurrence dépend, pour une grande part, des caractéristiques géotechniques intrinsèques à la zone. Ces phénomènes ne seront donc pas étudiés dans le cadre de la thèse.



FIGURE I-12: PHOTO D'UN EFFONDREMENT EN SEINE-MARITIME EN 2001 (SOURCE: CETE NC)

#### 1.4. LES FACTEURS DU RUISSELLEMENT

Le ruissellement est influencé par de nombreux facteurs qui peuvent chacun atténuer ou aggraver le phénomène. Ces facteurs sont ici présentés en quatre grands types : les précipitations, la géomorphologie, le sol et le sous-sol, et l'occupation du sol (Cros-Cayot, 1996; Montoroi, 2012). Chacun de ces grands types peut être décomposé en de multiples sous-facteurs influençant le ruissellement de différentes manières et à différentes échelles, plusieurs facteurs pouvant parfois même induire des rétroactions, c'est-à-dire équilibrer ou amplifier des effets conjoints.

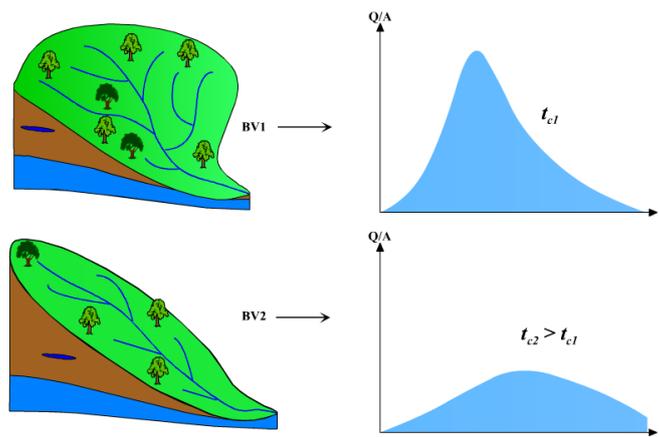
##### 1.4.1. LES PRECIPITATIONS

Les précipitations sont le premier facteur du ruissellement, ce sont elles qui permettent de générer les volumes d'eau. Les précipitations sont encore difficiles à caractériser, à prévoir et à simuler (Casari et al., 2016; Leblois et Creutin, 2013). La pluie peut être décrite par de nombreux paramètres tels que son intensité, sa durée, sa fréquence, sa répartition spatiale, son épicycle et son abattement (variation d'intensité par rapport à la distance à l'épicentre) (Musy, 2005). Chacun de ces paramètres peut influencer le ruissellement. L'intensité de la pluie, associée à sa durée, influence les volumes d'apport. Sa fréquence, ou son historique récent, informe sur l'état d'humidité du sol et sa répartition au cours de l'année peut montrer des saisons ou périodes plus propices au ruissellement. Sa répartition spatiale influence le ruissellement, par exemple, si l'épicentre de l'épisode pluvieux est localisé sur une zone à faible capacité d'infiltration ou bien au niveau d'un sous-bassin avec un faible temps de concentration. Le gel, par ailleurs, peut rendre les sols momentanément imperméables et accroître le potentiel de ruissellement.

##### 1.4.2. LA MORPHOLOGIE DU BASSIN VERSANT

La morphologie d'un bassin versant peut être caractérisée par de nombreux paramètres géométriques : la surface, la forme, l'altitude, les pentes, etc. (Douvinet et al., 2008; Dubreuil, 1966; Musy, 2005). La

surface étant l'aire de réception des précipitations, elle joue en partie un rôle dans les volumes d'apport. La forme d'un bassin versant influence la concentration des écoulements. Les bassins de forme concentrique favorisent la concomitance des écoulements et potentiellement la formation des volumes d'eau importants en certains points du bassin (Figure I-13). Il existe différents indices pour caractériser la forme du bassin. L'indice de compacité de Gravelius est défini par le rapport du périmètre d'un bassin au périmètre du cercle de même surface (Gravelius, 1914). L'indice de forme de Schumm (Schumm, 1956) est défini par le rapport du diamètre du cercle de même surface par la longueur maximale du bassin. On trouve également l'indice de Horton (Horton, 1932), qui est le ratio de la surface du bassin par le carré de la longueur du plus long cours d'eau ou encore de l'indice d'allongement de Caquot qui est le rapport du plus long chemin et du côté du carré de surface équivalente (Réméniéras, 1980).



**FIGURE I-13: HYDROGRAMMES A L'EXUTOIRE DE DEUX BASSINS VERSANTS DE FORMES DIFFERENTES, LE BASSIN DE FORME CONCENTRIQUE A UN DEBIT MAXIMUM PLUS IMPORTANT ET UN TEMPS DE CONCENTRATION PLUS COURT. (SOURCE : MUSY, 2005)**

La répartition des pentes dans le bassin versant est également une information critique. Les pentes fortes sont défavorables à l'infiltration et leurs longueurs sont propices à la constitution de volumes importants. Pour obtenir la pente caractéristique d'un bassin versant, il existe de multiples indices. La pente moyenne se calcule par la moyenne des surfaces élémentaires dans le sens de plus grandes pentes. L'indice de pente de Roche se calcule par rapport à la pente entre chaque courbe de niveau (Roche, 1963). Les ruptures de pente influencent également la dynamique des écoulements où une courbure convexe favorise l'accélération des écoulements de surface et une courbure concave favorise le ralentissement. L'indice topographique (Beven et Kirkby, 1979) fournit une information sur la capacité d'évacuation de l'eau en un point. Il se calcule par  $\ln(a/\tan b)$ , où  $a$  est la pente moyenne des aires drainées en amont et  $b$  la pente locale. Cet indice, appelé également indice topographique d'humidité est souvent associé à la localisation des zones humides (Hjerdt et al., 2004). Douvinet et al. (2008) font une revue bibliographique des indices morphométriques, dans laquelle 63 indices ont été recensés (Figure I-14). Ils critiquent notamment le caractère statique (ne décrivant pas la dynamique des processus hydrologique) et cloisonné (composantes forme, volume et réseau rarement croisées) de ces indices empiriques.

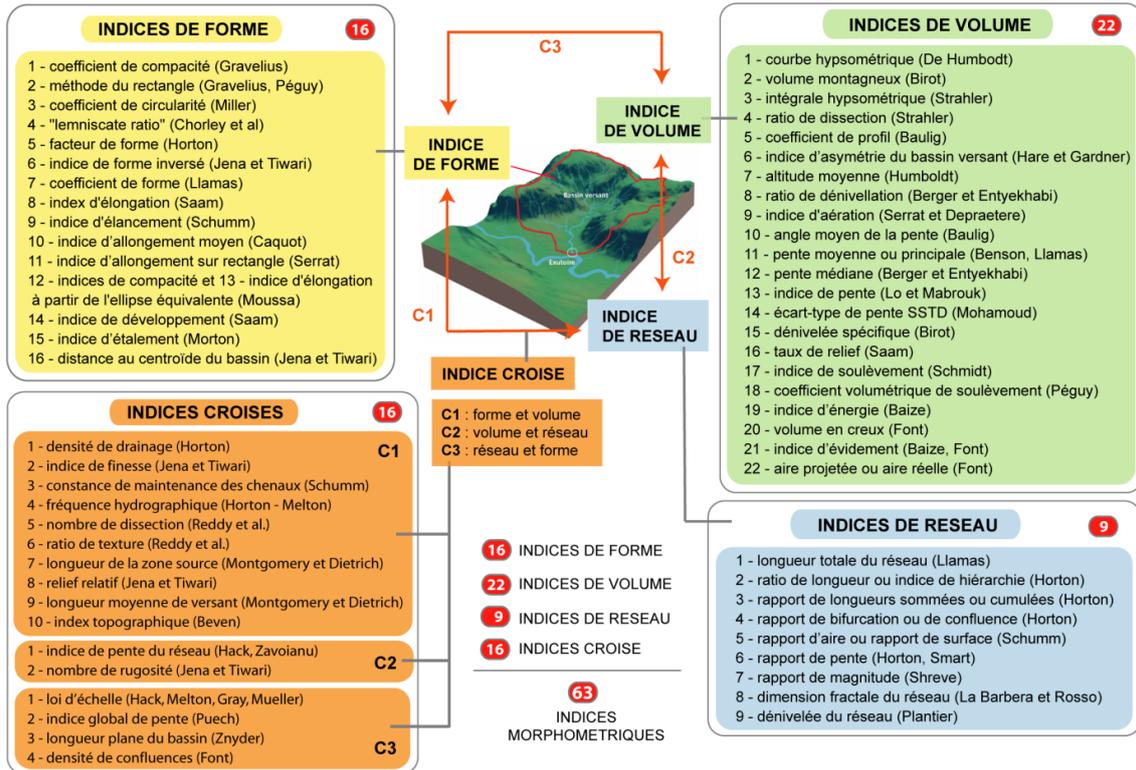


FIGURE I-14: RECENSEMENT DE 63 INDICES MORPHOMETRIQUES PAR DOUVINET ET AL. (2008) DANS LEUR REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Ces paramètres peuvent se calculer à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT), bien que la valeur de certains indices puisse varier selon la résolution du MNT (effet fractal du calcul du périmètre par exemple) (Sarrazin, 2012; Zhang et al., 2008). Il est important de bien caractériser la qualité du MNT dont les valeurs arrondies peuvent générer des artefacts (effet de terrasses sur les zones planes) (Khuat Duy, 2011). La microtopographie joue également un rôle sur les écoulements de surface, mais sa prise en compte requiert des données de très haute résolution. Ces indices sont régulièrement discutés, remis en cause et de nouveaux apparaissent (Bendjoudi et Hubert, 2002).

### 1.4.3. LE SOL ET SOUS-SOL

Le sol est l'interface entre l'atmosphère et la roche mère. Il résulte de la dégradation de la couche superficielle de la roche mère et d'un apport en sédiments. Le sol est composé d'air, d'eau, de matière minérale et de matière organique animale et végétale de tailles très diverses. Il est le lieu de multiples interactions physiques, chimiques et biologiques (Montoroi, 2012). Le sol est un milieu particulièrement complexe et de nombreux paramètres sont nécessaires pour le caractériser : son couvert végétal (taille des racines, capacité à l'évapotranspiration), sa texture (sable, limon, argile) (Figure I-15), sa structure (répartition des horizons et caractéristiques du sol entre chaque horizon (Figure I-16), son épaisseur (de la surface au substratum), sa porosité (répartition des vides), sa teneur en eau, sa teneur en matières organiques, etc. (Duchaufour, 2004; "Gis Sol" Partageons la connaissance des sols; Gobat et al., 2013). Chacun de ces paramètres influence le ruissellement de surface.

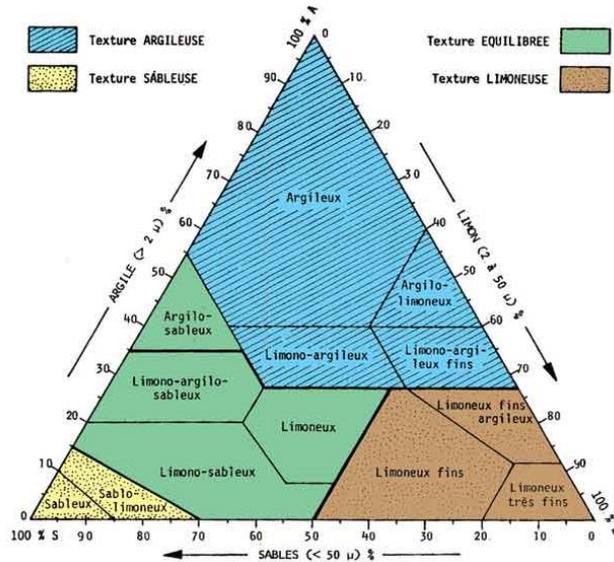


FIGURE I-15: TRIANGLE DES TEXTURES, REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DES DIFFÉRENTES TEXTURES DE SOLS SELON LEUR TENEUR EN SABLE, LIMON ET ARGILE.

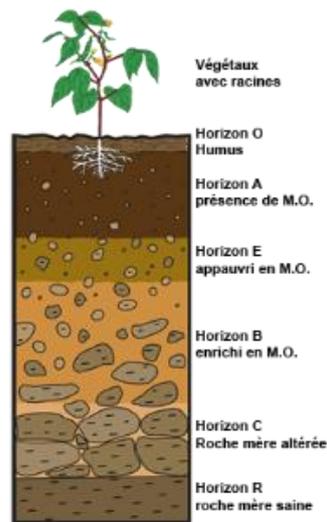
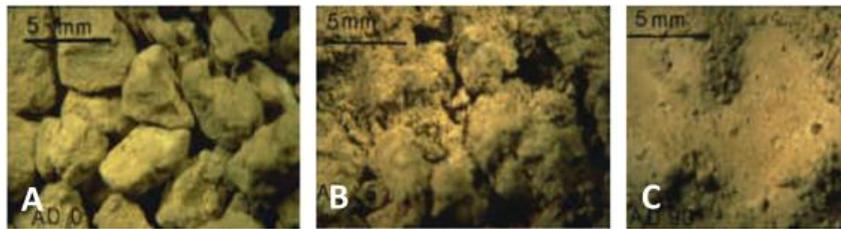


FIGURE I-16: REPRÉSENTATION SCHEMATIQUE DE LA STRUCTURE D'UN SOL COMPOSÉ DE DIFFÉRENTS TYPES DE SOLS APPELÉS AUSSI HORIZONS

La texture du sol, par exemple, caractérise sa propension à la battance et à l'érodabilité. Le phénomène de battance se produit par l'impact des gouttes de pluie sur des particules de sol instables. Les gouttes cassent les agrégats de sol en grains très fins qui colmatent la surface, formant une croûte réduisant fortement la perméabilité et favorisant l'érosion (Bajracharya et Lal, 1999; Philip, 1998). Les croûtes de battance se produisent sur des sols plutôt argileux-limoneux avec une faible teneur en matière organique (Figure I-17). L'érodabilité est l'incapacité du sol à résister au détachement de particules face à la force de cisaillement du ruissellement (Cerdan et al., 2006; Gomez et al., 2013; Wischmeier et Mannering, 1969). Les sols érodables sont également des sols limoneux avec une faible teneur en matières organiques. Une forte propension à l'érodabilité favorise des écoulements chargés en particules.



**FIGURE I-17: FORMATION D'UNE CROUTE DE BATTANCE PAR L'IMPACT DES GOUTTES DE PLUIE (DE A VERS C) (SOURCE: Y. LE BISSONNAIS)**

Les écoulements de subsurface peuvent former des drains naturels, macropores reliés entre eux formant des chemins préférentiels. Ces écoulements sont également favorisés par la présence de racines, de terriers d'animaux ou encore par des discontinuités telles que des fissures lorsque le sol est très sec ou entre deux horizons de sols de perméabilités différentes. Ces écoulements de subsurface fragilisent la surface et peuvent accélérer la formation de ravines par effondrements (Douvinet, 2008; Fort et al., 2015). Ils peuvent également revenir en surface par exfiltration notamment aux niveaux des ruptures de pentes convexes.

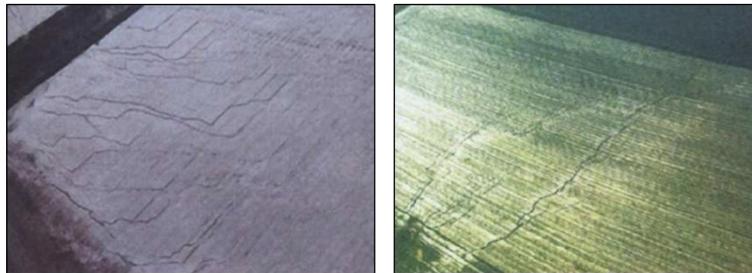
Les caractéristiques géologiques de la roche mère complexifient l'étude du ruissellement car elles influencent les écoulements surfaciques, ainsi que la réponse hydrologique globale du bassin versant (Beven et Germann, 1982; Brooks et Corey, 1964; Weiler et Naef, 2003). Des failles dans la roche mère par exemple peuvent permettre à l'eau de percoler rapidement en profondeur. Certains types de roches, notamment les roches altérées, par leur perméabilité, permettent un stockage supplémentaire (Onda et al., 2001). Par exemple, certaines zones dans le massif des Cevennes présentent une épaisseur de granite altéré perméable entre le sol et la roche mère, qui rend le phénomène de ruissellement assez rare (Braud et al., 2014). Le flux d'eau dans la roche peut parfois même dominer les flux de subsurface, pour les bassins en schiste par exemple (Onda et al., 2006). Les roches calcaires, peuvent également retenir de grandes quantités d'eau dans des cavités ou dans des rivières souterraines (Padilla et al., 1994).

#### 1.4.4. L'OCCUPATION DU SOL

L'occupation du sol désigne le type d'usage ou de non-usage que l'homme fait de la surface de la terre (forêts, pâturages, champs agricoles, routes, bâtiments, cours d'eau, etc.). L'occupation des sols influence la capacité d'infiltration ou de stockage des écoulements de surface. Le phénomène de ruissellement est nettement réduit sous couvert végétal naturel tandis que les sols nus ou les zones urbaines sont propices à la génération de ruissellement (Rey et al., 2004). A la fin des années 1960 on assiste à une extension des zones urbaines, puis à leur forte densification dans les années 1970 et le début des années 1980 (Baccaïni et Sémécurbe, 2009). L'extension des zones occupées par l'habitat individuel a augmenté dans quasiment toutes les régions françaises métropolitaines et elle a augmenté au-delà de 50% en région Provence-Alpes-Côte-D'azur entre 1992 et 2003. Ceci engendre une baisse de la capacité d'infiltration des eaux de surface et augmente les volumes d'eau à gérer pour les agglomérations urbaines. De plus, certaines modifications anthropiques de l'occupation du sol interceptent et redirigent les écoulements, tels que, le bâti, les réseaux d'irrigation et de drainage ou les réseaux linéaires au sol (routes, voies ferrées). Les zones urbaines ou péri-urbaines mettent en place des systèmes de protection tels que des fossés, des buses ou des bassins de rétention. Ces ouvrages ne sont pas toujours bien répertoriés dans des bases de données, et sont donc difficiles à prendre en compte dans l'étude et la gestion du ruissellement.

Les pratiques culturelles influencent également le phénomène de ruissellement (Bocher, 2005). Par exemple, le sens du travail du sol, peut influencer la direction du ruissellement et générer des ravines

(Figure I-18) (Delahaye, 2002; Ludwig, 2000). Le désherbage des inter-rangs et le fait de laisser la terre à nu entre deux cultures favorise également la genèse et le transfert rapide de ruissellement (Figure I-19). Des pratiques plus globales telles que le remembrement des parcelles agricoles ont engendré un impact à long terme sur l'érosion des terres et la perte en nutriments. Avant les remembrements qui ont permis d'élargir les parcelles et d'augmenter les rendements, il y avait le bocage. Le bocage c'est la séparation des parcelles par des talus végétalisés qui permettent le ralentissement et la meilleure infiltration des eaux de ruissellement tout en favorisant la biodiversité (Bocher, 2005). Par exemple, en Bretagne, entre 1960 et 1990, il y a eu une perte de 40% du maillage bocager (Bocher, 2005). Aujourd'hui on voit une volonté de replanter des haies entre les parcelles, mais souvent le peu de diversité des espèces affaiblit l'écosystème. La dynamique politique à ce sujet est encourageante, elle place la protection des ressources en eau au cœur de l'aménagement de bassins versants. Néanmoins, le rôle du bocage sur la dynamique du ruissellement et de l'érosion est complexe et encore à l'étude actuellement (Reulier et al., 2015). Plus généralement, l'occupation des sols est difficile à prendre en compte car elle varie rapidement dans le temps et dans l'espace (variation des cultures à l'échelle intra-annuelle et urbanisation à échelle plus lente).



**FIGURE I-18: PHOTOS AERIENNES OU LE SENS DU TRAVAIL DU SOL PEUT INFLUENCER LA DIRECTION DES ECOULEMENTS, A GAUCHE, LES ECOULEMENTS ONT ETE INFLUENCES, A DROITE, LES ECOULEMENTS ONT SUIVI LE CHEMIN DE PLUS GRANDE PENTE (SOURCE : DELAHAYE, 2002)**



**FIGURE I-19 : PHOTOS D'INTER-RANGS DESHERBES OU ON PEUT OBSERVER DE L'EROSION ET DES LAISSES DE CRUE AUTOUR DES PIED DE VIGNES. (OCTOBRE 2014, HERAULT)**

### 1.5. LES ENJEUX DU RUISSELLEMENT

Le ruissellement est un phénomène naturel et essentiel dans l'équilibre du cycle de l'eau, mais il peut avoir des conséquences néfastes sur les enjeux qu'il rencontre. D'après le guide de sensibilisation du CEPRI pour la gestion des inondations par ruissellement pluvial (CEPRI, 2015), 72.5% des communes ont

connu à ce jour au moins un épisode d'inondation par ruissellement. Trois enjeux majeurs exposés à l'aléa ruissellement sont détaillés ici : les personnes, les biens et l'environnement.

#### 1.5.1. LES PERSONNES

Les personnes peuvent être impactées physiquement par le ruissellement (Pascal Breil et al., 2016; Debionne et al., 2016; Shabou, 2016). Des études sur les bassins du nord de la France (Seine-Maritime, Somme, etc.) montrent que ces épisodes d'inondations boueuses sont relativement fréquents à échelle régionale, 269 évènements sont dénombrés sur 23 ans de données (Douvinet, 2008; Douvinet et al., 2009). Parmi ces évènements certains ont engendré des pertes humaines, tel qu'à Saint-Martin-de-Bocherville en juin 1997 et à Barentin et à Saint-Léonard en mai 2000 (Seine-Maritime), où respectivement 3 et 2 personnes ont perdu la vie. Les travaux de Boissier (2013) analysent également plusieurs phénomènes de ruissellement qui ont causé la mort. D'autres recherches montrent la difficulté d'évaluer l'impact humain des inondations en général, qui peut s'expliquer par une certaine sensibilité du sujet, mais aussi par l'interaction de facteurs qui se compensent. On voit par exemple une augmentation de la population située en zone à risque mais également une meilleure efficacité de la gestion de crise par les autorités et les secours (Boudou et al., 2016; Vinet et al., 2016). Lors d'épisodes de ruissellement intense, il est souvent difficile d'identifier les mécanismes hydrologiques ayant engendré les pertes, c'est-à-dire d'identifier la façon dont le phénomène de ruissellement intervient dans le phénomène global. Le ruissellement peut parfois être un facteur aggravant, pour les débordements de cours d'eau par exemple, dans d'autres cas, il est le mécanisme principal, lors des coulées de boue par exemple. Pour certains épisodes de coulées de boue, il arrive que le cumul de précipitation ayant généré le phénomène se trouve bien en amont des dégâts observés, où parfois il n'a même pas plu (Lucheux et Mondicourt en juin 2016, 1 décès, Courrier Picard, 2016). Ceci illustre la présence de zones de genèse du ruissellement (les plateaux agricoles), d'axes de transfert (les talwegs) et de zones d'accumulation (le village entre le talweg et le cours d'eau dans le cas de Lucheux, par exemple, qui a été recouvert par 10 à 20 cm de boue).

#### 1.5.2. LES BIENS

Les biens impactés par le ruissellement peuvent subir des dégâts plus ou moins importants selon l'intensité du phénomène naturel, la fragilité de la structure et les moyens de protection physiques ou organisationnels mis en œuvre. Différents types de biens sont détaillés ici : les biens privés, les biens ayant une activité économique ou une activité de service public et les terres agricoles.

##### 1.5.2.1. LES BIENS PRIVÉS

Plusieurs études montrent la complexité pour estimer le coût des inondations en général et donc du ruissellement en particulier (Bourguignon, 2014; Douvinet, 2006a, 2010; Gérin, 2011). Cette complexité est due ,d'une part, au manque de données ou à leur classification désordonnée dans diverses bases, parfois confidentielles (une quinzaine pour les données françaises d'après Bourguignon (2014)) et, d'autre part, à la complexité de l'estimation qui doit prendre en compte les coûts directs et indirects. Cette complexité pourrait aussi être due à des blocages culturels et politiques (Vinet, 2007). Les sujets peuvent s'avérer sensibles quand il s'agit de pertes humaines ou économiques, et quand il s'agit d'identifier une responsabilité. Les travaux de Bourguignon (2014) visent à estimer le coût des inondations en France en s'appuyant sur des données de montants d'indemnisations à destinations des communes, des particuliers ou des professionnels après des évènements d'inondation. D'après ses travaux (Figure I-20), plus de 80% des évènements recensés sont causés par la catégorie d'évènements « ruissellement urbain et crue d'orage », représentant 20 % de la charge totale indemnisée entre 1999 et

2011. Toutefois, il est difficile d'isoler les phénomènes liés au ruissellement puisqu'il y a souvent une confusion dans les termes des différents aléas. Par exemple, les autres catégories sont « crue lente et remontée de nappe », « crue rapide », « débordement et ruissellement » et « généralisé ». Faisant l'hypothèse que le ruissellement a pu également être un facteur aggravant ou le facteur principal pour des événements des catégories « crue rapide » et « débordement et ruissellement », on obtient que le ruissellement pourrait être impliqué dans 98% des événements, correspondant à une charge indemnisée de 66%. Par ailleurs, d'après le guide du CEPRI pour la gestion des inondations par ruissellement, le ruissellement serait équivalent aux inondations par débordement en matière de montants d'indemnisation assurantielle.

	<b>Crue lente et remontée de nappe</b>	<b>Crue rapide</b>	<b>Débordement et ruissellement</b>	<b>Généralisé</b>	<b>Ruissellement urbain et crue d'orage</b>
Nombre d'événements	7	32	90	3	632
Nombre d'arrêtés Catnat	1 120	1 041	3 307	1 350	5 057
Nombre moyen de commune	160	32	37	450	8
Nombre moyen de sinistres particuliers	400	100	70	900	15
Nombre moyen de sinistres professionnels	70	30	20	380	4
Coût moyen pour un particulier	7 900 €	8 500 €	9 000 €	16 000 €	4 600 €
Coût moyen pour un professionnel	28 000 €	37 000 €	34 000 €	52 000 €	20 000 €
% de la charge totale	5 %	13 %	34 %	29 %	19 %

Source : BD SILEHC

FIGURE I-20: CARACTERISATION DES DOMMAGES PAR NATURE D'ALEA (SOURCE : BOURGUIGNON, 2014)

Des analyses de coûts ont également été effectuées en Belgique et se focalisent spécifiquement sur le phénomène de ruissellement induisant des « inondations boueuses » (*muddy floods*) (Evrard, 2008). Se basant sur les données des services de secours, il a été estimé un coût global sur l'ensemble de la Belgique de 12.5 à 122 millions d'euros par an dû aux dégâts sur les propriétés publiques et de 1.6 à 16.5 millions d'euros par an pour les dégâts sur les propriétés privées. La Figure I-21 montre le détail des types d'interventions nécessaires pour la remise en état des municipalités après des épisodes d'inondation boueuses. On peut voir que réparer et nettoyer les rues et les infrastructures communales sont des tâches relativement coûteuses pour les municipalités, par exemple, 143 000 euros pour la commune de Fernelmont en août 2002, ou encore 300 000 euros pour la commune de Riemst en juillet 1999.

Municipality	Date of event	Type of intervention	Cost (€)
Beauvechain	August 2002	Cleaning of roads	10,125
	September 2005	Cleaning of roads	16,350
Chaumont-Gistoux	May 5, 2006	Cleaning of roads and cellars	80,000
	2-3 floods yr <sup>-1</sup>	Cleaning of roads	500 - 1,000
Ellezelles	August 27, 2002	Damage to bridges and roads	143,000
	1999	Cleaning of streets	11,000
Fernelmont	June 4-5, 2002	Cleaning of streets	4,720
	September 8-10,2005	Cleaning of roads	1,512
Frasnes-lez-Anvaing		Repair to roads	14,000
		Cleaning and repairs	327,640
Herzele	1999	Fire brigade interventions	9,000
	2001	Cleaning and repairs	83,475
	2002	Fire brigade interventions	2,250
Riemst	July 1999	Cleaning and repairs	83,475
		Fire brigade interventions	2,250
		Repairs to infrastructure	150,000
Walhain	August 2002	Repairs to public buildings	70,000
		Mud storage	32,000
		Staff and material costs	48,000
		Repair to infrastructure	164,620

Data available from the 'public work' services of the municipalities, except for Herzele and Riemst (data available from the municipal erosion mitigation schemes.)

**FIGURE I-21: COUT DES DOMMAGES INDUITS PAR DES INONDATIONS BOUEUSES POUR 9 MUNICIPALITES BELGES (SOURCE : EVRARD, 2008)**

#### 1.5.2.2. LES BIENS AYANT UNE ACTIVITE ECONOMIQUE OU DE SERVICE PUBLIC

Les biens exposés à l'aléa ruissellement peuvent également avoir un intérêt économique ou de service public. L'estimation du coût des impacts liés au ruissellement doit donc prendre en compte, en plus des pertes directes liées aux dégâts matériels, les pertes liées à la baisse de productivité. Pour certains biens, les effets dominos sont tels que l'estimation des pertes économiques devient extrêmement complexe. Par exemple, les infrastructures en réseau, telles que les réseaux de transports routiers ou ferrés, les réseaux d'énergie ou de télécommunication ont un rayon d'impact bien plus large, surtout si l'impact affecte un nœud critique (Freiria et al., 2015; Gonzva et al., 2015; Versini et al., 2010a). Les réseaux ferrés sont particulièrement vulnérables, car contrairement aux réseaux routiers, ils sont moins denses et les possibilités d'itinéraires bis sont réduites. Dans certains cas, les pertes économiques peuvent aller jusqu'à se compter en baisse d'image de marque. Le projet WEATHER (Maurer et al., 2012) qui traite de l'évaluation de l'impact des risques naturels sur les systèmes de transports à l'échelle de l'Europe a mis en place une méthodologie pour estimer les impacts économiques (directs et indirects). Des estimations sont présentées pour différents types de risques naturels et pour chaque type de système de transport. La Figure I-22 présente l'estimation pour les réseaux ferrés d'Europe. La catégorie d'évènements potentiellement liés au phénomène de ruissellement est « heavy rainfall with consequent events », bien que le ruissellement ait pu également avoir un impact dans la catégorie « permanent rainfalls with consequent events ». Le projet WEATHER estime le coût médian direct (capital and operational costs) par épisode de pluie intense à 1.82 millions d'euros (moyenne sur les réseaux européens) pouvant aller jusqu'à 2.69 millions d'euros en prenant en compte les coûts indirects (user costs). Le coût moyen, plus élevé car impacté par quelques évènements très coûteux, peut s'élever jusqu'à 7 millions d'euros par épisode.

Bandwith of costs per costs type and weather event type in mio EUR						
		Heavy rainfalls with consequent events	Permanent rainfalls with consequent events	Thunder- storms	Winter- storms	Avalanches
capital costs	min	0,00	1,97	0,00	0,00	0,00
	max	2,81	50,37	0,04	0,04	0,09
	average	0,73	18,13	0,02	0,01	0,04
	median	0,26	2,06	0,02	0,00	0,04
oprational costs	min	0,15	3,40	0,49	0,20	0,16
	max	18,82	40,29	0,63	5,94	7,36
	average	3,84	16,62	0,56	1,65	3,76
	median	1,56	6,17	0,56	0,58	3,76
user costs	min	0,10	2,01	0,29	0,12	0,08
	max	11,96	23,79	0,29	2,48	3,47
	average	2,44	9,84	0,29	0,86	1,78
	median	1,01	3,73	0,29	0,40	1,78
Total costs	min	0,26	7,37	0,82	0,35	0,23
	max	31,97	114,46	0,93	8,42	10,92
	average	7,00	44,60	0,87	2,52	5,58
	median	2,69	11,96	0,87	1,40	5,58

FIGURE I-22: ESTIMATION DES COUTS DES DOMMAGES SUR LES RESEAUX FERRES PAR TYPE D'ALEA ET PAR TYPE DE COUTS (MOYENNE SUR LES RESEAUX FERRES EUROPEENS), EXTRAIT DU PROJET WEATHER (MAURER ET AL, 2012)

### 1.5.3. L'ENVIRONNEMENT

#### 1.5.3.1. LES TERRES AGRICOLES

Les terres cultivées sont particulièrement vulnérables au ruissellement. Les terres nues durant les intercultures, le désherbage entre les rangs, ou encore l'utilisation d'engins agricoles fragilise les sols, sur lesquels le ruissellement peut provoquer de l'érosion et des pertes en nutriments. Ceci peut générer une baisse de rendement agricole avec souvent une irréversibilité du processus au vu du temps nécessaire aux sols pour se reconstruire (Montgomery, 2007; Pimentel et al., 1995; Pimentel, 2006). Selon Pimentel et al. (1995) depuis 40 ans, 30% des terres arables dans le monde sont devenues non-productives. Toujours selon Pimentel (2006), aux Etats-Unis, les pertes en sols pour les terres arables s'estiment en moyenne à 10 tonnes/ha/an. 90% de terres cultivés aux Etats-Unis perdraient plus vite leur sols fertiles qu'ils ne se créent (USDA, 2000a, 2000b). Lal (2001) explique la complexité pour quantifier les pertes de sols et les pertes économiques associées à court et à long terme. Le phénomène d'érosion génère une rétroaction positive. Plus il y a d'érosion, plus les sols s'appauvrissent en nutriments, ce qui fait baisser également leur possibilité de stockage en eau, ce qui génère plus de ruissellement et accélère davantage l'érosion.

#### 1.5.3.2. LES ECOSYSTEMES

Enfin, le ruissellement peut également avoir un impact négatif sur les écosystèmes. Le ruissellement est un vecteur pour le transfert des polluants dans le sol, tels que les pesticides (Pesce et al., 2010). Le

ruissellement provenant des champs cultivés serait une source majeure de contamination de l'eau naturelle (Lacas et al., 2005). De plus, le ruissellement apporte davantage de sédiments dans les cours d'eau, à cause de l'érosion diffuse mais également lors d'épisodes d'inondations boueuses. Ceci augmente la turbidité de l'eau et perturbe les écosystèmes (Thompson et al., 2014). La contamination de l'eau par des sédiments et des polluants peut aller jusqu'à polluer les réserves en eau potable, par exemple en Seine-Maritime via le réseau karstique (Douvinet, 2008).

## 1.6. REGLEMENTATION POUR LA GESTION DU RUISSELLEMENT

### 1.6.1. EVOLUTION DE LA REGLEMENTATION

En France, on distingue deux familles de lois autour du ruissellement, les lois qui évoquent le ruissellement urbain et la gestion des ressources en eau, et les lois qui évoquent le ruissellement par les risques qu'il peut engendrer, tels que les inondations.

Les réflexions autour du ruissellement urbain débutent au XIX<sup>ème</sup> siècle, qui voit le début des méthodes de dimensionnement des réseaux d'assainissement dans un but hygiénique où les eaux doivent sortir de la ville pour éviter la transmission de maladies. La gestion des eaux pluviales et des eaux usées n'est pas différenciée. L'augmentation de la population, des besoins industriels font augmenter la demande en eau ainsi que les problèmes de gestion des réseaux qui saturent régulièrement et débordent. C'est dans ce contexte, qu'en 1964, est créée la première loi sur l'eau qui a pour but d'améliorer la gestion des ressources en eau (meilleur partage et limitation des pollutions) et qui préconise la gestion par grands bassins hydrographiques (7 en France métropolitaine). Dans les années 1970, apparaissent les premières normes environnementales à l'échelle de l'Europe, ainsi que la notion de gestion de l'eau tout au long de son parcours, afin de réduire les débits de pointe (Instruction technique 77-284, 1977). Dans les années 1990, les difficultés de gestion des eaux pluviales continuent avec l'évolution de l'urbanisation, et la réglementation évolue. Au niveau européen émergent la directive sur les eaux résiduaires urbaines (directive 91/271/CEE du 21 mai 1991, transcrite dans la deuxième loi sur l'eau de 1992) qui vise à améliorer la qualité de l'eau tout en maintenant le développement économique des pays. La directive cadre européenne sur l'eau - DCE (directive 2000/60/CE) est promulguée le 23 octobre 2000) et a pour but de mettre en œuvre une politique commune de gestion et de protection des ressources en eau. La troisième loi sur l'eau de 2006 ainsi que les lois Grenelle aident à la mise en œuvre de la DCE à l'échelle de la France en élaborant des plans d'actions (CEPRI, 2015; Directive Inondation, 2007; ONEMA, 2014). La Figure I-24 synthétise l'évolution de la réglementation autour de la gestion des ressources en eau.

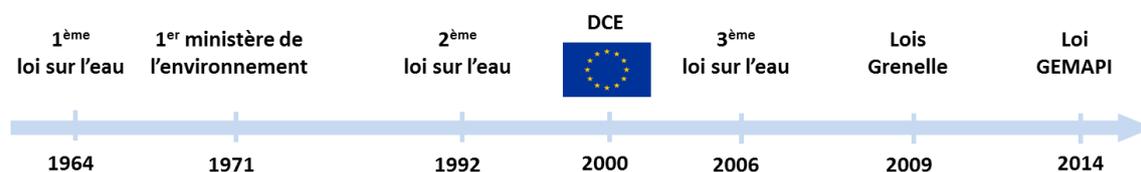


FIGURE I-23 : CHRONOLOGIE DES DIFFERENTES LOIS FRANCAISES ET EUROPEENNES POUR LA GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Concernant la gestion des risques liés à l'eau en France, la réglementation débute avec la loi du 13 juillet 1982 qui instaure le système d'indemnisation des catastrophes naturelles. La loi du 32 juillet 1987, renforcée par celle du 2 février 1995 a institué les Plan de Prévention des Risques Naturels (PPRN). Tous les citoyens ont le droit à l'information sur les risques auxquels ils sont soumis, ainsi que les moyens pour s'en protéger. La procédure pour les PPRN est définie par les articles L562-1 à L562-9 du code de l'environnement (PRIM, 2010). Les PPRN sont des documents réglementaires réalisés par l'Etat,

permettant de délimiter des zones exposées aux risques naturels et donnant des préconisations en termes de gestion des risques. Le code de l’environnement (L121-10) stipule que l’aménagement territorial doit prendre en compte les risques naturels. Ainsi, les PPRN doivent être annexés aux Plan Locaux d’Urbanisme (PLU). Les moyens financiers consacrés par le ministère à l’élaboration des PPRN s’élèvent en 2010 à 15 millions d’euros par an (PRIM, 2010). Au 31 décembre 2012, 1779 communes sont équipées d’un PPR Inondation (PPRI) par ruissellement (Jaillet et al., 2012). Ce chiffre est à mettre en relation avec les 16939 communes soumises au risque inondation en France. Dans certaines communes, le risque ruissellement est évoqué sans qu’il existe forcément de PPR ruissellement (Côtes d’Armor, Orne). Certaines communes ont fait l’objet d’un arrêté CatNat (Catastrophe Naturelle) coulées de boue ou ruissellement mais ne possèdent pas de PPRI ruissellement (par exemple dans le Puy-de-Dôme ou dans la Meuse) (Jaillet et al., 2012). La Figure I-24 synthétise l’évolution de la réglementation autour de la gestion des risques liés à l’eau.

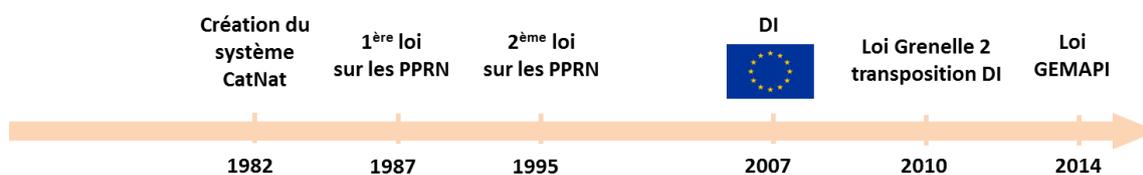


FIGURE I-24: CHRONOLOGIE DES DIFFERENTES LOIS FRANCAISES ET EUROPEENNES POUR LA GESTION DES RISQUES LIES A L’EAU

Depuis plusieurs décennies maintenant, la réduction des risques de catastrophes est passée d’une simple discipline technique à un intérêt mondial basé sur une stratégie de développement durable des territoires et des populations (UNISDR, n.d.). Certains scénarios de changement climatique (IPCC, 2014; Kelman, 2015) prévoient une augmentation des phénomènes naturels en intensité et/ou en fréquence dans les décennies à venir. C’est dans ce contexte qu’émerge la Directive Européenne Inondation (DI) (2007/60/CE du 23 octobre 2007) (The european floods directive, 2007) qui vise à fournir un cadre commun aux pays d’Europe pour l’évaluation et la réduction des risques liés aux inondations.

La directive comprend trois étapes : l’évaluation préliminaire des risques d’inondation (EPRI) (Chapitre 2 de la directive), la cartographie des inondations (Chapitre 3 de la directive) et l’élaboration de Plan de Gestion des Risques d’Inondation (PGRI) (Chapitre 4 de la directive). Ces travaux doivent faire l’objet de mises à jour régulières tous les 6 ans. La directive inondation est transposée en droit français par la loi Grenelle 2 du 12 juillet 2010. C’est dans ce contexte que la France introduit la notion de Territoires à Risque Important d’Inondation (TRI). En 2012, 122 TRI ont été définis. Sur les 122, 8 TRI sont soumis au risque ruissellement pour la métropole (dont 3 en Corse), et 11 pour les départements d’Outre-Mer. Pour la réalisation du 1<sup>er</sup> niveau de la directive, l’EPRI, des Enveloppes Approchées des Inondations Potentielles (EAIP) ont été réalisées pour les inondations par débordement de cours d’eau (EAIPce), qui comprend également les cours d’eau intermittents (DREAL Rhone-Alpes, 2013). Les EAIP servent de base pour des analyses plus précises sur certaines zones. A l’heure actuelle l’EAIPce ne cartographie pas entièrement le phénomène de ruissellement, seulement pour les talwegs principaux. Concernant la cartographie des inondations (chapitre 3 de la directive), 3 intensités d’inondations doivent être représentées: les crues de probabilité faible, moyenne et forte. Pour chaque scénario, doivent apparaître l’étendue de l’inondation, le niveau d’eau et la vitesse. Pour les TRI ou autres zones qui possèdent une cartographie des aléas ou des risques réalisée dans le cadre des PPRI, ces données servent à alimenter la carte nationale. Ensuite les cartes doivent être croisées avec l’exposition des enjeux pour donner des cartes de risques et ainsi poursuivre sur le 3<sup>ème</sup> niveau de la directive, la réalisation des Plans de Gestion des Risques Inondation.

Désormais, l'action publique est outillée de nombreux dispositifs applicables à de nombreux domaines tels que l'urbanisme, la gestion de l'eau, la gestion des risques et la sécurité civile (Gérin, 2011). L'évolution du cadre réglementaire charge l'action publique de concilier les différents objectifs que sont la réduction des catastrophes liées à l'eau et le maintien du bon état écologique des masses d'eau, notamment avec la loi GEMAPI du 27 janvier 2014 pour la gestion des milieux aquatiques et la prévention des inondations. L'objectif de cette loi est de redonner aux rivières un fonctionnement naturel, de lui laisser plus d'espace pour s'étendre en cas de crue et pour favoriser la biodiversité dans ces zones (DREAL et Agence de l'eau, 2015). Ceci montre une prise de conscience des menaces qui pèsent sur les ressources en eau et les risques associés.

### 1.6.2. DEFINITION EVASIVE DU RUISSELLEMENT DANS LES TEXTES REGLEMENTAIRES

Le texte de la directive inondation reste assez évasif sur la description des phénomènes concernés. D'autres textes supplémentaires donnent des compléments aux définitions sans vraiment statuer sur les limites des phénomènes à représenter (Tableau I-1) (European Commission, 2016; Jaillet et al., 2012; LENE loi portant engagement national pour l'environnement, 2010; The european floods directive, 2007). La Commission européenne donne des conseils pour aider à l'implémentation de la directive : « La directive s'applique à tous les types d'inondations (rivières, lacs, crues soudaines, inondations côtières, submersion et tsunami) » (European Commission, 2016), mais là aussi il n'y a pas de définition précise des phénomènes. La directive européenne 2000/60/CE du 23 octobre 2000 établit un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau et donne différentes définitions dans son article 2 (Parlement européen et Conseil européen, 2000): (2.1) « eaux de surface: les eaux intérieures, à l'exception des eaux souterraines, les eaux de transition et les eaux côtières, sauf en ce qui concerne leur état chimique, pour lequel les eaux territoriales sont également incluses » ; (2.3) « eaux intérieures: toutes les eaux stagnantes et les eaux courantes à la surface du sol et toutes les eaux souterraines en amont de la ligne de base servant pour la mesure de la largeur des eaux territoriales ».

**TABLEAU I-1: DEFINITION DE L'INONDATION POUR LA DIRECTIVE EUROPEENNE INONDATION ET LA LOI PORTANT ENGAGEMENT NATIONAL POUR L'ENVIRONNEMENT (SOURCE: CEPRI, 2015)**

Texte	Directive inondation	LENE
Définition de l'inondation	Submersion temporaire par l'eau de terres qui ne sont pas submergées en temps normal	Submersion temporaire par l'eau de terres émergées
Origines admises	Crues de rivières, de torrents de montagne et de cours d'eau intermittents méditerranéens	Toute origine
Exclusions	Exclusion possible des inondations dues aux réseaux d'égouts	Exclusion des inondations dues aux réseaux de collecte des eaux usées, y compris les réseaux unitaires

La définition du ruissellement n'est pas univoque dans la littérature (CEPRI, 2015; La Documentation française, 1999). On retrouve néanmoins le ruissellement parmi certaines classifications des grands types d'inondations. Montoroi (2012) classe les inondations selon quatre types : les inondations par débordement, par ruissellement, par remontées de nappes et par submersion marine. On retrouve également cette classification dans l'article « inondation » de l'encyclopédie libre Wikipédia. Sur le site de l'observatoire des risques naturels en Languedoc-Roussillon (Observatoire des risques naturels, n.d.), les inondations sont caractérisées en trois types : les inondations de plaine en aval des grands cours d'eau,

les crues torrentielles ou à montée rapide qui peuvent toucher les cours d'eau intermittents, et les inondations par ruissellement pluvial urbain. De ce fait, la définition des inondations par ruissellement reste très évasive dans les documents réglementaires. Cette difficulté à définir le ruissellement peut être liée au caractère complexe du phénomène qui fait intervenir de nombreux facteurs et induit des aléas de formes très variées. Il est parfois difficile de poser une limite entre ruissellement et crue rapide. Le caractère local, fugace du phénomène rend difficile l'émergence d'une mémoire collective (Le Bissonais et al., 2002). Le manque de données d'observation et de mesure est un frein à la compréhension du phénomène, au développement de modèles et à leur évaluation. Cependant l'impact sur la société est bien réel pour les opérationnels et pour les collectivités, au vu des quelques chiffres des bases de données françaises et internationales. Il est indispensable de bien comprendre le phénomène et de travailler à sa représentation afin de concevoir les techniques de gestion adaptées. Il est également important de bien quantifier son impact pour prendre la mesure du phénomène, et estimer les bénéfices ou les limitations lors d'investissements dans des systèmes de protection ou de prévention.

## 1.7. TERMINOLOGIE

### 1.7.1. DEFINITION DU RUISSELLEMENT

Au vu des éléments présentés dans ce premier chapitre, une définition du phénomène de ruissellement, tel qu'étudié dans le cadre de la thèse, est proposée :

- Le ruissellement est généré par la part des précipitations qui ne s'infiltré pas dans le sol et qui s'écoule à la surface en dehors du réseau hydrographique permanent, qui est ici limité au réseau alimenté principalement par des flux souterrain et de subsurface.
- Le phénomène de ruissellement comprend les phases de genèse et d'écoulement, incluant les phénomènes d'érosion, d'écoulements chargés, de coulées de boue, de laves torrentielles, de glissements superficiels et de dépôts.
- Le phénomène de ruissellement est caractérisé par une dimension spatiale réduite et une dimension temporelle rapide. Le ruissellement est induit par les précipitations, il peut donc possiblement se produire en tout point du territoire, mais sa genèse et son écoulement sont influencés par les caractéristiques de surface telles que la topographie, le type de sol, la géologie et l'occupation du sol.
- L'aléa ruissellement se caractérise également par son effet de surprise en provoquant des inondations éloignées de tout cours d'eau, par la violence des écoulements qui peuvent transporter des matériaux de volumes importants, et donc par des conséquences potentiellement importantes en termes d'impact humain et économique.

### 1.7.2. DEFINITIONS DES TERMES DU DOMAINE DES RISQUES

Les termes présentés dans cette section se focalisent autour du domaine des risques. Leur définition est nécessaire car leur sens peut être nuancé voire très contrasté d'un contexte à l'autre (recherche, opérationnel, etc.) et d'une discipline à l'autre (hydrologie, sociologie, etc.) (Christensen et al., 2003; Thywissen, 2006). Les définir dans le cadre de l'étude permet de mener à bien des raisonnements et de pouvoir les partager (Magne, 2010). Les définitions proposées dans cette section sont issues de synthèses qui s'appuient sur de nombreux glossaires et articles scientifiques (Christensen et al., 2003;

Committee on Foundations of risk analysis, 2015; Magne, 2010; Maurer et al., 2012; Office québécois de la langue française (OQLF) et ministère des Services gouvernementaux québécois (MSG), 2013; Renn et Klinke, 2004; Thywissen, 2006; UNDHA, 1992). Les définitions disponibles dans la littérature sont souvent très théoriques, elles sont ici accompagnées d'exemples d'application dans le cadre de la thèse (Tableau I-2). La liste des termes présentés ici n'est pas exhaustive par rapport au domaine des risques. Les termes sont présentés par ordre alphabétique.

**TABLEAU I-2: DEFINITION DES TERMES DU DOMAINE DES RISQUES AVEC EXEMPLES APPLIQUES AU CONTEXTE DE LA THESE**

Termes	Définitions	Exemples
Aléa	Phénomène aléatoire dans le temps et dans l'espace. Il peut se définir par la combinaison de l'intensité de de l'occurrence.	Une inondation, une coulée de boue, de l'érosion, etc.
Enjeu	Élément physique ou social ayant une valeur pour l'humain.	Les personnes, les biens, l'environnement, etc.
Exposition	Concomitance spatiale d'un aléa et d'un enjeu.	La localisation d'une habitation située en zone inondable.
Intensité	Magnitude ou dangerosité de l'aléa.	La vitesse, la densité, l'envergure d'une coulée de boue.
Mitigation	Mesure à mettre en œuvre pour réduire l'intensité ou l'occurrence de l'aléa afin de réduire le risque	Mise en place de bassins de rétention en amont d'un enjeu pour diminuer le volume d'apport potentiel.
Occurrence	Probabilité qu'un aléa se produise sur une certaine zone à un certain moment.	La voie ferrée est inondée en moyenne tous les deux ans au niveau d'une gare.
Résilience	Capacité d'un enjeu à revenir rapidement à son état normal après avoir été impacté par un aléa.	Délai de remise en état de la route après un glissement de talus afin que les voitures puissent à nouveau circuler.
Risque	Potentialité qu'un enjeu soit impacté par un aléa en produisant un effet indésirable. Il peut se définir par la combinaison de l'exposition et de la vulnérabilité.	Probabilité d'avoir des pertes humaines ou économiques à cause des effets du ruissellement.
Vulnérabilité	Incapacité d'un enjeu à résister à un impact.	Les enfants et les personnes âgées sont plus vulnérables que les autres car ils peuvent avoir des difficultés à se déplacer seuls pour fuir une catastrophe.

En plus de la logique hydrologique amont-aval, il y a une interconnexion des enjeux dans un même territoire, ce qui peut engendrer des effets dominos, c'est-à-dire qu'un risque peut en engendrer un autre. L'évaluation des risques doit être élargie aux aspects sociaux et économiques, c'est la vision systémique des risques (Leone et Vinet, 2006; Maurer et al., 2012). La Figure I-25 présente les différents termes précédemment définis avec leurs interactions. L'aléa est la combinaison de l'intensité et de

l'occurrence. L'exposition est la combinaison d'un aléa et d'un enjeu. Le risque est la combinaison de l'exposition et de la vulnérabilité. Pour réduire le risque, des mesures de mitigation peuvent être mise en œuvre pour réduire l'intensité et/ou l'occurrence, ou la résilience de l'enjeu peut être augmentée.

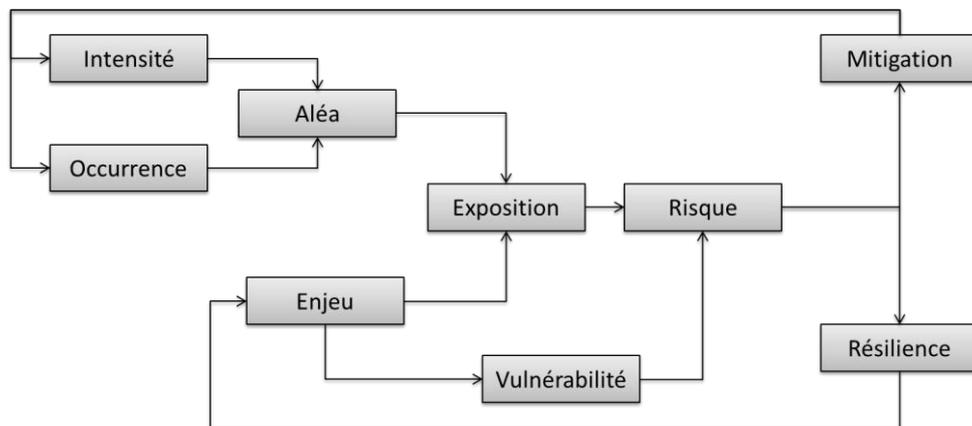


FIGURE I-25: VISION SYSTEMIQUE DES RISQUES (SOURCE: ADAPTE DE MAURER ET AL., 2012)

Ce premier chapitre a permis de définir le phénomène étudié dans la thèse. Le ruissellement a été défini par son fonctionnement hydrologique, ses mécanismes de genèse et les différents facteurs qui l'influencent. Les risques induits par son écoulement ont été identifiés de manière exhaustive. Les enjeux du territoire pouvant être impactés par le ruissellement ont été décrits. Bien qu'il soit encore difficile d'estimer l'impact réel du ruissellement sur la société, quelques chiffres ont été donnés pour illustrer les dégâts qu'il peut engendrer. Ce chapitre fait aussi un historique de la réglementation autour du ruissellement, en lien avec la gestion des ressources et la gestion des risques. Enfin, Les termes utilisés dans la cadre de la thèse ont été défini en s'appuyant sur des définitions théoriques et en les illustrant par des exemples en lien avec le ruissellement. Dans le second chapitre, le contexte ferroviaire sera présenté et en particulier la gestion du ruissellement sur l'infrastructure ferroviaire.

## CHAPITRE 2 : LA GESTION DU RUISSELLEMENT DANS LE CONTEXTE FERROVIAIRE

Après avoir présenté le contexte hydrologique, ce chapitre présente le contexte ferroviaire. La place du gestionnaire d'infrastructure dans le système ferroviaire est d'abord présentée. Les éléments de l'infrastructure pouvant être impactés par le ruissellement sont également présentés, suivi des différents types d'impacts que l'on peut observer. Enfin, une partie importante de ce chapitre présente les méthodes de gestion des risques liés au ruissellement durant les différentes étapes de la vie d'une ligne, pour finir sur un constat des limites et difficultés actuelles. Les éléments présentés dans ce chapitre sont utiles à la compréhension du travail de thèse, notamment le travail réalisé pour construire les bases de données sur les impacts et sur l'infrastructure, mais également le travail réalisé sur l'intégration de la méthode IRIP dans le processus actuel de gestion des risques.

### 2.1. LE SYSTEME FERROVIAIRE

Depuis le 1er janvier 2015, SNCF est constituée de trois Etablissements Publics à caractère Industriel et Commercial (EPIC). Elle possède également de nombreuses filiales, de droit public et privé, qui forment le Groupe SNCF. Les trois EPIC sont :

- L'ÉPIC SNCF, qui prend en charge le pilotage global du groupe ;
- L'ÉPIC SNCF Mobilités, pour le transport de voyageurs et de marchandises ;
- L'ÉPIC SNCF Réseau, qui gère, exploite et développe le réseau ferré français.

En 2015, le réseau ferré national, compte environ 30 000 km de lignes, dont 15 687 km de lignes électrifiées et 2024 km de lignes à grande vitesse. L'entreprise fait circuler en moyenne 15 000 trains par jour pour le transport de fret et de voyageurs, et transporte un milliard de personnes par an. SNCF Réseau, pour mener à bien ses missions, est doté de 8 directions générales et 10 directions territoriales complémentaires. Parmi elles, sont réparties quatre grandes activités : Maintenance et Travaux, Accès au Réseau, Circulation, et Ingénierie et projets. Ingénierie et projets, en lien avec les autres acteurs internes et externes de l'entreprise conçoit et réalise les projets de développement et de régénération du réseau, tout en se plaçant dans une démarche de recherche, d'innovation et de développement. L'ingénierie s'organise autour d'une direction nationale de l'ingénierie technique (IGT) située à La-Plaine-Saint-Denis (93) et de 23 Pôles Régionaux d'Ingénierie (PRI) répartis dans 23 régions (Figure I-26). Les régions sont délimitées selon les régions administratives et selon la logique des lignes. Ils sont en charge des travaux ou projets d'ingénierie sur leurs territoires et sont appuyés par IGT pour les grands projets et pour tous besoins ou avis techniques. Le métier « Maintenance et Travaux » (M et T), en lien fort avec l'ingénierie, est également organisé autour d'un pôle national et de nombreux infra-pôles répartis parmi ces 23 régions (un pôle ou plus par région). L'organigramme de SNCF Réseau peut être trouvé sur le site de

l'entreprise<sup>1</sup>. La SNCF constitue l'acteur central du système ferroviaire en France, autour duquel gravite de nombreuses autres entreprises : fournisseurs, entreprises de travaux, autres transporteurs, etc. On définit par système ferroviaire l'ensemble des éléments et personnes qui permettent le bon fonctionnement du réseau en équilibre avec les autres systèmes qui l'entourent.

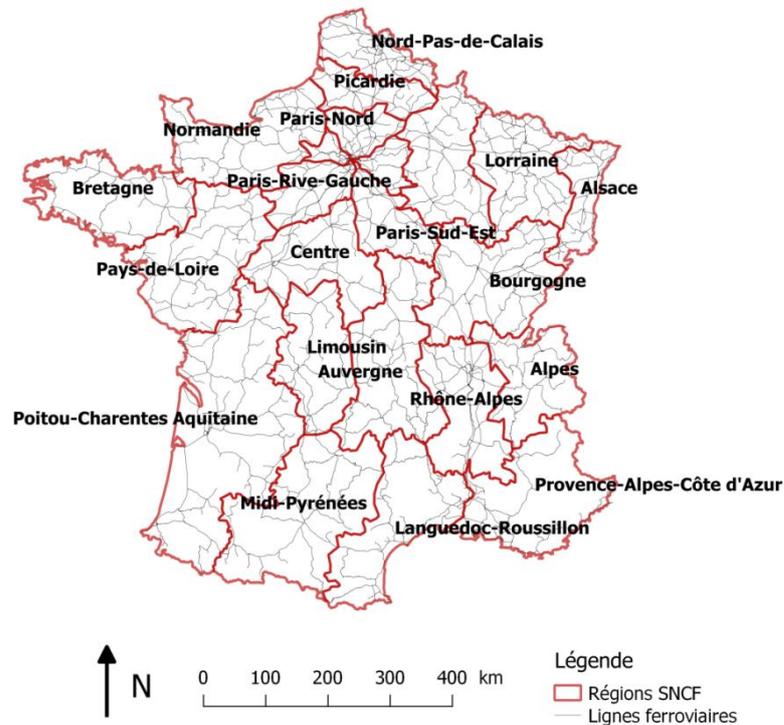


FIGURE I-26: CARTE DES 23 REGIONS QUI SE REPARTISSENT LES TRAVAUX D'INGENIERIE SUR LE RESEAU FERRE NATIONAL (RFN)

## 2.2. L'INFRASTRUCTURE FERROVIAIRE

L'infrastructure ferroviaire est un système composé de nombreux éléments qui interagissent pour permettre la circulation des trains. L'infrastructure ferroviaire regroupe six grands ensembles: les installations fixes de traction électrique, les installations de télécommunication, les installations de signalisation, la voie, les ouvrages d'art et les ouvrages en terre (Figure I-27).

<sup>1</sup> Site de l'entreprise SNCF Réseau : <http://www.sncf-reseau.fr/fr/structure-et-organigramme>

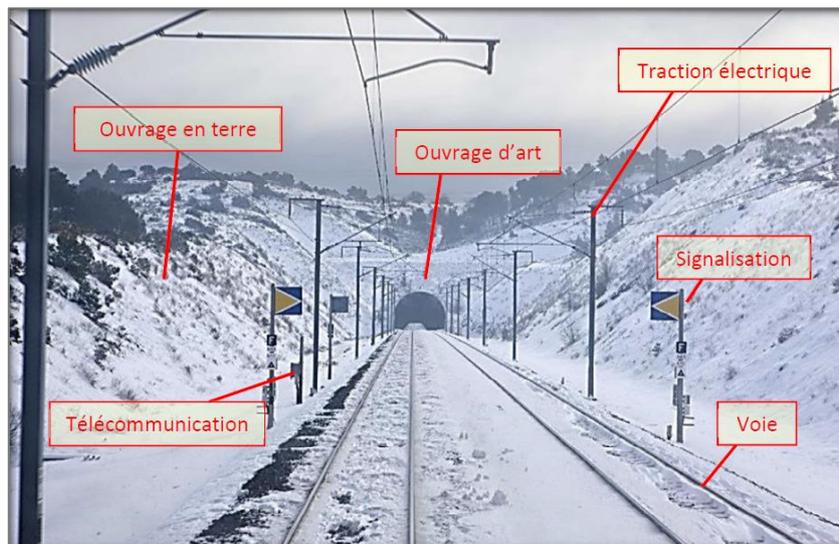


FIGURE I-27: LES ELEMENTS CONSTITUTIFS DE L'INFRASTRUCTURE FERROVIAIRE (EXTRAIT DE NOISETTE, 2015)

### 2.2.1. LES OUVRAGES EN TERRE

Le profil en long de la voie ferrée est très contraint, par exemple, avec une limite sur les pentes longitudinales maximales pour pouvoir réaliser la traction électrique ou le freinage dans de bonnes conditions. La voie ferrée ne peut donc pas suivre le terrain naturel. Bien que le choix dans le tracé des lignes favorise les zones planes, les travaux de terrassement restent indispensables. Le terrain naturel est remanié et des ouvrages en terre (OT) sont créés, produisant différents types de profils transversaux: les remblais, lorsque la voie ferrée se situe sur une ou plusieurs couches de matériaux rapportés et compactés (Figure I-28), et les déblais meubles ou rocheux, lorsque la voie ferrée se situe dans une excavation par rapport au terrain naturel (Figure I-29). La voie ferrée peut également être établie en profil mixte, remblai d'un côté et déblai de l'autre, par exemple lorsque la voie se situe sur un versant. Il existe des tronçons où la voie est établie au niveau du terrain naturel (sans travaux importants de terrassement), on parle de profil rasant. Un ouvrage en terre enveloppe (OTE) correspond aux limites physiques des terrassements réalisés pour sa création. Un OTE peut rassembler plusieurs ouvrages en terre mais avec des profils similaires, par exemple, un ensemble de déblais. Il peut y avoir quelques variations au sein d'un même OTE mais il y a une continuité dans la structure et aussi souvent dans le réseau hydraulique. Pour la gestion du patrimoine, les ouvrages en terre au sein d'un même OTE portent le même nom. Ils sont identifiés par rapport à leurs points kilométriques (PK) de début et de fin et peuvent être différents côté droit et côté gauche (Figure I-30).

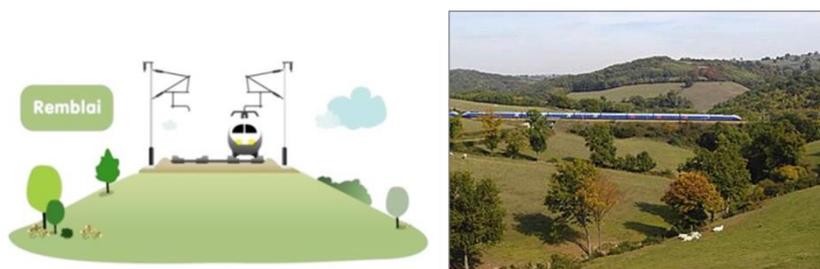


FIGURE I-28: REMBLAI SCHEMA ET PHOTO



FIGURE I-29: DEBLAI SCHEMA ET PHOTO

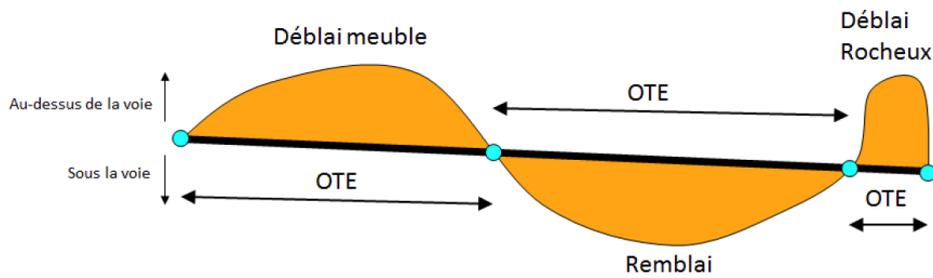


FIGURE I-30: SCHEMA D'UN PROFIL EN LONG D'UNE LIGNE INDICANT LES OUVRAGES EN TERRE ENVELOPPE (OTE)

)

### 2.2.2. LA VOIE

La voie est soumise à d'importants efforts aux passages des trains, sa stabilité est essentielle pour la sécurité des circulations. La Figure I-31 montre une vue en coupe de la constitution d'une voie ferrée. Les rails sont attachés sur des traverses permettant un écartement constant des deux rails. L'ensemble rails-traverses est posé sur une couche de ballast. Le ballast est composé de pierres formant une couche de 10 à 35 cm d'épaisseur qui assure la transmission des efforts engendrés par le passage des trains au reste de la structure. Il est important de maintenir un ballast propre pour garder la bonne cohésion des grains entre eux. Le ballast est donc remplacé régulièrement durant la vie d'une voie ferrée. La voie ballastée repose sur la plate-forme ferroviaire composée d'une sous-couche et d'une couche de forme. La plate-forme est légèrement inclinée vers l'extérieur pour assurer l'évacuation des eaux zénithales. En plus du bon choix des matériaux de plateforme et du bon dimensionnement des couches de la plateforme, le compactage des matériaux et le drainage sont les moyens de garantir le maintien de la plate-forme et de respecter les contraintes de portance de la voie et de répartition des efforts vers le sol support. La maîtrise des eaux est indispensable à la pérennité de la voie ainsi que l'ensemble de l'infrastructure ferroviaire. Trinh (2011) a étudié le comportement hydromécanique de la plate-forme ferroviaire classique. Il montre sa vulnérabilité face aux eaux pluviales et préconise de surveiller la teneur en eau de cette couche pour prévenir tout risque de déstabilisation de la plate-forme et recommande l'installation de dispositifs de drainage sur les sections en déblai.

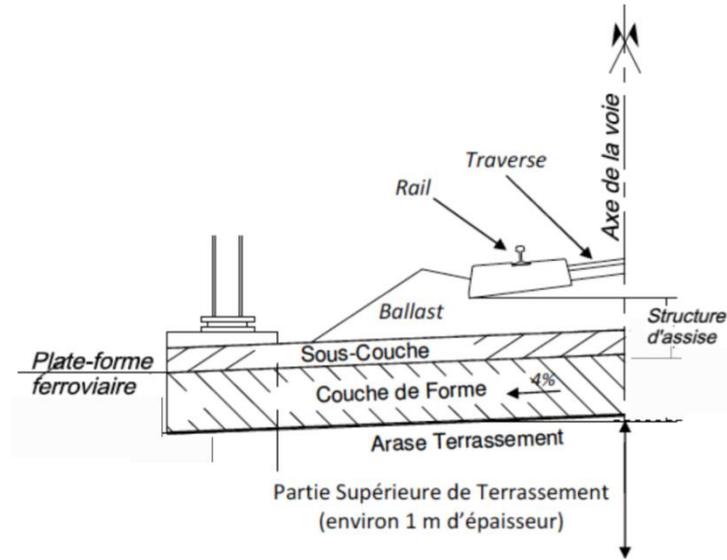


FIGURE I-31: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA CONSTITUTION DE LA VOIE FERREE (SOURCE: SIDURON, 2014)

### 2.2.3. LE RESEAU HYDRAULIQUE

La géométrie particulière de la voie ferrée, ainsi que son caractère linéaire et continu, font qu'elle intercepte les écoulements naturels de l'eau. Pour assurer la transparence hydraulique de la voie ferrée, ainsi que la gestion des eaux générées dans l'emprise ferroviaire, l'infrastructure est équipée de nombreux dispositifs hydrauliques. On distingue différents types de dispositifs selon leurs fonctions, à savoir, les ouvrages de traversée sous voie, les dispositifs de drainages et les techniques de stockage et d'infiltration. On considère comme réseau hydraulique l'ensemble des dispositifs hydrauliques mais aussi la plate-forme, la voie et les ouvrages en terre ainsi que l'ensemble des bassins versants interceptés par la voie ferrée (Figure I-32).

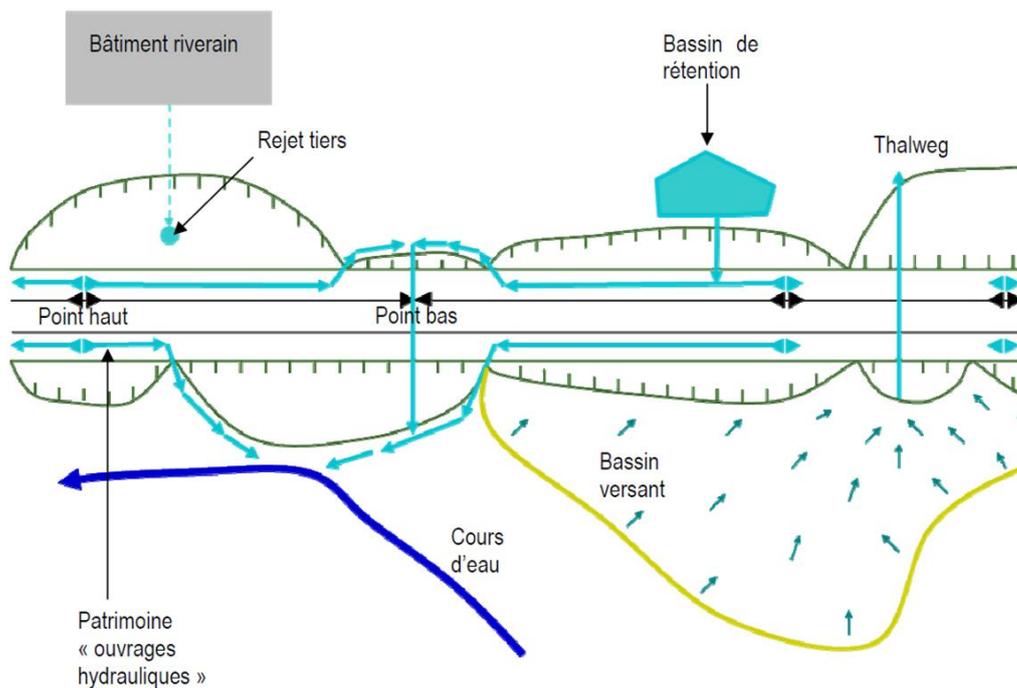


FIGURE I-32: SCHEMA DU RESEAU HYDRAULIQUE

### 2.2.3.1. LES OUVRAGES DE TRAVERSEE SOUS VOIE

Les ouvrages de traversée sous voie regroupent les ouvrages assurant le transit des écoulements de l'amont vers l'aval. Pour les écoulements pérennes, les ouvrages de traversée peuvent être des ouvrages d'art (pont-rail, viaduc, aqueduc) pour les écoulements intermittents, les ouvrages peuvent être des buses ou des dalots (Figure I-33). Il peut aussi y avoir des ouvrages de traversée sous voie n'ayant pas de fonction hydraulique, pour le passage de véhicules par exemple.



FIGURE I-33: EXEMPLES D'OUVRAGES HYDRAULIQUES DE TRAVERSEE (DE GAUCHE A DROITE: AQUEDUC, BUSE, DALOT)

### 2.2.3.2. LES DISPOSITIFS DE DRAINAGE

Les dispositifs de drainage regroupent les installations le long des voies ferrées permettant de drainer la plateforme et de collecter les eaux provenant des bassins versant extérieurs en amont et de les acheminer vers un exutoire en aval. Ces dispositifs peuvent être en surface ou enterrés, à proximité de la plate-forme ou en crête de déblai (Figure I-34). Ils peuvent être des fossés, revêtus ou non, des collecteurs drainants, des cunettes ou encore des descentes d'eau (Figure I-35). Ils peuvent être en béton ou en matériau thermoplastique selon la résistance mécanique nécessaire.



FIGURE I-34: PHOTO D'UN FOSSE REVETU PLACE EN CRETE DE DEBLAI POUR INTERCEPTER LES ECOULEMENTS. L'EAU PLUVIALE EST ENSUITE ACHEMINEE VERS UN EXUTOIRE VIA UNE DECENTE D'EAU OU LA PROCHAINE JONCTION AVEC UN REMBLAI.



FIGURE I-35: EXEMPLES DE DISPOSITIFS DE DRAINAGE (DE GAUCHE A DROITE: DESCENTE D'EAU GRAND DEBIT, FOSSE BETON PREFABRIQUE A BARBACANE, FOSSE REVETUE A CIEL OUVERT)

#### 2.2.3.3. LES DISPOSITIFS DE STOCKAGE ET D'INFILTRATION

Pour limiter ou réguler les volumes d'apport ou de rejet, des techniques permettent de stocker l'eau afin de la ralentir et de favoriser son infiltration. Le stockage et l'infiltration peuvent se faire dans les dispositifs de drainage pourvus de revêtements perméables ou bien dans des bassins de rétention à proximité des voies (Figure I-36).

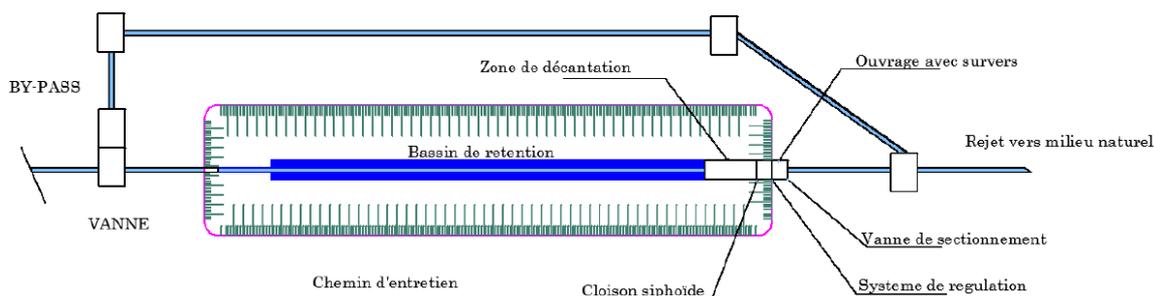


FIGURE I-36: SCHEMA D'UN BASSIN DE RETENTION AVEC SYSTEME DE SURVERSE

#### 2.2.3.4. LES DISPOSITIFS D'HYDRAULIQUE DOUCE

L'hydraulique douce est l'ensemble des techniques qui permettent la gestion des eaux de ruissellement au plus proche du cycle de l'eau. L'idée est de gérer l'eau de surface à l'endroit où elle se génère en favorisant son infiltration ou son évaporation, de limiter son transfert vers l'aval ou de limiter sa concentration, sa vitesse de transfert, le transport de particules de sol, et ainsi de limiter les impacts en aval. L'hydraulique douce a des intérêts multiples et complémentaires que sont, la réduction du risque inondation, la protection des écosystèmes par notamment la limite des transferts de polluants, la limitation des volumes d'apport aux stations d'épuration lors d'épisodes pluvieux importants, le rechargement des nappes phréatiques, etc. Les dispositifs d'hydraulique douce ont également la particularité d'être simples à mettre en place et de s'intégrer dans les paysages (AREAS, n.d.; Benmamar et al., 2016; Richet et al., 2016). Les différents dispositifs peuvent être :

- des zones enherbées, elles ralentissent les écoulements et permettent le dépôt des sédiments (Figure I-37) ;
- des fascines, entrelacements de bois morts ou vivants avec des pieux que l'on place en travers des chemins de ruissellement, elles permettent de piéger les sédiments ou autres matériaux et luttent contre l'érosion (Figure I-38);
- des fossés, noues ou talus, qui permettent de rediriger les écoulements tout en favorisant leur infiltration durant leur cheminement vers l'aval, ils évitent également l'érosion (Figure I-39);
- Des haies ou boisements pour ralentir les écoulements et favoriser une infiltration profonde ;
- Des mares tampons, qui peuvent servir de rétention pour des épisodes de faible période de retour (Figure I-40).

Pour maîtriser le ruissellement dans le cas de parcelles agricoles, il s'agit parfois également de changer les pratiques culturales. Par exemple, enherber les inter-rangs permet de lutter contre l'érosion, et travailler le sol parallèlement à la voie ferrée permet de limiter les dépôts de sédiments sur la voie ferrée.



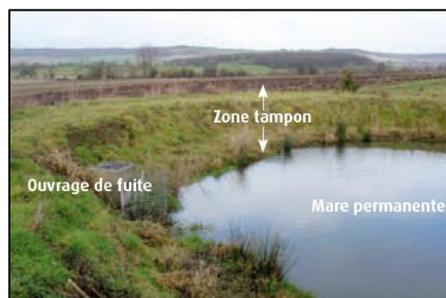
**FIGURE I-37: PHOTO D'UNE BANDE ENHERBEE QUI PERMET LE DEPOT DES BOUES DE RUISSellement (SOURCE : FICHE SYNTHÈSE DE L'AREAS N°13)**



**FIGURE I-38: FASCINE PLACEE EN TRANSVERSALE PAR RAPPORT AUX ECOULEMENTS (SOURCE : FICHE SYNTHÈSE DE L'AREAS N°12)**



**FIGURE I-39: LES FOSSES ET TALUS REDIRIGENT LES ECOULEMENTS EN LES RALENTISSANT ET EN FAVORISANT L'INFILTRATION (SOURCE : FICHE SYNTHÈSE DE L'AREAS N°15)**



**FIGURE I-40: PHOTO D'UNE MARE TAMPON AVEC UN OUVRAGE DE FUITE (SOURCE : FICHE SYNTHÈSE DE L'AREAS N°16)**

Bien que les techniques d'hydraulique douce permettent une maîtrise des risques tout en favorisant la biodiversité, le couplage avec des techniques classiques reste indispensable. Ces dispositifs restent généralement efficaces pour des périodes de retour d'environ 5 années (AREAS, n.d.). L'hydraulique douce permet d'écrêter les débits de pointes pour les épisodes importants et une régulation des eaux de ruissellement au quotidien. Ces dispositifs sont efficaces pour de petits bassins versants, inférieurs au kilomètre carré mais doivent être placés aux endroits stratégiques pour une efficacité maximale (AREAS, n.d.; SMBV Caux Seine, n.d.; SMBV de la Pointe de Caux, n.d.).

L'utilisation de techniques d'hydraulique douce n'est pas répandue à SNCF. D'une part car ces techniques ne figurent pas dans les référentiels internes, d'autre part car cela implique de travailler hors de l'emprise ferroviaire. Faire des actions hors emprise implique de travailler dans une propriété privée, il faut donc contacter le propriétaire et pouvoir lui expliquer les problématiques. Ceci peut être intéressant pour le propriétaire voisin qui peut également avoir des problèmes de ruissellement (inondation, perte en sol). Dans ce cas il faut réussir à expliquer pourquoi et comment gérer mutuellement le ruissellement. La question de la responsabilité de l'entretien des systèmes d'hydraulique douce peut aussi émerger. Il est possible pour SNCF de passer en force s'il est avéré que les pratiques du propriétaire en amont impactent effectivement la voie ferrée. Il faut dans ce cas interagir avec les services fonciers internes à l'entreprise et négocier des prix d'achat de terrain avec le propriétaire, la Direction de l'Immobilier de l'Etat (ex-France Domaine) ou la Chambre d'Agriculture. Néanmoins, il est important de faire passer le message de la solidarité amont-aval, et de la nécessité de gérer le ruissellement au plus proche de sa zone de production. Il est possible de faire appel à des facilitateurs, tels que des techniciens de syndicats de bassins, pour discuter avec les différents acteurs du territoire. Dans tous les cas les procédures peuvent être longues, ralentir les projets ou ne pas aboutir.

### 2.3. LES DESORDRES LIES AU RUISSELLEMENT SUR L'INFRASTRUCTURE FERROVIAIRE

Malgré l'installation de dispositifs de maîtrise des eaux pluviales, la voie ferrée peut être sujette à des détériorations ou des destructions dues aux eaux de ruissellement. Les causes peuvent être multiples, liées à l'occurrence d'un aléa exceptionnellement fort, ou liées à un problème au niveau des dispositifs hydrauliques. Concernant les dispositifs hydrauliques, les désordres peuvent être dus à un sous-dimensionnement (capacité insuffisante par rapport à l'intensité de l'aléa), à un dysfonctionnement (lié à des défauts de réalisation lors des travaux d'installation, à des travaux ultérieurs ayant réduit la section, au comblement par des matériaux charriés, des déchets ou de la concrétion calcaire), ou bien à l'inexistence de dispositif. L'origine du désordre peut également être liée au vieillissement des installations (naturel ou défaut d'entretien) ou encore à une modification dans l'environnement (réduction de la capacité d'infiltration des surfaces, aménagements tiers, rejets sauvages) qui peut entraîner un accroissement des volumes d'apport. Ainsi, les désordres seront de types différents, selon la forme de l'aléa ruissellement (coulée, glissement, érosion, etc.), son intensité et selon les caractéristiques de la zone impactée, la configuration de l'environnement proche (parcelle cultivée en limite d'emprise ferroviaire, rejets sauvages) et de l'infrastructure (profil en travers et en long, présence et état des dispositifs, etc.). Cette section fait une présentation non exhaustive des types de désordres engendrés par le ruissellement sur l'infrastructure ferroviaire, selon le type de profil en travers.

#### 2.3.1. CONFIGURATION EN DEBLAI

La Figure I-41 présente les types de désordres liés au ruissellement que l'on peut voir survenir dans une configuration en déblai. L'occurrence d'un aléa ruissellement peut engendrer une submersion des voies ferrées par de l'eau (Figure I-42) ou des dépôts de boue (Figure I-43) ou de matériaux (Figure I-44). Il peut y avoir également une pollution des éléments de l'infrastructure par des fines (sédiments très fins) qui peuvent colmater les dispositifs hydrauliques ou déstabiliser la couche de ballast en diminuant la cohésion des grains entre eux. La circulation d'eau au niveau des voies ferrées peut également provoquer un emportement de ballast et/ou une érosion de la plate-forme pouvant déstabiliser la voie ferrée. Les grains de ballast, peuvent être transportés de façon longitudinale (Figure I-45) ou transversale (Figure I-46). Des ravinements ou des glissements de talus peuvent être induits par circulation d'eau sur la pente du talus ou par stagnation en pied ou en crête (Figure I-47), pouvant apporter des matériaux sur la voie.

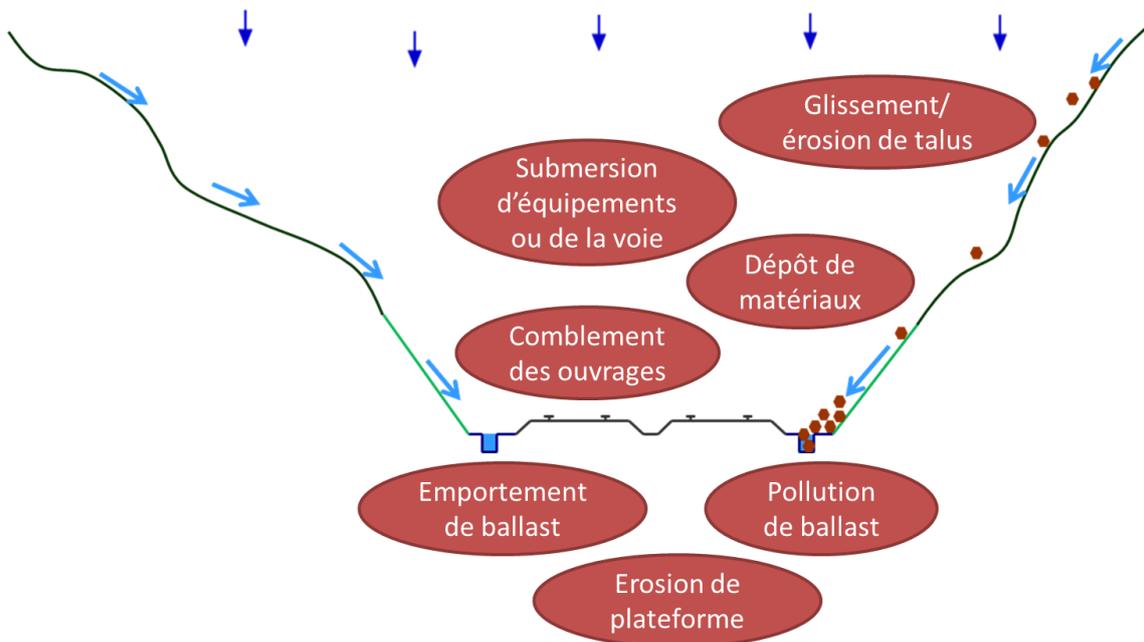


FIGURE I-41: SCHEMA DES DIFFERENTS TYPES DE DESORDRES DANS LES CONFIGURATIONS EN DEBLAI



FIGURE I-42: INONDATION DE LA VOIE PAR DES EAUX DE RUISSELLEMENT



FIGURE I-44: DEPOTS DE MATERIAUX EN VOIE



FIGURE I-43: DEPOTS DE BOUE APRES LE PASSAGE D'EAUX DE RUISSELLEMENT



FIGURE I-45: EMPOTEMENT LONGITUDINAL DE BALLAST PAR CIRCULATION D'EAU AU NIVEAU DE LA PISTE OU DU FOSSE



FIGURE I-46: EMPORTEMENT TRANSVERSAL DE BALLAST



FIGURE I-47: GLISSEMENT DE TALUS PAR STAGNATION D'EAU EN CRETE

### 2.3.2. CONFIGURATION EN REMBLAI

La Figure I-48 présente les principaux désordres que l'on peut voir survenir dans une configuration en remblai. L'eau de ruissellement provenant de l'amont rencontre généralement au niveau de la voie ferrée un ouvrage de traversée sous voie ou un dispositif de drainage qui l'y achemine. Un apport de sédiment transporté ponctuellement à la suite d'un évènement intense ou de manière diffuse sur le long terme, peut combler l'ouvrage de traversée (Figure I-49) ou les dispositifs de drainage. Un sous-dimensionnement, un ouvrage comblé ou un aléa d'intensité exceptionnel peut engendrer une accumulation d'eau derrière le remblai ferroviaire, le mettre en charge, ce qui peut engendrer une percolation de l'eau à travers le corps du remblai voire une surverse par-dessus le remblai pouvant polluer ou emporter des éléments de l'infrastructure, tels que le ballast ou le remblai lui-même (Figure I-50). La percolation fragilise et déstabilise les matériaux du remblai pouvant engendrer une dégradation accélérée et augmenter les risques d'emportement avec des niveaux d'intensité plus faible. La circulation d'eau sur la partie aval du remblai peut engendrer de l'érosion ou des glissements du talus (Figure I-51). Une circulation d'eau en pied de remblai peut également provoquer des affouillements (Figure I-52).

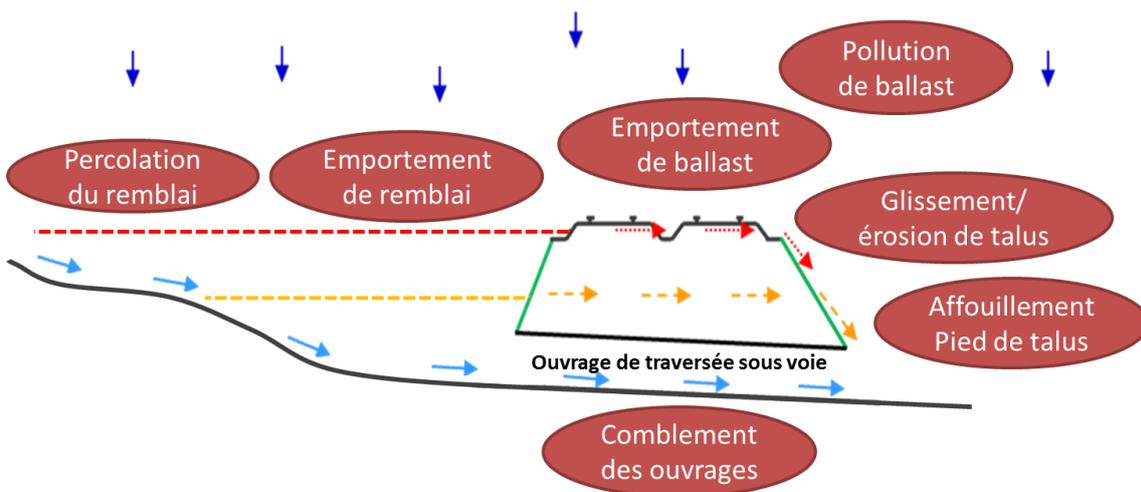


FIGURE I-48: SCHEMA DES DIFFERENTS TYPES DE DESORDRES DANS LES CONFIGURATIONS EN REMBLAI



**FIGURE I-49: COMBLEMENT D'UN OUVRAGE HYDRAULIQUE DE TRAVERSEE**



**FIGURE I-51: EROSION DU REMBLAI AVAL PAR PERCOLATION DANS LE CORPS DU REMBLAI**



**FIGURE I-50: EMPORTEMENT D'UN REMBLAI FERROVIAIRE**



**FIGURE I-52: AFFOUILLEMENT DU PIED DE REMBLAI**

### 2.3.3. JONCTIONS DEBLAI-REMBLAI

Les eaux pluviales qui arrivent au niveau d'un déblai sont généralement drainées sur la longueur du déblai jusqu'au prochain exutoire souvent associé à une jonction avec un remblai, comme indiqué sur la Figure I-53. L'eau en circulant au niveau de la jonction peut engendrer de l'affouillement, de l'érosion voire un glissement du talus du remblai. Pour protéger ces zones sensibles, des dispositifs sont installés pour aider à l'écoulement (Figure I-54).

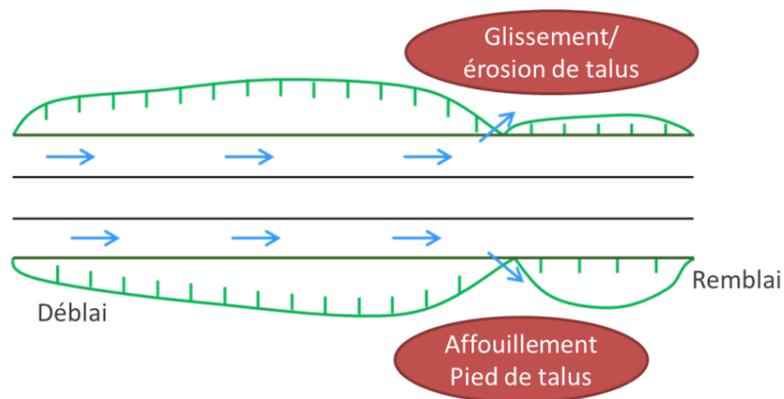


FIGURE I-53: SCHEMA DES DIFFERENTS TYPES DE DESORDRES AUX NIVEAUX DES JONCTIONS DEBLAI-REMBLAI



FIGURE I-54: TRANSITION REMBLAI DEBLAI AVEC UN DISPOSITIF HYDRAULIQUE

#### 2.4. LA GESTION DES RISQUES LIES AU RUISSELLEMENT A SNCF

Du point de vue opérationnel, les deux risques majeurs sont la défaillance de la sécurité et la perturbation des circulations. De ce point de vue, les risques induits par le ruissellement sont (1) l'indisponibilité de la ligne due à la présence d'obstacle (eau, boue, matériaux) ou due à l'absence d'un élément (brèche ou destruction du remblai ferroviaire), et (2) la dégradation accélérée des éléments ou la déstabilisation de l'infrastructure. Pour réduire ces risques, la gestion se fait à tous les stades de la vie d'une ligne : au moment de la conception (pour des lignes nouvelles ou sur des lignes existantes) et lors du cycle de vie, durant les opérations de maintenance et de surveillance, ainsi que durant l'exploitation de la ligne. Les méthodes de gestion des risques évoluent par des retours d'expérience réguliers (Figure I-55). La gestion des risques liés au ruissellement est donc une problématique multi-métiers. De ce fait, l'identification du processus global de gestion des risques (étapes, acteurs) est complexe. Cette section présente un panel non exhaustif de méthodes de gestion du ruissellement au niveau de la conception, de la maintenance, de la surveillance, de l'exploitation, et de la gestion des données. Ces méthodes s'appuient à la fois sur des référentiels internes à l'entreprise et sur des pratiques récurrentes parfois érigées en méthodes de références.

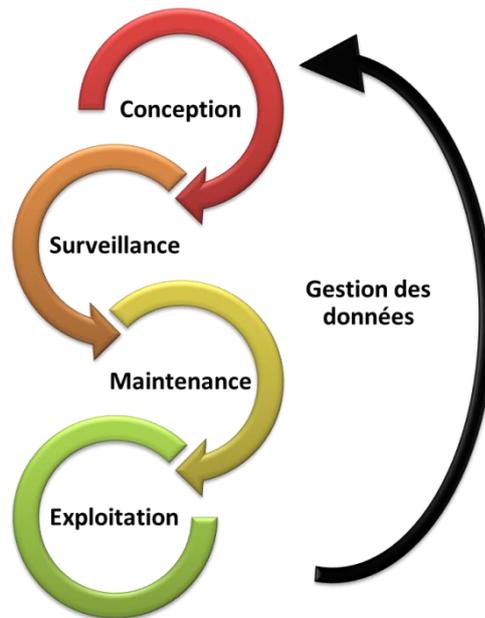


FIGURE I-55: LE PROCESSUS DE GESTION DES RISQUES LIES A L'EAU SUR L'INFRASTRUCTURE FERROVIAIRE FAIT INTERVENIR TOUTES LES ETAPES DE LA VIE D'UNE LIGNE ET REQUIERT UNE APPROCHE MULTI-METIER

#### 2.4.1. CONCEPTION

Concernant la conception de lignes nouvelles, les problématiques de ruissellement interviennent après le choix du tracé. Les principales contraintes pour le choix du tracé sont les zones de relief, les zones naturelles protégées, les zones urbaines, la desserte des gares, etc. Ensuite, sont pris en compte les écoulements pérennes et le réseau hydrographique intermittent via les cartes IGN. Puis, les informations locales et les expertises terrains permettent d'identifier les zones propices au ruissellement, afin de concevoir les ouvrages hydrauliques.

Pour les lignes existantes, il existe également des besoins de conception ou de régénération d'ouvrages hydrauliques. Ceci peut être dû à des changements dans l'environnement amont qui ont modifié les écoulements ou bien à une maintenance non adaptée de l'ouvrage qui nécessite une reconstruction. Les référentiels et les savoir-faire internes permettent de décider du type, de la position et de la dimension du dispositif hydraulique à mettre en place. Le choix du dispositif dépend de son débit capable par rapport aux volumes d'apport de l'environnement, de la surface qu'il occupe par rapport à la configuration locale, de la faisabilité de son installation et de sa maintenance, de son coût, etc. Les dispositifs doivent être homologués ou validés par l'entreprise. Dans le cas où des alternatives aux conceptions classiques doivent être trouvées, elles doivent faire l'objet d'une dérogation. Dans les faits, les ingénieurs doivent faire des compromis pour choisir la meilleure solution qui satisfera aux différentes contraintes de conception et environnementales.

##### 2.4.1.1. CONTRAINTES DE CONCEPTION

- Les contraintes peuvent être liées au choix de l'exutoire (un cours d'eau, une retenue, un réseau existant, un champ d'expansion de crue, etc.). Un exutoire trop éloigné engendre davantage de collecte des eaux pluviales et donc des volumes plus importants à gérer. La solution de se raccorder à un réseau d'assainissement existant est possible mais les rejets doivent aussi être limités pour ne pas surcharger les réseaux tiers.

- Les contraintes peuvent être liées au manque d'espace dans l'emprise ferroviaire pour installer les dispositifs adéquats. Notamment en zone urbaine où l'installation d'un bassin de rétention à ciel ouvert hors emprise est difficilement envisageable, ou bien dans le fond des déblais, en drainage longitudinal, où des tranchées étroites doivent souvent être installées à défaut de fossés drainants plus robustes.
- Les contraintes peuvent venir des travaux nécessaires à la mise en place des solutions choisies. Des travaux de terrassement risquent de déstabiliser la voie. Des interruptions ou limitations temporaires de vitesse durant les travaux peuvent avoir un impact financier élevé. C'est pourquoi les travaux ont souvent lieu la nuit, mais les dispositifs doivent pouvoir être installés dans le temps imparti et assurer pleinement leur fonction à la reprise des circulations.
- Les contraintes de maintenance doivent également être prises en compte. Les dispositifs robustes demandant moins d'entretien sont privilégiés. Les dispositifs difficiles d'accès, tels que les fossés en crête de déblai, les petits aqueducs sous les remblais, ou les dispositifs en dehors de l'emprise ferroviaire souffrent généralement de défaut d'entretien avec le temps, voire peuvent être oubliés.
- De plus, les eaux de ruissellement contiennent une part de matière en suspension non négligeable qui peut combler les dispositifs hydrauliques, réduisant significativement leur débit capable et donc leur efficacité. Les sédiments peuvent également se déposer dans le ballast lorsque les eaux traversent la plate-forme, par percolation ou submersion. Les grains de ballast ainsi salis perdent en cohésion et dégradent les propriétés mécaniques de la structure d'assise. A terme, ceci accélère le vieillissement de l'infrastructure et les capacités d'exploitation de la ligne.

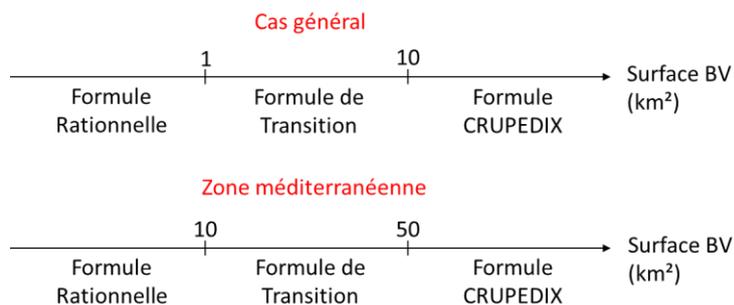
#### 2.4.1.2. CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES

En tant que maître d'ouvrage, SNCF doit respecter le code civil, le code de l'environnement et les réglementations en vigueur sur les territoires concernés par les projets, à savoir les objectifs de quantité et de qualité fixés par les SDAGE (Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux), PLU, etc. En ce qui concerne la gestion des eaux pluviales, les articles L214-1 à L214-6 du Code de l'Environnement précisent la nomenclature des opérations soumises à autorisation ou à déclaration. Les articles R214-1 et suivants précisent la procédure à suivre pour les demandes d'autorisation et de déclaration. La rubrique 2.1.5.0 est notamment relative aux rejets d'eaux pluviales dans les eaux douces superficielles, sur le sol ou dans le sous-sol. Ainsi, les projets dont la surface totale (surface des emprises ferroviaires plus surface des bassins versants dont les écoulements sont interceptés par l'emprise ferroviaire) est comprise entre 1 et 20 ha sont soumis à déclaration. Les projets dont la surface est supérieure ou égale à 20 ha sont soumis à autorisation. D'autres rubriques s'appliquent si le projet est en lien avec un cours d'eau. Ces réglementations s'appliquent également pour les travaux provisoires et les opérations d'entretiens. Pour tout projet soumis à autorisation ou à déclaration, la maîtrise d'ouvrage doit constituer des dossiers loi sur l'eau. L'instruction et le suivi des dossiers sont assurés par les Directions Départementales des Territoires – et de la Mer (DDT-M), en charge de la police de l'eau sur le territoire départemental. Les dossiers peuvent être assez conséquents à construire. Ils doivent comporter un résumé non technique du projet, la vérification de sa compatibilité avec le SDAGE et l'interaction éventuelle avec les zones Natura2000, jusqu'à 20 km. Pour les déclarations le temps d'instruction est d'environ 2 à 3 mois, pour les autorisations, il est généralement porté à 1 an. C'est pourquoi, ces procédures doivent être bien intégrées dans les phases amont des projets, voire une concertation préalable avec la police de l'eau peut

permettre de mieux cibler les procédures auxquelles les projets sont soumis. Ces réglementations visent à l'amélioration de la maîtrise de la ressource en eau, au niveau de sa qualité mais aussi au niveau des risques qu'elle peut engendrer. Ces textes encouragent finalement le développement de techniques alternatives permettant une gestion plus raisonnée de la ressource au plus proche de cycle de l'eau.

#### 2.4.1.3. CALCULS DES DEBITS RUISSELES

Le dimensionnement des dispositifs hydrauliques s'appuie également sur les référentiels internes à l'entreprise. Concernant les calculs de débits ruisselés, ils s'appuient principalement sur les recommandations faites par le Service d'Etudes Techniques des Routes et des Autoroutes (SETRA) dans le guide technique de l'assainissement routier (SETRA, 2006). Le choix de la période de retour pour laquelle l'ouvrage hydraulique devra être dimensionné est inscrit dans les référentiels internes à l'entreprise et dépend de l'enjeu de la ligne (périodes de retours considérées allant du décennal au centennal). Dans le cas des bassins versants jaugés, il est possible de faire des analyses statistiques des chroniques de débits pour identifier des périodes de retour de débits importants. Néanmoins, la quasi-totalité des petits bassins versants traversés par le réseau ferré ne sont pas jaugés. Pour estimer des débits de pointe, on utilise alors des formules empiriques ou semi-empiriques. Le choix de la formule dépend de la taille du bassin versant et de s'il se trouve en zone méditerranéenne ou non (Figure I-56). Dans le cas général, la formule Rationnelle (Thompson, 2007) est utilisée pour des bassins versants inférieurs au kilomètre carré, la formule dite de « Transition » jusqu'à 10 km<sup>2</sup> (SETRA, 2006), puis la formule CRUPEDIX (Ministère de l'Agriculture, 1980) pour les bassins les plus grands.



**FIGURE I-56: FORMULES DE CALCUL DE DEBITS UTILISES A SNCF SELON LES CRITERES DE SURFACE DE BASSIN VERSANT (BV) ET DE REGION (ADAPTE DU GUIDE DU SETRA, 2006)**

La difficulté se trouve aujourd'hui dans l'origine empirique des formules et des méthodes d'estimation des paramètres, tels que le coefficient de ruissellement. Les formules peuvent s'appliquer sur tous types de bassins versants mais les résultats n'apportent pas de garantie de fiabilité quant aux débits extrêmes. De plus, le ruissellement est ici approché avec la variable « débit » mais ce n'est pas la seule variable à prendre en compte pour la gestion du ruissellement. La difficulté est que ces formules n'apportent pas l'information quant à la venue possible de matières en suspension dans le ruissellement et du risque de dépôt dans le ballast ou sur les voies ou de comblement des ouvrages hydrauliques.

#### 2.4.2. SURVEILLANCE

Concernant la surveillance, des visites régulières sont effectuées sur les différents éléments de l'infrastructure par les services concernés. Des visites rapprochées peuvent se faire pour les ouvrages les plus à risque. L'objectif est d'éviter un incident pouvant impacter la sécurité des circulations ou des tiers ou pouvant impacter la régularité des circulations. La surveillance est aussi effectuée par les conducteurs de trains qui sont en charge de signaler tout désordre sur les voies et aux abords.

#### 2.4.2.1. SURVEILLANCE DES OUVRAGES EN TERRE ET HYDRAULIQUES

La surveillance des ouvrages en terre et hydrauliques est réalisée à l'occasion de diverses tournées de surveillance cycliques ou à thème. Elle doit permettre d'identifier une évolution de l'ouvrage ou de l'environnement, une dégradation ou des indices précurseurs d'une dégradation. Elle doit permettre également d'évaluer le niveau de risque et d'alerter si besoin, ainsi que de définir les actions de maintenance à entreprendre, sous la forme de préconisations, associées à un délai maximal de réalisation. La périodicité des visites pour chaque type d'ouvrage ainsi que les éléments à reporter sur les rapports de visites s'appuient sur les référentiels internes.

#### 2.4.2.2. SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT

Concernant l'environnement de la voie ferrée, la surveillance se fait depuis l'emprise ferroviaire. Une visite hors de l'emprise ferroviaire peut se faire si un besoin est identifié, mais n'a pas vocation à couvrir l'ensemble des phénomènes pouvant affecter la voie ferrée. Cette surveillance ne se substitue pas à la surveillance que doit assurer tout propriétaire riverain des emprises ferroviaires pour empêcher que des dommages ne s'y propagent. Si d'anciennes interventions ont été effectuées hors de l'emprise (mise en place de dispositifs, réalisation de confortements), leur surveillance se fait selon la convention effectuée lors de l'intervention. En cas d'absence de convention, la surveillance de ces installations relève des obligations de SNCF Réseau.

#### 2.4.2.3. LES TOURNEES INTEMPERIES

Il existe également un système de tournées intempéries, effectuées à pied, en voiture ou sur matériel roulant, sur certaines zones, lors de conditions météorologiques particulières. Chaque région liste les zones sensibles pour différents types d'aléas météorologiques (vent, pluie, gel), où les tournées sont déclenchées au dépassement de certains seuils. Pour l'aléa pluviométrique, les seuils dépendent des zones géographiques. La difficulté se trouve dans le nombre de sites à visiter par rapport aux agents disponibles et au temps nécessaire aux agents pour se rendre sur les sites. Certaines régions sont très vastes et les temps d'interventions peuvent dépasser les temps de détection d'un désordre avant le passage d'un train, pour les phénomènes à cinétique rapide. La difficulté se trouve également dans la sélection et la hiérarchisation des zones sensibles qui se base sur l'historique des incidents et les expertises des agents concernant l'état de l'ouvrage et les éléments de contexte du site. Une proportion non négligeable de désordres survient également sur des zones non identifiées comme sensibles. Il peut être nécessaire, dans certaines zones, d'affiner la sélection des sites ainsi que les seuils de déclenchement des tournées. Par ailleurs, les agents en charge des tournées de surveillance doivent vérifier que la situation ne présente pas de danger pour la circulation des trains. Les agents restent aux abords des voies et n'ont pas forcément les compétences hydrologiques pour estimer la gravité de certaines situations (fossé à la limite du débordement, eau ayant percolé le remblai, etc.) (Figure I-57). Parfois les agents n'ont pas l'information sur le type de vérifications à effectuer, qui se trouve parfois hors de l'emprise ferroviaire ou simplement en crête de déblai et donc non visibles depuis les abords des voies. Il y a besoin de fournir des recommandations plus précises sur les vérifications à effectuer. Il y aurait également une opportunité de mutualiser les efforts de surveillance en intégrant au processus des acteurs extérieurs à l'entreprise, étant davantage à proximité des zones sensibles, et peut-être ayant de meilleures connaissances des processus hydrologiques.



**FIGURE I-57: LES LAISSES DE CRUE ENTRE LES DEUX VOIES NE SERONT PAS FORCEMENT RAPPORTEES PAR LES AGENTS DE TOURNEES PUISQUE NE PRESENTANT PAS DE DANGER DIRECT POUR LES CIRCULATIONS MAIS SONT TEMOINS D'UN PASSAGE D'EAU SUR LA VOIE FERREE ET DONC D'UNE SITUATION DANGEUREUSE A UN CERTAIN MOMENT (DEPARTEMENT HERAULT, 2014).**

### 2.4.3. MAINTENANCE

#### 2.4.3.1. ENTRETIEN DU RESEAU HYDRAULIQUE

La maintenance courante des éléments de l'infrastructure est réalisée par les services de maintenance et de travaux de SNCF Réseau, via des entretiens réguliers dont les cycles sont fonctions des éléments et des caractéristiques de trafic de la ligne (référentiel interne IN2950). La maintenance peut être « préventive systématique », exécutée de façon cyclique sans contrôle préalable de l'état de l'installation. La surveillance fait partie de ce type de maintenance. Elle peut être « préventive conditionnelle », basée sur une surveillance du fonctionnement de l'élément ; ou encore « préventive prévisionnelle », en suivant les prévisions extrapolées des analyses. La maintenance peut être également corrective, en cas de défaillance. Les principes et l'organisation générale de la maintenance s'appuient sur les référentiels internes de l'entreprise. Il n'existe pas de plan de maintenance à proprement dit pour les dispositifs hydrauliques mais des entretiens réguliers sont effectués pour curer, vidanger et nettoyer les dispositifs. Au cours de la vie d'une ligne, des travaux de régénération peuvent être entrepris pour réaliser des aménagements palliatifs avec investissements, création ou remplacement du réseau hydraulique. Ces travaux de régénération peuvent être ponctuels ou sur de grands linéaires. En général les services de maintenance commandent aux services d'ingénierie une prestation consistant à déterminer la consistance des travaux de régénération, qui seront réalisés par des entreprises de travaux (internes ou externes), à l'issue de désordres. Les travaux de régénération peuvent aussi se faire de manière préventive sur les lignes à fort enjeu.

#### 2.4.3.2. LES DIAGNOSTICS DE LIGNES

Les diagnostics de ligne sont des missions commandées par les services de maintenance ou autres services du gestionnaire d'infrastructure (clients) aux services d'ingénierie. L'objectif d'un diagnostic de ligne est d'optimiser le plan de maintenance de la ligne, que ce soit au niveau des visites de surveillance ou des travaux de maintenance. Un diagnostic peut aussi se faire dans les phases d'initialisation d'un projet de régénération, dans le but de prioriser des zones par exemple. Un diagnostic de ligne peut se faire à l'échelle d'un tronçon, d'une ligne, d'une région. A l'échelle d'un site, le terme « expertise » est

privilegié. La mission « diagnostic de ligne » inclut deux phases principales (Figure I-58) : l'évaluation des risques, avec une évaluation de l'exposition de la voie ferrée à certains aléas naturels et une évaluation de la vulnérabilité de l'infrastructure ; et la réduction des risques avec l'émission de préconisation en termes de travaux, de maintenance ou de surveillance.

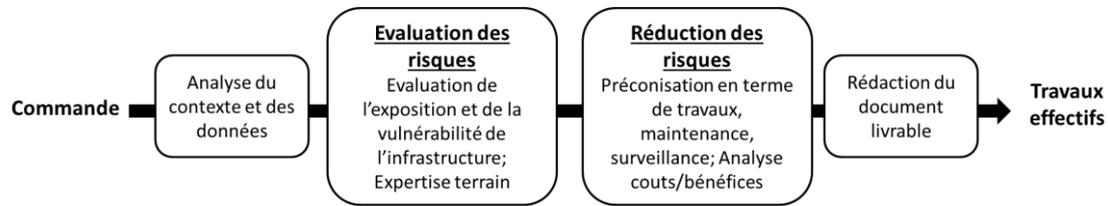


FIGURE I-58: PROCESSUS D'UN DIAGNOSTIC DE LIGNE (SOURCE: ADAPTE DE LAGADEC ET AL., SOUMIS EN 2017 A SAFETY SCIENCE)

Pour la phase « évaluation des risques », les objectifs et les contraintes varient d'une étude à l'autre, ce qui rend difficile l'identification d'une méthode générale. Lors de cette étape, il y a également l'identification des risques qui est discutée avec le client. C'est lui qui décide des risques que le diagnostic va couvrir et donc aussi ceux qui ne vont pas être étudiés. On peut néanmoins décrire succinctement les pratiques. Dans un premier temps, la zone d'étude (tronçon, ligne ou région) est divisée en sections d'étude. Il peut y avoir différentes façons de choisir les sections selon l'objectif du diagnostic (Figure I-59). Les sections peuvent suivre la décomposition en ouvrage en terre enveloppe (déblai, remblai, etc.) ; suivre la logique du réseau hydraulique, où un tronçon est délimité par deux points hauts sur le profil en long de la ligne ; ou encore suivre les limites topographiques de l'environnement. Ce dernier choix est peu retenu du fait que les études se focalisent généralement sur l'emprise ferroviaire. Le découpage en sections d'étude nécessite d'effectuer des visites terrain. En effet, les patrimoines ouvrages en terre et ouvrages hydrauliques ne sont pas toujours bien connus ou localisés. Une fois que les sections d'étude sont identifiées, une priorisation des sections les plus à risques est effectuée, sur la base d'une analyse détaillée de l'aléa et de la vulnérabilité. Cette analyse détaillée se fait généralement via des expertises terrain et en étudiant l'historique des désordres sur la section. Concernant l'aléa hydrologique, l'expert se base généralement sur les données disponibles, telles que des données pluviométriques de Météo-France, des données de susceptibilité aux glissements ou aux coulées du BRGM, des cartes de zones inondables de types Atlas des Zones Inondables (AZI) ou Plan de Prévention des Risques (PPR) si disponible, etc. Pour l'aléa ruissellement, il n'existe pas, à l'heure actuelle, d'information disponible à l'échelle du Réseau Ferré National (RFN) pour quantifier son exposition. L'expertise se base donc principalement sur les visites terrain et l'historique. Elle se fait au cas par cas, bien que le ruissellement soit un aléa majeur pour le RFN. Concernant l'évaluation de la vulnérabilité, le savoir-faire interne à l'entreprise permet d'évaluer l'état de fonctionnement des éléments de la voie ferrée, ainsi que les configurations à risque, tels que les passages à niveau, les têtes de tunnel ou les déblais longs. Mais là encore, il n'existe pas de méthode générale pour quantifier la vulnérabilité de la voie ferrée face à l'aléa ruissellement.

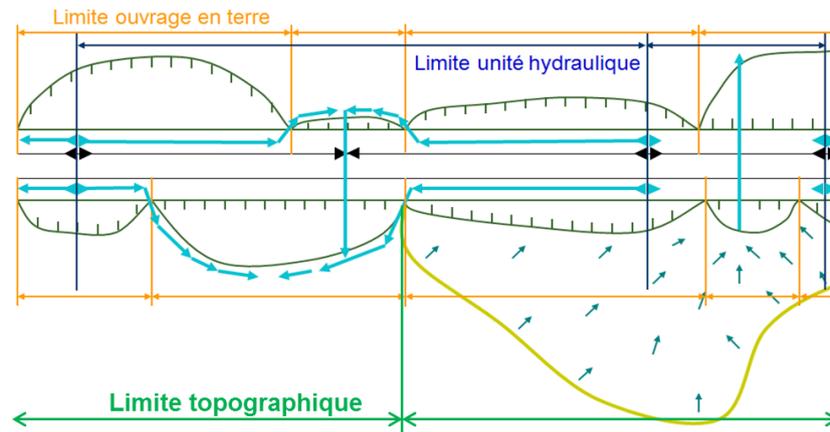


FIGURE I-59: DIFFERENTES FAÇONS DE DECOUPER LA LIGNE EN TRONÇONS D'ETUDES: LE DECOUPAGE SELON LES OUVRAGES EN TERRE, SELON LE RESEAU HYDRAULIQUE OU SELON LES LIMITES TOPOGRAPHIQUES (SOURCE: DIAGNOSTIC DE LIGNE BAYONNE-IRUN).

La phase « réduction des risques » consiste à donner des préconisations assorties de délais d’urgence, sur les solutions à mettre en œuvre pour réduire les risques, en termes de travaux, de maintenance et/ou de surveillance. Cela implique de faire des compromis entre le coût et le bénéfice tout en prenant en compte l’objectif de la commande (réduction du nombre d’incidents, augmentation de la performance de la ligne, etc.) et la faisabilité (plages de travaux, disponibilité du personnel ou du matériel pour l’entretien et la surveillance, etc.). La réalisation d’une analyse coût/bénéfice est souvent indispensable pour convaincre le client de la nécessité de certaines opérations. Lors de cette étape, des discussions avec le client en amont du livrable permettent de bien estimer l’acceptabilité ou non du risque. Si un risque est acceptable c’est toujours sous conditions, par exemple d’une surveillance particulière.

Dans l’étude de Pollet et al. (2014), il est également proposé d’utiliser la méthode nœud papillon pour réaliser des diagnostics de ligne. Après avoir identifié au préalable les sections exposées à un aléa sur un tronçon de ligne, on réalise une analyse nœud papillon pour chaque section. Le nœud papillon consiste en la représentation schématique d’un arbre des causes et d’un arbre des défaillances de part et d’autre d’un évènement critique redouté (Figure I-60). L’arbre des causes aide à identifier les facteurs de prédisposition et les facteurs de rupture. L’arbre des défaillances aide à identifier les enjeux sur le système ferroviaire et les impacts hors du cadre ferroviaire. A l’issue de cet arbre, quatre barrières (les barrières de prévention, de protection, de détection et de réduction) sont identifiées et choisies en concertation avec le gestionnaire d’infrastructure. Le nœud papillon est donc un outil d’aide à la réalisation des deux phases d’évaluation et de réduction des risques. Cette vision schématique est aussi un support de discussion entre les différents acteurs (experts, décideurs, etc.) pour mieux évaluer les coûts et les impacts des solutions envisagées. Le nœud papillon permet d’aller encore plus loin en offrant une vision système, c’est-à-dire en anticipant les conséquences sur l’ensemble du système ferroviaire ainsi que sur les autres systèmes qui l’entourent.

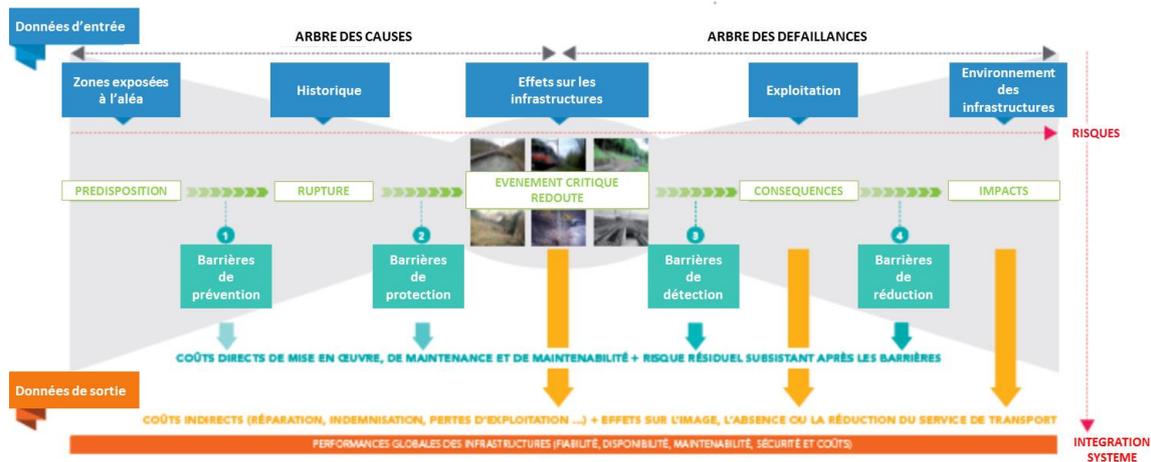


FIGURE I-60: PRINCIPE DE L'ANALYSE NOEUD PAPILLON (SOURCE: POLLET ET AL., 2014)

En résumé, le résultat d'un diagnostic s'appuie sur : l'évaluation des risques, l'analyse coûts/bénéfices, l'analyse des difficultés de réalisation et de maintenance et l'acceptabilité du risque. La décision repose sur ces différentes analyses, qui, de fait de leur croisement, ne transparaissent pas de façon indépendante dans les conclusions finales. L'expert en charge d'un diagnostic de risque doit être polyvalent, ne pas seulement avoir une expertise dans un domaine mais aussi avoir une bonne vision des enjeux ferroviaires généraux et spécifiques de la ligne étudiée. L'évaluation de l'aléa n'est donc pas le seul critère pour mettre en œuvre des actions sur une zone, mais une meilleure connaissance de sa répartition sur la ligne permettrait d'optimiser et de pérenniser les actions. Des outils d'aide à l'évaluation de l'aléa permettraient également d'appuyer la décision de l'expert et de mieux discuter le choix des solutions avec le client.

#### 2.4.4. EXPLOITATION

##### 2.4.4.1. REGULATION DES CIRCULATIONS

La phase d'exploitation de la ligne est également une phase du cycle de vie d'une ligne où les risques liés au ruissellement doivent être maîtrisés. Lorsqu'un désordre est signalé, que ce soit par un agent, un conducteur ou un tiers, et s'il y a un risque pour la sécurité, une Interruption Temporaire de Circulation (ITC) est mise en place. Dans les autres cas, une Limitation Temporaire de Vitesse (LTV) peut être instaurée ou une consigne de rouler au pas peut être donnée.

##### 2.4.4.2. VISITES POST-INCIDENT

Suite au signalement d'un désordre, des agents des services de maintenance se rendent sur la zone impactée, souvent accompagnés d'agents de l'ingénierie. Des mesures immédiates sont effectuées pour sécuriser la zone. Puis, une expertise est réalisée pour estimer les travaux de remise en état et de réduction du risque à court et à long terme. Concernant le diagnostic des causes, il s'effectue via une expertise terrain. Cependant même lorsque le désordre est lié à un aléa hydrologique, l'agent de l'ingénierie n'est pas toujours hydrologue ou hydraulicien, et les causes peuvent être difficiles à identifier. De plus, les agents sur le terrain ne vont pas toujours hors emprise ferroviaire ou assez loin en amont pour bien identifier l'origine du désordre. Une expertise hydraulique peut être préconisée pour les cas complexes. Néanmoins, il n'existe pas de méthode générale pour effectuer des retours d'expérience post-incidents.

#### 2.4.5. GESTION DES DONNEES SUR LES INCIDENTS ET LE PATRIMOINE

Pour de nombreux cas, la gestion des risques liés au ruissellement nécessite des études de l'historique des incidents et/ou des travaux sur une zone. Il est donc essentiel de bien conserver les documents et de faciliter leur recherche. SNCF a mis en œuvre différents moyens pour faciliter les études historiques.

##### 2.4.5.1. FONCTIONNEMENT DES ARCHIVES A SNCF

Le Service Archives Documentation (SARDO) est le service national des archives de SNCF situé à proximité du siège. Il existe également des correspondants archives dans différents services. Les archives fonctionnent en trois âges : les archives courantes, intermédiaires et historiques. Les archives courantes sont classées au niveau local, ce sont des dossiers en cours ou encore sensibles. Elles se trouvent soit dans des armoires dans les bureaux, soit dans des espaces dédiés qui restent à proximité des bureaux. Pour les bureaux de la direction centrale et de la région parisienne, les archives intermédiaires sont rassemblées dans un même centre en région parisienne et sont conservées jusqu'à la fin de la durée d'utilité administrative (DUA), c'est à dire depuis 1960 environ. Les documents des archives intermédiaires sont référencés dans un logiciel qui permet une recherche par mots clés, parmi les mots contenus dans la description des dossiers. Ce logiciel « MAÏS » autorise un accès libre, via le site internet<sup>2</sup>, pour un nombre restreint de documents. Pour les autres régions, les archives intermédiaires restent dans les services concernés. Ces archives ne sont pas référencées dans le logiciel précédemment cité, mais certains services possèdent des bases de données des archives intermédiaires. Pour les régions PACA, Languedoc-Roussillon et Midi-Pyrénées, les archives intermédiaires se trouvent au centre des archives multirégionales de Béziers mais le logiciel ne s'applique pas non plus. Les archives historiques ou définitives, c'est-à-dire les dossiers qui présentent un intérêt administratif permanent, un intérêt stratégique ou historique, sont rassemblés au Centre National des Archives Historiques de SNCF au Mans (Figure I-61). On y trouve des dossiers datant de la création de SNCF, mais également datant des compagnies des chemins de fer antérieures à SNCF. La recherche d'informations se fait par le logiciel d'archive. Le logiciel permet également de retracer le parcours des archives à travers les âges.



**FIGURE I-61: RAYONS D'ARCHIVES AU CENTRE NATIONAL DES ARCHIVES HISTORIQUES DU MANS**

##### 2.4.5.2. LES BASES DE DONNEES NUMERIQUES

En plus des données se trouvant en archives, les informations sur le patrimoine et les incidents sont classés dans des bases de données numériques. Les bases de données numériques existent depuis le milieu des années 1990, elles ne contiennent donc que l'information récente ainsi que quelques informations historiques majeures. Il existe de nombreuses bases de données selon les services et leurs besoins. Il y a actuellement des travaux mis en œuvre pour capitaliser toutes ces informations via une

---

<sup>2</sup> [http://www.archives-historiques.sncf.fr/spark\\_archives/spark/login](http://www.archives-historiques.sncf.fr/spark_archives/spark/login)

plate-forme unique. Les bases de données susceptibles de contenir des informations relatives au ruissellement sont présentées ci-dessous.

#### LA BASE DE DONNEES SUR LES OUVRAGES EN TERRE

La base de données sur les ouvrages en terre contient à la fois des informations sur les désordres et sur les visites régulières de surveillance. Il y a des données sur tous les ouvrages qui ont présenté une sensibilité d'une origine quelconque (géotechnique, hydrologique, anthropique). Les désordres y sont classés par typologie. Bien qu'il n'y ait pas de typologie « ruissellement », on peut néanmoins regrouper plusieurs catégories d'origine liée à l'eau, par exemple, inondation, érosion, glissement, etc. Les descriptions des désordres sont assez brèves mais renvoient aux comptes rendus de visites. La précision dans la localisation n'est pas toujours bien renseignée. Souvent un seul repère kilométrique est fourni bien que le désordre puisse être étendu sur plusieurs dizaines voire centaines de mètres. Parfois les kilomètres sont arrondis. Pour géolocaliser le désordre il faut donc se référer aux documents complémentaires. Les désordres sont complétés dans la base par les agents, il y a donc une certaine subjectivité pour la brève description de l'information notamment sur l'origine hydrologique ou non. Il est important de noter que les ouvrages en terre qui n'ont jamais connu de désordre ne sont souvent pas référencés, de telle façon qu'il n'est pas simple de connaître le profil transversal de la ligne (remblai, déblai, etc.) en tout point du réseau.

#### LA BASE DE DONNEES SUR LES OUVRAGES D'ART

La base de données sur les ouvrages d'art référence la localisation et le type de tous les ouvrages d'art (tunnel, pont, etc.). C'est une information intéressante par rapport au phénomène de ruissellement, car la présence d'un ouvrage de traversée sous voie est souvent le témoin d'un besoin de faire transiter les écoulements. Tout comme la base des ouvrages en terre, on y trouve les comptes rendus de visite de surveillance, bien qu'ils soient focalisés sur les aspects génie civil plutôt que sur un éventuel impact hydraulique.

#### LA BASE DE DONNEES SUR LES PERTURBATIONS DE CIRCULATION DES TRAINS

La base de données sur les perturbations de circulation des trains référence uniquement les désordres ayant eu un impact sur la régularité des circulations. Il peut être difficile dans cette base de donnée de retracer l'origine de la perturbation (liée à l'eau ou non) puisqu'elle est orientée vers un usage opérationnel en temps réel. De plus, de nombreux impacts du ruissellement peuvent impacter un élément de l'infrastructure sans perturber les circulations.

#### LA BASE DE DONNEES DES INCIDENTS GRAVES

La base de données des incidents graves recense les incidents qui ont mis en cause ou auraient pu mettre en cause la sécurité des personnes. Peu d'incidents recensés dans cette base ne sont pas déjà recensés dans les autres, néanmoins, c'est un bon outil complémentaire puisque les faits y sont analysés, les causes recherchées, on y trouve des photos et des références aux études réalisées par la suite.

#### LE REFERENCEMENT DU PATRIMOINE HYDRAULIQUE

Les informations concernant le patrimoine hydraulique sont réparties de manière implicite dans les autres domaines du patrimoine ferroviaire, la voie, les ouvrages en terre (OT) et les ouvrages d'art (OA). Pour effectuer des recherches sur le patrimoine hydraulique, il faut donc d'abord cibler un tronçon, un OT, un OA, chercher les études produites sur la zone pour y trouver des descriptions plus précises sur les caractéristiques de la voie et les dispositifs hydrauliques. Il existe néanmoins une base de données très récente dont l'objectif est de recenser le patrimoine hydraulique. Elle n'a pu être complétée que sur quelques lignes jusqu'à présent, telles que des LGV ou des lignes qui ont fait l'objet d'analyses récentes.

## LES SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

Il existe également à disposition des agents, des systèmes d'information géographique internes à l'entreprise, conçus pour différents usages et objectifs (référencement des zones de travaux, aide à la maîtrise de la végétation, etc.). Ils permettent aux agents de se repérer sur le réseau (via les numéros de ligne et les points kilométriques) et par rapport à la géographie autour du réseau ferré. Il existe de nombreuses couches d'informations géographiques pouvant être exportées sur logiciel SIG, telles que la position des passages à niveau, des ponts routes et ponts rails, les tunnels, les gares, etc.

### 2.5. LIMITES ACTUELLES

Pour conclure, la voie ferrée, en temps qu'infrastructure extérieure, est particulièrement exposée à l'aléa ruissellement. Ses contraintes de conception (profil en long, ouvrages en terre, etc.) font qu'elle intercepte et redirige les écoulements. Le RFN est réparti sur tous types de territoires et entrecoupe de nombreux petits bassins versants sensibles au ruissellement. Les ouvrages en terre meuble, le ballast, sont autant d'éléments de l'infrastructure vulnérables face au ruissellement. Un réseau hydraulique est mis en place pour protéger l'infrastructure et permettre une bonne maîtrise des eaux pluviales, néanmoins, il peut être complexe à concevoir et difficile à maintenir. Le ruissellement se caractérise sur les voies ferrées par des inondations de plate-forme, des coulées de boue et des glissements avec des apports de matériaux en voie, de l'érosion et du ravinement avec un risque de déstabilisation de la plate-forme.

Bien qu'essentielle, la gestion des risques liés au ruissellement est une problématique complexe. Elle doit se penser à tous les stades de vie d'une ligne, de la conception à l'exploitation en passant par la maintenance et la surveillance. Il existe peu de méthode de référence pour aider à la gestion des risques liés au ruissellement, c'est-à-dire pour savoir où le ruissellement est susceptible d'impacter la voie et comment réduire les risques. L'identification des zones susceptibles d'être impactées repose actuellement sur l'expertise terrain et l'étude des données historiques. Les difficultés se trouvent dans la complexité du phénomène ruissellement qui se produit sur tous types de territoires, en dehors des rivières, qui n'est pas lié seulement à la topographie mais à de nombreux autres facteurs difficiles à identifier sur le terrain et dans les temps impartis. Il n'existe pas de définition précise de l'aléa ruissellement et des effets induits sur l'infrastructure. Ceci engendre des problèmes de qualification dans les rapports ou dans les bases de données et une difficulté de communication entre les acteurs. L'absence de cartes de référence d'aléa ruissellement, contrairement aux cartes de débordement de cours d'eau, est également un frein à l'amélioration de la gestion des risques liés au ruissellement.

La réduction des risques nécessite l'adaptation ou la conception d'ouvrage de protection, ainsi que l'émission de préconisations en termes de maintenance et de surveillance. Cependant, les méthodes actuelles d'estimation de débits ruisselés sont empiriques et ne donnent pas de garanties sur les bassins versants non jaugés. De plus, la boue et les matériaux transportés par les eaux de ruissellement ne peuvent être gérés avec les techniques classiques. Il est également difficile de définir des cycles d'entretien des dispositifs hydrauliques qui peuvent être rapidement comblés. Les contraintes environnementales sur les débits rejetés nécessitent également de gérer les eaux pluviales au plus près du cycle de l'eau. Mais, il manque encore des méthodes pour pouvoir installer des dispositifs alternatifs aux endroits stratégiques, souvent hors de l'emprise ferroviaire.

L'identification puis l'optimisation de ce processus de gestion des risques est un travail de long terme et nécessite des adaptations dans les pratiques et les concepts. Les modifications dans ce processus doivent être motivées par des gains de temps, d'argent ou d'image. Il est donc important de pouvoir qualifier ou quantifier les améliorations. Cependant, il est encore difficile d'estimer l'impact économique direct et

indirect du ruissellement et donc d'investir du temps et de l'argent pour une meilleure protection et une meilleure prévention. Le travail de réorganisation et l'évolution des méthodes est plus complexe et plus long que pour des investissements palliatifs et des solutions curatives. De plus, l'évolution de la réglementation oblige l'entreprise à avancer dans ces domaines, avec notamment la création d'un Plan de Protection Contre les Inondations (PPCI) qui est imposé aux gestionnaires d'établissement ayant une mission de service public situés en zone inondable. A l'échelle de SNCF, c'est la Sûreté Ferroviaire (EPIC de tête) qui est chargée de décliner dans l'entreprise les plans gouvernementaux, tels que Vigipirate ou la gestion du risque inondation.



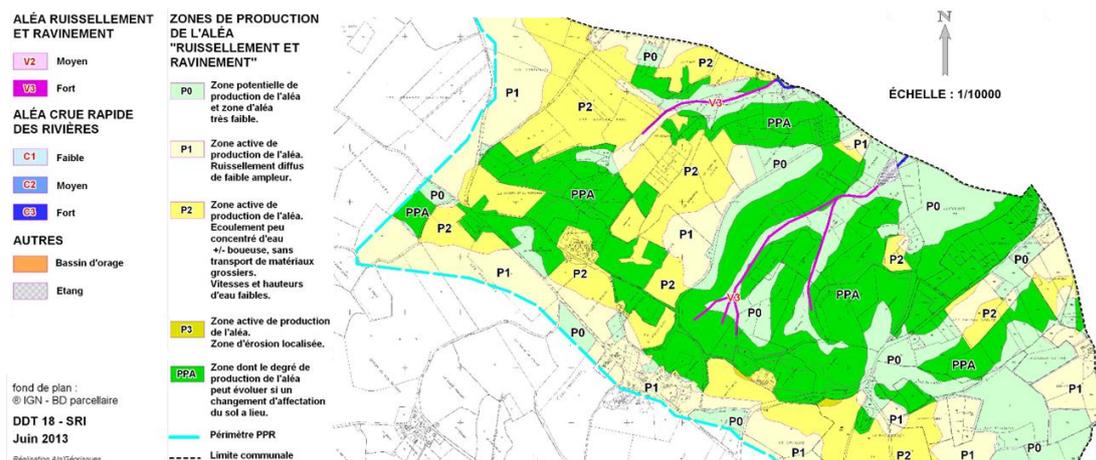
## CHAPITRE 3 : LA CARTOGRAPHIE DU RUISSELLEMENT

### 3.1. ETAT DE L'ART DES METHODES DE CARTOGRAPHIE DU RUISSELLEMENT

La cartographie des aléas naturels est une information critique pour la gestion des risques. Les cartes peuvent servir pour l'aménagement des territoires, pour choisir des méthodes de gestion adaptées aux phénomènes et pour mettre en place des actions aux emplacements stratégiques (Saint-Marc, 2017). Concernant l'aléa inondation par débordement de cours d'eau, de nombreuses cartes sont disponibles, telles que les Atlas des Zones Inondables (AZI), les Cartographies Informatives des Zones Inondables (CIZI), ou les cartes des Plus Hautes Eaux Connues (PHEC) à l'échelle de la France. Il existe également, à l'échelle des collectivités, les Plans de Prévention des Risques Inondation (PPRI). Les débordements de cours d'eau sont plus aisés à étudier et davantage de données sont disponibles pour modéliser le phénomène. En revanche, l'aléa ruissellement est plus complexe à étudier car il peut se produire éloigné de tout cours d'eau et sur tous types de territoires. Il est généré par la pluie mais de multiples facteurs influencent le phénomène, le réduisant ou l'aggravant. Il existe différentes méthodes de cartographie du ruissellement, développées pour différents contextes et différents objectifs. Lors de la création de la méthode IRIP (Indicateur de Ruissellement Intense Pluvial), une revue bibliographique des méthodes de cartographie a été réalisée par Dehotin et Breil (2011a). Jaillot et al. (2012) et Poulard et Breil (2012) ont également réalisé une revue bibliographique des exemples français et européens de méthodes de cartographie de ruissellement dans le cadre de la directive inondation. Poulard et Breil (2012) avaient pour ambition de faire un état de l'art global, mais en raison de la rareté des cas d'étude et des différents contextes physiques, la bibliographie s'est très vite recentrée sur l'Europe. Cette section reprend en partie ces rapports. Les méthodes de cartographies sont présentées selon quatre types d'approches : naturaliste, topographique, par combinaison d'indicateurs et par modélisation physique. Trois méthodes sont davantage détaillées pour illustrer ces types d'approches : EXZECO, le modèle de l'INRA et RuiCells.

#### 3.1.1. L'APPROCHE NATURALISTE

De nombreux Plan de Prévention des Risques (PPR) ruissellement utilisent des approches naturalistes pour réaliser leurs cartes. Les cartes sont basées sur une expertise locale, en croisant des observations terrain, des études hydro-géo-morphologiques et des données historiques (archives, témoignages, etc.). Des cartes préliminaires sont générées, puis des allers-retours sur le terrain permettent de les affiner (Marty et Thevenet, 2006). Jaillot et al. (2012) montrent que la majeure partie des zonages PPR Ruissellement en France utilise des approches naturalistes. Plusieurs exemples sont présentés tels que le PPR de la commune de Château-Thierry (Aisne), le PPR de la commune d'Assigny (Cher) (Figure I-62) ou le PPR de la commune d'Avallon (Yonne).



**FIGURE I-62: PLAN DE PREVENTION DES RISQUES RUISSÈLEMENT DE LA COMMUNE ASSIGNY (CHER) EFFECTUEE PAR LE BUREAU D'ETUDE ALP'GEORISQUES PAR APPROCHE NATURALISTE (SOURCE: ADAPTEE DE LA CARTE DES ALEAS DE LA COMMUNE D'ASSIGNY<sup>3</sup>)**

L'avantage de cette méthode est que les cartes obtenues sont assez précises et souvent cohérentes avec la réalité. L'inconvénient est la difficulté de répétabilité de la méthode, la difficulté pour l'application à de grandes surfaces et à des terrains peu connus ou difficiles d'accès. De plus, l'étude produite peut contenir de la subjectivité (focus sur les zones à enjeux et risques non anticipés pour d'éventuels nouveaux enjeux) et différentes zones sont difficilement comparables (les représentations cartographiques et les variables descriptives sont hétérogènes). Pour aider à la mise en place de ces PPR, l'état français propose une méthodologie pour cartographier l'aléa inondation (dont l'inondation par ruissellement pluvial urbain), dans un guide accessible en ligne (Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, 1999). Ce guide conseille la démarche naturaliste pour cartographier l'aléa. Il met néanmoins en lumière la complémentarité de l'hydrogéomorphologie et de la modélisation hydraulique.

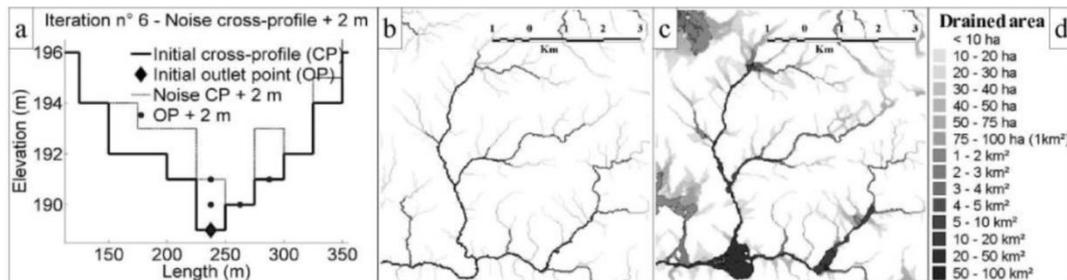
### 3.1.2. L'APPROCHE TOPOGRAPHIQUE

Les approches topographiques ont l'avantage d'être simples et nécessitent peu de données d'entrée, mais elles se focalisent davantage sur l'accumulation des eaux de ruissellement dans les talwegs que sur les dynamiques en versant. Elles ne prennent pas en compte les autres facteurs (type de sol, occupation du sol, géologie) qui diminuent ou amplifient le phénomène. La méthode EXZECO (Pons et al., 2010a, 2010b) peut être citée en exemple, ainsi que certains algorithmes de traitement de données topographiques disponibles via des logiciels SIG, permettant à tout utilisateur de faire des analyses plus ou moins approfondies sur des zones restreintes.

EXZECO, pour Extraction des Zones d'ÉCOulement, est un algorithme développé par le Cerema Méditerranée et industrialisé depuis l'année 2010 (Pons et al., 2010a, 2010b). La méthode est basée sur l'analyse automatique de la topographie à partir de traitements SIG sur des Modèles Numériques de Terrain (MNT). EXZECO utilise l'algorithme D8 disponible sur les logiciels SIG, qui permet, en fonction de la valeur d'altitude des pixels du MNT, de définir pour chacun d'entre eux une direction d'écoulement parmi les 8 possibles, les 8 pixels autour. Un seuil minimum de surface drainée est choisi pour identifier les zones d'écoulements représentées par les points. Le principe est ensuite de bruite aléatoirement le MNT sur l'altitude, avec une valeur prédéfinie. Le bruitage est réitéré et à chaque itération, l'extraction des zones d'écoulement (via l'algorithme D8 et le seuil de surface drainée) est appliqué sur un MNT bruité

<sup>3</sup> Cartes des aléas et notice de présentation disponible sur le site : <http://www.cher.gouv.fr/>

différemment. Le bruitage est réitéré un nombre de fois prédéfinie. Finalement, EXZECO ne requiert qu'une donnée d'entrée, un MNT, et trois paramètres : la hauteur de bruitage, la surface drainée minimale et le nombre d'itérations. La carte ainsi obtenue représente les zones d'écoulements pour différents seuils de surface drainée. Plus la surface drainée est importante, plus la zone est foncée, signifiant que la zone est potentiellement inondable par ruissellement (Figure I-63).



**FIGURE I-63: ILLUSTRATION D'EXZECO, (A) UN PROFIL EN TRAVERS AVEC UNE ITERATION A +2M ET LA DETECTION DE DIFFERENTS POINTS BAS, (B) ET (C) DEUX CARTES FINALES D'EXZECO, POUR 1 ET 1000 ITERATIONS SUR LA ZONE D'AIX-EN-PROVENCE, (D) LA LEGENDE DES CARTES (SOURCE: PONS ET AL., 2010A)**

La méthode fait quelques exceptions pour les zones plates et larges, notamment en tête de bassin et pour les zones endoréiques. Bien que la méthode requière d'importantes ressources de calcul, une carte a pu être réalisée sur la France entière et a été ajoutée à l'Enveloppe Approximative des Inondations Potentielles pour les cours d'eau (EAIPce). L'atout de cette méthode est qu'elle puisse être appliquée avec un grand rendement et elle est disponible via une application web. Néanmoins, bien que des travaux soient en cours pour intégrer l'hydrologie locale, cette méthode ne prend pas en compte d'autres facteurs influençant le phénomène, tels que les propriétés du sol ou l'occupation du sol.

### 3.1.3. L'APPROCHE PAR CROISEMENT D'INDICATEURS

L'approche par croisement d'indicateurs consiste à croiser des données ne représentant pas nécessairement le même type d'information (de fond ou d'unité différente), afin de combiner des effets et faire ressortir des zones plus ou moins sensibles. Ce type d'approche a l'avantage de pouvoir prendre en compte de multiples facteurs et est souvent plus accessible à la compréhension et à la mise en œuvre. Les facteurs les plus récurrents dans ce type de modèle sont la topographie, l'occupation du sol, le type de sol ainsi qu'une pluie de référence, la combinaison de ces facteurs variant selon les auteurs. On peut citer par exemple le modèle de l'INRA pour la cartographie de l'aléa érosion à l'échelle nationale (présenté dans la section suivante), développé par (Cerdan et al., 2006) pour être appliqué à l'échelle départementale ; le modèle SCALES (Le Gouée et al., 2010) qui se focalise sur les parcelles agricoles et qui prend en compte des paramètres tels que les pratiques culturales ou les saisons. Le modèle ERRUISSOL développé à la faculté de Gembloux et à l'université de Liège (Wallonie) (Dautrebande et al., 2007; Demarcin et al., 2009). Poulard et Breil (2012) proposent de distinguer les zones de ruissellement diffus, les zones de ruissellement concentré et les zones d'érosion. Ces modèles nécessitent des données précises, souvent acquises par expertise, et se focalisent sur le processus d'érosion des sols, alors que pour des besoins de gestion du ruissellement il est important de disposer d'informations telles que les axes d'écoulement par exemple.

Piney (2009) fait une comparaison de ces trois modèles de ruissellement et d'érosion et conclut que le modèle ERRUISSOL a l'avantage d'être simple à mettre en œuvre et offre la possibilité d'une complexification croissante. Le modèle de l'INRA repose en grande partie sur les données de sol encore

disponibles de façon très hétérogène. Cette comparaison rappelle également, que l'atout d'un modèle est d'être robuste et simple, que les tests d'application et d'évaluation doivent rester sur des bassins inférieurs à 100 km<sup>2</sup>, et que les zones les plus dangereuses sont les talwegs et espaces de concentration du ruissellement, que les algorithmes des SIG peuvent déjà détecter efficacement. Il recommande pour la détection des axes de concentration l'utilisation de l'indice d'efficacité (Douvinet et al., 2008) et de l'indice topographique (Beven et Kirkby, 1979).

Le modèle de l'INRA a été proposé au début des années 2000 (Le Bissonais et al., 2002) pour cartographier la sensibilité des sols à l'érosion. Il se base sur une méthode de croisement de type « arbre de décision ». Les indicateurs pris en compte, dans l'ordre d'apparition de l'arbre, sont : l'occupation du sol, la propension à la battance, la pente et la propension à l'érodabilité. L'ordre d'apparition des indicateurs dans l'arbre a été choisi pour que l'indicateur pouvant être influencé par l'activité humaine soit en premier. L'arbre de décision est différent après le premier indicateur : selon le type d'occupation du sol, les indicateurs suivants ne sont pas pondérés de la même façon. La combinaison de ces quatre premiers indicateurs donne une sensibilité potentielle « agro-pédo-géomorphologique » sur 4 niveaux (très faible, faible, moyen, fort). Le choix du niveau de sensibilité a été choisi via une étude bibliographique, des expérimentations terrain et des concertations d'experts. Ensuite, ce premier score est combiné avec un indicateur saisonnier d'érosivité des pluies, en 5 classes, donnant ainsi un niveau d'aléa érosion saisonnier. La combinaison se fait de la façon suivante : si l'érosivité est égale à 3, le niveau d'aléa reste le niveau de sensibilité ; s'il est supérieur à 3, le niveau d'aléa est égal au niveau de sensibilité plus 1 ; s'il est inférieur à 3, le niveau d'aléa est égal au niveau de sensibilité moins 1. Les différents critères de l'arbre de décisions sont présentés Figure I-64 pour l'occupation du sol de type « terre agricole ». L'aléa érosion final est sur cinq niveaux (Figure I-65).

Land use	Crusting	Slope	Erodibility	Erosion risk for the five rainfall erosivity classes				
				1	2	3	4	5
Arable land	Null	0–10%	*	1	1	1	1	2
		> 10–30%	*	1	1	2	2	3
		> 30%	Low/Medium High	1 2	1 2	2 3	2 3	3 4
	Low	0–2%	*	1	1	1	1	2
		> 2–5%	*	1	2	2	2	3
		> 5–10%	Low/Medium High	2 2	2 3	3 4	3 4	4 5
		> 10%	Low/Medium High	2 2	2 3	3 4	4 4	4 5
		Medium	0–2%	*	1	1	2	2
	High	> 2–5%	*	1	2	2	3	4
		> 5–10%	*	2	3	3	4	5
		> 10%	*	3	4	4	5	5
		0–1%	*	1	1	2	3	3
		> 1–2%	*	2	3	3	4	5
	> 2%	*	3	4	4	5	5	

FIGURE I-64: EXTRAIT DE L'ARBRE DE DECISION POUR L'OCCUPATION DES SOLS DE TYPE 'TERRE AGRICOLE' (SOURCE: LE BISSONNAIS ET AL., 2001)

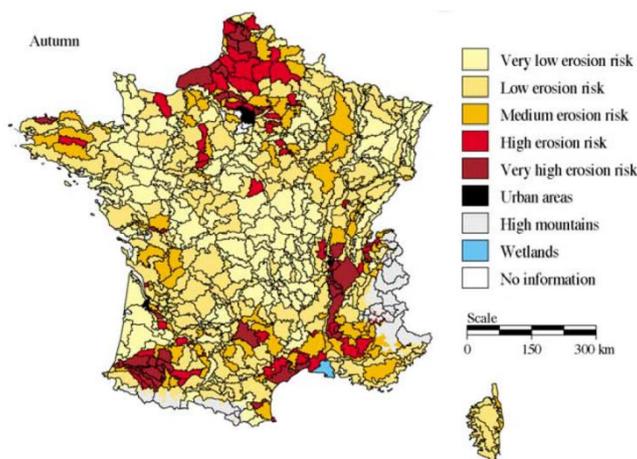


FIGURE I-65: CARTE D'ALEA EROSION INTEGREE PAR PETITES REGIONS AGRICOLES POUR LA SAISON AUTUMNE (SOURCE: LE BISSONNAIS ET AL., 2001)

L'avantage de cette méthode est qu'elle fait intervenir peu d'indicateurs. Elle est applicable à grande échelle, des cartes à l'échelle de la France ont été produites. Néanmoins, le choix des niveaux repose essentiellement sur l'expertise, ce qui peut être complexe pour des contextes climatiques ou géomorphologiques particuliers.

#### 3.1.4. L'APPROCHE PAR MODELISATION PHYSIQUE

Les approches par modélisation représentent les phénomènes via des équations et mettent en œuvre des algorithmes pour résoudre les équations en chaque point d'un maillage plus ou moins précis de la zone d'étude. Ces types de modèles doivent néanmoins faire l'objet de calibration, requièrent souvent beaucoup de données d'entrée et sont également coûteux ou non disponibles pour des besoins opérationnels. Pour la cartographie du ruissellement par modélisation physique on peut citer de nombreux modèles tels que ANSWER (Beasley et al., 1980), KINEROS (Smith et al., 1995; Woolhiser et al., 1990), LISEM (DeRoo et al., 1996), RUSLE (Dabney et al., 2011; Renard et al., 1997), RuiCells (présenté dans la section suivante), STREAM/WATERSSED (Cerdan et al., 2002a), ou encore WEPP (Nearing et al., 1989). Dans le cadre de la directive européenne inondation, le Royaume-Uni a réalisé une cartographie à l'échelle nationale via une approche par modélisation. Les cartes ont été réalisées par le bureau d'étude JBA Consulting et grâce au modèle Jflow-GPU, selon une approche « pluie-débit ». Les représentations cartographiques montrent les zones inondées par ruissellement considérant un scénario de pluie de période de retour 200 ans et générant des inondations pour des périodes de retour de 100 ans. Néanmoins, due à une forte incertitude, les cartes ne sont pas publiques sur tout le territoire, elles sont parfois uniquement destinées aux autorités locales.

Le modèle RuiCells, développé à l'université de Rouen depuis 1999, permet de simuler les débits ruisselés en tout point d'un bassin versant (D. Gaillard, 2006; Douvinet et al., 2014; Langlois et Delahaye, 2002). RuiCells se base sur le concept des automates cellulaires associés aux SIG pour créer un maillage en cellules triangulaires irrégulières où chaque élément (points, lignes, polygones) possède une représentation physique (cuvettes, talwegs, surface) avec la logique d'écoulement qui lui correspond (Figure I-66). Sont ensuite intégrées au modèle, les informations sur les caractéristiques de surface des sols (occupation du sol, propriétés du sol) ainsi que des données pluviométriques. L'organisation de ces cellules (de l'amont vers l'aval avec les directions) permet de simuler des écoulements hydrauliques en tenant compte des entrées et sorties de chaque cellule simultanément. Les équations de Saint-Venant

sont adaptées pour simuler des écoulements sur des prairies ou zones cultivées. Six paramètres sont nécessaires pour résoudre les équations sur le maillage, tels que la vitesse maximale pour des pentes négligeables ou pour des pentes très fortes, les seuils de hauteur d'eau pour certaines pentes, etc. Ainsi, la sortie du modèle est un graphique montrant l'évolution du débit en fonction du temps accompagné d'une cartographie des cumuls de surface en chaque cellule (Figure I-67). Le modèle peut être utilisé pour de nombreuses applications hydrologiques telles que l'identification des axes d'écoulement, la cartographie des zones de production, la production de courbes de débits et des temps de concentration en chaque point, etc. Différentes conditions de sol ou de pluviométrie peuvent également être simulées. RuiCells permet de cartographier une dynamique spatiale et temporelle des écoulements de surface. Néanmoins, le modèle requiert un calage pour être utilisé sur de nouveaux bassins, il est difficilement applicable à grande échelle et un logiciel particulier est nécessaire pour réaliser le maillage et les simulations.

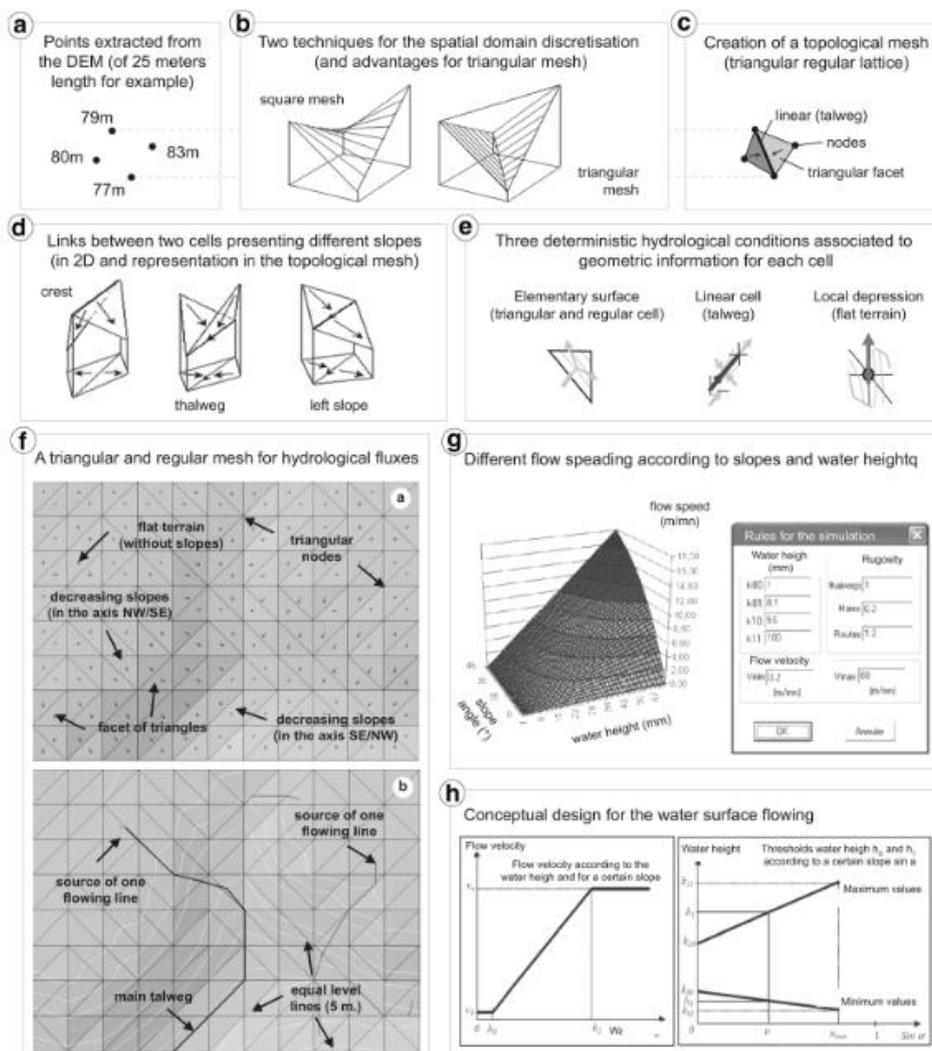


FIGURE I-66: PRINCIPE DE CONSTRUCTION DU MAILLAGE ET SORTIES DU MODELE RUICELLS (SOURCE : DOUVINET ET AL., 2014)

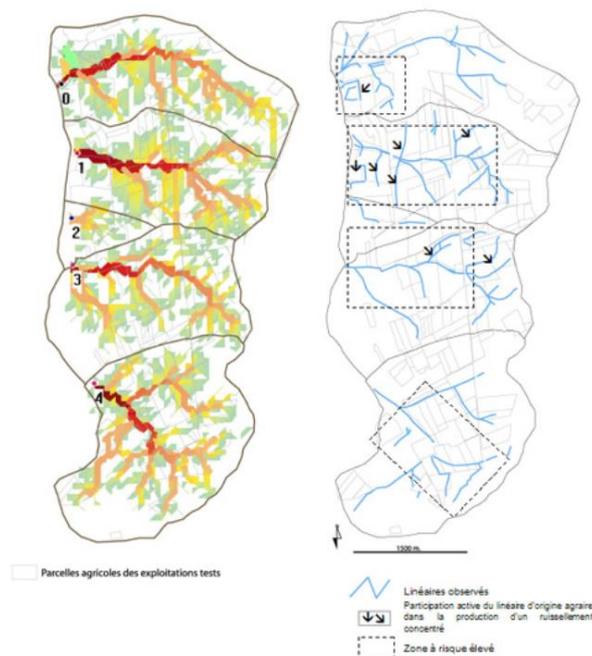


FIGURE I-67: ILLUSTRATION D'UNE CARTE D'ALEA RUISSellement SUR 5 PETITS BASSINS VERSANTS ET COMPARAISON AVEC DES TRACES DE RUISSellement OBSERVEES (SOURCE: GAILLARD, 2006)

### 3.1.5. SYNTHESE

Cet état de l'art des méthodes de cartographie du ruissellement, bien que non exhaustif, permet de situer la méthode IRIP parmi le panel des méthodes qui existent actuellement. Les approches naturalistes sont assez précises mais les méthodes ne sont pas homogènes et ne permettent pas une cartographie à grande échelle. Les approches topographiques sont intéressantes car simple à mettre en œuvre et une donnée d'entrée suffit mais elles se focalisent uniquement sur les zones d'écoulement et n'informent pas sur les dynamiques de versant, notamment l'érosion par ruissellement. Les approches par combinaisons d'indicateurs permettent de combiner des informations sur les sols en plus de la topographie. Certaines méthodes prennent en compte des données climatiques telles que l'érosivité de la pluie. Néanmoins, le panel actuel montre des méthodes souvent mono-processus, se focalisant sur l'érosion des sols agricoles et nécessitant des données d'entrée assez précises. Les approches par modélisation physique sont très précises et permettent d'apprendre sur la dynamique spatiale et temporelle du ruissellement, mais elles sont souvent complexes à mettre en œuvre, nécessitant de nombreuses données d'entrée et des calages, ce qui les rend difficiles d'utilisation dans des contextes opérationnels. La suite du chapitre présente la méthode IRIP, utilisée dans la suite de nos travaux, son concept et son fonctionnement.

## 3.2. LA METHODE IRIP

### 3.2.1. HISTORIQUE ET CONCEPT DE LA METHODE IRIP

C'est lors d'un groupe de travail animé par le GRAIE (Groupe de Recherche Rhône-Alpes sur les Infrastructures et l'Eau), en 2009, qu'a été identifié le besoin d'une méthode de cartographie des inondations par ruissellement intense pluvial. Le GRAIE est une association depuis 1985 et regroupe des collectivités territoriales, des bureaux d'études, des organismes de recherche et des services de l'état. Il a pour but le transfert des informations et résultats de recherche aux acteurs de la gestion de l'eau (GRAIE, n.d.). Lors de ce groupe de travail portant sur la prise en compte des eaux pluviales dans les documents

d'urbanisme et de planification, il est apparu un manque méthodologique sur le diagnostic territorial du risque inondation par ruissellement (Brelot et al., 2009), les expertises de cet aléa étant généralement effectuées localement grâce à une très bonne connaissance du terrain.

Le projet IRIP, acronyme de « Indicateur de Ruissellement Intense Pluvial », a été mis en œuvre par Irstea, sur une durée de 21 mois, avec le soutien financier de la Région Rhône-Alpes et de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse. Le comité de pilotage était composé des financeurs ainsi que du GRAIE, des représentants de services opérationnels tels que le GRAND-LYON, la DREAL, des bureaux d'étude comme SAFEGE et REALITES-Environnement et des experts scientifiques sur le ruissellement rural et urbain de l'INSA de Lyon et de l'INRA de Thonon-Les-Bains. C'est dans ce contexte que la méthode IRIP a été développée à Irstea, par J. Dehotin et P. Breil (Dehotin et Breil, 2011a, 2011b).

L'objectif pour le développement de la méthode IRIP était de concevoir une méthode simple et robuste. Robuste dans le sens où elle pourrait s'appliquer sur tous types de territoires sans calage *a priori* et pour tous types d'échelles. Simple dans le sens où la méthode serait simple à implémenter et les cartes simples à interpréter. Pour cela, la méthode devait nécessiter peu de données d'entrée et des données accessibles sur tous les territoires.

En 2012, la méthode IRIP est adoptée par SNCF, qui met en place un programme de recherche dénommé IRIP Rail. Ce programme de recherche vise à améliorer la gestion des risques ferroviaires liés au ruissellement. Pour des besoins d'automatisation et d'utilisation dans un contexte opérationnel d'ingénierie et de recherche, la méthode a été implémentée sous forme de logiciel. On a donc deux objets :

- La méthode IRIP (avec un « I » majuscule) qui correspond à la théorie ;
- Le logiciel iRIP © (avec un « i » minuscule) qui correspond à l'implémentation de la méthode sous forme de programme informatique et qui a été développé à SNCF de 2012 à 2014, par Judicaël Dehotin, et qui fait l'objet d'un partenariat avec Irstea.

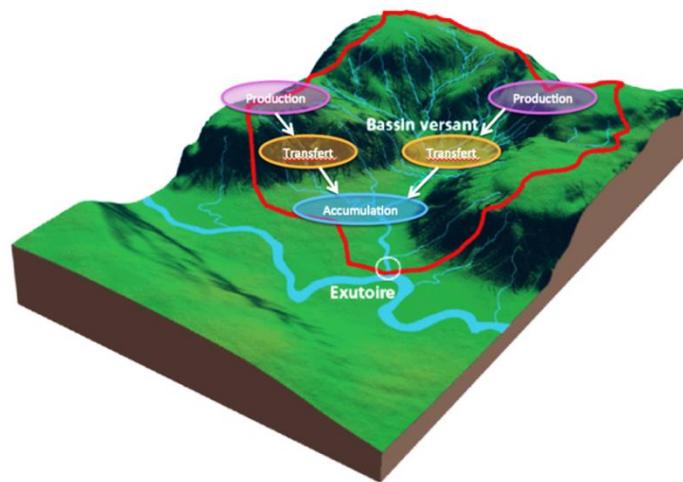
### 3.2.2. PRESENTATION DE LA METHODE IRIP

#### 3.2.2.1. DES CARTES DE SUSCEPTIBILITE AU RUISSellement

La méthode IRIP est une méthode de cartographie par combinaison géomatique d'indicateurs du paysage ayant une influence sur le ruissellement. Chaque indicateur est catégorisé en favorable ou défavorable à l'occurrence de ruissellement. Ainsi, plus une zone aura d'indicateurs favorables au ruissellement plus elle sera considérée comme susceptible de voir se produire du ruissellement. La méthode IRIP prend en compte uniquement les caractéristiques de surface et ne prend pas en compte la pluie, c'est une méthode dite « sèche ». Les précipitations intenses pouvant se produire partout, dans une logique de protection par des politiques d'aménagement ou de prévention, il est essentiel de connaître les zones les plus propices au ruissellement par rapport aux caractéristiques de surface indépendamment de l'aléa météorologique. Bien qu'il existe des régimes pluviométriques différents à l'échelle de la France, pouvant influencer le ruissellement, pour une gestion territoriale des risques à l'échelle d'un bassin versant, le paramètre précipitation peut être écarté dans un premier temps. C'est pourquoi, on parle de carte de susceptibilité au ruissellement. Pour produire des cartes d'aléa, les cartes de susceptibilité doivent être croisées avec l'aléa pluviométrique.

### 3.2.2.2. METHODE DE COMBINAISON D'INDICATEURS

Le modèle conceptuel du ruissellement utilisé pour l'élaboration de la méthode IRIP est basé sur une segmentation du phénomène en trois processus : la production, le transfert et l'accumulation du ruissellement (Figure I-68). Chaque processus est influencé par des facteurs différents. Par exemple, la pente influence le transfert et l'accumulation du ruissellement mais pas de la même manière. Les pentes fortes sont favorables au transfert, tandis que les pentes faibles sont favorables à l'accumulation. Les processus peuvent se produire alternativement, simultanément ou de manière isolée. On peut voir par exemple, de la production et de l'accumulation du ruissellement sur une même zone. On peut voir localement une zone favorable à l'accumulation éloignée de toute zone favorable à la production ou au transfert.



**FIGURE I-68: MODELE CONCEPTUEL DU RUISSellement EN TROIS PROCESSUS: LA PRODUCTION, LE TRANSFERT ET L'ACCUMULATION**

Ainsi la méthode IRIP permet de générer trois cartes de susceptibilité au ruissellement : la carte de susceptibilité à la production (CSP), au transfert (CST) et à l'accumulation (CSA). Chaque carte est construite par la combinaison de 5 indicateurs. La méthode de combinaison est identique pour les trois cartes mais les indicateurs diffèrent selon les processus. La méthode de combinaison des indicateurs est présentée de Figure I-69 à Figure I-71. Chaque indicateur est classé en 2 catégories : favorable au ruissellement, et la note de 1 lui est attribuée ; ou défavorable au ruissellement, et la note de 0 lui est attribuée. On obtient alors une carte binaire par indicateur. La somme de ces 5 cartes binaires donne une carte de susceptibilité au ruissellement en 6 niveaux, de 0 (aucun indicateur n'est favorable) à 5 (tous les indicateurs sont favorables). Pour chaque carte, le choix des indicateurs est présenté. Ces choix résultent d'une revue de la littérature sur les différents modèles existant d'érosion et d'inondation par ruissellement, d'une analyse de plusieurs épisodes de ruissellement intense afin d'identifier les facteurs prépondérants, ainsi que de nombreux tests de combinaisons. Le choix des indicateurs est davantage détaillé dans la suite du texte et dans le rapport bibliographique du projet IRIP (Dehotin et Breil, 2011a). Dans le paragraphe suivant sur l'implémentation de la méthode, les seuils de favorabilité et les méthodes de calcul des indicateurs sont présentés.

- Carte de susceptibilité à la production

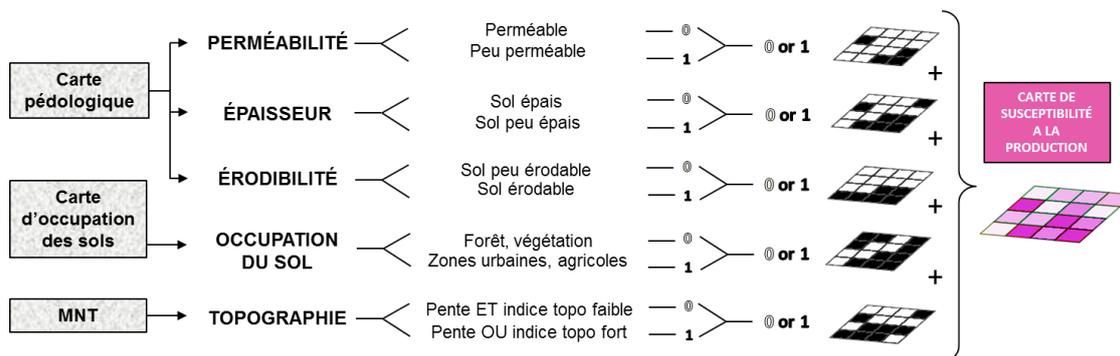


FIGURE I-69: SCHEMA DE CREATION DE LA CARTE DE SUSCEPTILITE A LA PRODUCTION, EN GRIS LES DONNEES D'ENTREE, EN COULEUR LA CARTE DE SORTIE

Le choix des 5 indicateurs utilisés pour créer la CSP sont inspirés des paramètres utilisés dans les modèles d'érosion des sols tels que SCALE ou RUSLE. La perméabilité est un indicateur majeur puisqu'elle influence directement le potentiel de production de ruissellement hortonien. L'épaisseur est assimilée ici à la capacité de stockage du sol en eau. Un sol peu épais aura tendance à saturer plus rapidement. Un sol fortement érodable sera favorable à la production d'eau chargée en sédiment. Concernant l'occupation du sol, le ruissellement est plus susceptible d'être généré en zone urbaine qu'en zone rurale, il est plus susceptible d'être généré en zone de culture qu'en zone de forêt. Les types de cultures jouent également sur la susceptibilité à la production, par exemple, les vignobles ou les parcelles culturales ayant des terrains à nus une partie de l'année sont davantage propices au ruissellement. Enfin, l'indicateur de topographie combine la pente et l'indice topographique. Bien que l'indice topographique soit également un indicateur de pente, ces indicateurs n'influencent pas le ruissellement de la même manière. Les pentes fortes sont considérées comme favorables au ruissellement du fait de la mise en vitesse de l'eau. Sur ces zones, l'infiltration sera plus difficile et la zone sera plus propice à la production de ruissellement hortonien. L'indice topographique (Beven et Kirkby, 1979), aussi appelé indice d'humidité, augmente lorsque la capacité d'évacuation de l'eau en un point diminue. Un indice topographique fort montrera donc les zones susceptibles à la production de ruissellement par saturation.

- Cartes de susceptibilités au transfert et à l'accumulation

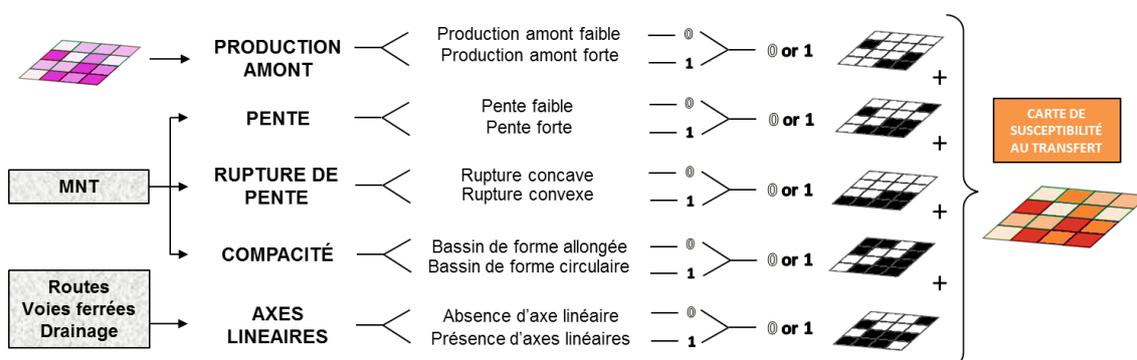


FIGURE I-70: SCHEMA DE CREATION DE LA CARTE DE SUSCEPTILITE AU TRANSFERT, EN GRIS LES DONNEES D'ENTREE (CSP DEVIENT UNE DONNEES D'ENTREE), EN COULEUR LA CARTE DE SORTIE

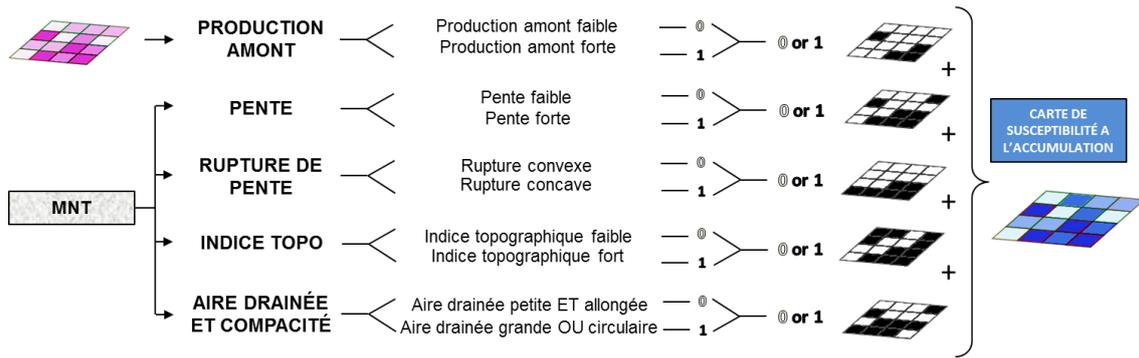


FIGURE I-71: SCHEMA DE CREATION DE LA CARTE DE SUSCEPTIBILITE A L'ACCUMULATION, EN GRIS LES DONNEES D'ENTREE (CSP DEVIENT UNE DONNEES D'ENTREE), EN COULEUR LA CARTE DE SORTIE

Pour la création des CST et des CSA, la CSP devient un indicateur d'entrée. Le transfert ou l'accumulation du ruissellement est plus favorable si le bassin amont a une susceptibilité à la production élevée. Ensuite, les pentes et les ruptures de pente favorisent le transfert et l'accumulation mais de façon opposée. Le transfert sera favorisé par des pentes fortes et des ruptures de pente convexes. Ce sont par exemple des zones où l'on peut observer une mise en mouvement ou une accélération du ruissellement voire de l'érosion. Pour l'accumulation, elle sera favorisée par des pentes faibles et des ruptures de pente concaves, sur des zones où l'on peut observer un ralentissement du ruissellement, une inondation temporaire, une stagnation d'eau ou des dépôts faisant suite à de l'érosion.

Pour le transfert, l'indicateur de compacité caractérise la forme du bassin versant. Si le bassin est de forme circulaire, la concomitance spatiale et temporelle des écoulements de surface est plus probable. Localement, des débits plus forts peuvent être observés pouvant également provoquer des incisions dans le sol. Le cinquième indicateur pour la CST est la présence ou non d'axes linéaires, tels que des routes, des voies ferrées ou des fossés drainants. Les axes linéaires sont considérés comme pouvant intercepter et rediriger les écoulements voire les accélérer.

Pour l'accumulation, un indice topographique fort montre une zone avec une capacité d'évacuation de l'eau faible par rapport au potentiel d'eau pouvant provenir de l'amont. Enfin, le cinquième indicateur de la CSA est une combinaison de la surface drainée en un point et de la compacité du sous-bassin en amont de ce point. Les zones avec des surfaces drainées importantes et une potentialité de concomitance des écoulements sont plus propices de voir arriver de grandes quantités d'eau et donc sont susceptibles aux inondations par ruissellement.

### 3.2.3. PRESENTATION DU LOGICIEL IRIP©

On distingue la méthode IRIP, qui est la combinaison théorique des différents indicateurs du paysage, du logiciel iRIP©, qui est l'implémentation de la théorie sous forme de programme informatique. Le programme est présenté ici, ainsi que les choix qui ont été faits en termes d'algorithmes, de méthodes de calcul et de seuils. Le logiciel iRIP© est programmé en Python (Python, n.d.) et fait appel à des bibliothèques telles que PCRaster (PCRaster Python extension, 2010), SAGA-GIS (SAGA GIS, n.d.) ou GDAL/OGR (GDAL library in Python, n.d.) pour le traitement des données géographiques.

Les données géographiques peuvent être :

- Des données rasters (ou matricielles) de format Esri grid (.asc), GeoTIFF (.tif) ou PCRaster (.map), représentant l'espace par une grille de cellules uniformes (ou pixels). Chaque cellule couvre une aire géographique qui dépend de sa résolution et comporte une valeur d'attribut qui lui est assignée.
- Des données vecteurs de format Shape Esri (.shp), Cad (.dxf) ou MapInfo (.tab), représentant des données graphiques sous forme de points, de lignes, ou de polygones (aires) avec des valeurs d'attribut stockées dans des tables associées (les tables attributaires).

Le Tableau I-3 présente les indicateurs utilisés pour la construction chaque carte IRIP avec les seuils de favorabilité, c'est-à-dire les seuils à partir desquels la note de 1 est attribuée. La troisième colonne précise si le seuil est à définir par l'utilisateur, s'il est absolu, toujours le même quelle que soit la zone d'étude, ou s'il est relatif, c'est-à-dire calculé par rapport à chaque zone d'étude. La quatrième colonne présente les méthodes de détermination des seuils, dans les cas où ils sont prédéfinis.

**TABLEAU I-3 : LISTE DES INDICATEURS, DE LEURS SEUILS, UTILISES POUR CREER LES CARTES IRIP AVEC LE LOGICILE IRIP**

Cartes IRIP	Indicateurs	Seuils de favorabilité (note de 1)	
		Type	Méthode de calcul
PROD	Perméabilité		A définir par l'utilisateur
	Epaisseur		A définir par l'utilisateur
	Erodabilité		A définir par l'utilisateur
	Occupation du sol		A définir par l'utilisateur
	Pente OU indice topo	Relatif	algorithme de classification
TRANS	Production amont	Relatif	mode(BV amont) $\geq 3/5$
	Pente	Relatif	algorithme de classification
	Rupture de pente	Relatif	mode(pentes amont) < pente locale
	Compacité	Absolu	Indice d'Horton $\geq 1$
	Axes linéaires au sol	Absolu	Présence + buffer de 2*résolution
ACC	Production amont	Relatif	mode(BV amont) $\geq 3/5$
	pente	Relatif	algorithme de classification
	Rupture de pente	Relatif	mode(pentes amont) > pente locale
	Compacité OU Aire drainée	Absolu	Indice d'Horton $\geq 1$ OU Aire drainée $\geq 100\text{Ha}$
	Indice topographique	Relatif	algorithme de classification

### 3.2.3.1. RESOLUTION DES CARTES IRIP

Les trois cartes IRIP finales sont des rasters de même résolution que celle du MNT utilisé en entrée. Si les autres données d'entrée (cartes d'occupation des sols, pédologique ou informations sur les axes linéaires) ne sont pas de la même résolution, elles sont rééchantillonnées pour convenir à la résolution du MNT d'entrée (fonction « gdalwarp »). La méthode de rééchantillonnage par défaut est la méthode du plus proche voisin. Bien que cette méthode d'interpolation soit peu précise, elle a l'avantage d'être rapide. Si les autres données d'entrée sont de format vecteur, elles sont rastérisées à la résolution du MNT d'entrée (fonction « gdal\_rasterize »).

### 3.2.3.2. LES INDICATEURS LIES A LA PEDOLOGIE

Il revient à l'utilisateur de fixer les seuils pour lesquels la perméabilité, l'épaisseur et l'érodabilité seront favorables à la production de ruissellement. Dans le cadre de l'utilisation du logiciel iRIP© en contexte opérationnel, des seuils par défaut sont proposés pour la France métropolitaine. Ces seuils sont modifiables via l'interface du logiciel.

### 3.2.3.3. L'INDICATEUR D'OCCUPATION DU SOL

L'utilisateur peut décider les types d'occupations du sol à considérer comme favorables au ruissellement et ceux à considérer comme défavorables. Pour un usage opérationnel, des choix par défaut sont également proposés, tels que les zones urbaines et les zones de cultures considérées comme favorables au ruissellement. Pour les pixels localisés en zone urbaine, les indicateurs de propriétés des sols changeront automatiquement : la perméabilité et l'épaisseur seront considérés comme favorables et l'érodabilité comme défavorable. La carte finale de production aura des niveaux compris entre 3/5 et 4/5 pour les zones urbaines.

### 3.2.3.4. LE PLAN DE DRAINAGE ET LE CALCUL DE L'AIRE DRAINEE

Le plan de drainage est le repère essentiel à tout calcul nécessitant une logique amont-aval, tel que les fonctions hydrologiques. Il est calculé à partir d'un MNT. Dans le logiciel iRIP, le plan de drainage est calculé par la fonction « Iddcreate » de PCRaster (PCRaster documentation, n.d.). Cette fonction permet d'assigner en chaque cellule la direction de la plus grande pente parmi les 8 cellules qui l'entourent. Les 8 directions possibles sont représentées par des chiffres de 1 à 9 (5 étant de la cellule centrale) (Figure I-72). Si deux cellules ou plus ont les mêmes valeurs les plus faibles, l'algorithme choisit la direction de façon aléatoire. L'algorithme fait de même pour les zones planes. Le plan de drainage est retravaillé grâce à la fonction « Iddrepair » de telle sorte que tous les chemins de drainage finissent vers un point exutoire.

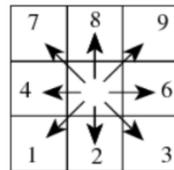


FIGURE I-72: ILLUSTRATION DE L'ALGORITHME PERMETTANT DE CREER LE PLAN DE DRAINAGE A PARTIR D'UN MNT (EXTRAIT DE PCRASTER DOCUMENTATION)

Le calcul de l'aire drainée est réalisé avec la fonction PCRaster « accuflux ». Cette fonction permet de calculer pour chaque cellule, le nombre cumulé de cellules en amont s'écoulant dans une cellule, selon le plan de drainage préalablement calculé. Ce nombre est attribué à la cellule considérée. Ainsi, pour obtenir une surface drainée, il faut multiplier ce nombre par la surface d'une cellule.

### 3.2.3.5. LES INDICATEURS PENTE ET INDICE TOPOGRAPHIQUE

Le calcul de la pente locale se fait par la fonction « slope » de PCRaster (PCRaster documentation, n.d.) qui utilise la méthode des différences finies du 3<sup>ème</sup> ordre (Horn, 1981). Le calcul de l'indice topographique se fait en chaque cellule par la formule suivante :

$$\text{Indice topographique} = \ln\left(\frac{\text{aire drainée}}{\tan(\text{pente locale})}\right)$$

Pour déterminer des seuils de favorabilité *a priori* pour la pente et pour l'indice topographique, le logiciel iRIP© utilise un algorithme de classification. La fonction utilisée est « cluster analysis for grids » de SAGA GIS (SAGA GIS documentation, n.d.). Cette fonction permet, pour une carte pixélisée par exemple, de faire des groupes de pixels dont les valeurs sont homogènes selon des critères statistiques et de proximité. Cette fonction utilise une combinaison des algorithmes « Iterative Minimum Distance » (Forgey, 1965), aussi appelé partitionnement en k-moyennes, et « Hill-climbing » (Rubin, 1967). Le résultat est un partitionnement de la carte pixélisée en un certain nombre de groupes au sein desquels la variance est minimisée et entre lesquels la variance est maximisée. On peut définir le nombre de groupes souhaités. Dans le cas de la méthode IRIP, 2 groupes de pentes (fortes/faibles) et 2 groupes d'indices topographiques (forts/faibles) doivent être obtenus, afin de segmenter les indicateurs pente et indice topographique en favorable ou défavorable au ruissellement. Ainsi, il n'existe pas de seuil fixe pour déterminer une pente forte ou une pente faible, mais il est possible, pour les deux groupes, de donner la variance et la valeur moyenne au sein d'un groupe ainsi que le nombre de pixels dans le groupe.

Enfin, pour la carte production, les deux indicateurs de pente et d'indice topographique sont combinés par un opérateur « ou inclusif ». Par exemple pour un pixel, si la pente est classée comme « forte » ou si l'indice topographique est classé comme « fort », la note de 1 lui est attribuée, 0 sinon. Pour la carte de transfert, seul l'indicateur de pente est utilisé et la pente doit être classée comme « forte » pour être favorable au ruissellement. Pour la carte accumulation, les indicateurs de pente et d'indice topographique sont utilisés séparément. La pente doit être classée comme « faible » pour être favorable et l'indice topographique doit être classé comme « fort ».

### 3.2.3.6. L'INDICATEUR DE PRODUCTION AMONT

Cet indicateur est calculé sur la base de la carte de susceptibilité à la production (CSP) préalablement créée. L'objectif est de binariser cette carte pour connaître les zones avec un fort potentiel de production de ruissellement en amont. Pour ce faire, en chaque pixel de la CSP, la valeur modale des niveaux de susceptibilité à la production (allant de 0 à 5) est calculée par rapport au bassin versant relatif au pixel considéré (Figure I-73). La valeur modale ou mode statistique, est la valeur la plus représentée de l'échantillon. Si cette valeur modale est supérieure ou égale à 3, le sous-bassin est considéré comme globalement favorable à la production et la note de 1 est attribuée au pixel considéré, 0 sinon.

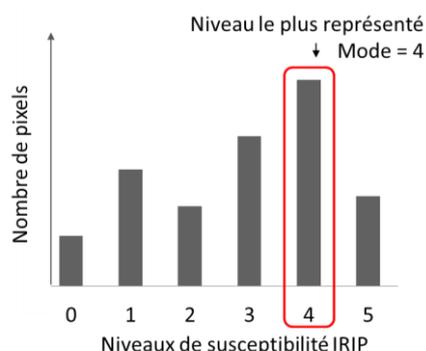


FIGURE I-73: CHOIX DE LA VALEUR MODALE PARMIS UN ECHANTILLON DISCRET

Pour calculer le bassin versant relatif à chaque pixel, la fonction « upstream » de PCRaster est utilisée. Cette fonction permet de connaître la valeur de la ou des premières cellules en amont direct de la cellule considérée. Les cellules amont sont connues via le plan de drainage préalablement calculé. En faisant une

itération sur cette fonction, il est ainsi possible de connaître l'ensemble des valeurs des cellules dans un bassin versant relatif à une cellule, et donc d'en calculer le mode.

### 3.2.3.7. L'INDICATEUR DE RUPTURE DE PENTE

L'objectif ici est de définir en chaque pixel si la rupture de pente est de forme convexe ou concave. Pour chaque pixel, le mode statistique des valeurs de pentes du bassin versant relatif au pixel est calculé. Si le mode est supérieur à la pente locale du pixel, le pixel est considéré comme concave et donc favorable à l'accumulation (Figure I-74). A l'inverse, si le mode des pentes amont est inférieur à la pente locale, le pixel est considéré comme convexe et favorable au transfert. Pour l'ensemble de la zone d'étude, les valeurs des pentes locales sont classifiées en 40 classes (40 est supposé être un nombre de classes suffisamment grand pour garder de la variabilité dans l'échantillon), via l'algorithme de classification précédemment présenté. Ainsi le calcul du mode pour chaque bassin relatif à chaque pixel se fait par rapport aux classes de pentes et non à leurs valeurs. Ainsi, l'échantillon est réduit, plus représentatif, et il y a moins de chance de faire basculer le mode d'une valeur à l'autre, le calcul du mode est plus robuste.

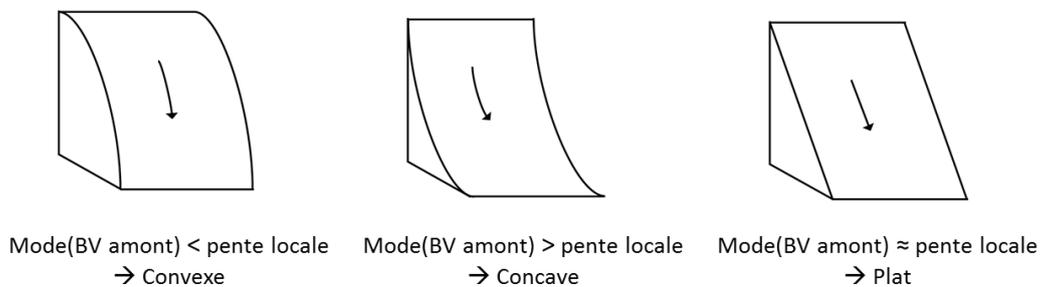


FIGURE I-74: ILLUSTRATION DU CALCUL DES RUPTURES DE PENTE DANS LE LOGICIEL iRIP (ADAPTE DE MAZAGOL ET AL., 2008)

### 3.2.3.8. L'INDICATEUR DE COMPACTITE

L'indicateur de compacité est calculé dans le logiciel iRIP via l'indice de forme d'Horton :

$$\text{Indice d'Horton} = \frac{\text{Aire drainée}}{(\text{Chemin hydrologique le plus long})^2}$$

L'indice de forme est calculé en chaque pixel. S'il est supérieur ou égal à 1, le bassin versant relatif au pixel est considéré comme de forme circulaire et la note de 1 lui est attribuée. Il existe de nombreux indices pour appréhender la compacité d'un bassin versant, mais plus ou moins faciles à mettre en œuvre d'un point de vue géomatique. L'indice de Gravelius (Gravelius, 1914) est par exemple plus couramment utilisé mais il fait intervenir le périmètre du bassin versant. La valeur du périmètre n'est pas stable par exemple car elle peut varier selon la résolution de l'étude avec un effet fractal (Bendjoudi et Hubert, 2002).

### 3.2.3.9. L'INDICATEUR AXES LINEAIRES

Si la donnée d'entrée sur les axes linéaires est de format vecteur, elle est rastérisée. Ensuite, afin de prendre en compte les abords des axes (fossés, talus) et de parer aux erreurs de géolocalisation, une zone tampon de deux fois la résolution de l'étude (résolution du MNT d'entrée) est appliquée de part et d'autre de l'axe. Le seuil de favorabilité est simple, s'il y a présence d'un axe linéaire, le pixel est à 1, la zone est favorable au transfert du ruissellement, sinon le pixel est à 0.

#### 3.2.3.10. L'INDICATEUR COMPACITE OU AIRE DRAINEE

Le cinquième indicateur pour la création de la carte de susceptibilité à l'accumulation du ruissellement est une combinaison de type « ou inclusif » de l'indice de forme d'Horton et de l'aire drainée. Le seuil à partir duquel l'aire drainée est considérée suffisante pour mobiliser une importante quantité d'eau a été fixé à 100 ha. Un pixel prendra donc la note de 1 s'il a une aire drainée supérieure ou égale à 100 ha ou s'il a un indice d'Horton supérieure ou égal à 1.

#### 3.2.4. DISCUSSION

##### 3.2.4.1. DES METHODES DE CALCUL RESPECTANT LA LOGIQUE HYDROLOGIQUE

Utiliser des méthodes de classification pour définir des classes de pentes ou des classes d'indices topographiques permet de prendre en compte la notion de spatialisation de ces éléments du paysage. Une pente forte n'est pas un élément isolé. C'est une particularité du paysage qui est liée fortement à son environnement proche avec une dépendance qui diminue avec la distance. Les méthodes de classification permettent de prendre en compte un ensemble spatial de caractéristiques, plutôt que des caractéristiques indépendantes entre elles. La méthode de calcul des ruptures de pente permet également de prendre en compte cette notion de bassin versant, en comparant la répartition des valeurs de pente à la pente locale. Plusieurs indicateurs, tels que la production amont, l'indice de compacité, les ruptures de pentes tiennent compte de la logique amont-aval de l'hydrologie, en recalculant pour chaque pixel le bassin versant associé, et en effectuant le calcul de l'indicateur à partir de cette zone relative au pixel.

Concernant les cartes finales, qui sont des concaténations de tous ces indicateurs, une susceptibilité au ruissellement peut être identifiée à partir du moment où il y a une persistance spatiale de niveaux forts. Les pixels forts isolés doivent être analysés avec précaution. Ils peuvent ne pas porter de réelle information, ils peuvent être dus à des artefacts. Ceci est beaucoup moins probable lorsqu'on observe une persistance de plusieurs niveaux forts dans une même zone.

##### 3.2.4.2. DES CHOIX PARFOIS ARBITRAIRES

Des choix ont été faits afin de construire et d'implémenter la méthode IRIP. Certains choix peuvent être complexifiés, tels que la méthode de ré-échantillonnage des données d'entrée pour correspondre à la résolution du MNT, ou encore la fonction de création du plan de drainage qui utilise un algorithme à 8 directions. Il existe des méthodes beaucoup plus complexes pour réaliser ces types de tâches. Il faut néanmoins garder à l'esprit l'objectif de la méthode IRIP d'être une méthode de diagnostic. Elle ne permet pas une modélisation fine des processus physiques. Ses objectifs sont d'être simple et robuste. Il pourrait être intéressant d'étudier comment la complexification de ces algorithmes influence les cartes finales.

Des choix de seuils ont dû également être faits afin d'appliquer la méthode, notamment en ce qui concerne les seuils issus des données pédologiques ou d'occupation du sol. Ce sont des seuils par défaut, mais il revient aussi à l'utilisateur, selon l'expertise qu'il a sur la zone d'étude et selon les données disponibles, de les faire varier.

D'autres choix peuvent paraître encore plus arbitraires, par exemple, prendre un seuil de 3/5 pour la production amont, classifier les valeurs de pentes en 40 classes pour faire les calculs de ruptures de pente, considérer l'indice de compacité favorable s'il est supérieure ou égal à 1, prendre une zone

tampon de deux fois la résolution pour les axes linéaires, ou encore choisir une aire drainée d'au moins 100 ha pour que la zone soit favorable à l'accumulation. Bien que certains aient été définis intuitivement, certains mériteraient davantage de tests pour être bien établis.

#### 3.2.4.3. ATOUTS

Un atout majeur de la méthode IRIP est son adaptabilité et sa souplesse. Tout d'abord, c'est une méthode de scores, c'est-à-dire que chaque indicateur a une note et que leur somme donne une notion de plus ou moins grande susceptibilité. Ainsi, avec une méthode de scores, il est possible de croiser des informations de nature très différentes, par exemple des valeurs de conductivités hydrauliques avec des valeurs d'indices topographiques, ou encore des données de format vecteur et de format raster. La méthode de scores apporte de la robustesse dans le sens où, si une donnée est peu précise ou peu fiable, elle ne compte que pour une information sur cinq (dans le cas de la méthode IRIP). Une information sur la localisation d'une zone susceptible de niveau 4/5 ou 5/5 est donc une information qui a une certaine valeur. La méthode IRIP peut être qualifiée de robuste grâce à l'utilisation d'algorithmes de classification qui permettent de calculer des seuils relatifs à la zone d'étude. Ainsi, la méthode peut être appliquée sans calage à priori. IRIP requière peu de données d'entrée (topographie, sol, occupation du sol) et ces données sont accessibles gratuitement pour des résolutions grossières à l'échelle de l'Europe (Exemple : SRTM pour la topographie, la base de données LUCAS pour les sols et la base Corine Land Cover pour l'occupation du sol). Ces données sont également disponibles à haute, voire très haute résolution sur de nombreuses zones (données payantes mais de plus en plus de zones disponibles).

L'apport de la méthode IRIP par rapport aux méthodes actuelles est la possibilité de créer trois cartes représentant trois processus du ruissellement : production, transfert, accumulation. Ainsi, les cartes IRIP facilitent la compréhension du comportement hydrologique d'un bassin versant. La méthode IRIP en combinant des informations du paysage fait ressortir des particularités, des zones plus propices que d'autres au ruissellement intense, indépendamment de l'occurrence d'un épisode pluvieux intense. Ces cartes fournissent donc des informations supplémentaires pour l'aménagement du territoire et pour la gestion des risques. Connaître la répartition spatiale des différents processus de ruissellement peut permettre d'adapter les techniques de gestion des risques selon les zones.

#### 3.2.4.4. LIMITES

Les cartes produites par la méthode IRIP restent statiques et qualitatives. Les différents régimes de pluies ne sont pas pris en compte. Les cartes IRIP ne peuvent donc pas fournir des informations quantitatives telles que des vitesses, des hauteurs et des débits. L'échelle de susceptibilité proposée dans la méthode IRIP ne correspond pas à des variables usuelles. L'échelle de susceptibilité n'a pour le moment pas montré de lien évident avec des données des périodes de retour. Le caractère statique des cartes IRIP peut éventuellement être mieux appréhendé en représentant différents scénarios, par exemple selon les saisons, en changeant la paramétrisation sur les propriétés du sol (réduction de la perméabilité pendant les longues périodes pluvieuses hivernales) ou sur l'occupation du sol (sols nus durant les intercultures).

La méthode IRIP, dans son format actuel, ne prend pas en compte l'influence de la géologie sur le ruissellement bien que son influence soit prépondérante sur certaines zones. Par exemple, dans les zones karstiques avec présence de gouffres en surface ou au niveau de roches altérées ou de failles, la capacité de stockage peut être grandement accrue. La méthode IRIP ne prend également pas en compte les ouvrages de protection d'origine anthropique. Avec des données topographiques de très haute

résolution, il est possible de détecter d'éventuels fossés, talus ou bassins de rétention, mais avec des données d'entrée plus grossières, les cartes n'intègrent pas cette information.

Considérant la présentation de la méthode IRIP faite dans ce chapitre, il peut y avoir beaucoup de propositions de développement, aussi bien au niveau de sa partie théorique (méthode de combinaison, choix des indicateurs, etc.), qu'au niveau de sa partie implémentation (calcul des indicateurs, méthodes de classification, etc.). Bien qu'une paramétrisation par défaut soit proposée, davantage de tests doivent être effectués, afin de mieux appréhender la sensibilité ou la robustesse de certains indicateurs et leurs influences sur les représentations cartographiques finales. Il est essentiel également de prodiguer des conseils d'utilisation pour interpréter les cartes ou pour effectuer des calages *a posteriori*. Comme toute modélisation, se posent des questions de changements d'échelle. Lorsque l'on change d'échelle, certains processus deviennent prépondérants sur d'autres. Ceci doit être mieux appréhendé pour l'utilisation de la méthode IRIP mais également pour l'étude du phénomène de ruissellement. Finalement, une multitude de tests sont possibles, mais il faut pouvoir être en mesure de les évaluer, c'est-à-dire de savoir quelle paramétrisation est la plus performante, la plus représentative de la réalité. Mais pour cela, il faut disposer de données de comparaison et de méthodes de comparaison.

#### 3.2.4.5. ENJEUX DE L'ÉVALUATION

L'évaluation de la méthode IRIP est un enjeu majeur pour la suite de son utilisation. Tout d'abord, la méthode IRIP conceptualise le phénomène de ruissellement en trois étapes (production, transfert et accumulation) et il est essentiel d'évaluer la pertinence de cette approche. Évaluer la méthode IRIP, c'est aussi fournir des clés d'interprétation de ces trois cartes au regard de la réalité du terrain et plus généralement, cela permettra d'en apprendre davantage sur le phénomène de ruissellement et les aléas induits. Évaluer la méthode IRIP permettra d'estimer la qualité des cartes produites et leurs bénéfices par rapport aux outils actuels. Cela permet également de la comparer à d'autres méthodes de cartographie, de l'améliorer et de poursuivre son développement.

Les cartes IRIP sont vouées à être utilisées dans un cadre opérationnel. Elles peuvent être à l'origine de décisions ou servir à appuyer des raisonnements. Ces cartes vont fournir des informations de base pour mettre en œuvre des actions de maîtrise des risques. Ces actions peuvent engendrer des coûts et remettre en cause la sécurité. Il est donc essentiel pour l'utilisateur de connaître le domaine d'application de la méthode de cartographie et les hypothèses sous-jacentes, d'être en mesure d'interpréter les résultats et de les vérifier. Les décisions doivent être prises au regard de la fiabilité des cartes. C'est pourquoi l'évaluation de la méthode IRIP doit suivre une procédure rigoureuse.

### 3.3. ÉVALUATION DES METHODES DE CARTOGRAPHIE DU RUISSELLEMENT

#### 3.3.1. DONNEES APPROCHEES

L'ensemble des contributeurs aux développements des méthodes de cartographie du ruissellement pointent la difficulté d'évaluation. Cette difficulté est incontestablement due au manque de données relatives au ruissellement. Le caractère rapide et localisé du phénomène de ruissellement rend son observation et sa mesure difficile. L'aspect multi-aléas du ruissellement, pouvant générer des phénomènes induits tels que des inondations, des coulées de boue, des glissements, de l'érosion ou encore des dépôts, nécessite de nombreuses variables pour le décrire entièrement, et donc pour évaluer les cartes de ruissellement. La variable « débit » n'est pas suffisante par exemple. Ainsi la constitution des bases de données d'observations ou de mesures est complexe et quasi-inexistante à grande échelle.

En raison du manque de données relatives au ruissellement, l'évaluation doit se faire par comparaison avec des données approchées, ou « proxies data ». Les données approchées, sont des données en lien indirect avec le phénomène de ruissellement. Ce sont des données pour lesquelles il existe un biais, une inconnue entre le phénomène et la donnée. Les données approchées ne sont pas issues de mesures directes et ne peuvent pas être comparées au phénomène sans prétraitement. Ce sont des témoins de l'occurrence du phénomène, des conséquences par exemple. L'usage de données approchées a été généralisé notamment dans le domaine de la climatologie. En effet, les modèles climatiques génèrent des simulations sur des étendues spatiales et temporelles considérables, et il n'existe pas de bases de données homogènes sur toute la surface de la terre, ni remontant assez loin dans le temps. Les climatologues se tournent donc vers des données approchées, témoin du climat passé et réparties sur le globe, telles que les cercles de croissance sur les arbres (dendrochronologie), les coraux, les carottes de glaces, les sédiments marins ou lacustre, etc. (IPCC, 2003; Lee et al., 2008). Concernant le domaine de l'hydrologie, il existe également des exemples d'utilisation de données approchées pour l'évaluation des modèles.

Cette section présente des exemples de méthode d'évaluation, dont l'évaluation par comparaison à des données approchées. Bien que cette section se focalise sur les méthodes de cartographie du ruissellement, le peu d'exemples disponibles dans la littérature amène à regarder plus largement les modèles hydrologiques. En amont de la thèse, la méthode IRIP a déjà fait l'objet de nombreuses évaluations, dans le cadre de projets, de stages et lors de la construction du logiciel iRIP©, cette section présente donc également les évaluations déjà réalisées de la méthode IRIP.

### 3.3.2. EVALUATION PAR CONCERTATION AVEC DES ACTEURS LOCAUX

Dans les cas où les cartes de ruissellement sont réalisées par expertise terrain, elles sont souvent évaluées par concertation avec les acteurs locaux. C'est le cas, par exemple, de certains PPR ruissellement, ou encore de certains modèles d'érosion tels que le modèle de l'INRA ou STREAM. Les cartes issues de la méthode Exzeco ont bénéficiées de retours d'acteurs locaux, via la diffusion de l'EAIP (Enveloppe Approximative des inondations potentielles ; réalisée par fusion de zones inondables issues de plusieurs méthodes dont Exzeco ; diffusion restreinte), ce qui a permis de corriger certaines zones. Mais dans ces cas-là, l'évaluation reste qualitative et ponctuelle.

### 3.3.3. EVALUATION PAR COMPARAISON A DES MESURES *IN SITU*

Une évaluation de la méthode IRIP a été réalisée par comparaison à des mesures *in situ*, issues de l'instrumentation du bassin versant du Mercier (Rhône) (De Lavenne, 2010; Dehotin et al., 2015a). Des dispositifs de mesure, tels que des pluviomètres, des capteurs d'humidité du sol et des pièges à eau, ont été installés au niveau d'une dizaine de sites choisis par rapport aux cartes IRIP. L'observation, d'une durée d'un an, a permis de mettre en évidence une différence de comportement du bassin vis-à-vis du ruissellement selon que les sites soient positionnés sur des zones propices à la production, au transfert ou à l'accumulation. Les zones de production montrent une humidité du sol plus faible globalement mais une grande variation de l'humidité durant les épisodes pluvieux, ce qui semble montrer une saturation rapide du sol et l'apparition de ruissellement hortonien. Les zones d'accumulation montrent, par ailleurs, une humidité du sol globalement importante, tandis que les zones de transfert montrent une dynamique intermédiaire (Figure I-75). Ce résultat montre la pertinence du concept de la méthode IRIP de cartographier différentes étapes du ruissellement. Cette étude a permis également de justifier certains choix d'indicateurs, tels que les ruptures de pentes convexes pour le transfert et les ruptures concaves pour l'accumulation, ou encore l'influence de l'occupation du sol dans la genèse du ruissellement. Cette

étude a fait ressortir l'importance des caractéristiques de la pluie sur la genèse du ruissellement, bien que cette information n'apparaisse pas actuellement dans la méthode IRIP, mais permet aussi de montrer la pertinence de réaliser des cartes de susceptibilité pour identifier les zones propices au ruissellement. Bien que le bassin du Mercier, sur lequel l'étude a été menée, soit finalement peu favorable au ruissellement et que peu d'évènements pluvieux intenses aient été enregistrés, les tendances sont encourageantes.

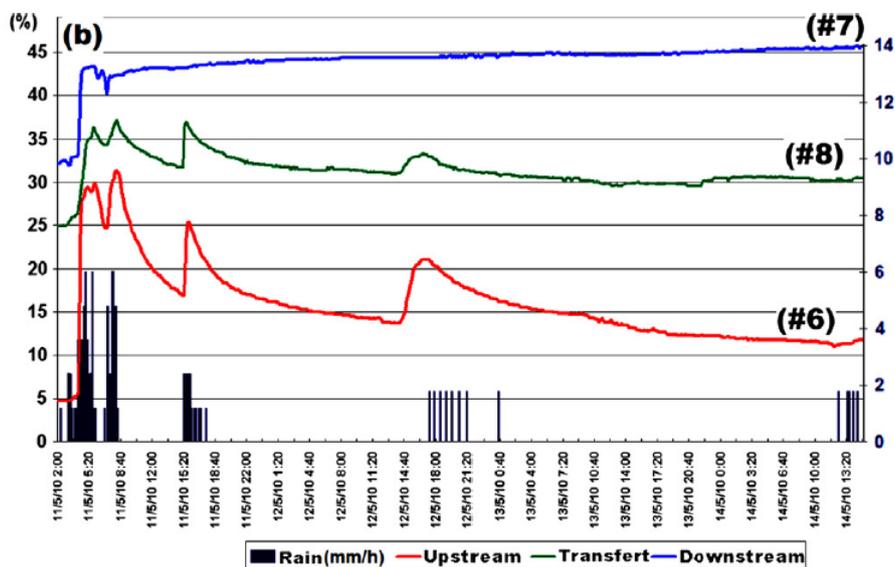
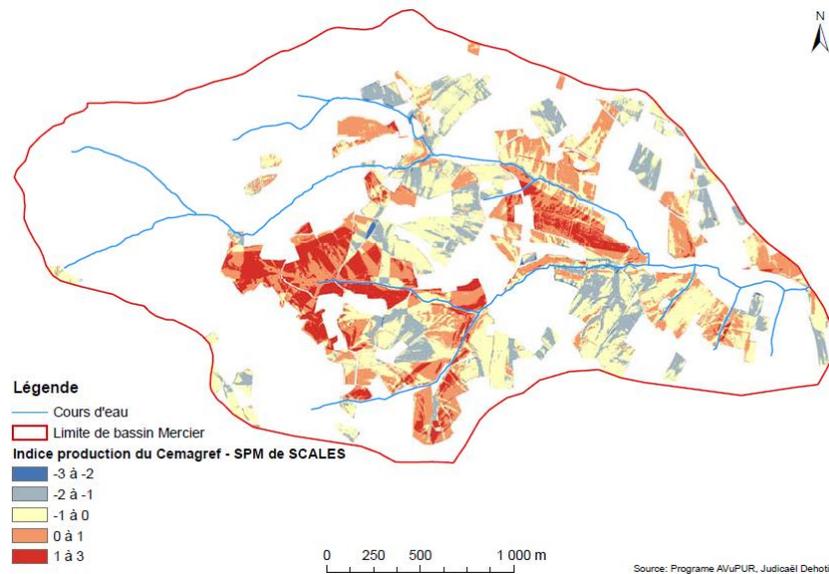


FIGURE I-75: EVOLUTION DE L'HUMIDITE DU SOL DURANT UN EPISODE PLUVIEUX POUR DIFFERENTS SITES DE MESURES (SOURCE: DEHOTIN ET AL., 2015)

D'autres modèles ont été évalués par comparaison avec des mesures *in situ*, ce qui est intéressant pour évaluer la pertinence des représentations cartographiques par rapport à la réalité du terrain. Néanmoins, ces expérimentations sont fastidieuses et chronophages à mettre en place, elles se focalisent généralement sur des zones restreintes, et une extrapolation sur d'autres zones avec des contextes hydro-géomorphologiques différents reste difficile. Bien que la mesure du ruissellement *in situ* soit complexe, davantage d'instrumentations spécifiques au phénomène devraient être mises en œuvre car elles apportent des données précieuses pour l'évaluation des modèles mais aussi pour améliorer la connaissance du phénomène.

### 3.3.4. EVALUATION PAR COMPARAISON A DES CARTES ISSUES D'AUTRES MODELES

Une évaluation de la méthode IRIP par comparaison avec les cartes issues des modèles SCALES et SHYREG (Aubert et al., 2014) a été réalisée. Pour ces comparaisons seule la carte IRIP de production a été utilisée. Pour le modèle SCALES, la distribution des niveaux IRIP de susceptibilité a été comparée aux « niveaux de pression » des cartes SCALES. Ceci a montré une correspondance spatiale des niveaux faibles et des niveaux forts des deux cartes IRIP et SCALES (De Lavenne, 2010). Néanmoins, la comparaison a été restreinte aux zones agricoles, puisque SCALES permet de réaliser des cartes seulement sur ces zones (Figure I-76). Pour la comparaison avec la méthode SHYREG, des cartes de coefficients de ruissellement ont été réalisées. Pour la carte IRIP, les coefficients de ruissellement ont été calculés pour chaque pixel par le ratio de l'aire de production d'IRIP sur l'aire totale. La comparaison avec les coefficients SHYREG a été réalisée visuellement (Arnaud et Dehotin, 2011). Il est ressorti une réelle difficulté de comparaison de deux cartes due à la différence de concept des méthodologies utilisées, une basée sur l'étude des pluies et l'autre basée sur l'étude des sols.



**FIGURE I-76: CARTE DES DIFFERENCES ENTRE LA CARTE IRIP DE SUSCEPTIBILITE A LA PRODUCTION ET LA CARTE DE SENSIBILITE POTENTIELLE DES MILIEUX ISSUE DE SCALES SUR LE BASSIN VERSANT DU MERCIER (SOUS-BASSIN DE L'YZERON) (SOURCE: DE LAVENNE, 2010)**

D'autres méthodes de cartographie ont été comparées à des cartes issues d'autres modèles. Le modèle SCALES, par exemple, a été évalué par comparaison aux sorties des modèles PESERA et de l'INRA (Le Gouée et al., 2010). Mais la difficulté réside dans le lien indirect entre les différentes cartes, réalisées avec des méthodes et des paramètres très différents. De plus, la comparaison de différentes méthodes de cartographie ne permet pas de dire quelle méthode est la plus performante. La comparaison peut également s'avérer complexe lorsque les représentations cartographiques sont de formes différentes, auquel cas une simple comparaison visuelle, peut s'avérer difficile à commenter.

### 3.3.5. EVALUATION PAR COMPARAISON A DES DONNEES APPROCHEES

#### 3.3.5.1. EVALUATION PAR COMPARAISON A DES DONNEES SUR LES OUVRAGES HYDRAULIQUES

Des comparaisons ont été réalisées avec des données de position et de dimension d'ouvrages hydrauliques. Ce type de comparaison a été réalisé sur les bassins de l'Azergues (Rhône) (Bonnet-Carrier et al., 2013) et de la Lézarde (Seine-Maritime) (Patrice, 2015). Les données sur les ouvrages hydrauliques sont ici considérées comme informant sur des problématiques de ruissellement au niveau des zones d'implantation de ces ouvrages, et sont donc utilisées comme données de comparaison. La première comparaison s'est focalisée sur la carte IRIP de production, et a montré que 80% des bassins de rétention se trouvent sur des pixels IRIP supérieurs ou égaux à 3. Les volumes des bassins de rétention ont également été comparés aux niveaux des pixels IRIP autour des bassins (Figure I-77), montrant une faible corrélation. Sur le bassin de la Lézarde, cette comparaison a été effectuée en considérant des zones tampons autour des ouvrages afin de pallier à l'incertitude dans la géolocalisation. Les résultats montrent une correspondance de 64%, avec une zone tampon de 25 m, entre les ouvrages et les pixels IRIP d'accumulation supérieurs ou égaux à 4. Sur ces deux comparaisons, les difficultés ont été de savoir quel niveau de susceptibilité IRIP est à considérer (3 ou 4/5), de choisir s'il faut considérer les pixels autour des ouvrages hydrauliques ou sur l'ensemble des bassins amonts (moyenne ou médiane), ou encore de savoir comment prendre en compte les ouvrages placés en séries. De plus, le lien entre les cartes IRIP et la dimension des ouvrages n'est pas direct. Le choix dans la conception de ces ouvrages dépend beaucoup

du contexte local (configuration, espace, etc.). Les problématiques qui ont émergées dans le cadre de ces évaluations sont caractéristiques des comparaisons de données de fonds et de formes différentes.

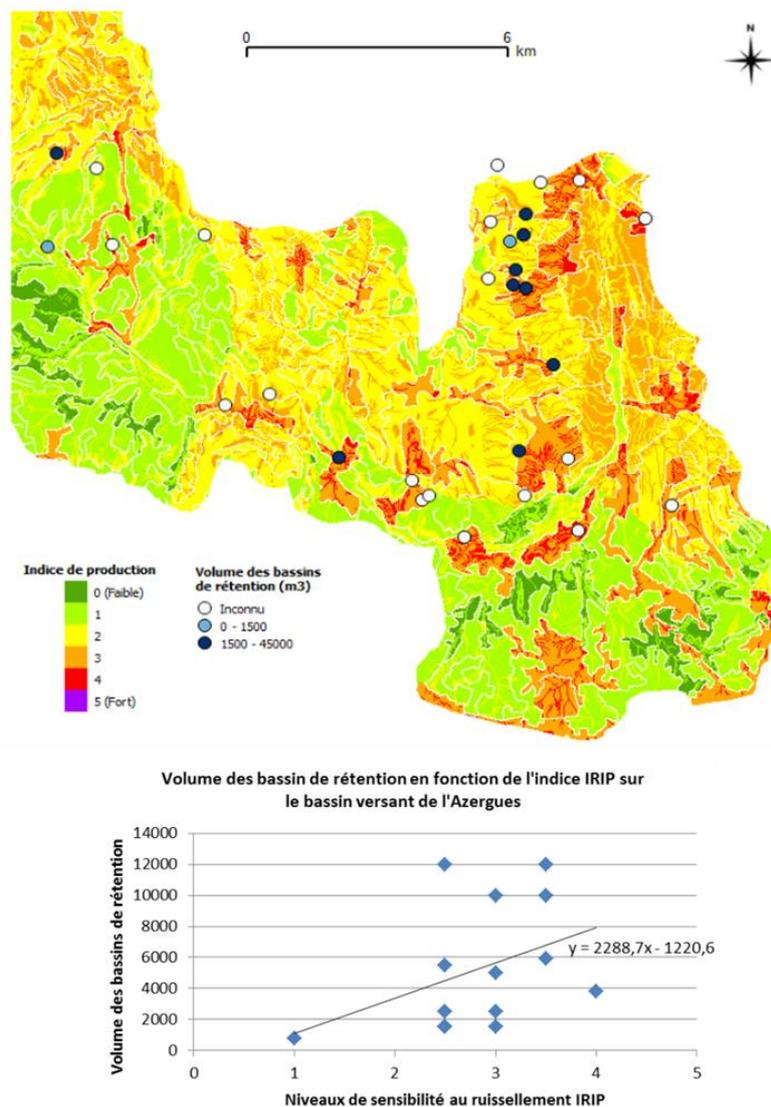


FIGURE I-77: COMPARAISONS VISUELLE ET STATISTIQUE ENTRE LES BASSINS DE RETENTION ET LA CARTE IRIP DE PRODUCTION SUR LE BASSIN VERSANT DE L'AZERGUES (SOURCE: BONNET-CARRIER ET AL., 2013)

### 3.3.5.2. EVALUATION PAR COMPARAISON AUX DONNEES CATNAT

Dans le rapport technique de la méthode IRIP (Dehotin et Breil, 2011b), les données de la base GASPARG sur les arrêtés de catastrophes naturelles ont été comparées aux cartes IRIP de susceptibilité au transfert et à l'accumulation du ruissellement. Des comparaisons visuelles et statistiques (diagramme de dispersion) ont été réalisées pour plus de 400 communes. Ces comparaisons montrent une tendance positive encourageante entre le pourcentage du territoire des communes sensibles au ruissellement d'après IRIP et le nombre d'arrêtés de catastrophes naturelles par commune. Néanmoins, l'utilisation des données de la base GASPARG pour l'analyse des évènements de ruissellement a ses limites. La manque de scientificité de cette base de données soulevé par Douvinet (2006b) et Douvinet et Vinet (2012) est lié entre autres à son architecture peu pertinente pour l'extraction des épisodes de ruissellement. De plus, ces déclarations de catastrophes naturelles reflètent surtout les zones à enjeux, et plus particulièrement

les zones vulnérables. Pour tenter de pallier à ce biais, les comparaisons ont été effectuées seulement sur les zones urbaines (d'après la base d'occupation du sol Corine Land Cover). La tendance positive est davantage marquée (Figure I-78). Bien que ces données comportent de nombreux biais et incertitudes, elles restent les seules disponibles pour évaluer la méthode IRIP sur de larges territoires.

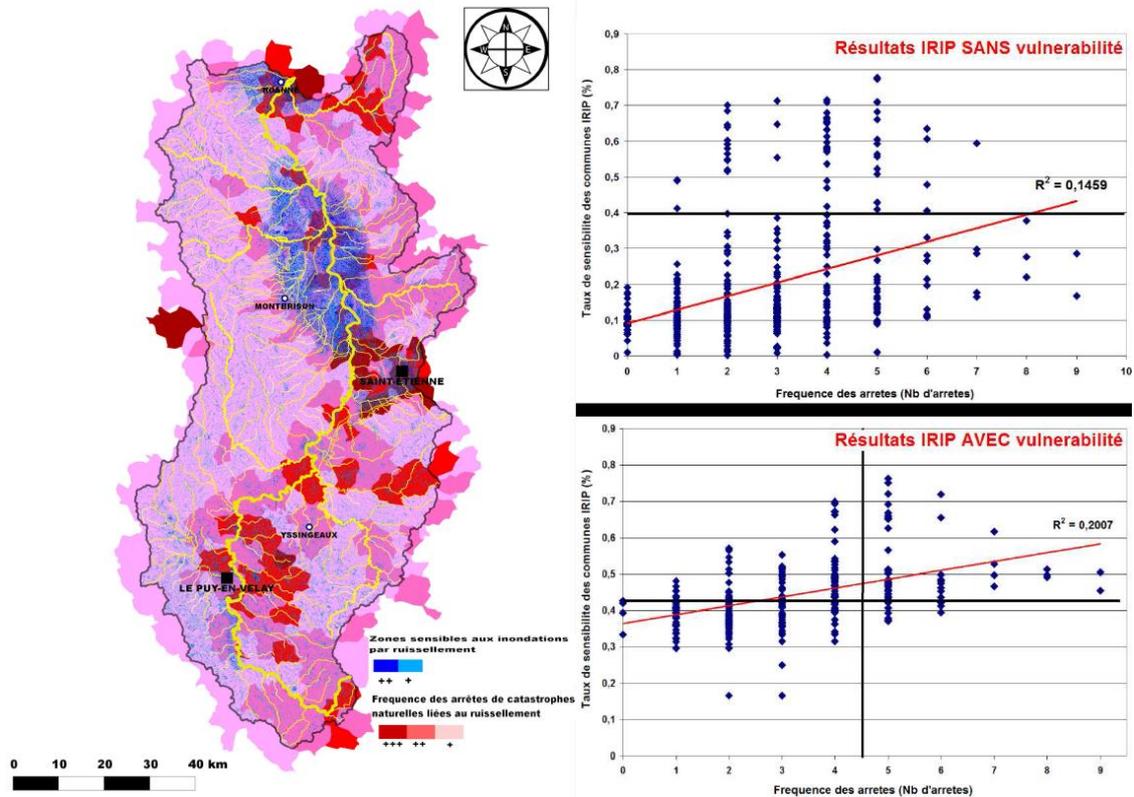


FIGURE I-78: COMPARAISON ENTRE LE NOMBRE D'ARRÊTES CATNAT PAR COMMUNE ET LE TAUX DE SURFACES SENSIBLES AU RUISSellement D'APRÈS IRIP, SUR LE BASSIN DE LA LOIRE AMONT, EN CONSIDÉRANT TOUTE LA ZONE D'ÉTUDE (SANS VULNERABILITE) ET EN CONSIDÉRANT SEULEMENT LES ZONES URBAINES (AVEC VULNERABILITE) (SOURCE: DEHOTIN ET BREIL, 2011B)

### 3.3.5.3. ÉVALUATION PAR COMPARAISON A DES DONNÉES DE DÉSORDRES SUR LES VOIES FERRÉES

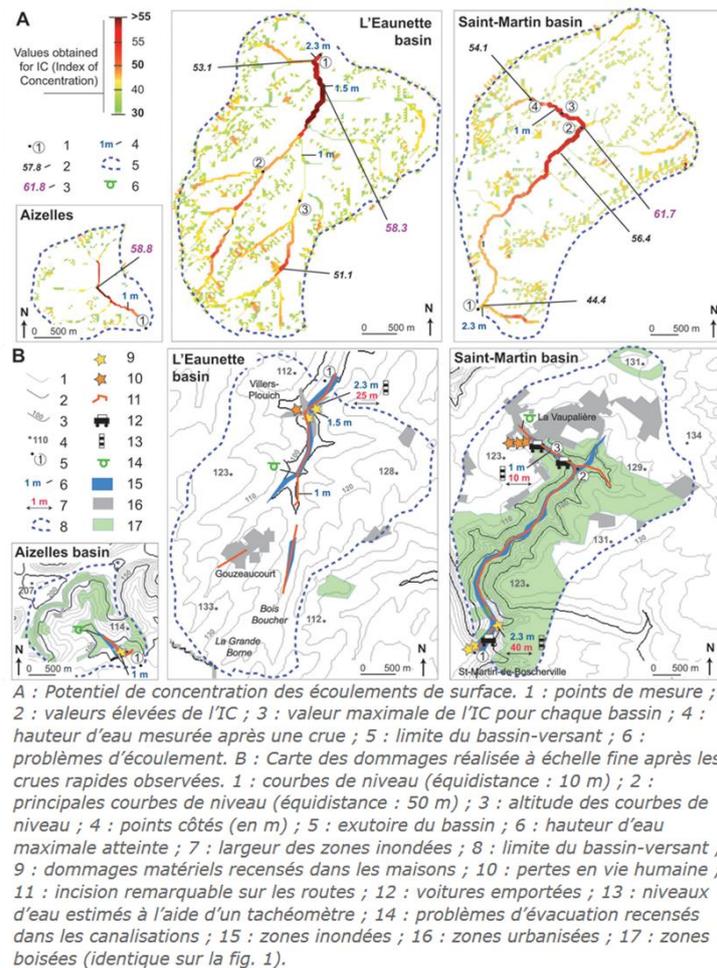
Des comparaisons avec des données de désordres sur les voies ferrées ont été effectuées dans le cadre d'études et de stages réalisés à SNCF (Dehotin et al., 2014, 2015b; Laverne, 2013; Mellal, 2014). Ces tests se sont focalisés sur des événements bien connus. Les comparaisons sont globalement visuelles et l'information spatiale des cartes IRIP est évaluée par rapport aux diagnostics effectués à la suite aux désordres, par SNCF. Ces comparaisons montrent qu'il existe un lien entre les niveaux de susceptibilités IRIP forts et l'occurrence de désordres. Néanmoins, il y a un besoin de fixer un cadre méthodologique pour poursuivre ces tests. Pour chacune de ces études, il a été identifié un fort potentiel de la méthode IRIP à contribuer à l'amélioration de la gestion des risques liés au ruissellement, notamment grâce aux trois cartes IRIP, qui pourraient permettre d'aller vers une gestion intégrée aux bassins versants. Ces études concluent sur le besoin de capitaliser davantage de données de désordres et d'effectuer davantage de tests pour évaluer le réel apport de la méthode IRIP à la maîtrise du ruissellement.

#### 3.3.5.4. EVALUATION PAR COMPARAISON A DES DONNEES DE COUPURES DE ROUTE

Les axes linéaires au sol, tels que les routes ou les voies ferrées, étant particulièrement exposés aux écoulements de surface, sont de bons indicateurs de problématiques de ruissellement en certains points des linéaires. Versini (2007) utilise des données sur les coupures de route (base de données constituées par 40 années d'observation et de recensement dans le département du Gard) pour évaluer un modèle de prévision de crues rapides. Cet exemple illustre l'évaluation d'un modèle de prévision de crue et non de ruissellement, mais la méthode utilisée est intéressante pour la problématique de la thèse. Pour effectuer cette comparaison, un « indice d'efficacité » est utilisé, correspondant au pourcentage d'évènements détectés qui a été réellement observé. Naulin et al. (2013) reprennent ces travaux et mettent en œuvre une méthode d'évaluation plus robuste par statistique de contingence, en calculant quatre indices de vérifications : probabilité de détection, taux de fausses alarmes, probabilité de fausses détections et Peirce Skill Score. Ces études pointent également le biais qui existe entre la prévision d'un aléa et l'occurrence d'impacts. Pour pallier à ce biais, la vulnérabilité de la route a été caractérisée, via l'analyse de la base de données de coupure de route, montrant ainsi la réelle complexité due à l'influence de la configuration locale des sections de routes (Naulin et al., 2013; Versini et al., 2010a).

#### 3.3.5.5. EVALUATION PAR COMPARAISON A DES DONNEES D'IMPACTS

Certaines méthodes d'évaluation par comparaison à des données d'impacts se focalisent généralement sur des épisodes précis. Bien que de lourds travaux soient entrepris pour constituer ces bases de données d'impacts, les méthodes d'évaluation restent assez sommaires, les comparaisons étant souvent visuelles. Par exemple, le modèle RuiCells a fait l'objet d'évaluation par comparaison avec des données d'impacts (sur des personnes, des habitations, des voitures, etc.) et de traces (incisions sur les routes, estimations de niveaux d'eau, etc.) pour cinq épisodes d'inondation par ruissellement sur 5 bassins versant (Douvinet et al., 2013) (Figure I-79). La limite de ce type de comparaison est qu'il n'y a pas de mesure de performance du modèle. De plus, il n'y a pas de données là où il n'y a pas d'enjeu, puisque pas de témoins. Ce type de comparaison est faisable pour un nombre réduit de zones d'étude, mais avec plus de données, il faudrait l'automatiser.



**FIGURE I-79: EVALUATION DES CARTES ISSUES DU MODELE RUICELLS PAR COMPARAISON VISUELLE DE LA LOCALISATION D'IMPACTS POST-EVENEMENT ET AUX ZONES FORTEMENT EXPOSEES D'APRES LE RUICELLS (SOURCE: ADAPTE DE DOUVINET ET AL., 2013)**

D'autres travaux utilisent les statistiques de contingence pour évaluer l'efficacité de modèles de crues rapides par rapport à des données d'impacts, tels que les travaux de Calianno et al. (2013). Pour cette étude, la base de données d'impacts a été construite via des observations terrain remontées par des témoins et des enquêtes téléphoniques à destination de particuliers, effectuées durant des épisodes de crues (Gourley et al., 2010; Ortega et al., 2009). Pour quantifier la performance du modèle, des probabilités de détection et des taux de fausses alarmes ont été calculées. Cette évaluation a bénéficié de nombreuses données de 'non-événement', issues des enquêtes téléphoniques, permettant des calculs plus robustes des tables de contingence. Ces travaux mettent également en lumière le lien indirect entre les prévisions du modèle et les impacts effectifs, et donc le besoin de prendre en compte la vulnérabilité des enjeux. L'utilisation des statistiques de contingence est complétée de comparaisons visuelles par superposition des prévisions et des impacts (Figure I-80).

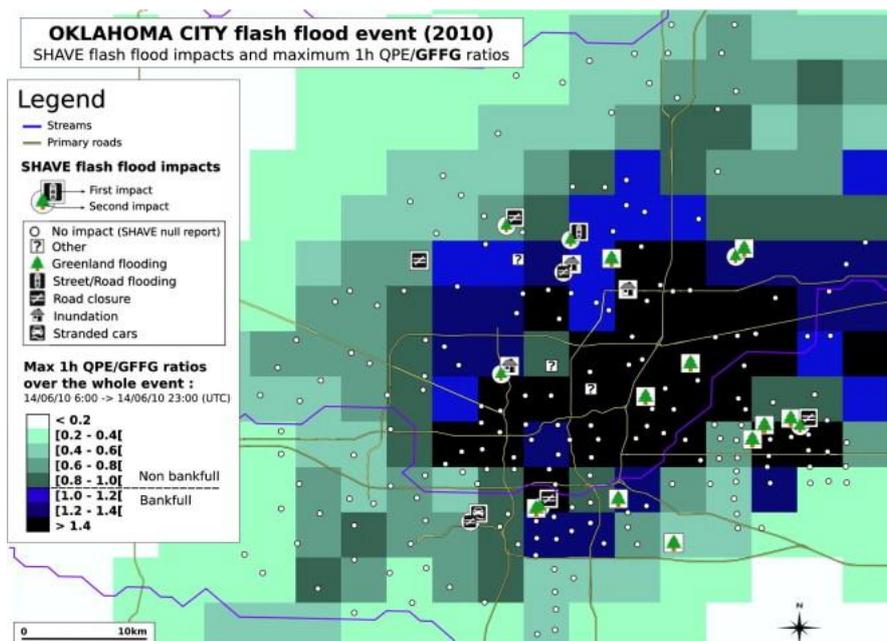
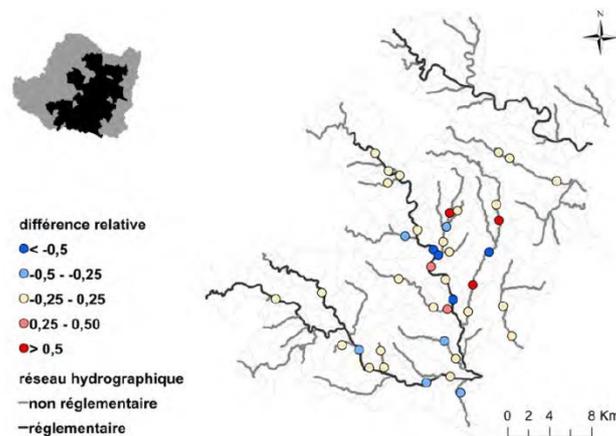


FIGURE I-80: L'ÉVALUATION D'UN MODÈLE DE PRÉVISIONS DE CRUES RAPIDES PAR COMPARAISON AVEC DES DONNÉES D'IMPACTS VIA DES STATISTIQUES DE CONTINGENCE ET DES COMPARAISONS VISUELLES (SOURCE: CALIANNO ET AL., 2013)

L'évaluation par statistiques de contingence est également utilisée dans les travaux de Defrance (2014) et de Defrance et al. (2014). Les résultats de la méthode AIGA de prévision de crues rapides sont comparés à des données historiques de dégâts issues des bases de données des services RTM (Restauration de Terrains de Montagne, services de l'Office Nationale des Forêts). L'objectif ici est d'évaluer la performance du système d'alerte mais également d'identifier des seuils d'alerte à partir desquels les probabilités de détection sont maximisées et les taux de fausses alarmes sont minimisés. Pour cela, les critères probabilité de détection et de taux de succès, calculés à partir des tables de contingence, sont affichés dans un graphique des probabilités de détections en fonction des taux de succès, pour différents seuils. Defrance (2014) propose d'utiliser cette méthode pour comparer différents modèles entre eux.

Les données de la Caisse Centrale de Réassurance sur les sinistres recensés lors d'évènement déclarés « catastrophe naturelle » ont été utilisées en tant que données de validation dans les travaux de Le Bihan (2016) pour évaluer un modèle d'impact d'inondation par débordement. Une évaluation détaillée a été effectuée sur le Territoire à Risque Important d'Inondation (TRI) d'Alès pour laquelle un long travail de prétraitement des données de comparaison a dû être effectué. Pour évaluer les résultats du modèle de prévision d'impact, les nombres de sinistres simulés sont comparés aux nombres de bâtiments situés en zone inondable pour plusieurs tronçons le long du cours d'eau. Les résultats de l'évaluation sont affichés sous forme de diagramme de dispersion accompagnés d'une « probabilité de réussite » qui est égale au ratio du nombre de sinistres simulés sur le nombre de bâtiments inondables. Les diagrammes sont réitérés pour différents prétraitement des données de comparaison. En plus de ces diagrammes, une comparaison visuelle est effectuée via la réalisation d'une carte des différences relatives entre le nombre de sinistres recensés et simulés (Figure I-81).



**FIGURE I-81: EVALUATION DES RESULTATS D'UN MODELE DE PREVISION D'IMPACT PAR CALCUL DE PROBABILITES DE REUSSITE ET PAR REALISATION DE CARTES DES DIFFERENCES RELATIVES (SOURCE: LE BIHAN, 2016)**

Les interventions des pompiers sont une source de données conséquentes qui peuvent informer sur le lieu d'un incident mais aussi sur la chronologie des impacts durant un même épisode. Bien que ces informations soient encore difficilement accessibles, Le Bihan (2016) fait une rapide évaluation de la qualité et des possibilités d'exploitation de ce type de données pour évaluer un modèle d'impact et conclut sur les difficultés de prétraitement de l'information et du fort biais qu'elles contiennent. Il est préconisé d'utiliser ce type de données en complément d'autres données. Des études utilisent également des données issues des réseaux sociaux en tant que données de comparaison pour évaluer des modèles (Saint-Martin et al., 2016). Néanmoins, un tri approfondi doit être effectué avant de pouvoir traiter ce type de donnée.

### 3.3.6. SYNTHÈSE

Ces exemples d'évaluation ont illustré les problématiques liées au manque de données sur le ruissellement. Plusieurs études ont donc utilisé des données approchées pour l'évaluation de modèles. Une des principales difficultés évoquées se trouve dans la constitution des bases de données approchées. La constitution de base de données nécessite un long travail de collecte mais également un travail de prétraitement, afin de comparer au modèle des informations raisonnablement similaires. Une autre difficulté évoquée se trouve dans la comparaison de données de fonds et de formes différents. Beaucoup d'évaluations sont effectuées par comparaison visuelle entre la localisation d'impacts et les cartes d'aléa, mais les résultats restent assez qualitatifs. D'autres méthodes font appel aux statistiques de contingence. Le calcul de tables de contingence et d'indicateurs associés permet en effet de fournir une mesure de la performance d'un modèle. Néanmoins, ces différentes études attestent de la difficulté de gérer ce lien indirect entre aléa et impact. Les impacts ne se produisent que sur les enjeux et plus encore sur les enjeux vulnérables. Pour une évaluation fiable, la vulnérabilité des objets d'étude doit être caractérisée. Peu de méthodes sont encore développées pour aider à caractériser la vulnérabilité, puisqu'elle dépend pour beaucoup de l'objet considéré et du contexte local. Par ailleurs, ici sont présentées des évaluations de système de prévision ou de système d'alerte. Il est donc pertinent de calculer des probabilités de détection et des taux de fausses alarmes. Pour l'évaluation de cartes de susceptibilité, ces indicateurs ne semblent pas aussi pertinents. Il d'abord pouvoir déterminer un seuil à partir duquel on peut considérer qu'une alerte est annoncée afin d'être en mesure de la comparer aux données d'impacts. Or, aucun niveau de susceptibilité de la méthode IRIP n'a été fixé pour considérer une zone en phase d'alerte.

D'ailleurs, le terme d'alerte comporte une notion de temps, une alerte est déclenchée pour une période de temps précise, or, les cartes IRIP sont des cartes statiques.

Concernant l'évaluation de la méthode IRIP, la difficulté réside également dans la quantité d'information à évaluer. Il est possible d'évaluer chacune des trois cartes IRIP séparément, ou bien leur apport mutuel pour l'analyse d'une dynamique spatiale. Il est également possible d'évaluer les cartes en considérant seulement les pixels supérieurs ou égaux à 3, 4 ou 5, ou encore d'évaluer s'il ne se produit jamais de ruissellement au niveau des pixels très faible (0, 1 ou 2). Ces tests de comparaison peuvent être répétés pour tenter de calibrer la méthode IRIP, en faisant varier certains indicateurs ou seuils par exemple. Néanmoins, les données approchées peuvent difficilement être exploitées à des fins de calibration, puisque par définition elles ne représentent pas directement le phénomène. Finalement, l'évaluation de la méthode IRIP requiert de choisir des éléments à évaluer en priorité, de définir une stratégie d'évaluation par rapport à ce que l'on souhaite évaluer, tout en palliant aux biais et aux incertitudes contenues dans les données approchées.

## CONCLUSION ET DEMARCHE GENERALE DE LA THESE

Les travaux de thèse évoluent ainsi dans des contextes scientifique et technique riches en problématiques. L'aléa ruissellement a été finalement peu étudié en regard d'autres aléas hydrologiques. Il y avait donc un besoin de réaliser un état des connaissances assez conséquent. Le premier chapitre a permis d'affiner la définition du phénomène de ruissellement qui englobe ses phénomènes induits. Bien définir le phénomène est essentiel pour pouvoir le maîtriser. Une estimation de l'impact du ruissellement sur la société a été réalisée en synthétisant les études effectuées dans ce domaine. Il ressort une réelle complexité de cette évaluation mais aussi un réel enjeu. Tant que l'impact n'est pas clairement défini, on ne peut pas être en mesure de gérer les risques. Cette estimation est nécessaire afin de choisir les moyens à mettre en œuvre, d'évaluer leur efficacité, et de convaincre d'investir du temps et de l'argent à des fins de gestion des risques.

L'impact du ruissellement sur le système ferroviaire a été également peu exploré. La caractérisation des risques liés au ruissellement sur l'infrastructure ferroviaire n'est définie que depuis récemment. Pour autant, elle n'est pas encore répandue entre tous les agents, il existe par exemple une confusion des termes coulée, glissement, ravinement, dépôts, etc. La gestion des risques liés au ruissellement dans le contexte ferroviaire ne se fait pas encore par approche systémique et repose encore beaucoup sur une maintenance curative. Ceci est dû notamment au manque de données disponibles sur l'aléa ruissellement à l'échelle du réseau ferré national pour aider les experts à l'identification des zones exposées. Ceci est également dû à la problématique technique de la gestion de la composante solide du ruissellement (apport de boue et de matériaux).

Malgré l'importance critique de disposer de cartes d'aléa pour gérer les risques associés, il n'existe pas encore en France de représentation cartographique de référence de l'aléa ruissellement. Bien qu'il existe de nombreuses méthodes de cartographie du ruissellement, elles proposent souvent des représentations mono-processus ou nécessitent des données d'entrée précises et des calibrations, ce qui est problématique à l'échelle nationale. La méthode IRIP, créée à Irstea et en co-développement avec SNCF, propose de cartographier la susceptibilité au ruissellement en trois étapes, production, transfert, accumulation, via une approche par combinaison géomatique d'indicateurs. La méthode IRIP se veut simple (peu de données d'entrée) et robuste (sans calage *a priori*), mais son concept, son implémentation et les cartes produites requièrent d'être rigoureusement évaluées, afin d'être utilisées dans un contexte opérationnel. L'évaluation de cartes d'aléa ruissellement est complexe, car peu de données existent sur le phénomène. L'évaluation doit donc passer par la comparaison des cartes à des données approchées, telles que des données de conséquences (impacts, mesures de protection, etc.). Emergent alors des questions méthodologiques pour comparer des données de fond et de forme différentes. Des méthodes d'évaluation utilisent les statistiques de contingence ce qui permet de quantifier la performance d'un modèle, mais lorsqu'il s'agit de cartes de susceptibilité, il n'y a pas de seuil d'alerte directement utilisable pour comparer avec les impacts. De plus, la différence entre aléa et impact nécessite de prendre en

compte les aspects de vulnérabilité. Pour l'évaluation de la méthode IRIP, une stratégie de comparaison des différentes données doit être établie afin de prendre en compte tous les biais et incertitudes.

Suite à cette revue des méthodes d'évaluation, il est proposé d'utiliser, pour l'évaluation de la méthode IRIP, une méthode basée sur le calcul de tableaux de contingence et d'indicateurs de type probabilité de détection et taux de fausses alarmes. Cette méthode est proposée au vu des données disponibles pour l'évaluation d'IRIP qui sont des données d'impacts. La comparaison à ces données va donc permettre d'évaluer la capacité de la méthode IRIP à retrouver ces impacts. Il semble donc pertinent de réaliser des tableaux de contingence afin de dénombrer les impacts retrouvés, des impacts non retrouvés. Par ailleurs, les indicateurs calculés sur la base de ces tableaux de contingence sont régulièrement utilisés dans la littérature, on dispose donc d'intervalles de variation de référence, et de conseils d'interprétation. Suite au choix de cette méthode, se posent de nombreuses questions méthodologiques quant à la mise en forme des données d'impacts et des cartes IRIP pour être en mesure de les comparer. Pour gérer cette problématique, il est proposé de procéder en deux étapes. Dans un premier temps, une phase de constitution de la méthode d'évaluation permettra de tester de nombreux choix de prétraitement des données. Cette phase ne mènera pas directement à la quantification de la performance de la méthode IRIP, mais permettra d'élaborer une méthode d'évaluation robuste où chaque hypothèse aura été justifiée. Dans un second temps, une fois que la méthode d'évaluation sera consolidée, il sera possible de la complexifier en y intégrant les aspects de vulnérabilité. A l'issue de cette seconde étape, il sera possible de fournir une estimation de la performance de la méthode IRIP à identifier les zones exposées au ruissellement. Suite à ces deux étapes, la méthode d'évaluation a été élaborée, et on dispose à présent de chiffre de référence quant à la performance de la méthode IRIP. Il est enfin possible de tester des propositions de développement. Ces propositions pourront alors être évaluées par comparaison aux données d'impacts, et il sera possible de déterminer si les développements proposés sont effectivement des améliorations. Cette stratégie, développée dans la deuxième partie de la thèse, va permettre d'atteindre les deux premiers objectifs de la thèse qui sont l'évaluation de la méthode IRIP et la proposition de pistes d'amélioration.

Ensuite, la troisième partie de la thèse se focalise sur l'évaluation de la contribution de la méthode IRIP à la gestion des risques liés au ruissellement, dans le contexte ferroviaire et dans d'autres contextes. L'objectif de cette partie est de mettre en contexte la méthode IRIP, afin de proposer des usages concrets, ainsi que des pistes d'adaptation des cartes IRIP, pour exploiter les informations spatialisées pour différents métiers de la gestion des risques. Pour répondre à cet objectif, la méthode IRIP sera comparée aux résultats de différentes études en lien avec la gestion des risques : des zonages réglementaires de plans de prévention des risques, des retours d'expérience post-incidents sur les voies ferrées, et un diagnostic de ligne, mission essentielle pour une bonne gestion de l'infrastructure ferroviaire. A l'issue de cette troisième partie, il sera possible de dire comment et en quoi la méthode IRIP peut être un outil pour la gestion des risques liés au ruissellement.

## DEUXIEME PARTIE : EVALUATION ET DEVELOPPEMENT DE LA METHODE IRIP SUR LA LIGNE DE PARIS-SAINT- LAZARE AU HAVRE

### INTRODUCTION

Suite à la présentation du contexte de la thèse et des enjeux scientifiques et opérationnels, cette seconde partie présente l'évaluation de la méthode IRIP sur la ligne de Paris-Saint-Lazare au Havre. Pourquoi la méthode IRIP doit-elle être évaluée ? La méthode IRIP de cartographie du ruissellement utilise une approche originale de combinaison géomatique d'indicateurs du paysage et propose de représenter l'aléa ruissellement sous trois étapes, la production, le transfert et l'accumulation. Tout d'abord, la pertinence de cette approche doit être évaluée. Peu de modèles de ruissellement utilisent ce type d'approche, il est essentiel de bien appréhender le sens des cartes fournies. Peut-on réellement allier simplicité et performance ? De plus, dans le but d'un usage opérationnel des cartes IRIP, il est nécessaire de connaître leur valeur (quelles informations apportent-elles ?) et leur fiabilité (jusqu'où peut-on leur faire confiance ?). Les cartes d'aléa peuvent être des éléments de décision dans un contexte de gestion des risques liés au ruissellement. Ces décisions peuvent engendrer des changements dans les politiques de sécurité et peuvent également engendrer des coûts parfois importants. Il est donc capital de disposer d'un maximum d'informations pour interpréter les cartes IRIP avant de prendre des décisions.

L'objectif de cette seconde partie est de proposer une méthode d'évaluation de la méthode IRIP s'appuyant sur des données d'impacts liés au ruissellement sur les voies ferrées. La comparaison de cartes d'aléa à des données d'impacts nous amènera à nous interroger sur la caractérisation de la vulnérabilité de l'infrastructure ferroviaire face au ruissellement. Une fois la méthode d'évaluation établie, il sera possible de fournir une quantification de la performance de la méthode IRIP à détecter les zones exposées à l'aléa ruissellement. Enfin, sur la base des scores de performance obtenus, il sera testé des améliorations de la méthode IRIP, en termes de performance, mais aussi en termes de lisibilité des représentations cartographiques.

Pour évaluer, il y a besoin d'une référence, de données de comparaison. Dans ce travail, les impacts liés au ruissellement sur la voie ferrée sont utilisés en tant que référence. Les impacts sur le réseau ferré sont en effet de bons indicateurs de problématiques de ruissellement en certains points. Le réseau ferré est réparti sur tout le territoire. Les voies ferrées quadrillent les bassins versants. Elles interceptent donc les écoulements de surface et souvent pour de très petits bassins versants, non instrumentés. Les voies ferrées sont de bons témoins du ruissellement. De plus, certaines lignes sont implantées dans le paysage depuis plus d'un siècle, on peut donc espérer collecter des données sur le ruissellement sur une grande période de temps, via les archives du gestionnaire d'infrastructure. La première problématique est donc de créer une base de données des impacts liés au ruissellement incorporant les informations qui seront utiles pour l'évaluation des cartes IRIP. Ensuite, il faut proposer une méthode de comparaison, pour

établir les liens entre les données d'aléa, de risque et de vulnérabilité. La difficulté se trouve dans la comparaison de données de fonds et de formes différentes. Les données d'aléa sont les trois cartes IRIP, avec des niveaux de susceptibilité de 0 à 5. Les données de risque sont les impacts. Ce sont des données qualitatives, imprécises et non nécessairement exhaustives, en dépit des efforts de collecte qui auront été consentis. Enfin, les données de vulnérabilité sont les informations relatives à l'infrastructure, sa configuration, ses dimensions spatiales, son évolution dans le temps, ainsi que son environnement proche et tous les moyens structurels et organisationnels mis en œuvre pour la protéger.

Cette partie est organisée en trois chapitres qui reflètent la maturation de la méthode d'évaluation finalement proposée.

- Le Chapitre 1 présente la constitution de la base de données d'impact et présente les informations qui ont pu être collectées, ainsi que la méthode d'évaluation quantitative proposée. Cette dernière fait appel aux outils utilisés dans l'évaluation de prévisions météorologiques et cherche à dénombrer, via des tableaux de contingence, les impacts bien identifiés par la méthode IRIP, ceux qui sont manqués, ceux qui sont identifiés à tort et enfin les zones sans impact car non exposées. La difficulté de la mise en œuvre d'une telle méthode à partir des cartes IRIP est liée à la nature cartographique et non quantitative de l'information disponible (contrairement à une prévision hydrologique on ne peut pas dire si oui ou non un seuil de vigilance a été dépassé). Le premier chapitre s'attache donc à comparer la pertinence de plusieurs méthodes de prétraitements des cartes IRIP et des données d'impact afin de calculer les tables de contingence.
- Cette première approche a mis en lumière qu'on ne peut pas dissocier les données d'impact, des informations sur l'infrastructure. L'infrastructure a une influence sur les écoulements de surface et ceci se traduit par (1) des impacts qui ne sont pas nécessairement localisés au niveau du point d'arrivée de l'eau, et (2) par la nature de l'impact qui n'est pas forcément en lien avec le niveau de susceptibilité des cartes IRIP. Parfois, l'écoulement n'aura même pas généré d'impact car le tronçon est protégé. Ce second chapitre présente donc la collecte des données sur l'infrastructure, propose une méthode de caractérisation de sa vulnérabilité. Ceci amène à complexifier la méthode d'évaluation proposée au premier chapitre en y intégrant le paramètre de vulnérabilité. Ce chapitre se conclut par une estimation de la performance de la méthode IRIP à identifier les tronçons de voie ferrée exposés au ruissellement. Cet estimation vaut donc pour la méthode IRIP dans sa configuration par défaut (telle que présentée dans la première partie de la thèse).
- Une fois la méthode d'évaluation établie, il devient possible d'envisager des améliorations et des évolutions de la méthode IRIP, dont l'apport peut être évalué avec la méthode du chapitre 2. Le chapitre 3 s'intéresse à cette question. Finalement, sur la base de ces trois jeux de données, les cartes IRIP, les données d'impacts, la caractérisation de la vulnérabilité, serait-il possible de calibrer la méthode IRIP ? Serait-il possible de trouver un optimum de paramétrage de la méthode IRIP qui pourrait correspondre au mieux aux données d'impacts et de vulnérabilité ? Il est possible de tester de multiples paramètres dans la méthode IRIP, le choix des indicateurs, les méthodes de calcul des indicateurs, leur seuil, leur pondération, etc. Un processus de test doit être déterminé afin de ne pas se perdre dans les possibilités de modifications. Nous testons dans ce chapitre un nombre limité de nouvelles paramétrisations de la méthode qui découlent directement de l'analyse critique des résultats de l'évaluation réalisée dans les deux chapitres précédents et des indicateurs utilisés pour produire les cartes IRIP. Le but est d'aboutir à une méthode IRIP plus robuste et à des cartes plus lisibles.

# CHAPITRE 1 : CREATION D'UNE METHODE D'EVALUATION PAR COMPARAISON AVEC LES IMPACTS SUR LA VOIE FERREE

## 1.1. INTRODUCTION

Ce chapitre présente la création de la méthode d'évaluation des cartes IRIP par comparaison aux données d'impacts. La première difficulté réside dans la constitution de la base de données des impacts. Ceci nécessite un long travail de capitalisation des informations, dispersées dans les diverses bases de données de SNCF. Les bases de données numériques n'étant utilisées que depuis récemment à l'échelle de la vie de la ligne, le recours aux archives est indispensable pour collecter les données historiques. Ce travail a nécessité l'appui de compétences en archivistique. Les données ainsi collectées doivent ensuite être analysées puis homogénéisées afin de constituer la base de données de référence des impacts liés au ruissellement sur la voie ferrée.

Ensuite, pour évaluer les cartes IRIP par comparaison avec les données d'impacts, une méthode d'évaluation est proposée, basée la réalisation de tableaux de contingence et le calcul d'indicateurs de performance. Cette proposition repose sur des méthodes classiques d'évaluation de prévisions, utilisées notamment pour les modèles météorologiques et hydrologiques (WWRP/WGNE Joint Working Group on Forecast Verification Research, 2015). La problématique ici est de comparer des données de fonds et de formes différentes. Les cartes IRIP sont un ensemble de trois cartes, pixélisées (de type raster), avec des niveaux de susceptibilité de 0 à 5 ; et les données d'impacts sont des données linéaires (de type vecteur), géolocalisées sur la voie ferrée par des points kilométriques de début et de fin, et comportant des informations qualitatives (type d'impacts, date, etc.). Des prétraitements de mise en forme sont donc nécessaires, afin d'être en mesure de comparer ces données de façon quantitative.

L'objectif de ce premier chapitre est donc d'élaborer la méthode d'évaluation des cartes IRIP par comparaison aux données d'impacts. Pour traiter la problématique de mise en forme des données, la méthode d'évaluation sera appliquée pour différents choix de prétraitement des données. Ainsi, il sera possible de mieux appréhender l'influence de la mise en forme sur les résultats de la comparaison. Les prétraitements devront être justifiés par rapport à la réalité, et rester simples à mettre en œuvre et à reproduire. A l'issue de ce chapitre, les prétraitements les plus pertinents seront déterminés et conservés, pour ensuite complexifier la méthode d'évaluation avec la prise en compte de la vulnérabilité.

Ce chapitre présente dans un premier temps la zone d'étude, la ligne de Paris-Saint-Lazare au Havre et le tronçon d'étude de 80 km entre Rouen et Le Havre, ainsi que la construction des cartes IRIP de susceptibilité à la production, au transfert et à l'accumulation du ruissellement. Ensuite, le travail de création de la base de données d'impacts liés au ruissellement sur l'infrastructure ferroviaire sera présenté. Puis, la méthode de comparaison des cartes IRIP et des données d'impact sera expliquée, ainsi que les différentes mises en forme des données à tester. Enfin, les résultats de la comparaison seront

présentés pour les différents types de prétraitements, puis ils seront discutés afin de garder la mise en forme la plus pertinente pour la suite de l'évaluation.

## 1.2. MATERIELS ET METHODES

### 1.2.1. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

La ligne de Paris-Saint-Lazare au Havre constitue la ligne 340 000 du Réseau ferré National. Elle est une des grandes artères ferroviaire du nord-ouest de la France et relie Paris aux agglomérations de Rouen et du Havre. Le tronçon de Paris à Rouen, d'une longueur de 128 km, a été inauguré en 1843 et le tronçon de Rouen au Havre, de 94 km supplémentaire, a été inauguré en 1847 (Figure II-1). La ligne, dès son ouverture, connaît un fort trafic de voyageurs et de marchandises, de par l'attraction touristique de la région, mais également de par le lien qu'elle permet entre la capitale et les grands ports fluviaux et maritimes, du Havre et de Rouen. En 1962, les trains les plus rapides mettent 2 h 26 pour rallier la gare de Paris-Saint-Lazare au Havre. Après l'électrification de la ligne, en 1967, les temps de trajets se raccourcissent. En 1975, le parcours se fait en 1 h 45, afin d'assurer la correspondance avec les paquebots de la Compagnie Générale Transatlantique. Aujourd'hui, le temps de parcours est d'environ 2 heures, les trains ayant tous un ou plusieurs arrêts intermédiaires, et le trafic francilien s'étant intensifié.

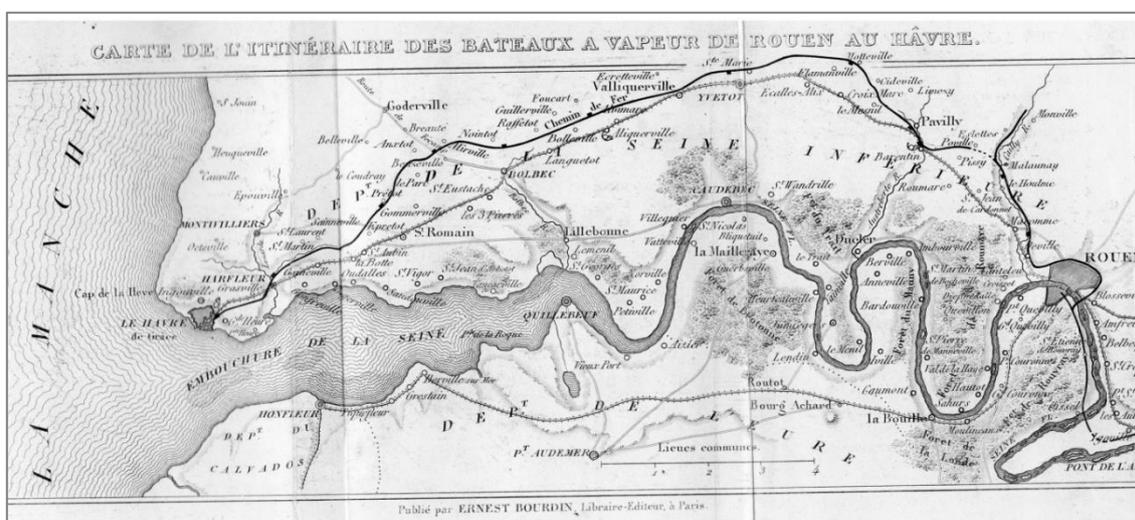


FIGURE II-1: CARTE DU TRONÇON ROUEN - LE HAVRE. SOURCE: JULES JANIN VERS 1845, GUIDE DU VOYAGEUR DE PARIS A LA MER PAR ROUEN ET LE HAVRE, PARIS, ERNEST BOURDIN EDITEUR (SD)

Le tracé de la ligne entre Paris et Rouen possède un profil régulier qui suit le plus souvent la vallée de la Seine. Entre Rouen et le Havre, le tracé quitte la Seine pour emprunter le plateau du Pays de Caux, dans l'objectif de créer des embranchements pour d'autres lignes en direction des villes de Dieppe et Fécamp. La voie ferrée rejoint donc le plateau via deux longues rampes aux niveaux des vallées de l'Austreberthe (côté Rouen) et du Saint-Laurent (côté Le Havre). De nombreux ouvrages d'art sont également construits, tels que les viaducs de Barentin et de Mirville, ou encore les tunnels de Pavilly et de Pissy-Poville. Entre Rouen et Le Havre, la ligne dessert une quinzaine de gares telles que les gares de Barentin, Yvetôt ou encore Bréauté-Beuzeville. L'histoire de la ligne ainsi que le schéma de la ligne, ses grands ouvrages et ses gares, sont décrits dans l'article Wikipédia « Ligne de Paris-Saint-Lazare au Havre » et dans son annexe « Schéma de la ligne de Paris-Saint-Lazare au Havre » (Wikipedia, 2017). La zone d'étude est le tronçon de Rouen au Havre, entre les Point Kilométriques (PK) 140+758 et 220+890, soit un tronçon de 80,132 km. Le

tronçon commence à la fin de l'agglomération de Rouen et se termine à l'entrée de l'agglomération du Havre. Il a été choisi de ne pas étudier les zones fortement urbanisées. L'environnement proche de la voie ferrée a beaucoup évolué à travers le temps, et le ruissellement pluvial y est aujourd'hui complètement canalisé. L'évaluation des cartes IRIP sur ces zones nécessiterait trop d'hypothèses. La Figure II-2 présente la zone d'étude ainsi que le bassin versant intercepté par le tronçon ferroviaire (limites jaunes).

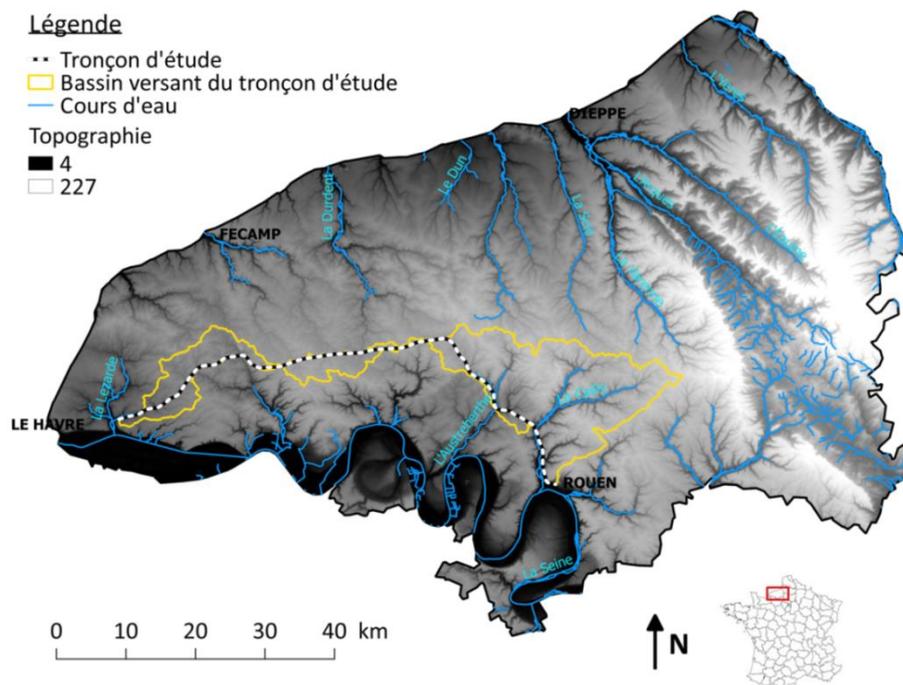


FIGURE II-2: PRESENTATION DU TRONÇON D'ETUDE ET DE SON BASSIN VERSANT SITUÉE DANS LE DEPARTEMENT DE LA SEINE-MARITIME ; LE BASSIN VERSANT D'ETUDE INTERCEPTE LES RIVIERES DE L'AUSTREBERTHE ET DU CAILLY.

La zone d'étude se situe dans le département de la Seine-Maritime et pour sa majeure partie dans la zone géographique du Pays de Caux. Le pays de Caux s'étend de la côte d'Albâtre au nord-ouest, de la Seine au sud et jusqu'aux vallées de la Varenne et de l'Austreberthe à l'est. C'est un vaste plateau sédimentaire, s'élevant jusqu'à 180 m d'altitude et entaillé de vallées étroites (Hauchard et Laignel, 2008). Le sous-sol du plateau cauchois est constitué d'une épaisse couche de craie, jusqu'à 200 m par endroit, datant du Crétacé Supérieur. Le sol du plateau est composé de sol alluvionnaire dans les vallées drainées par les cours d'eau, d'argile à silex issu de l'altération du plateau crayeux sur les coteaux, et de limons jusqu'à plusieurs mètres d'épaisseur sur les plateaux. Ces plateaux limoneux bien que parmi les plus fertiles de France, sont très sensibles aux phénomènes d'érosion et de battance. Les agrégats poreux en surface peuvent se transformer par l'impact des gouttes de pluie en croute quasiment imperméable. Les particules fines de sols viennent colmater les interstices, ceci qui favorise la genèse de grands volumes de ruissellement.

Le réseau hydrographique permanent est court, avec notamment les rivières pérennes de la Lézarde et de l'Austreberthe qui se jettent dans la Seine, et les rivières de Valmont et de Durdent qui se jettent dans la Manche (Figure II-1). Le plateau est également constitué d'un réseau très dense de rivières intermittentes et de talwegs secs, hérités de la dernière ère glaciaire au cours de laquelle les ruissellements de fonte ont érodé la surface (Auzet et al., 1993; Hauchard et al., 2002). Le réseau hydrographique souterrain, creusé par l'eau dans la craie, est très actif. La complexité souterraine est accrue par un réseau de cavités

anthropiques, les marnières, appelées également bétoires, traces de l'exploitation de la craie au XIX et XX<sup>ème</sup> siècle.

Le climat de la Seine-Maritime se caractérise par un climat océanique tempéré, avec des hivers doux et des étés frais. Les précipitations annuelles sont comprises entre 700 mm sur la côte et jusqu'à 1200 mm à l'intérieure des terres. On distingue deux saisons pluvieuses, à l'été et à l'automne. L'hiver, les précipitations sont longues et peu intenses. L'été est marqué par des orages dont l'intensité pluvieuse peut atteindre 200 mm/h. Les sols épais et fertiles ainsi que le climat océanique favorable ont permis un développement prospère de l'agriculture. Le blé, la betterave à sucre, la luzerne, le colza, le lin sont les principales cultures.

Du fait de ces particularités hydro-géomorphologiques, le territoire du Pays de Caux est particulièrement exposé au ruissellement de surface et subit régulièrement des épisodes de ruissellement intense (Delahaye et al., 2002; Douvinet et al., 2014; Hauchard, 2002). De nombreuses villes ou villages se situent en fond de vallée, telles que Fécamp ou Pavilly, et certaines portions de routes remontent les vallées pour atteindre le plateau, à l'endroit même où se forment certaines rivières intermittentes. Ces routes, appelées routes en cavées, subissent le ruissellement diffus et intense. L'occurrence d'épisode de ruissellement intense engendre souvent des conséquences catastrophiques (Figure II-2).



**FIGURE II-3: PHOTOS DE ROUTES EN CAVEES IMPACTEES LORS D'UN EPISODE DE RUISSELLEMENT INTENSE SUR LE BASSIN VERSANT DE LA LEZARDE EN OCTOBRE 2013 (SOURCE : SYNDICAT MIXTE DE BASSIN VERSANT - SMBV - POINTE DE CAUX)**

### 1.2.2. CREATION DES CARTES IRIP SUR LA ZONE D'ETUDE

#### 1.2.2.1. DONNEES D'ENTREE ET PARAMETRAGE

Les cartes IRIP de susceptibilité à la production, au transfert et à l'accumulation du ruissellement sont créées grâce au logiciel iRIP©. Le Tableau II-1 présente les données d'entrée et les seuils utilisés pour créer les cartes IRIP.

TABLEAU II-1 : SYNTHÈSE DES DONNÉES D'ENTRÉE ET DES SEUILS UTILISÉES POUR LA CRÉATION DES CARTES IRIP

Cartes IRIP	Indicateurs	Données d'entrée	Seuils de favorabilité (note de 1)
PROD	Perméabilité	European Soil Database V2.0 résolution 500 m	$K_s < 10^{-6} \text{ m/s} + \text{ZU}$
	Épaisseur		Erodabilité $\geq 3 + \text{ZU}$
	Erodabilité		Épaisseur $\leq 50 \text{ cm} - \text{ZU}$
	Occupation du sol	Mode d'Occupation des Sols de Haute-Normandie Echelle 1/5000	Zones urbaines (ZU), cultures et sols nus.
	Pente OU indice topo	BD ALTI® IGN résolution 25 m	algorithme de classification
TRANS	Production amont		mode(BV amont) $\geq 3/5$
	Pente	BD ALTI® IGN résolution 25 m	algorithme de classification
	Rupture de pente		mode(pentes amont) < pente locale
	Compacité		Indice de Horton $\geq 1$
	Axes linéaires au sol	ROUTE 500® IGN	Présence + buffer de 2*résolution
ACC	Production amont		mode(BV amont) $\geq 3/5$
	pente	BD ALTI® IGN résolution 25 m	algorithme de classification
	Rupture de pente		mode(pentes amont) > pente locale
	Compacité OU Aire drainée		Indice de Horton $\geq 1$ OU Aire drainée $\geq 100 \text{ Ha}$
	Indice topographique		algorithme de classification

#### LES INDICATEURS LIÉS À LA PÉDOLOGIE

Pour les trois indicateurs liés à la pédologie, la base européenne des données de sol est utilisée (ESDB V2.0)<sup>4</sup>. Cette base de données, développée par la Commission Européenne et le European Soil Bureau Network (Ballabio et al., 2016), est disponible en ligne<sup>5</sup>. La résolution est de 500 m. Les seuils choisis pour les indicateurs de perméabilité, d'épaisseur et d'érodabilité sont issus d'une revue de littérature dans le domaine de la pédologie (Bonnet, 2012; De Lavenne, 2010). L'indicateur de perméabilité est représenté par la conductivité hydraulique à saturation du sol ( $K_s$ ) calculé à l'aide des fonctions de pédo-transfert (Rawls et Brakensiek, 1985). Un seuil de conductivité hydraulique à saturation inférieur à  $10^{-6} \text{ m/s}$  a été fixé pour considérer un sol comme peu perméable et donc favorable au ruissellement.

<sup>4</sup> Le rapport du BRGM (BRGM/RP-50454-FR) mentionne des données plus précises sur cette zone qu'il pourrait être intéressant de tester mais nous n'avons pas eu la possibilité durant la thèse.

<sup>5</sup> <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/european-soil-database-v20-vector-and-attribute-data>

$$Ks = \exp(19.52348 * POR - 8.96847 - 0.028212 * PC + 0.00018107 * PS^2 - 0.0094125 * PC^2 - 8.395215 * POR^2 + 0.077718 * PS * POR - 0.00298 * PS^2 * POR^2 - 20.019492 * PC^2 * POR^2 + 0.0000173 * PS^2 * PC + 0.02733 * PC^2 * POR + 30.001434 * PS^2 * POR - 0.0000035 * PC^2 * PS)$$

Avec,

PC = Taux d'argile (Percent Clay)  $5 < PC < 60$  ;

PS = Taux de sable (Percent Sand)  $5 < PS < 70$  ;

POR = Porosité

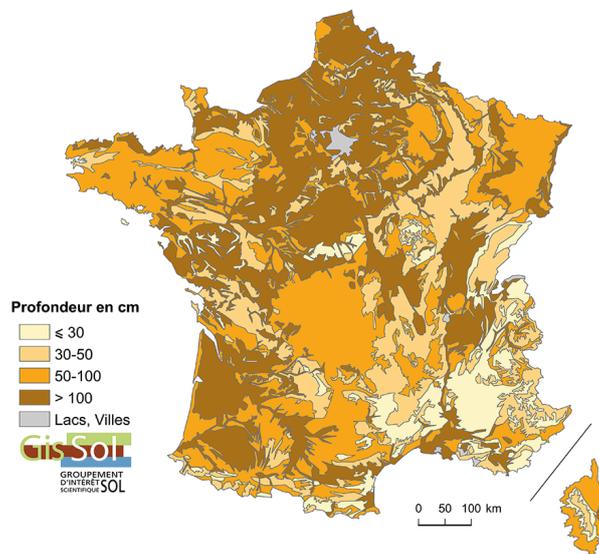
$$POR = 1 - \frac{\rho}{\rho_s}$$

Avec,

$\rho$  = densité du sol

$\rho_s$  = densité du sol sec, égale à  $2.65 \text{ g/cm}^3$

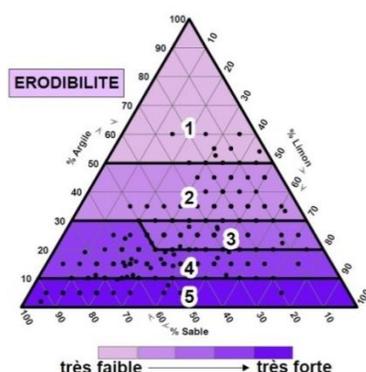
Le seuil pour considérer un sol peu épais et donc favorable au ruissellement a été fixé à 50 cm. La Figure II-4 présente la répartition des profondeurs de sols en France métropolitaine. La légende ne donne pas d'information sur les sols avec une épaisseur supérieure à 1 mètre, mais dans certaines régions, les épaisseurs de sols peuvent aller de 5 à 15 mètres et jusqu'à 20 mètres par endroits, par exemple dans le nord de la France (Seine-Maritime, Picardie) (Landemaine, 2017). Pour la zone d'étude, l'ensemble du bassin versant est donc défavorable au ruissellement en termes de profondeur.



Source : Inra, Base de données géographique des sols de France à 1/1 000 000, 1998.

FIGURE II-4 : CARTE DES PROFONDEURS DE SOLS EN FRANCE METROPOLITAINE ; EXTRAIT DU SITE DU GIS SOL (GIS SOL, n.d.)

Le seuil pour l'indicateur d'érodabilité se base sur les fonctions de pédo-transfert permettant de convertir les données de texture du sol en 5 classes de sensibilité à l'érosion (Figure II-5). Pour la paramétrisation du logiciel iRIP©, les sols considérés comme favorables à l'érosion sont les sols avec une sensibilité supérieure ou égale à 3/5.



**FIGURE II-5: REGLES DE PEDOTRANSFERT PERMETTANT DE CONVERTIR LES DONNEES TEXTURALES EN CLASSES D'ERODABILITE PAR PROJECTION DANS LES TRIANGLES DE TEXTURE REDECOURTES EN 5 CLASSES DE SENSIBILITE DE 1 (TRES FAIBLE) A 5 (TRES FORTE) (SOURCE : CERDAN ET AL., 2006 ET INRA/IFEN)**

#### L'INDICATEUR D'OCCUPATION DU SOL

Le Mode d'Occupation des Sols de la région Haute-Normandie de 2009<sup>6</sup>, librement téléchargeable, est utilisé pour l'indicateur d'occupation du sol. Cette carte d'occupation des sols, réalisée par photo-interprétation, est à l'échelle de 1/2000 pour les zones urbaines et 1/5000 pour les zones rurales. Cette donnée offre un classement de l'occupation du sol en 41 catégories réparties dans 4 grands types, les territoires artificialisés, les territoires agricoles, les forêts et milieux semi-naturels et les surfaces en eau, se déclinant chacun sous quatre niveaux de précision (nomenclature disponible sur le site internet du MOS Haute-Normandie). Pour le paramétrage du logiciel iRIP©, les zones considérées comme favorables à la production du ruissellement sont l'ensemble des territoires artificialisés (nomenclature N1), ainsi que les terres arables hors périmètre d'irrigation (N221), les cultures permanentes de type pépinières (N225), les zones de coupes et autres travaux forestiers (N314), les schorres (ou prés salés) (N321), les roches nues (N332), les étendues de sédiments fins (N333) et les tourbières (N336).

#### L'INDICATEUR DES AXES LINEAIRES AU SOL

Seules les routes sont considérées pour l'indicateur des axes linéaires au sol. L'étude des cartes IRIP se faisant principalement autour de l'emprise ferroviaire, il a été décidé de ne pas considérer les voies ferrées pour cet indicateur, afin de ne pas biaiser l'analyse en ayant un niveau supplémentaire dans la carte de transfert pour toute la voie ferrée. La donnée utilisée pour prendre en compte les routes dans les cartes IRIP est la donnée ROUTE 500® de l'IGN, à l'échelle de 1/500 000<sup>7</sup>. L'indicateur est donc considéré comme favorable au transfert du ruissellement aux niveaux des routes et sur une zone de 50 m de part et d'autre (deux fois la résolution du MNT).

#### LES INDICATEURS LIES AU MNT

Le Modèle Numérique de Terrain de la BD ALTI® de l'IGN de résolution 25 m est utilisé<sup>8</sup>. Cette donnée a été constituée via des numérisations de cartes et des restitutions photogrammétriques. Les valeurs d'altitude sont arrondies au mètre. Cinq indicateurs sont basés sur l'analyse du MNT : La pente, l'indice topographique, les ruptures de pentes, l'indice de Horton et l'aire drainée. Le seuil d'aire drainée est fixé à 100 ha, le seuil de l'indice de Horton est à 1, et la méthode de calcul des ruptures de pente est expliquée en partie 1 section 3.2.3.7. Concernant la distinction favorable/défavorable pour la pente et l'indice topographique, une méthode de classification est utilisée via la fonction « cluster analysis for

<sup>6</sup> <http://mos.hautenormandie.fr/>

<sup>7</sup> <http://professionnels.ign.fr/route500>

<sup>8</sup> <http://professionnels.ign.fr/bdalti>

grids » du logiciel SAGA GIS. La classification ne donne pas de seuil fixe mais fournit pour chaque classe le nombre d'éléments, la moyenne et l'écart-type. Pour la pente, la valeur moyenne est de 20 % pour la classe forte, et de 3 % la classe faible. De la même manière, pour l'indice topographique, la valeur moyenne est de 19,9 pour la classe forte et de 14,8 pour la classe faible (Figure II-6).

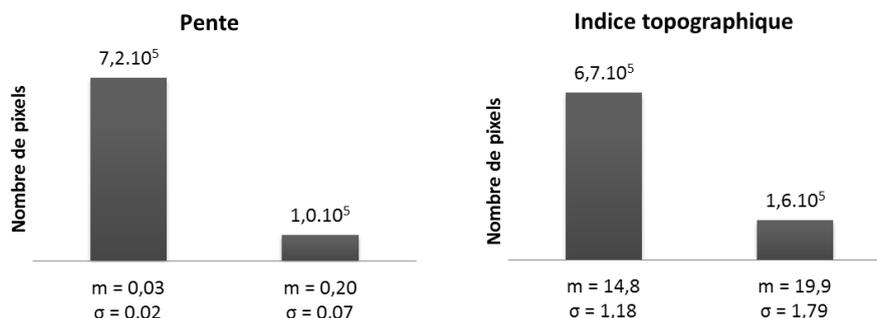


FIGURE II-6 : INFORMATIONS STATISTIQUES (m = MOYENNE, σ = ECART-TYPE) SUR LES DEUX CLASSES DE PENTES ET D'INDICES TOPOGRAPHIQUES

#### 1.2.2.2. PRESENTATION DES CARTES IRIP SUR LA ZONE D'ETUDE

##### CARTE DE SUSCEPTIBILITE A LA PRODUCTION

La Figure II-7 présente la carte de susceptibilité à la production sur l'ensemble de la zone d'étude. D'après la carte, les niveaux 3 et 4 sont les plus représentés sur les plateaux, tandis que des niveaux 2 et inférieurs sont davantage présents sur les flancs de vallées, notamment aux niveaux des principales vallées de l'Austreberthe, du Saint-Laurent et du Cailly. L'indicateur d'érodabilité est favorable (1) sur l'ensemble de la zone d'étude et l'indicateur d'épaisseur est quant à lui défavorable (0) sur l'ensemble de la zone également. L'indicateur de perméabilité est favorable (1) sur les plateaux et défavorable (0) aux niveaux des vallées principales. L'usage du sol sur les plateaux étant essentiellement agricole, cet indicateur est favorable (1) sur une grande partie. Les niveaux 4 sur les plateaux sont donc atteints lorsque l'indice topographique est favorable (1). On peut observer ponctuellement des niveaux 5 situés sur les zones urbaines, puisque dans ce cas, l'indicateur d'épaisseur est automatiquement considéré comme favorable (1). Les cinq indicateurs binaires utilisés pour la création de la carte Production sont présentés de Figure II-8 à Figure II-12.

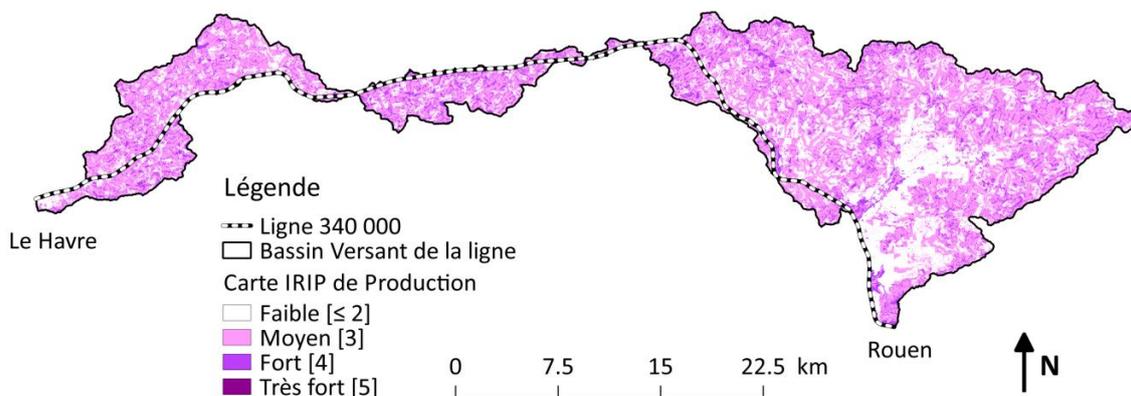


FIGURE II-7 : CARTE DE SUSCEPTIBILITE A LA PRODUCTION DE RUISSELLEMENT

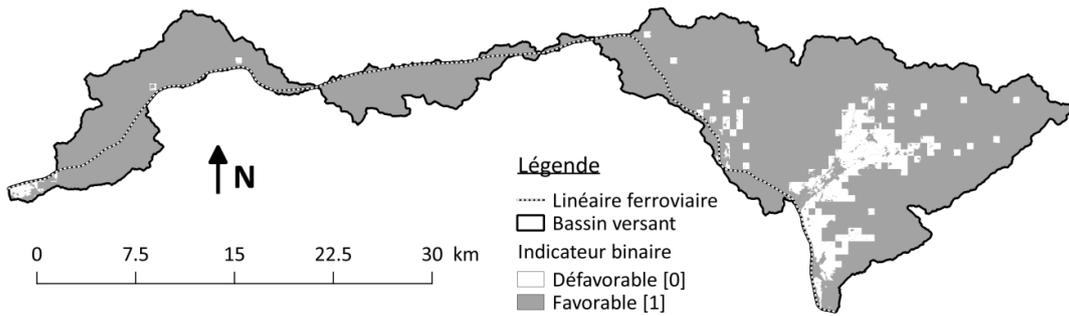


FIGURE II-8 : INDICATEUR DE PERMEABILITE (AUTOMATIQUEMENT FAVORABLE SUR LES ZONES URBAINES)

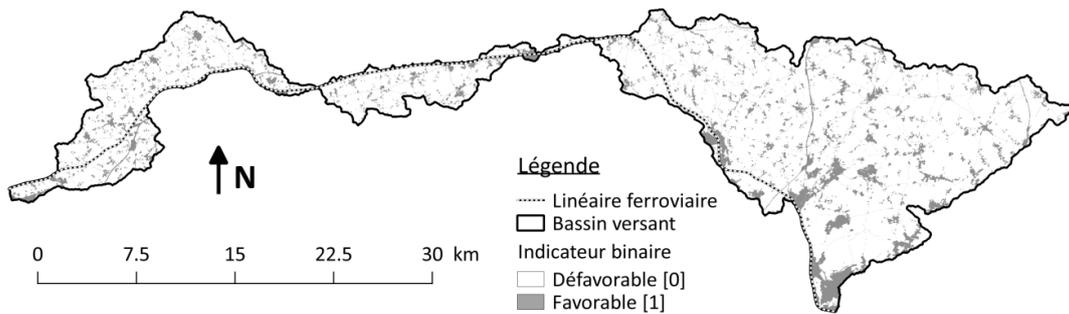


FIGURE II-9 : INDICATEUR D'ÉPAISSEUR (AUTOMATIQUEMENT FAVORABLE SUR LES ZONES URBAINES)

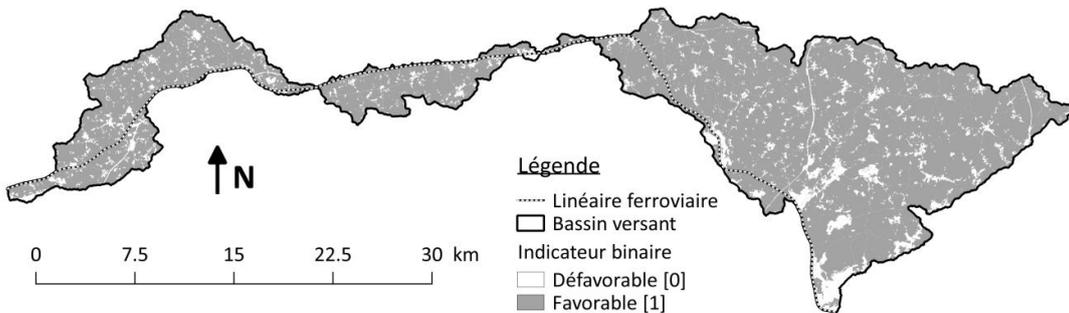


FIGURE II-10 : INDICATEUR D'ÉRODABILITE (AUTOMATIQUEMENT DÉFAVORABLE SUR LES ZONES URBAINES)

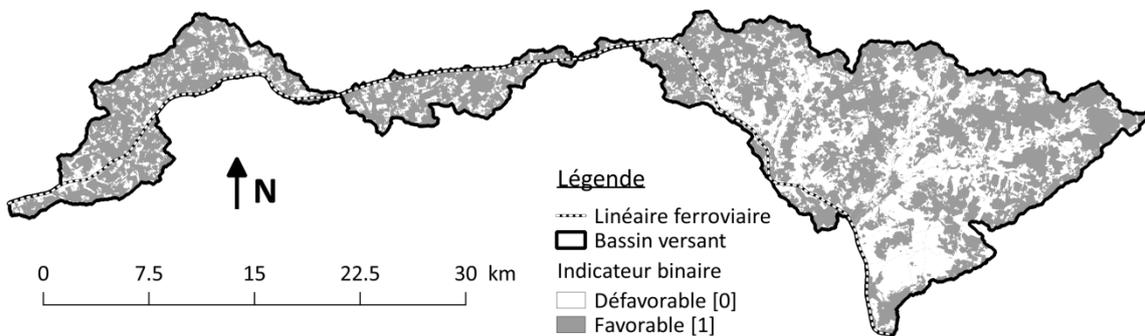


FIGURE II-11 : INDICATEUR D'OCCUPATION DU SOL

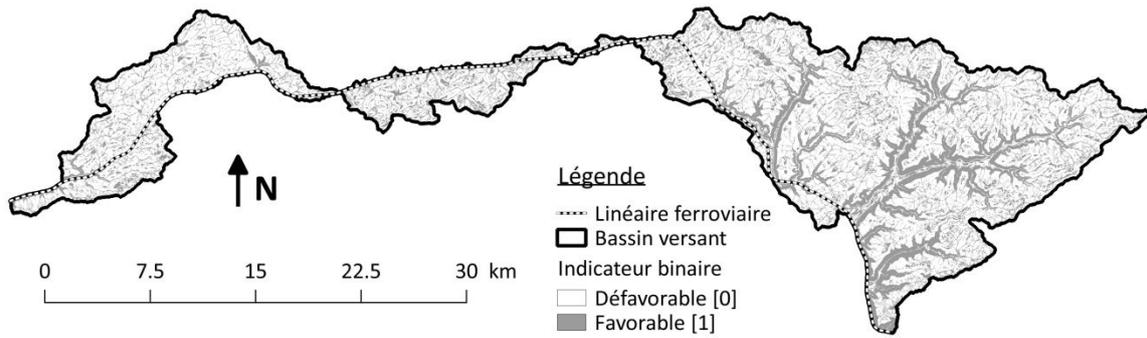


FIGURE II-12 : INDICATEUR DE RELIEF (PENTE FORTE OU INDICE TOPOGRAPHIQUE FORT)

CARTE DE SUSCEPTIBILITE AU TRANSFERT DU RUISSELLEMENT

La Figure II-13 présente la carte de susceptibilité au transfert. Les niveaux forts de transfert se situent principalement sur les flancs des vallées et des talwegs. La carte IRIP identifie les flancs de talwegs jusqu'en tête de bassin avec des niveaux 3, 4 et 5. Le potentiel de transfert est faible sur les plateaux à l'exception de l'emplacement des principaux axes routiers, qui sont identifiés par des niveaux 3 et 4. Les cinq indicateurs binaires utilisés pour construire la carte de transfert sont présentés de Figure II-14 à Figure II-18.

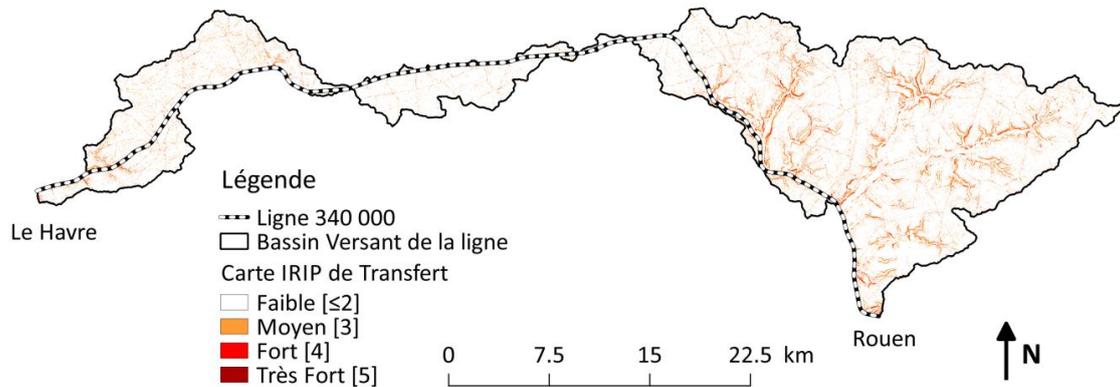


FIGURE II-13 : CARTE DE SUSCEPTIBILITE AU TRANSFERT DU RUISSELLEMENT

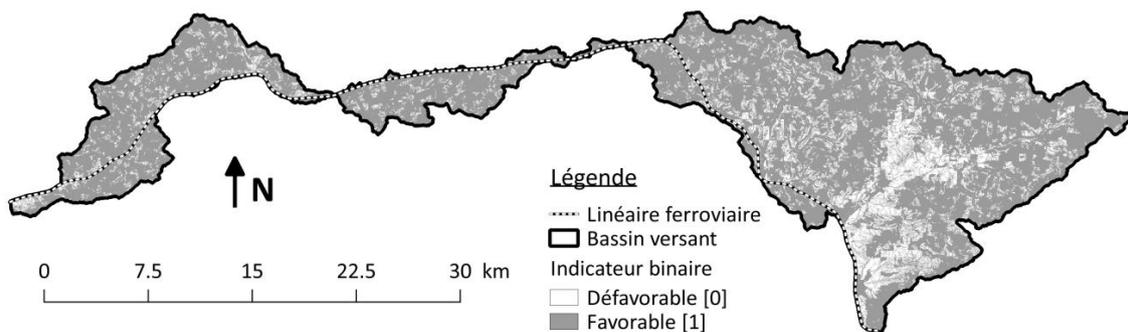


FIGURE II-14 : INDICATEUR DE LA PRODUCTION AMONT (VALABLE POUR LES CARTES DE TRANSFERT ET D'ACCUMULATION)

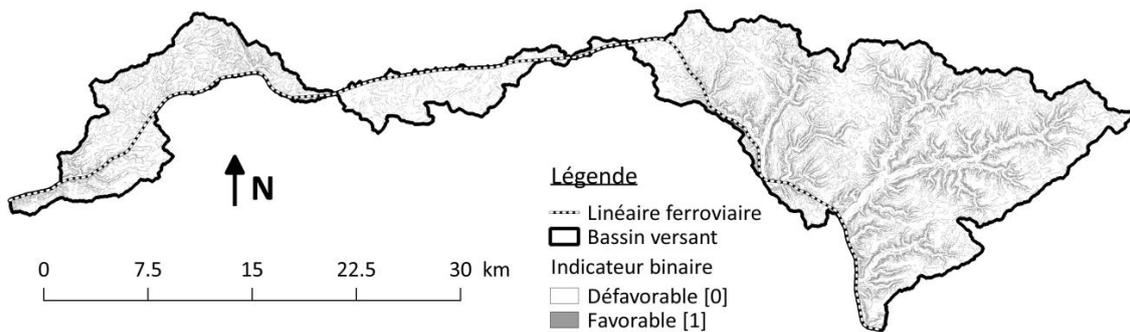


FIGURE II-15 : INDICATEURS DES RUPTURES DE PENTES CONVEXES

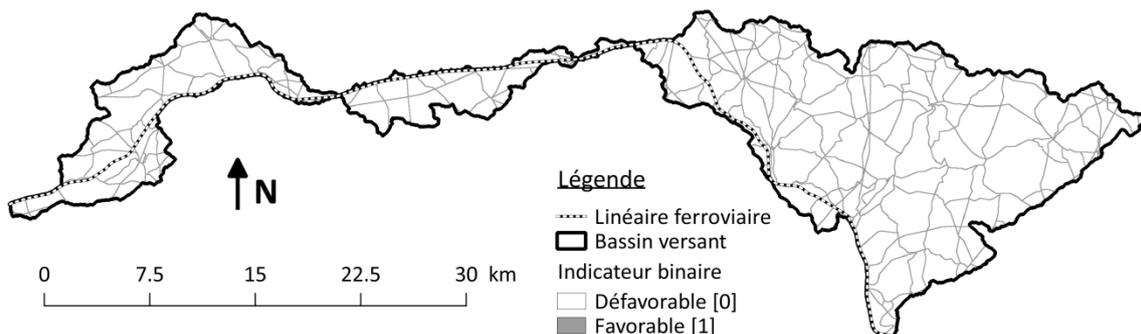


FIGURE II-16 : INDICATEUR DES AXES LINEAIRES AU SOL

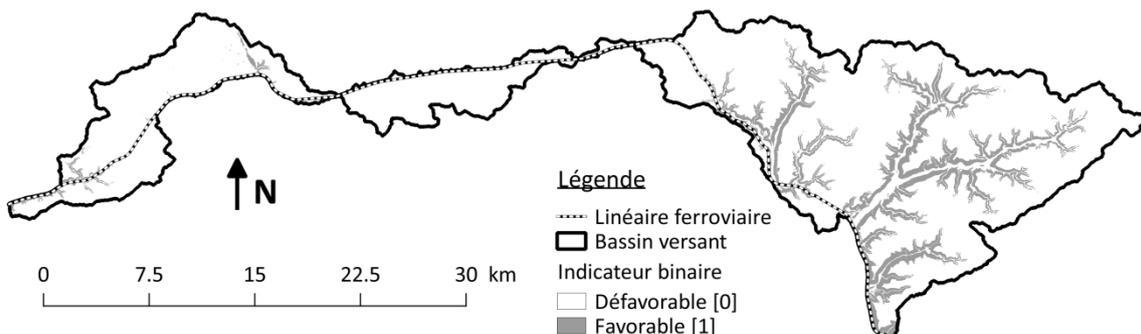


FIGURE II-17 : INDICATEUR DES PENTES FORTES

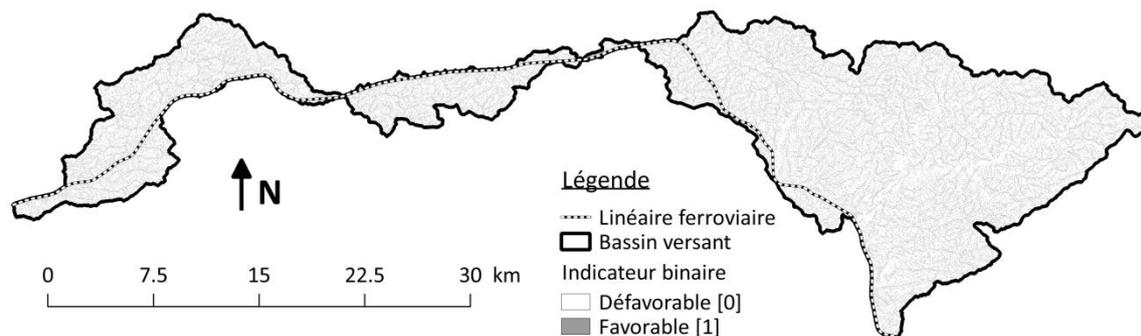


FIGURE II-18 : INDICATEUR DE COMPACTITE

CARTE DE SUSCEPTIBILITE A L'ACCUMULATION DU RUISSELLEMENT

La Figure II-19 présente la carte de susceptibilité à l'accumulation. Le niveau 3 est le potentiel d'accumulation le plus présent sur les plateaux. On observe également des niveaux 4 et 5 dans les talwegs, depuis les principales vallées jusqu'en tête de bassin. Les flancs de vallées ainsi que les flancs des principaux talwegs présentent un faible potentiel d'accumulation avec des niveaux 2 et inférieurs. Les indicateurs binaires utilisés pour construire la carte d'accumulation sont présentés de Figure II-20 à Figure II-23.

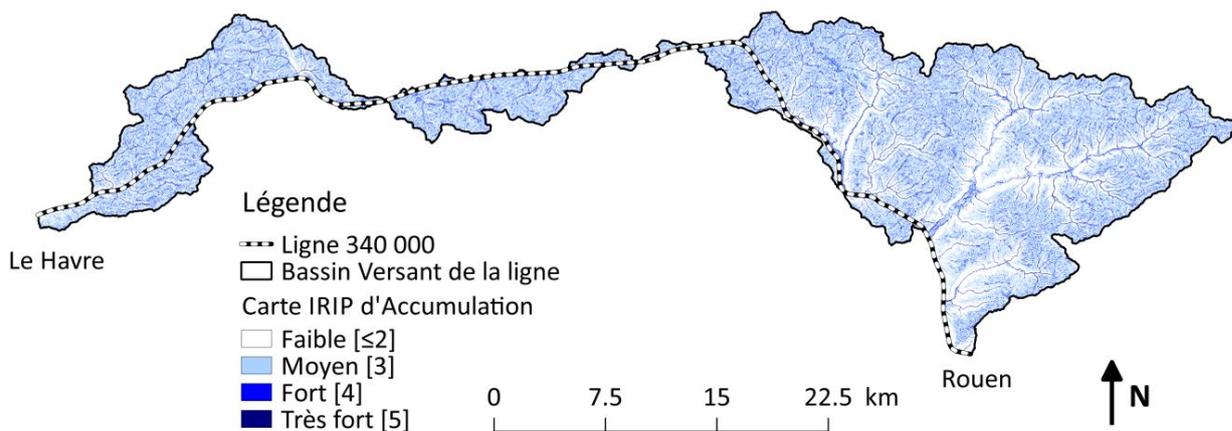


FIGURE II-19 : CARTE DE SUSCEPTIBILITE A L'ACCUMULATION DU RUISSELLEMENT

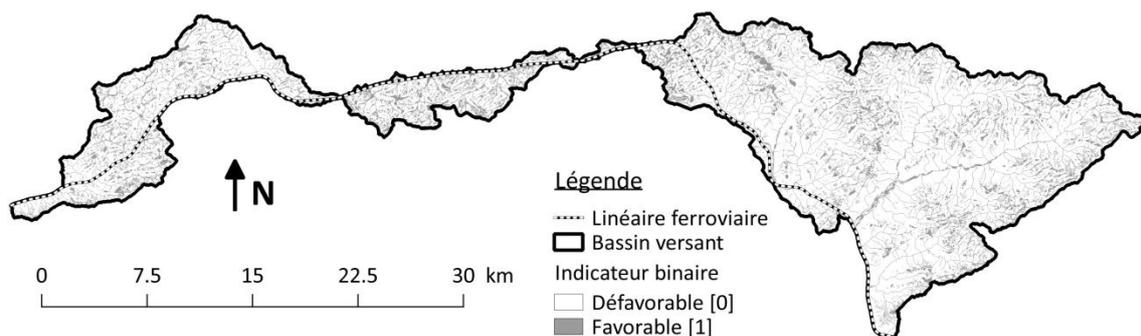


FIGURE II-20 : INDICATEUR DE L'INDICE TOPOGRAPHIQUE

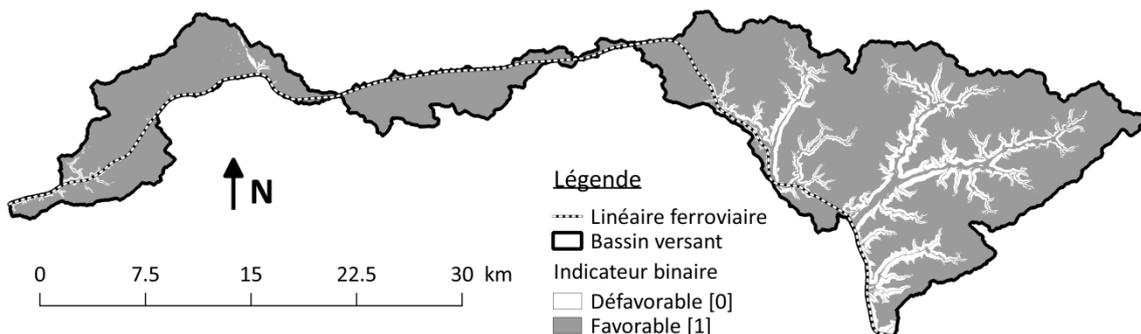


FIGURE II-21 : INDICATEUR DES PENTES FAIBLES

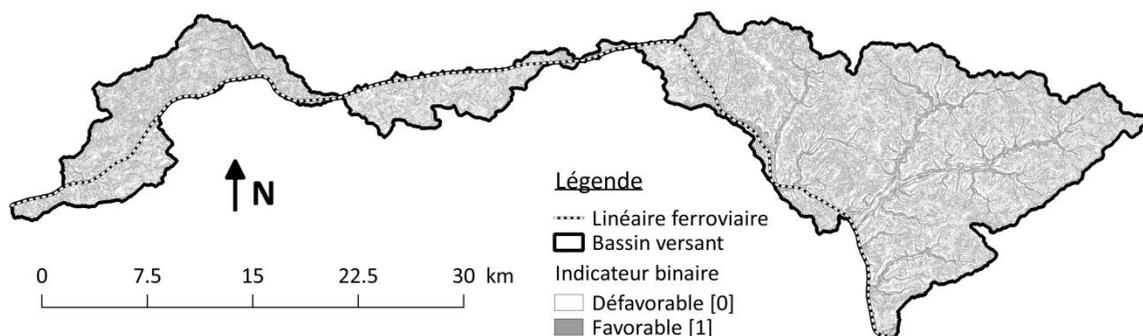


FIGURE II-22 : INDICATEUR DES RUPTURES DE PENTES CONCAVES

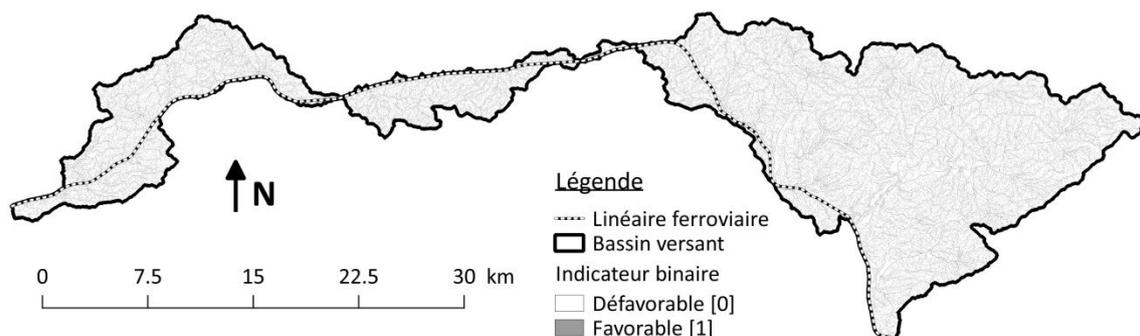


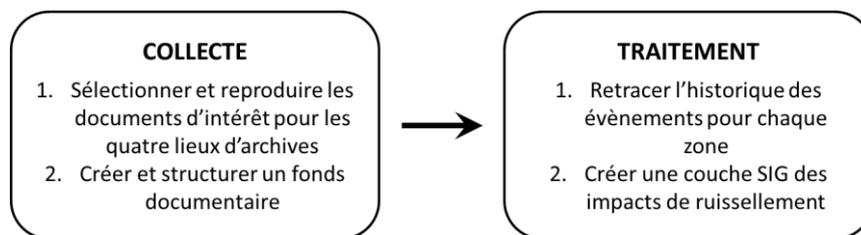
FIGURE II-23 : INDICATEUR DE COMPACTITE ET D'AIRE DRAINEE (OPERATEUR OU)

### 1.2.3. CREATION DE LA BASE DE DONNEES DES IMPACTS HISTORIQUES LIES AU RUISSELLEMENT

#### 1.2.3.1. OBJECTIF

Les cartes IRIP sont des cartes de susceptibilité à l'aléa ruissellement. Elles indiquent toutes les zones qui potentiellement peuvent voir se produire du ruissellement. Pour évaluer l'exactitude de ces cartes, il faudrait disposer de façon exhaustive des informations sur les épisodes de ruissellement. Il n'existe pas de telles séries de données. Pour se rapprocher autant que possible de ces conditions, les données historiques de SNCF sur la zone d'étude sont exploitées. L'implantation de la voie ferrée sur le territoire fait qu'elle intercepte les écoulements. Les impacts sur la voie ferrée sont donc de bons indicateurs d'occurrence du ruissellement. SNCF, en tant que gestionnaire du réseau, enregistre les impacts sur la voie ferrée, et on peut espérer retrouver des traces de ces informations sur toute la durée de l'exploitation de la ligne. Ces informations sont potentiellement disponibles sur environ un siècle et demi, de la création de la ligne en 1847 à aujourd'hui.

L'objet final attendu est une liste de tous les impacts liés au ruissellement sur le tronçon d'étude, de la création de la ligne à nos jours. Les informations nécessaires pour chaque impact sont la localisation, sous forme de points kilométriques de début et de fin, et l'origine de l'impact, à savoir, s'il est en lien avec du ruissellement ou non. Ces éléments permettront de constituer une couche SIG des impacts sur la ligne. La méthode de travail, élaborée avec l'appui d'une archiviste, se compose de deux étapes principales : la collecte, effectuée par l'archiviste, et le traitement des données, effectué dans le cadre de la thèse (Figure II-24).



**FIGURE II-24: LA CREATION DE LA BASE DE DONNEES D'IMPACTS SE FAIT EN DEUX ETAPES, LA COLLECTE, REALISEE PAR UNE ARCHIVISTE, ET LE TRAITEMENT, REALISE DANS LE CADRE DE LA THESE**

#### 1.2.3.2. COLLECTE

Le travail de collecte se compose de deux étapes : sélectionner et reproduire (photo ou scan) les documents d'intérêt ; et, constituer un fonds documentaire et le structurer afin d'optimiser à la fois le travail de collecte et le travail de traitement des données. Les reproductions des documents intégrées au fonds documentaire permettront d'analyser les événements, a posteriori, sans avoir à retourner sur les lieux d'archives.

Quatre lieux d'archives ont été visités pour collecter les informations historiques liées au ruissellement sur le tronçon d'étude (Figure II-25). A Saint-Denis (93), se trouvent les archives courantes, en format numérique ou papier. Les informations récentes sur les désordres sur l'infrastructure ferroviaire sont enregistrées dans des bases de données numériques (présentées en partie 1 section 2.4.5.2), depuis les années 90 environ. Les bases de données sont nombreuses afin de répondre aux différents besoins métiers. Ceci constitue une première difficulté. Pour capitaliser les informations sur les impacts, il faut analyser toutes les bases de données, identifier les doublons, recouper les descriptions enregistrées selon différents points de vue (maintenance, exploitation, etc.). Les informations dans les bases de données sont souvent synthétiques, il faut alors chercher davantage de description dans les dossiers d'affaires. Les dossiers récents sont classés sur les serveurs ou dans les bureaux. Les plus anciens sont classés en format papier dans les locaux d'archives du bâtiment de l'ingénierie. Les dossiers sont classés par numéro de lignes et par points kilométriques. A Villeneuve (94), se trouvent les archives intermédiaires, c'est-à-dire les affaires closes mais qui ont moins de 30 ans. Elles sont consultables sous réserve d'une habilitation. Les archives sont inventoriées dans le logiciel MAÏS et peuvent être rapatriées dans les bureaux pour consultation. A Rouen, se trouvent les archives courantes, une partie des archives intermédiaires et une partie des archives historiques de la région Normandie (qui n'ont pas encore été traitées pour être rapatriées au Mans). Ces archives rassemblent donc des documents de tous les services de la région, notamment des services d'ingénierie, de maintenance, d'exploitation, etc. Les archives de Rouen sont situées dans les bureaux de différents bâtiments et dans le local d'archive au sous-sol de la gare de Rouen. Enfin, au Mans, se trouvent les archives historiques de SNCF pour toute la France, inventoriées également dans MAÏS et consultables sous autorisation. Le système des archives de SNCF est présenté en partie 1 section 2.4.5.1.



FIGURE II-25: LES QUATRE LIEUX D'ARCHIVES A VISITER POUR CAPITALISER LES DONNES HISTORIQUES SUR LA LIGNE PARIS - LE HAVRE

Pour chacun de ces lieux il faut estimer les temps de collecte. L'estimation se fait en collectant et en étudiant les inventaires les plus récents, s'il y en a de disponibles. Puis des sondages sont réalisés dans chaque lieu. Le principe des sondages est de dépouiller quelques boites au hasard dans un local d'archives, afin de réaliser une estimation de la quantité et de la qualité globale des informations. Un comptage du nombre de boite par lieu, permet ainsi une estimation du temps de travail. Davantage de détails sur la méthode de collecte de données en archives sont disponibles dans le rapport de mission de Sixtine De Bejarry, archiviste (De Bejarry et Redon, 2017). Le Tableau II-1 présente le temps de travail pour chaque lieu d'archive, il s'élève au total à 4 mois en comptant les temps d'élaboration de la méthode, de prise de contact sur place, de déplacements, et de remplissage de la base de données (tâches annexes).

TABLEAU II-1: TEMPS DE TRAVAIL POUR LE RECHERCHE DE DONNEES EN ARCHIVES POUR CHAQUE LIEU

Lieu d'archives	Temps de travail (en journée)
Saint-Denis	15
Rouen	30
Villeuneuve	5
Le Mans	5
Tâches annexes	25
Total	80

Les documents d'intérêt à sélectionner et à reproduire sont tous les documents relatifs aux 80 km du tronçon d'étude Rouen – Le Havre faisant référence à l'eau ou à des évènements pouvant être induits par l'eau, tels que des glissements, des affaissements. Les travaux sur les dispositifs hydrauliques, tels que le réseau de drainage, les bassins de rétention ou encore la mise en place de mesures d'urgence telles que du curage ou la pose d'une berlinoise après un glissement sont également sélectionnés. Toutes informations relatives à la présence d'eau même en dehors des emprises ferroviaires sont également des documents d'intérêt. Les boites pour lesquelles il n'y a pas de numéro de ligne ou de PK indiqués sont également consultées pour s'assurer de ne manquer aucun document en lien avec le ruissellement. S'il y a un doute sur le lien avec le ruissellement, les documents sont quand même reproduits, pour être étudiés a posteriori. Les documents sélectionnés ainsi que leur reproduction sont inventoriés pour constituer un fonds documentaire.

Le choix dans la structure du fonds documentaire doit permettre un travail facilité de remplissage et de post-traitement. Le référencement des documents par l'archiviste doit être rapide. Il faut donc qu'il y ait un minimum d'informations à rechercher à l'intérieur des documents. L'archiviste remplit les

informations nécessaires pour retrouver les documents originaux, telles que la cote, la typologie, la date, etc. Mais il faut également qu'il y ait des informations clés à propos du sujet traité dans le document pour faciliter le post-traitement, telles que la localisation et la date de l'évènement et de savoir s'il s'agit d'un impact, d'une observation ou de travaux par exemple. Le Tableau II-2 et le Tableau II-3 présentent les informations à relever pour chaque document.

**TABLEAU II-2 : PRESENTATION DES INFORMATIONS A RELEVER DANS LES DOCUMENTS D'INTERET ET A REMPLIR DANS LA TABLE « DOCUMENTS »**

Nom table: Documents

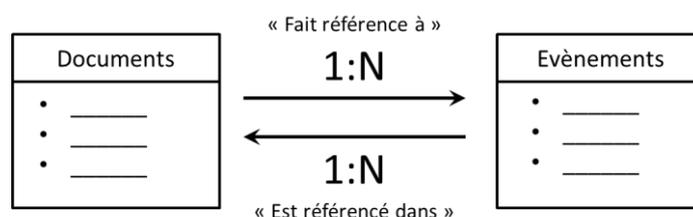
Nom du champ	Type de données	Exemple
Numéro document	Numéro unique automatique	1, 2, 3...
Localisation	Texte	Villeneuve, Gare de Rouen...
Cote	Texte	2003/IGLGOT/236
Date	Date	Janvier 1983
Typologie	Texte	Correspondance, Rapport d'expertise...
Reproduction	Texte	Lien vers la reproduction
Remarques	Texte	Champ libre

**TABLEAU II-3 : PRESENTATION DES INFORMATIONS A RELEVER DANS LES DOCUMENTS D'INTERET ET A REMPLIR DANS LA TABLE « EVENEMENTS » (OTE SIGNIFIE OUVRAGE EN TERRE ENVELOPPE)**

Nom table: Evènements

Nom du champ	Type de données	Exemple
Numéro Evènement	Numéro unique automatique	1, 2, 3...
PK début	Numérique	140,987
PK fin	Numérique	141,203
Nom OTE	Texte	Remblai de la Lézarde
Date	Date	Août 1991
Type	Texte	Incident, travaux, observation...
Remarques	Texte	Champ libre

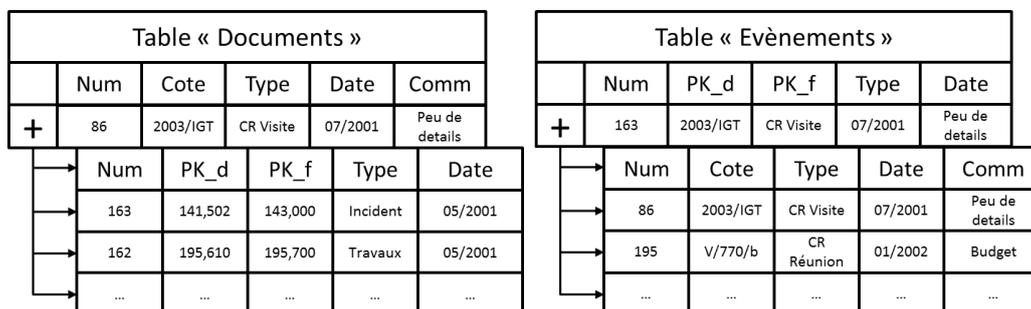
Pour répondre aux besoins de collecte et de traitement il a donc été décidé de créer deux tables, une référençant chaque document, et l'autre référençant chaque évènement. Les deux tables sont liées par une relation N à N (Figure II-26). En effet, un document peut faire référence à plusieurs évènements et un évènement peut être référencé dans plusieurs documents.



**FIGURE II-26: SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE RELATION N:N ENTRE DEUX TABLES**

Ainsi, l'archiviste remplit la table « documents » avec les métadonnées du document et remplit la table « évènement » avec les évènements décrits dans le document, à raison d'une ligne par évènement. Si un évènement est déjà référencé, il suffit de faire le lien avec le nouveau document. Au moment du

traitement des données, le travail est facilité grâce à la liste des évènements créés par l'archiviste, avec les informations clés. Pour faire la synthèse des informations concernant un évènement (origines, circonstances, etc.), la liste de tous les documents faisant référence à cet évènement est disponible, ils peuvent ainsi être analysés dans le détail (Figure II-27).



**FIGURE II-27: ILLUSTRATION DES TABLES « DOCUMENTS » ET « EVENEMENTS », LEUR ARCHITECTURE ET LEUR SYSTEME DE REMPLISSAGE, LA TABLE « EVENEMENTS » SE REMPLIT AUTOMATIQUEMENT AVEC LE REMPLISSAGE DE LA TABLE « DOCUMENTS ».**

Le fonds documentaire ainsi constitué contient 506 documents dans la table « Documents », datant de 1903 à 2017. La table « Evènement » remplie par l'archiviste contient 720 évènements. Ces 720 évènements sont le prétraitement des données réalisé automatiquement lors du remplissage de la base de données. Parmi eux, se trouvent des doublons. En effet, il n'est parfois pas aisé de déterminer si des évènements présentés dans des documents différents sont un seul et même évènement. De plus, l'archiviste n'a pas le temps de regarder en détail le fond des documents et des connaissances sur le ruissellement sont parfois nécessaires pour faire la part des choses. Dans ces cas-là, les évènements sont ajoutés à la base de données de façon distincte.

### 1.2.3.3. TRAITEMENT

Pour réaliser l'objet attendu, à savoir la liste de tous les impacts liés au ruissellement, tous les documents collectés doivent être analysés. Pour cela, il a été décidé de procéder par zone. Certaines zones sont des ouvrages en terre enveloppe (OTE) (définition partie 1 section 2.2.1). Ces zones sont déjà connues et nommées par les services des ouvrages en terre. Néanmoins, certaines zones où il s'est produit des impacts ne correspondent pas à des ouvrages en terre connus. Elles ont donc été nommées pour la suite par leurs points kilométriques de débuts et de fin. Ainsi, tous les documents faisant référence à une même zone, ou un même OTE sont analysés pour faire une synthèse des impacts sur la zone. Il est davantage pertinent de faire l'analyse par zone que par évènement, puisque ceci permet de retracer l'historique d'une zone, de faire des liens entre les impacts, entre les éventuels travaux, ou de prendre en compte l'évolution de l'infrastructure ou de l'environnement. De plus, il peut y avoir des connexions hydrauliques au sein d'une même zone. Il peut donc y avoir des connexions dans le cas où des zones impactées ne sont pas localisées au droit de zones d'arrivée d'eau.

Le Tableau II-4 présente un exemple de fiche synthèse réalisée pour un OTE (données fictives). La première case de la fiche synthèse « Numéro évènements », permet de noter les numéros uniques automatiques des évènements tels qu'ils sont référencés dans le fonds documentaire. La case « Numéro documents » permet de noter les numéros uniques des documents du fonds documentaire dans lesquels sont référencés les évènements. Ainsi, il est toujours possible de revenir aux documents d'origine si besoin. Les PK de début et de fin sont ceux de l'ouvrage en terre enveloppe. La plupart des ouvrages en terre enveloppe est connue et disponible dans une base de données interne. Pour les ouvrages qui ne

sont pas inventoriés, un numéro est attribué, par exemple « remblai\_sans\_nom\_1 » et seulement les PK de l'impact sont donnés. La case PK ruissellement permet de faire la synthèse des zones impactées sur l'ensemble de l'OTE, après analyse de tous les documents. Les cases « dates évènements » et « description évènements » permettent d'inscrire une brève description de chaque évènement, impacts ou travaux. La case « description de l'infrastructure et de l'environnement » permet de décrire brièvement les particularités dans la configuration de l'infrastructure ou de l'environnement proche. La case « estimation coûts » permet de noter l'impact économique du ruissellement pour chaque évènement, si l'information est disponible. Les données collectées sur l'impact économique n'ont finalement pas été exploitées dans le cadre de la thèse, mais elles pourraient permettre de faire une estimation de l'impact économique moyen du ruissellement sur le réseau ferré. Concernant la case « incertitudes localisation ou origine », elle permet d'expliquer s'il y a des incertitudes au niveau de la précision dans la localisation ou dans le lien avec l'aléa ruissellement et dans quelles mesures. Pour quantifier l'incertitude de l'information, une notation a été élaborée. Les raisons étant très diverses pour chaque évènement, le système de notation peut difficilement reposer sur des critères absolus. Il a donc été décidé de faire très simple. La notation est sur trois niveaux, de 0 à 2, avec 0 lorsqu'il n'y a aucune incertitude, 1 lorsque qu'il y a une incertitude dans la localisation ou dans le lien avec le ruissellement, et 2 lorsqu'il y a une incertitude pour la localisation et pour le lien avec le ruissellement.

TABLEAU II-4: EXEMPLE D'UNE FICHE SYNTHÈSE RÉALISÉE POUR UN OUVRAGE EN TERRE ENVELOPPE (DONNÉES FICTIVES)

N° évènements :	PK début :	PK fin :
163, 86, 22	213+010	214+900
Nom ouvrage en terre enveloppe :		PKs ruissellement :
Déblai de la Forêt		Du 213+020 au 213+100 et du 213+500 au 214+115
Dates évènements :	Description évènements :	N° documents :
21/06/1996	Glissement de talus côté voie 2 avec dépôts en piste sur 50 mètres linéaires à partir du km 213+030 Travaux : pose d'un masque drainant du km 213+020 au km 213+100 Ravinements sur talus côté voie 2 entre les km 213+500 et 214+115	213, 422, 13
30/06/1996		56, 13
04/12/2004		205, 34
Incertitudes localisation ou origine :		Note incertitude
Glissement de 1996 s'est produit au niveau de terriers de blaireaux, quelle est la part du ruissellement dans ce glissement ?		1
Description de l'infrastructure et de l'environnement :		
La ligne est établie en déblai de 3 à 6 mètres de haut sur environ 2 km, le versant est penté de la voie 2 vers la voie 1. Les fossés drainants sont comblés de moitié par les boues. Il y a un pont route au km 214+810 pour la route départementale. En amont direct de la voie, une parcelle agricole cultive jusque sur la crête du déblai.		
Estimation coûts :		
Travaux de 1996 : 12 000 F		

Les Figure II-28 et Figure II-29 présentent deux documents collectés dans les archives, un pleinement exploitable, l'autre de qualité insuffisante pour identifier les informations d'intérêt. Le premier document date de 1935, il a été collecté dans les archives de la gare de Rouen, c'est un rapport sur des préconisations pour réaliser des travaux suite un épisode de ruissellement intense. Malgré l'ancienneté de ce document, les détails sont assez précis pour affirmer le lien avec l'aléa ruissellement « Après un orage violent [...] les eaux amassées sur le plateau ont dévalé en trombe dans la tranchée [...] », et le document indique précisément les points kilométriques où il y a eu des impacts. Le deuxième document date de 1966, il a été collecté dans les archives de gare de Rouen également, et renseigne sur des travaux à effectuer en évoquant de « l'eau accumulée à l'arrière de la culée ». Cette eau peut avoir de multiples origines, telles qu'une rupture de canalisation ou un défaut de drainage de plateforme. Il n'est pas possible d'affirmer le lien avec le ruissellement. De plus, la seule information sur la localisation est un point kilométrique unique faisant référence à la position de l'ouvrage en terre enveloppe, et non à la position de l'eau accumulée. Ce document est noté avec une incertitude de 2/2.

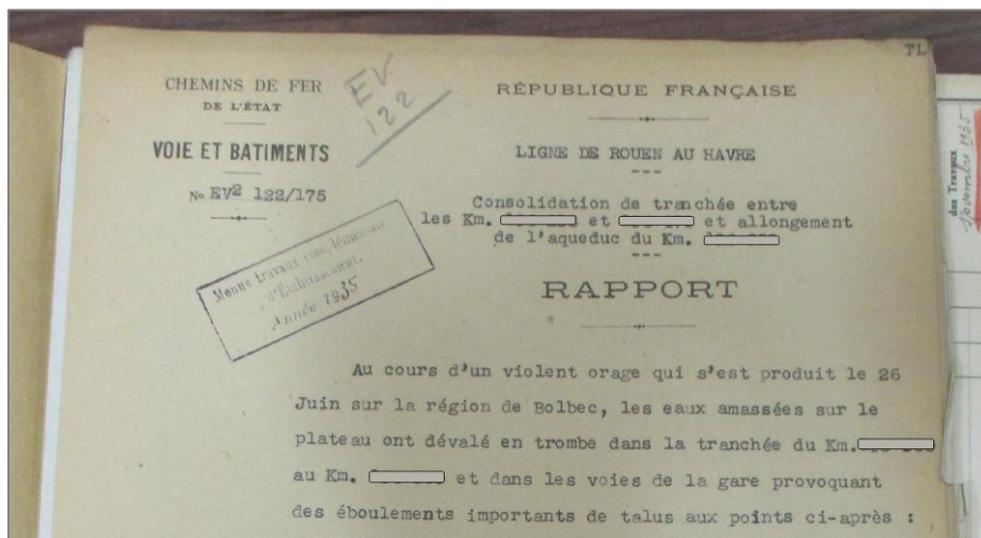


FIGURE II-28: REPRODUCTION D'UN DOCUMENT DE 1935, DECRIVANT AVEC PRECISION L'ORIGINE DU DESORDRE ET LES POINTS KILOMETRIQUES IMPACTES

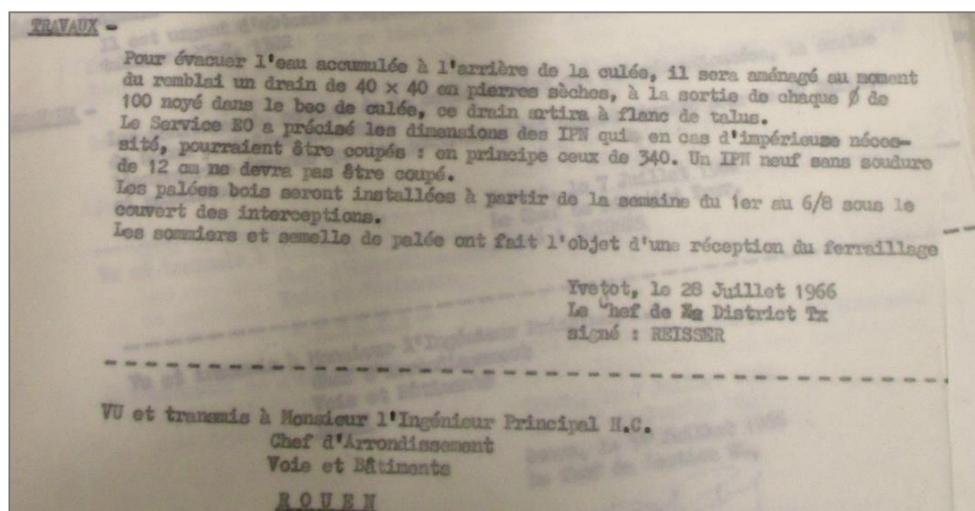


FIGURE II-29: REPRODUCTION D'UN DOCUMENT DE 1966, ABORDANT UN PROBLEME D'EAU STAGNANTE, MAIS NE DONANT PAS ASSEZ D'INDICATIONS SUR L'ORIGINE ET LA LOCALISATION POUR EXPLOITER L'INFORMATION

62 fiches synthèse ont été réalisées, et 74 impacts par le ruissellement ont été identifiés sur la zone d'étude. Des exemples d'impact de ruissellement sur l'infrastructure ferroviaire sont des coulées de boue, des dépôts de fines, des glissements de talus, des inondations, des emportements de remblais, ou encore des stagnations d'eau. Deux impacts au même endroit, ne comptent que pour un seul impact. Parmi les 74 impacts de ruissellement, 44 ont une incertitude de 0, 18 ont une incertitude de 1, et 12 ont une incertitude de 2 sur 2 (Figure II-30). La longueur cumulée des impacts est d'environ 13,200 km, avec une longueur moyenne par impact de 179 m, une longueur médiane de 45 m et une longueur maximale de 1350 m (Tableau II-5). La longueur minimale est un impact ponctuel, ici considéré comme 1 m.

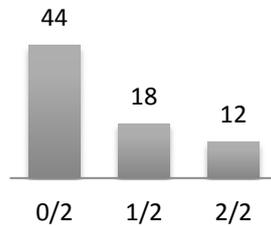


FIGURE II-30: REPARTITION DES IMPACTS SELON LE NIVEAU D'INCERTITUDE DE L'INFORMATION

TABLEAU II-5: LONGUEUR DES IMPACTS LIES AU RUISSELLEMENT (EN M)

Total	13 225
Min	1 (ponctuel)
Q1	1 (ponctuel)
Médiane	45
Moyenne	179
Q2	219
Max	1 350

Finalement, les données avec une incertitude de 2/2 ne sont pas exploitées par la suite, car trop peu d'informations permettent de s'assurer du lien avec le ruissellement et de la localisation de l'impact. La base de données finale compte alors 62 impacts, sur une longueur cumulée de 11,900 km. La Figure II-31 présente les 62 impacts sous forme d'une couche d'information géographique. Pour construire la couche SIG des impacts liés au ruissellement, les points kilométriques suffisent. Les zones peuvent être localisées sur les couches SIG lignes et points kilométriques du Référentiel Géographique de l'Infrastructure de SNCF. Par exemple, sur le logiciel QGIS, le plug-in LRS convient, ou encore la fonction « événements d'itinéraires » sur ArcGis.

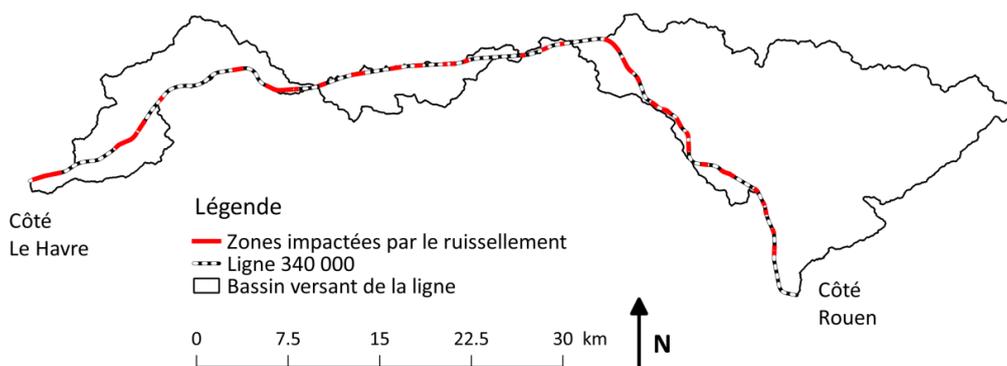


FIGURE II-31: COUCHE D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE DES 62 IMPACTS LIES AU RUISSELLEMENT SUR LE TRONÇON D'ETUDE

Ce travail de recherche de données d'impacts a permis également de collecter des informations sur les tournées intempéries (définition partie 1, section 2.4.2.3). Seules les informations sur les zones de tournées en lien avec le ruissellement sont capitalisées, par exemple lorsqu'il est indiqué qu'il y a un risque d'arrivée d'eau, un risque de glissement ou un risque d'inondation. Des données sur les tournées intempéries de deux époques ont été capitalisées, les années 1980 et les années 2010. Actuellement, les zones de tournées intempéries représentent environ 11 km en cumulé sur le linéaire d'étude, soit près de 14 %. Dans les années 1980, les zones de tournées représentaient plus de 40 km, soit plus de 50 % du linéaire. L'information sur la localisation des tournées intempéries est intéressante car cela montre les zones qui sont connues comme sensibles au ruissellement. Néanmoins, les zones de tournées qui n'ont pas été réellement impactées ne sont pas prises en compte dans un premier temps dans la base de données d'impacts. Des informations sur les ouvrages hydrauliques de traversée, et plus largement sur l'infrastructure ferroviaire, ont également été collectées. Bien que la présence d'un petit ouvrage hydraulique de traversée soit souvent le témoin de passage de ruissellement, les informations sur leur localisation n'ont pas été incluses dans la base de données d'impacts, s'ils n'ont pas réellement été impactés. Ces informations seront néanmoins utiles lors de la prise en compte de la vulnérabilité de l'infrastructure dans l'évaluation de la méthode IRIP, au chapitre suivant.

#### 1.2.3.4. DISCUSSION

La mise en œuvre de cette méthode de collecte et de traitement de données d'archives nécessite une importante coordination entre les compétences en archivistique, en hydrologie et en ferroviaire. Il faut déterminer bien en amont l'objectif de la recherche et savoir comment l'on veut se servir des résultats, afin de bien identifier les documents d'intérêt et de sélectionner les informations pertinentes dans chaque document. Lors de la constitution du fonds documentaire, il faut noter si l'information existe ou non dans un document. Le risque est de devoir revenir *a posteriori* sur des documents parce qu'une information n'a pas été correctement relevée. Pour optimiser le travail de l'archiviste, il est important de minimiser les informations à extraire de chaque document. Il est essentiel de travailler en collaboration pour bien définir ce qu'est un document d'intérêt vis-à-vis de l'étude du ruissellement. La communication doit se faire tout au long du travail de collecte. Par exemple, si l'archiviste estime qu'une information est difficile à trouver rapidement dans les documents, ou à l'inverse qu'une information est rapidement disponible, une évolution de la structure du fonds documentaire peut être décidée ensemble. Par exemple, durant la phase de traitement des données, il a été remarqué qu'il n'est pas nécessaire pour l'archiviste de décrire précisément le type d'information que l'on peut trouver dans chaque document, puisque tous les documents doivent être analysés *a posteriori* de façon détaillée afin de faire des synthèses zones par zones. La méthode de recherche de données a été optimisée et consolidée au cours du travail, son application sera donc facilitée pour de futures zones d'étude.

La base finale des impacts liés au ruissellement contient 62 zones d'impacts, ponctuels et étendus, contre 39 incidents dans la base de données des incidents sur les ouvrages en terre. Cette dernière base de données est la base d'incidents la plus fréquemment utilisées dans les services où sont réalisées les études hydrauliques. Néanmoins, cette base référencant 39 incidents est peu précise sur les localisations (seulement un point kilométrique est référencé par incident alors que la majeure partie ne sont pas ponctuels) et peu précise sur les circonstances de ces incidents. Cette base n'est pas exhaustive et l'incident le plus ancien sur la zone d'étude remonte à 1994. Ce travail de recherche de données en archives a donc permis de collecter 23 zones d'impacts supplémentaires ainsi que davantage d'informations sur les localisations et les circonstances. On peut néanmoins noter que le temps nécessaire à la création de cette base de données d'impacts a été de six mois, dont environ quatre mois pour l'étape de constitution du fonds documentaire et environ 2 mois pour l'étape de traitement des données et de création de la couche SIG des impacts. Malgré l'apport significatif d'informations sur

l'exposition de la ligne au ruissellement, ce type de recherche est difficilement réalisable par les agents dans le cadre d'études hydrauliques. La recherche de données est en effet souvent chronophage et les compétences en archivistiques peu disponibles. Une amélioration des systèmes de gestion des informations pourrait permettre de réduire les difficultés liés aux travaux de collecte de données.

Cette base de données a été créée afin de servir de comparaison pour évaluer les cartes IRIP. Mais, la base de données rassemble des informations qui s'étendent sur plus d'un siècle, alors que les cartes IRIP représentent la susceptibilité au ruissellement à un instant donné. Les cartes sont réalisées avec des données d'entrée statiques acquises à certaines dates. Si on peut estimer que la topographie et la pédologie varient peu en un siècle, l'occupation du sol quant à elle évolue rapidement. Techniquement, il est possible de créer des cartes de ruissellement pour différentes époques. Mais, on ne dispose pas, sur la zone d'étude, d'informations sur l'occupation du sol pour différentes périodes de temps, ou alors de façon très imprécise, notamment pour le début du XXème siècle. Est-il alors pertinent de comparer les cartes IRIP statiques avec des données d'impacts qui sont fonction du temps ? Peut-on se permettre de faire l'analyse comparative seulement avec les données d'occupation du sol de 2009 ? Les modifications majeures de l'occupation du sol sur la zone d'étude, sont : la diminution du bocage, provoquant une augmentation des surfaces agricoles et une diminution de la végétation ; le remplacement de forêts par des parcelles agricoles, notamment au niveau des limites de coteaux ; et une augmentation de l'urbanisation, au niveau des périphéries des villes. Vis-à-vis du ruissellement, les conditions d'occupation du sol sont donc de plus en plus favorables avec le temps. Ceci s'observe également avec les impacts, dont le nombre augmente fortement à partir du milieu des années 90. Cette information est néanmoins à mettre en regard de l'éventuelle perte d'informations pour les périodes très anciennes, ainsi que du vieillissement de la ligne, la rendant plus vulnérable avec le temps. Comparer un impact des années 1950, par exemple, avec une carte IRIP aux conditions d'occupation du sol de 2009, n'est pas si incohérent. Les conditions pluviométriques ayant engendrées l'impact de 1950, pourrait aussi théoriquement engendrer un impact en 2009. Les prédispositions du territoire au ruissellement augmentent globalement avec le temps. La comparaison d'un impact récent avec des conditions de sol de 1950 serait par ailleurs moins pertinente.

Par ailleurs, peut-on considérer, sur un siècle de données, que tous les évènements liés au ruissellement qui pouvaient se produire se sont produits au moins une fois sur la voie ferrée ? Pour savoir s'il est possible de faire cette approximation, on peut calculer les probabilités, sur un siècle, d'assister à des épisodes de ruissellement pour différentes périodes de retour. Le Tableau II-6 présente le calcul pour des épisodes de ruissellement aux périodes de retour de 10, 20, 50 et 100 ans. Pour un épisode de période de retour 10 ans, la probabilité de le voir chaque année est de 0,1. La probabilité d'y échapper chaque année est donc de 0,9 ( $1 - 0,1$ ), et la probabilité d'y échapper en un siècle de  $1.10^{-5}$  ( $0,9^{100}$ ). Cette probabilité proche de zéro signifie qu'il est très peu probable de ne pas voir un évènement décennal en un siècle d'observation. On peut donc faire l'hypothèse qu'en un siècle de données on dispose de tous les épisodes de période de retour 10 ans. Pour les périodes de retour de 20 et 50 ans, la probabilité d'avoir raté un épisode en un siècle est assez faible, respectivement de 0,01 et 0,13. On peut donc également faire l'hypothèse de tous les avoir dans la base de données. Par contre, Pour les épisodes centennaux, il y a plus d'une chance sur 3 de ne pas les avoir dans la base. Ce calcul simple permet d'estimer le type d'épisodes de ruissellement présents dans la base de données. Ceci reste néanmoins une estimation puisque les épisodes de ruissellement le long de la voie ferrée ne sont pas indépendants. Plusieurs épisodes de ruissellement peuvent se produire par exemple pour un même épisode pluvieux.

**TABEAU II-6 : CALCUL DE LA PROBABILITE DE NE PAS VOIR UN EPISODE DE RUISSELLEMENT EN UN SIECLE POUR PLUSIEURS PERIODE DE RETOUR**

Période de retour de l'évènement	Probabilité de voir l'évènement en 1 an	Probabilité d'échapper à l'évènement en 1 an	Probabilité d'échapper à l'évènement en 100 ans
100	0,01	0,99	0,37
50	0,02	0,98	0,13
20	0,05	0,95	0,01
10	0,10	0,90	$2,6.10^{-5}$

#### 1.2.4. METHODE DE COMPARAISON ENTRE LES CARTES IRIP ET LES DONNEES D'IMPACTS

L'objectif de la comparaison entre les cartes IRIP et les données d'impacts est d'évaluer la pertinence de la méthode IRIP. Pour cela, il s'agit de vérifier si les impacts sont localisés au niveau des zones identifiées par la méthode IRIP comme sensibles au ruissellement. La vérification peut être visuelle, c'est un très bon moyen de se faire une opinion sur la pertinence des cartes IRIP. Néanmoins, la démarche d'évaluation ne peut s'appuyer seulement sur des notions qualitatives. De plus, la vérification visuelle a ses limites sur une grande zone d'étude, elle peut être chronophage et subjective. Ceci ne peut pas être le seul moyen de vérification. Il est nécessaire de disposer en complément d'indicateurs quantitatifs et objectifs. La méthode de comparaison proposée se base sur des méthodes classiques d'évaluation de prévisions, notamment utilisées pour l'évaluation des modèles météorologiques et hydrologiques (WWRP/WGNE Joint Working Group on Forecast Verification Research, 2015). Elle consiste en la réalisation de tableaux de contingence, à partir desquels sont calculés différents indicateurs. Les indicateurs fournissent des estimations quantitatives de la corrélation des cartes IRIP avec la base de données d'impacts selon différents critères. Cette section présente le principe de construction des tableaux de contingence, ainsi que les six indicateurs choisis pour évaluer la pertinence de la méthode IRIP. Néanmoins contrairement aux prévisions quantitatives réalisées en météorologie ou en hydrologie, où il s'agit de compter des dépassements de seuils de vigilance, la méthode IRIP propose des cartes avec des niveaux de susceptibilité. Une des principales problématiques dans la comparaison des cartes IRIP et des données d'impacts est de mettre en forme les données afin de pouvoir réaliser les comptages pour les tables de contingence. Il existe de multiples possibilités de prétraitement et il est important de connaître l'influence des choix de prétraitement sur le résultat des corrélations. Cette section présente la comparaison de 16 méthodes de prétraitement retenues pour effectuer les tests de comparaison.

##### 1.2.4.1. TABLEAU DE CONTINGENCE

Un tableau de contingence est une matrice représentant l'interrelation entre deux variables. Ce sont des tableaux à double entrée, une variable pour les lignes et une autre pour les colonnes, dont le comptage des co-occurrences permet d'estimer une potentielle dépendance entre les deux variables (Stanski et al., 1989; WWRP/WGNE Joint Working Group on Forecast Verification Research, 2015). Dans le cas de l'évaluation de la méthode IRIP, les deux variables sont les cartes IRIP (selon les lignes) et les données d'impacts (selon les colonnes). Elles sont chacune décomposées en deux possibilités, zone identifiée ou non, pour IRIP, et impact observé ou non, pour les impacts (Tableau II-7). Il y a alors quatre types de corrélations possibles : vrai positif, faux positif, faux négatif et vrai négatif. Les vrais positifs (V+) sont les zones identifiées comme sensibles au ruissellement et où il y a effectivement eu un impact. Les faux positifs (F+) sont les zones identifiées comme sensibles mais où il n'y a pas eu d'impact. Les faux négatifs (F-) sont les zones non identifiées comme sensibles d'après IRIP mais où il y a eu un impact. Enfin, les vrais négatifs (V-), sont les zones non identifiées par IRIP et où il ne s'est effectivement rien passé. Une bonne

adéquation s’observe pour les cas où il y a beaucoup de vrais (positifs et négatifs) et peu de faux. Une attention particulière sera portée aux corrélations de type faux négatif. Un faux négatif signifie qu’une zone d’impact n’a pas bien été détectée. D’un point de vue opérationnel, c’est le résultat le plus pénalisant pour l’évaluation de la méthode IRIP. Il est davantage concevable d’avoir trop de faux positifs, trop de zones détectées par IRIP sans impact, plutôt que des faux négatifs. Ainsi, pour discuter les tableaux de contingence obtenus, davantage d’attention sera portée aux faux négatifs, s’il y en a.

**TABEAU II-7: TABLEAU DE CONTIGENCE THEORIQUE ENTRE LES CARTES IRIP ET LES IMPACTS LIES AU RUISSELLEMENT**

		Impact observé		
		Oui	Non	
Identifié par IRIP	Oui	Vrais positifs V+	Faux positifs F+	Total identifiés
	Non	Faux négatifs F-	Vrai négatifs V-	Total non identifiés
		Total observés	Total non observés	Total

#### 1.2.4.2. INDICATEURS DE PERFORMANCE

Le tableau de contingence n’est pas un outil en soit pour mesurer la performance d’une prédiction, mais est une base pour le calcul d’indicateurs de performance. Il existe de nombreux indicateurs de performance dans la littérature répondant chacun à des objectifs de mesure différents (WWRP/WGNE Joint Working Group on Forecast Verification Research, 2015). Pour l’évaluation de la méthode IRIP, six indicateurs de performance sont utilisés: la probabilité de détection (POD), le taux de fausses alarmes (FAR), la précision, le biais, le Chi-2 et le coefficient Phi.

##### LA PROBABILITE DE DETECTION

$$POD = \frac{(V+)}{(V+) + (F-)}$$

La probabilité de détection indique la proportion de zones impactées qui a été correctement identifiée par la méthode IRIP. Par exemple, un POD de 0,7 signifie que 70% des zones impactées ont bien été identifiées par IRIP. La probabilité de détection varie de 0 à 1, avec 1 signifiant le score parfait. Un POD qui n’est pas égal à 1 signifie que des zones ayant été impactée par le ruissellement ne seraient pas identifiées par la méthode IRIP, ce qui, dans un contexte opérationnel, est très péjorant. Le POD est à analyser conjointement au FAR, le taux de fausses alarmes.

##### LE TAUX DE FAUSSES ALARMES

$$FAR = \frac{(F+)}{(V+) + (F+)}$$

Le taux de fausses alarmes indique la proportion de zones identifiées par IRIP où il ne s’est rien passé. Par exemple, un FAR de 0,6 signifie que 60% des zones identifiées par IRIP comme sensibles au ruissellement n’ont vu se produire aucun impact. Le taux de fausses alarmes varie de 0 à 1, avec 0 le score parfait. Le taux de fausses alarmes permet de relativiser une probabilité de détection élevée. Par exemple, si la majeure partie de la zone d’étude est identifiée comme sensible au ruissellement, un POD élevé a des chances d’être obtenu, mais le FAR sera également élevé.

LA PRECISION

$$Précision = \frac{(V+) + (V-)}{Total}$$

La précision correspond au taux de réussite en prenant en compte les vrais négatifs. Par exemple, une précision de 0,8 signifie que 80 % des zones identifiées par IRIP sont en accord avec les données d'impacts, que les zones aient été impactées ou non. La précision varie de 0 à 1, avec 1 le score parfait. Cet indicateur de performance est intéressant dans un contexte opérationnel, puisqu'il prend en compte les vrais négatifs et montre également la capacité d'IRIP à identifier une zone qui n'est pas exposée au ruissellement. Par contre, le score de précision est fortement influencé par la catégorie la plus fréquente, souvent les vrais négatifs lorsque les zones impactées sont assez rares à l'échelle de la ligne.

LE BIAIS

$$Biais = \frac{(V+) + (F+)}{(V+) + (F-)}$$

Le biais mesure le ratio entre le nombre de zones identifiées comme sensibles au ruissellement et le nombre de zones effectivement impactées. Le biais varie de 0 à  $+\infty$ , avec un score parfait de 1, signifiant que les proportions de zones identifiées par IRIP et de zones effectivement impactées sont équivalentes. Si le biais est inférieur 1, la méthode IRIP aura tendance à sous-estimer l'étendu du linéaire de voie exposé au ruissellement, en regard de l'étendu de linéaire impacté. Si le biais est supérieur à 1, la méthode IRIP aura tendance à surestimer le linéaire exposé.

LE TEST DU CHI-2

Le test du Chi-2 donne une indication sur la dépendance de deux variables, qui sont ici les zones identifiées par IRIP et les zones impactées. La réalisation du test du Chi-2 sur le tableau de contingence permet de comparer les effectifs obtenus aux effectifs théoriques obtenus si les deux variables étaient indépendantes. Le Chi-2 se calcule par le carré de l'écart entre les effectifs obtenus et les effectifs théoriques divisé par les effectifs théoriques (Rakotomalala, 2011).

$$\chi^2 = \sum \frac{(\text{effectifs obtenus} - \text{effectifs théoriques})^2}{\text{effectifs théoriques}}$$

Si les effectifs obtenus sont (Tableau II-8) :

TABLEAU II-8: NOTATION DES EFFECTIFS DANS UN TABLEAU DE CONTINGENCE

	Zone impactée	Zone non impactée	Total
Zone identifiée	$n_{11}$	$n_{12}$	$n_{1.}$
Zone non identifiée	$n_{21}$	$n_{22}$	$n_{2.}$
Total	$n_{.1}$	$n_{.2}$	$n_{..}$

Les effectifs théoriques se calculent ainsi (Tableau II-9) :

TABLEAU II-9: CALCUL DES EFFECTIFS THEORIQUES DANS UN TABLEAU DE CONTINGENCE

	Zone impactée	Zone non impactée	Total
Zone identifiée	$\frac{n_{1.} * n_{.1}}{n_{..}}$	$\frac{n_{1.} * n_{.2}}{n_{..}}$	$n_{1.}$
Zone non identifiée	$\frac{n_{2.} * n_{.1}}{n_{..}}$	$\frac{n_{2.} * n_{.2}}{n_{..}}$	$n_{2.}$
Total	$n_{.1}$	$n_{.2}$	$n_{..}$

Et le Chi-2 se calcule ainsi :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \frac{\left(n_{ij} - \frac{n_{i.} * n_{.j}}{n_{..}}\right)^2}{\frac{n_{i.} * n_{.j}}{n_{..}}}$$

Le Chi-2 calculé varie de 0 à +∞. Pour juger de sa significativité, sa valeur est comparée à la fonction de distribution de la loi du Chi-2 à 1 degré de liberté. Le degré de liberté d'un tableau de contingence s'obtient par la formule générique ddl = (nombre de colonnes – 1) \* (nombre de lignes – 1), ici égal à 1. Des valeurs critiques de la distribution du Chi-2 à 1 degré de liberté sont résumées dans le Tableau II-10. La dépendance entre les zones identifiées par IRIP et les zones impactées peut être considérée comme extrêmement significative à partir d'un Chi-2 supérieur ou égal à 10,83.

TABLEAU II-10: VALEURS CRITIQUES DE LA DISTRIBUTION DU CHI-2 A 1 DEGRE DE LIBERTE

$P(\chi^2 \geq x)$	$x$	Interprétation
0,010	6,635	Significatif
0,005	7,879	Très significatif
0,001	10,83	Extrêmement significatif

#### LE COEFFICIENT PHI

$$\Phi = \frac{(V+) * (V-) - (F+) * (F-)}{\sqrt{[(V+) + (F+)][(V+) + (F-)][(V-) + (F+)][(V-) + (F-)]}}$$

Le coefficient de Phi permet de mesurer l'intensité de la dépendance entre deux variables (Cramér, 2016; Rakotomalala, 2011). Le Phi varie de 0 à 1, avec 1 score parfait. Le coefficient Phi peut être interprété comme un coefficient de corrélation pour un tableau de contingence composé de deux lignes et deux colonnes. Le coefficient de Phi est également lié au Chi-2 par la formule :

$$\Phi = \sqrt{\frac{\chi^2}{Total}}$$

SYNTHÈSE

Pour choisir les indicateurs à utiliser parmi la quantité disponible dans la littérature, il est essentiel de savoir ce que l'on cherche à évaluer. Globalement, l'évaluation de la méthode IRIP porte sur l'évaluation de sa capacité à bien détecter les zones exposées à l'aléa ruissellement. Par rapport aux données de comparaison disponibles, on cherche à quantifier la correspondance entre les cartes IRIP et la localisation des impacts.

De plus, utiliser un trop grand nombre d'indicateurs peut rendre l'interprétation des résultats plus difficile. Il est important de s'assurer que ces différents indicateurs ne sont pas redondants. Le Tableau II-11 fait la synthèse des indicateurs de performance choisis pour l'évaluation de la méthode IRIP, avec les questions auxquels ils permettent de répondre et leur interprétation.

TABLEAU II-11: SYNTHÈSE DES INDICATEURS DE PERFORMANCE CHOISIS POUR L'ÉVALUATION DE LA MÉTHODE IRIP

Indicateurs	Questions	interprétations
POD	Quelle est la part des zones impactées qui ont bien été identifiées par IRIP ?	Varie de 0 à 1, avec 1 score parfait
FAR	Quelle est la part des zones identifiées par IRIP comme sensibles où il ne s'est rien passé ?	Varie de 0 à 1, avec 0 score parfait
Précision	Quelle est la part des zones bien identifiées (V+ et V-) par la méthode IRIP ?	Varie de 0 à 1, avec 1 score parfait
Biais	Y a-t-il une sur ou sous-estimation des zones identifiées comme sensibles par la méthode IRIP ?	Varie de 0 à $+\infty$ , avec surestimation si $> 1$ et sous-estimation si $< 1$
$\chi^2$	La dépendance entre les zones identifiées par IRIP et les zones impactées est-elle statistiquement significative ?	Si $> 7,88$ très significatif Si $> 10,83$ extrêmement significatif
$\Phi$	Quelle est l'intensité de la dépendance ?	Varie de 0 à 1, avec 1 score parfait

1.2.4.3. MISE EN FORME DES DONNÉES

Pour compter les différents types de corrélations et remplir le tableau de contingence, les données à comparer doivent être mises en forme. Pour cela, il existe de multiples possibilités. Tout d'abord, il faut déterminer ce que l'on considère comme une zone identifiée sensible au ruissellement ou non par la méthode IRIP. Quelle(s) carte(s) IRIP doit-on utiliser ? La réunion des cartes accumulation et transfert semble le plus pertinent, mais ne faudrait-il pas tester également la réunion de l'accumulation, du transfert et de la production ? Ou bien, ne faudrait-il pas tester l'intersection des niveaux forts pour les différentes cartes IRIP ? Quel(s) niveau(x) de susceptibilité doit-on prendre en compte ? Par ailleurs, la voie ferrée et les zones impactées sont représentées ici par des éléments linéaires. Or, l'infrastructure ferroviaire, composée de deux voies ferrées et des ouvrages en terre, possède une certaine largeur, variant sur le linéaire. Quelle largeur prendre en compte autour de la voie et des zones d'impacts ? Enfin, la méthode de comptage des différents types de corrélation (V+, V-, F+ et F-) doit également être déterminée. Il est possible, simplement de calculer les surfaces de recoupement entre les zones

détectées sensibles et les zones effectivement impactées (corrélation de type vrai positif). Mais il est aussi possible de considérer qu'un impact est bien détecté par les cartes IRIP à partir d'un pixel fort dans son emprise. Le choix de la méthode de comptage est donc discuté. Le Tableau II-12 présente différents choix possibles pour la mise en forme des données à comparer. Si chaque choix est testé indépendamment, ceci fait un total de 576 tests à effectuer (6x4x2x2x3x2). Tous les réaliser serait chronophage et difficile à commenter. Des réflexions, présentées dans cette section, sur les choix de mise en forme permettent déjà d'éliminer un certain nombre de tests (les possibilités rayées dans le tableau).

TABLEAU II-12: LISTE DES CHOIX POSSIBLES POUR LA MISE EN FORME DES DONNEES A COMPARER (LES CHOIX RAYES N'ONT PAS ETE TESTES)

Cartes IRIP et types de combinaisons	Niveaux IRIP pour considérer une zone identifiée	Prise en compte des pixels isolés	Largeur de la zone tampon autour de la voie ferrée et des impacts	Largeur de la zone tampon autour des pixels IRIP	Méthode de comptage des corrélations
<del>P U T U A</del>	5	Oui	25 m	0 m	Calcul des surfaces de recoupement A partir de 1 pixel fort
T U A	≥4	Non	50 m	25 m	
<del>P A T A A</del>	≥3			<del>50 m</del>	
<del>T A A</del>	≥2				
A seulement T seulement					

#### CARTES IRIP ET TYPES DE COMBINAISON

Pour le choix des cartes IRIP à considérer pour la comparaison avec les données d'impacts, il a été décidé de ne pas prendre en compte la carte de production (P). Ce sont les cartes de transfert (T) et d'accumulation (A) qui sont susceptibles d'indiquer des zones de désordres, tels que de l'érosion, des dépôts ou des inondations. La carte de production montre les zones susceptibles de générer des volumes d'eau de surface importants, il faut ensuite qu'il y ait de forts potentiels de transfert ou d'accumulation pour engendrer un désordre. La carte de production est néanmoins prise en compte, comme un indicateur d'entrée pour créer les deux autres cartes. Concernant la combinaison des cartes IRIP, c'est la réunion des deux cartes (A U T) qui est utilisée. Il est considéré qu'un potentiel fort en transfert ou en accumulation, ou les deux peut induire un désordre. Il pourrait être intéressant de voir l'apport des deux cartes individuellement, mais la réalisation de tests sur la réunion des deux cartes a semblé prioritaire.

#### CHOIX DU NIVEAU IRIP MINIMUM A CONSIDERER

Concernant les niveaux IRIP minimum à considérer, il a été décidé de tester les niveaux 4 et plus, ainsi que les niveaux 3 et plus. Au vu de la distribution des niveaux IRIP sur la zone d'étude (Figure II-32), les niveaux 2 et plus représentent 92% de la surface. Ceci ne discrimine pas assez les zones sensibles au ruissellement. Pour les niveaux 5, ils ne représentent que 1% de la zone d'étude, ils sont considérés comme ne montrant pas assez d'information. Ainsi la question se pose davantage pour les niveaux intermédiaires 3 et 4, qui représentent respectivement 63 et 9% de tout le bassin d'étude. A partir de quel niveau un désordre peut se produire ? Ceci constituera deux tests différents.

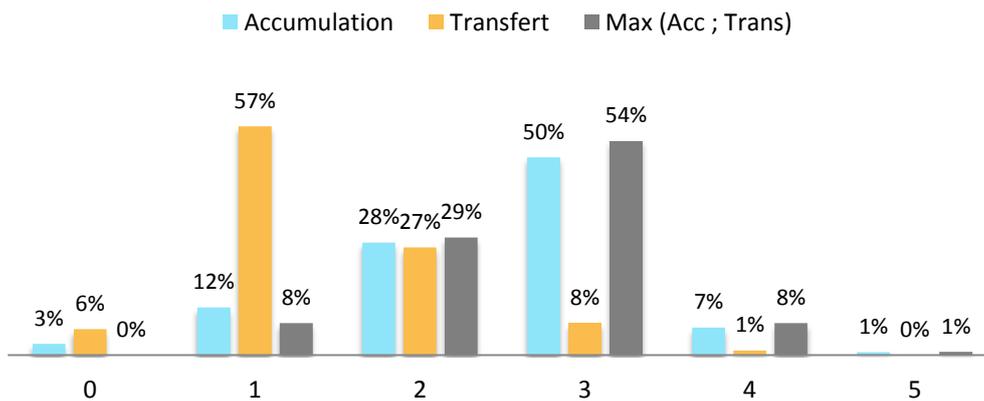


FIGURE II-32: FREQUENCES D'APPARITION DES DIFFERENTS NIVEAUX IRIP SUR TOUT LE BASSIN D'ETUDE, POUR LES CARTES D'ACCUMULATION, DE TRANSFERT ET POUR LA CARTE DU MAXIMUM D'ACCUMULATION ET TRANSFERT (A U T)

#### CHOIX DE PRISE EN COMPTE DES PIXELS ISOLEES

Concernant les pixels isolés, la question se pose de savoir s'ils sont significatifs ou non, s'ils apportent une réelle information. Les cartes IRIP sont créées par superposition de cinq informations binaires. Un pixel de niveau fort montre donc que plusieurs indicateurs sont favorables au ruissellement en un même point. Si le pixel est isolé on peut se demander s'il n'est pas issu d'une concomitance spatiale d'artefacts sur les données d'entrée par exemple. S'il y a une persistance spatiale de pixels forts (un amas de pixels forts), il est moins probable que cela soit dû à un artefact. Deux tests différents sont donc effectués l'un en prenant en compte tous les pixels, l'autre en ayant préalablement supprimé les pixels isolés. Un pixel est défini comme isolé, si sa zone tampon potentielle de 25 m ne recoupe pas la zone tampon de 25 m d'un autre pixel, tel qu'indiqué sur la Figure II-33. Créer une zone tampon sur une données de type vecteur (polygone ou ligne), revient à ajouter une épaisseur de la largeur souhaitée autour du vecteur (par exemple, fonction « v.buffer » dans le logiciel GRASS GIS<sup>9</sup>). La distance tampon a été choisie selon la taille d'un pixel, définie par la résolution du MNT en entrée, ici de 25 m. Concernant le traitement de suppression des pixels isolés, ils sont d'abord supprimés sur les cartes de transfert et d'accumulation séparément, puis la réunion des deux cartes est effectuée.

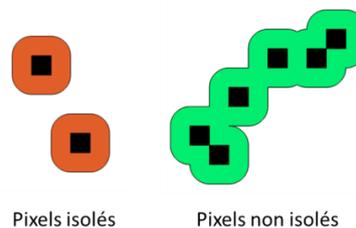


FIGURE II-33: ILLUSTRATION DU CRITERE DE RECOUPEMENT DES ZONES TAMPON DE 25 M POUR CONSIDERER UN PIXEL COMME "ISOLE"

#### CHOIX DE LA DISTANCE TAMPON DE PART ET D'AUTRE DE LA VOIE FERREE ET DES IMPACTS

La largeur d'une voie ferrée dépend du nombre de voie et de la taille des ouvrages en terre. Pour la zone d'étude, la voie est double, avec quelques zones de triages ponctuellement. Une voie fait environ 3 m

<sup>9</sup> <https://grass.osgeo.org/grass73/manuals/v.buffer.html>

(environ 8 m pour une voie double). La largeur des ouvrages en terre (déblai, remblai, etc.) peut varier, de 0 m pour certains profils rasant, à plus de 100 m pour certains grands remblais ou déblais. La Figure II-34 montre deux sites du tronçon d'étude où la surface de l'emprise ferroviaire varie. Sur la Figure II-34a, une zone tampon de 25 m de part et d'autre du linéaire de voie semble suffire, tandis que sur la Figure II-34b, la voie est établie sur un grand remblai avec une zone de triage, et l'emprise ferroviaire atteint près de 100 m de large. On observe néanmoins que l'emprise ferroviaire reste, pour sa majeure partie, comprise dans une bande de 50 m de large. Deux tailles de zones tampon sont testées, de 25 m et de 50 m de part et d'autre du linéaire de la voie ferrée. Par ailleurs, les données d'impacts, qui sont des données de type vecteur ligne, sont localisés sur le linéaire de voie ferrée. Pour les mêmes raisons que le linéaire de voie, le traitement de zone tampon est appliquée aux linéaires d'impacts. Tout d'abord, il y a besoin de transformer ces linéaires en polygones pour effectuer la comparaison avec les pixels IRIP. Ensuite, la localisation des linéaires d'impacts contient de l'incertitude, il est donc pertinent de considérer une zone tampon autour de ces données. Pour les données d'impacts, les largeurs de 25 et 50 m sont également testées.

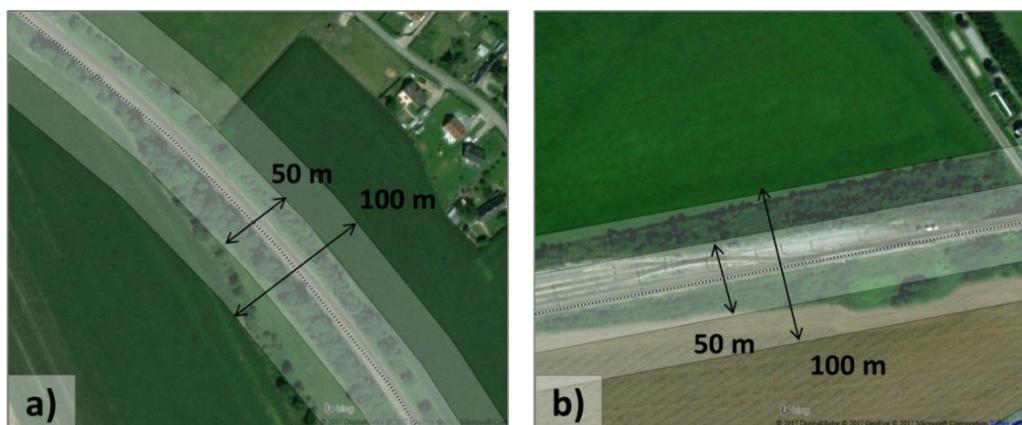


FIGURE II-34: ILLUSTRATION DE DEUX ZONES OU LA ZONE TAMPON DE 25 M COUVRE L'ENSEMBLE DE L'EMPRISE FERROVIAIRE (A) ET OU LA ZONE TAMPON DE 25 M EST TROP PETITE PAR RAPPORT A L'EMPRISE FERROVIAIRE (B)

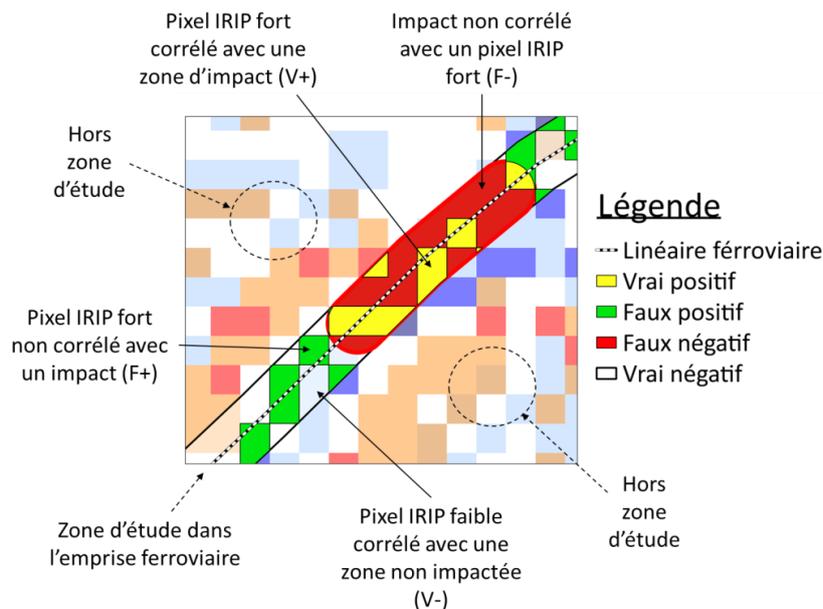
#### CHOIX DE LA PRISE EN COMPTE D'UNE ZONE TAMPON AUTOUR DES PIXELS IRIP FORTS

Des tests de comparaison sont également effectués en créant une zone tampon autour des pixels forts IRIP. Ceci permet de gérer une éventuelle erreur dans la géolocalisation entre les cartes IRIP (liées aux données d'entrée) et les zones d'impacts du ruissellement. Deux tests de comparaison sont effectués, l'un sans prendre en compte de zone tampon, l'autre en prenant en compte une zone tampon de 25 m, décidée selon la résolution des cartes IRIP. Une distance tampon de 50 m a été proposée mais n'a pas été testée car considérée trop large (un pixel + une zone tampon = 125 m de large) et pouvant néanmoins nuire à une certaine précision des cartes IRIP. De plus, les données d'impacts, avec lesquelles est étudié la correspondance, possède déjà une zone tampon de 25 ou 50 m selon les tests.

#### METHODE DE COMPTAGE DES CORRELATIONS

Pour remplir le tableau de contingence, il faut définir la méthode de comptage des corrélations, c'est-à-dire la façon de compter les vrais positifs, les faux positifs, etc. Il est proposé de compter les différents types de corrélations, en mesurant les surfaces de recouvrement entre les emprises spatiales des données (en mètres carrés), sur l'ensemble de l'emprise ferroviaire. Par exemple, sur la Figure II-35, les surfaces jaunes sont des pixels IRIP forts localisés au niveau d'un impact. Alors, l'ensemble de la surface jaune est

considérée comme vrai positif (en mètres carrés). Les surfaces vertes sont des pixels IRIP forts non corrélés avec un impact, elles sont considérées comme faux positif. De la même manière, les surfaces rouges sont des faux négatifs, elles sont des zones d'impacts où il n'y a pas de pixels IRIP forts. Enfin, les surfaces blanches à l'intérieur de la zone d'étude (linéaire ferroviaire plus une zone tampon de 25 ou 50 m de part et d'autre) sont des vrais négatifs, ce sont des pixels IRIP faibles non corrélés avec des impacts. Ainsi, le calcul des surfaces de recouvrement permet de considérer la totalité des pixels IRIP présents dans la zone d'étude (même les demi-pixels), et reste simple à réaliser grâce à des traitements géomatiques. L'inconvénient est que souvent, les pixels IRIP forts ne recouvrent pas toute la surface de l'impact. Sur la Figure par exemple, on peut voir que l'impact est corrélé avec des pixels IRIP forts (pixels en jaune) mais qu'il reste une grande surface (en rouge) qui sera comptée comme faux négatif, pourtant la zone d'impact semble bien détectée par IRIP. Par contre, cette méthode permet de tester la précision des pixels IRIP forts. Par ailleurs, les tests réalisés en prenant en compte une zone tampon autour des pixels IRIP forts permettront de pallier à cet effet car les pixels IRIP recouvriront davantage de surface.



**FIGURE II-35: ILLUSTRATION DE LA METHODE DE COMPTAGE DES TYPES DE CORRELATIONS EN MESURANT LES SURFACES DE RECOUVREMENT DES PIXELS IRIP ET DES ZONES IMPACTEES DANS L'EMPRISE FERROVIAIRE**

Une autre méthode de comptage des différents types de corrélations peut être proposée, consistant à considérer comme vrai positif un impact ayant un recouvrement avec au moins un pixel IRIP fort. Ainsi l'ensemble de l'impact compterait comme un seul vrai positif, un faux négatif étant un impact n'ayant aucun pixel IRIP fort dans son emprise. Néanmoins ceci pose la question de savoir ce que l'on considère comme faux positifs et comme vrais négatifs. Il faudrait pouvoir découper la voie ferrée en tronçons, afin d'être en mesure de compter les tronçons vrais positifs, vrais négatifs, etc. Ceci pose également la question du critère à choisir pour découper le linéaire de voie en tronçons. Cette proposition n'est pas retenue, dans un premier temps, puisque nécessitant des données supplémentaires sur l'infrastructure et son environnement pour effectuer un découpage pertinent de la voie ferrée. Le prochain chapitre prenant en compte les données d'infrastructure pourra tester cette proposition.

## SYNTHESE

A l'issue de l'élimination de plusieurs possibilités de mise en forme des données, il reste seize tests à effectuer pour lesquels il n'a pas été possible de faire un choix a priori. Le Tableau II-13 fait la synthèse de ces seize tests. Pour chacun de ces tests, le comptage des corrélations (V+, V-, F+ et F-) est effectué en mesurant les surfaces de recoupement entre les pixels IRIP forts et les zones impactées. Le but de réaliser de multiples tests avec différents prétraitements est de mieux appréhender l'influence des choix de mise en forme sur le résultat de la corrélation. Y a-t-il des prétraitements qui n'ont pas d'influence, ou à l'inverse y a-t-il des choix qui modifient fortement le résultat de la comparaison entre les cartes IRIP et les zones d'impacts ? Pour la suite de l'évaluation, il s'agira de réduire au maximum le nombre de tests à effectuer. Pour les prétraitements qui n'ont pas d'influence sur la corrélation, seul un test sera conservé pour la suite. Les choix de prétraitements qui influencent la corrélation seront analysés plus en détails pour comprendre pourquoi ils font varier les résultats. A l'issue de ce chapitre, les prétraitements les plus pertinents (simples et robustes) seront conservés pour la suite de l'évaluation.

TABLEAU II-13: SYNTHESE DES SEIZE TESTS A EFFECTUER POUR LA COMPARAISON DES CARTES IRIP ET DES DONNEES D'IMPACTS

N° test	Niveaux IRIP	Pixels isolés	Zone tampon voie et impacts	Zone tampon IRIP
1	≥4	Avec	25	0
2	≥4	Avec	25	25
3	≥4	Avec	50	0
4	≥4	Avec	50	25
5	≥4	Sans	25	0
6	≥4	Sans	25	25
7	≥4	Sans	50	0
8	≥4	Sans	50	25
9	≥3	Avec	25	0
10	≥3	Avec	25	25
11	≥3	Avec	50	0
12	≥3	Avec	50	25
13	≥3	Sans	25	0
14	≥3	Sans	25	25
15	≥3	Sans	50	0
16	≥3	Sans	50	25

## 1.3. RESULTATS

## 1.3.1. ANALYSE STATISTIQUE

Les résultats des seize tests de comparaison sont présentés Tableau II-14 et Tableau II-15. Le Tableau II-14 présente le calcul des surfaces pour chaque type de corrélation, V+, F+, F- et V-, en kilomètres carrés. Le Tableau II-15 présente les valeurs des six indicateurs de performance pour les seize tests : POD, FAR, Précision, Biais, Chi-2 et le coefficient Phi. Certains indicateurs de performance varient très fortement selon les tests, ce qui montre que les choix réalisés lors du prétraitement des données peuvent influencer de façon significative le résultat de la comparaison. La probabilité de détection par exemple, varie de 0,1 pour le test 7, à 1,0 pour les tests 10, 12 et 14. De même la précision et de biais varient respectivement de 0,2 à 0,8 et de 0,4 à 5,6. A l'inverse, le taux de fausses alarmes, le Chi-2 et le coefficient Phi sont assez stables. Pour les 16 tests, le taux de fausses alarmes reste compris entre 0,7 et 0,8, signifiant qu'entre 70

et 80% des zones détectées comme sensibles par la méthode IRIP n'ont en réalité pas été impactées. Ceci peut être expliqué de différentes manières, soit la méthode IRIP identifie à tort des zones qui ne sont en réalité pas exposées au ruissellement, soit les zones identifiées sont effectivement exposées mais n'ont pas subi d'impacts, peut-être parce que ces zones sont protégées par des dispositifs spécifiques, ou bien, il y a eu un impact mais l'information n'a pas été trouvée et n'a pas pu être intégrée à la base de données d'impacts. Les seize tests sont presque tous extrêmement significatifs, excepté le n°16. Ceci signifie qu'il y a effectivement un lien entre les niveaux IRIP forts et les zones impactées. En revanche, le coefficient Phi indique que ce lien est peu intense.

**TABEAU II-14: PRESENTATION DU DECOMPTE DES SURFACES POUR LES 4 TYPES DE CORRELATION ET POUR LES 16 TESTS DE COMPARAISON**

N° tests	Niv. IRIP	Pixels Isoles	Tampon voie + impacts (m)	Tampon IRIP (m)	V+ (km <sup>2</sup> )	F+ (km <sup>2</sup> )	F- (km <sup>2</sup> )	V- (km <sup>2</sup> )
1	≥4	Avec	25	0	1,2	3,5	5,8	29,7
2	≥4	Avec	25	25	4,6	17,0	2,4	16,2
3	≥4	Avec	50	0	2,5	7,5	13,5	57,0
4	≥4	Avec	50	25	10,0	33,0	6,0	31,5
5	≥4	Sans	25	0	1,5	4,4	5,5	28,8
6	≥4	Sans	25	25	4,2	14,8	2,8	18,4
7	≥4	Sans	50	0	1,5	4,2	14,5	60,2
8	≥4	Sans	50	25	9,3	29,9	6,7	34,6
9	≥3	Avec	25	0	4,7	21,3	2,3	11,9
10	≥3	Avec	25	25	6,8	32,2	0,2	1,1
11	≥3	Avec	50	0	10,7	42,0	5,4	22,5
12	≥3	Avec	50	25	15,5	62,5	0,5	1,9
13	≥3	Sans	25	0	4,5	20,6	2,5	12,6
14	≥3	Sans	25	25	6,8	32,1	0,2	1,1
15	≥3	Sans	50	0	10,3	40,5	5,7	24,0
16	≥3	Sans	50	25	15,5	62,4	0,5	2,0

**TABEAU II-15: PRESENTATION DES VALEURS DE SIX INDICATEURS DE PERFORMANCE POUR LES 16 TESTS DE COMPARAISON**

N° tests	Niv. IRIP	Pixels Isoles	Tampon voie + impacts (m)	Tampon IRIP (m)	POD	FAR	Précis.	Biais	X <sup>2</sup>	Φ
1	≥4	Avec	25	0	0,2	0,7	0,8	0,7	25202	0,1
2	≥4	Avec	25	25	0,7	0,8	0,5	3,1	47608	0,1
3	≥4	Avec	50	0	0,2	0,8	0,7	0,6	17207	0,0
4	≥4	Avec	50	25	0,6	0,8	0,5	2,7	65007	0,1
5	≥4	Sans	25	0	0,2	0,7	0,8	0,8	22963	0,1
6	≥4	Sans	25	25	0,6	0,8	0,6	2,7	52394	0,1
7	≥4	Sans	50	0	0,1	0,7	0,8	0,4	13670	0,0
8	≥4	Sans	50	25	0,6	0,8	0,5	2,4	69836	0,1
9	≥3	Avec	25	0	0,7	0,8	0,4	3,7	1344	0,0
10	≥3	Avec	25	25	1,0	0,8	0,2	5,6	141	0,0
11	≥3	Avec	50	0	0,7	0,8	0,4	3,3	1093	0,0
12	≥3	Avec	50	25	1,0	0,8	0,2	4,9	104	0,0
13	≥3	Sans	25	0	0,6	0,8	0,4	3,6	1203	0,0
14	≥3	Sans	25	25	1,0	0,8	0,2	5,6	380	0,0
15	≥3	Sans	50	0	0,6	0,8	0,4	3,2	1315	0,0
16	≥3	Sans	50	25	1,0	0,8	0,2	4,9	3	0,0

## 1.3.2. ANALYSE DETAILLEE

Pour illustrer l'interprétation de ces résultats, quatre tests sont présentés en détails, les tests n° 2, n°5, n°11 et n°16 (Figure II-36). Ces tests ont été choisis car ils représentent une bonne diversité des possibilités de prétraitement. Les tests n°2 et n°5 sont réalisés avec une zone tampon de 25 m autour du linéaire de voie ferrée et ils prennent en compte les niveaux IRIP supérieurs ou égaux à 4. Les tests n° 11 et n°16 sont réalisés avec une zone tampon de 50 m autour de la voie ferrée et prennent en compte les niveaux IRIP supérieurs ou égaux à 3. Les tests n° 2 et n° 16 considèrent une zone tampon de 25 m autour des pixels IRIP forts. Les tests n° 5 et n°11 ne considèrent pas de zone tampon. Enfin, les tests n°2 et n°11 prennent en compte les pixels isolés, les deux autres tests ne les considèrent pas. Ces quatre images présentent la même zone. Les cartes IRIP de transfert et d'accumulation sont affichées en fond. Le Tableau II-16 est un extrait du Tableau II-15 pour rappeler les résultats des tests numéros 2, 5, 11 et 16.

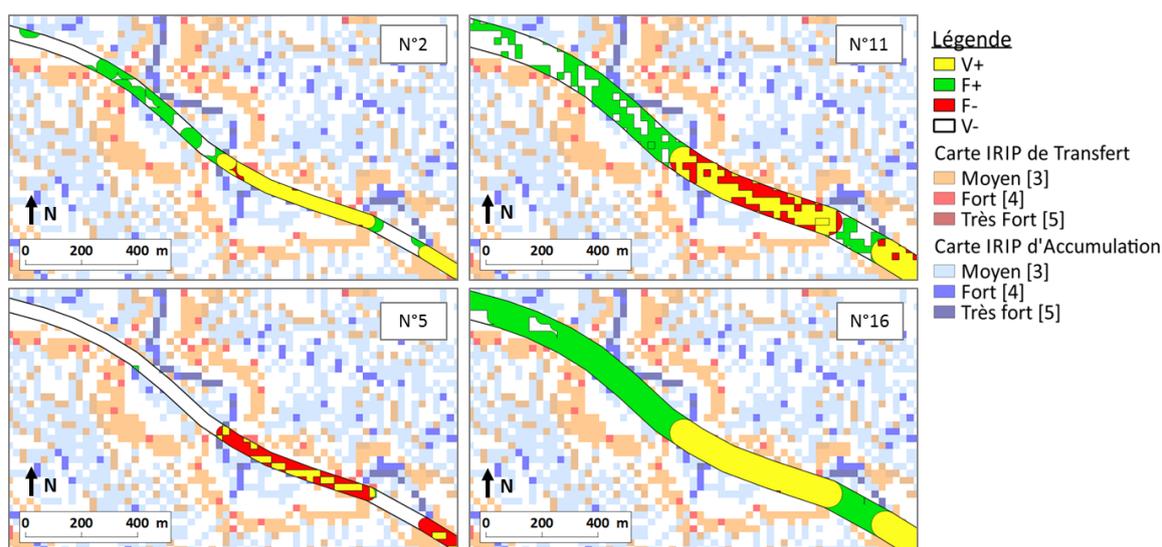


FIGURE II-36: COMPARAISON VISUELLE DES RESULTATS POUR LES TESTS NUMEROS 2, 5, 11 ET 16

TABLEAU II-16 : RAPPEL DES SIX INDICATEURS DE PERFORMANCE POUR LES TESTS NUMEROS 2, 5, 11 ET 16

N° tests	Niv. IRIP	Pixels Isolés	Tampon voie + impacts (m)	Tampon IRIP (m)	POD	FAR	Précision	Biais	X <sup>2</sup>	Φ
2	≥4	Avec	25	25	0,7	0,8	0,5	3,1	47608	0,1
5	≥4	Sans	25	0	0,2	0,7	0,8	0,8	22963	0,1
11	≥3	Avec	50	0	0,7	0,8	0,4	3,3	1093	0,0
16	≥3	Sans	50	25	1,0	0,8	0,2	4,9	3	0,0

Ces quatre tests montrent des corrélations très différentes entre les cartes IRIP et les zones d'impacts. La probabilité de détection varie très fortement. Pour le test n° 5, seulement 20% des zones impactées par le ruissellement ont été correctement identifiées par la méthode IRIP comme sensibles, contre 100% pour le test n° 16. Bien que le test n°16 ait la probabilité de détection la plus importante, il a la précision la plus faible. Seulement 20% des prédictions de la méthode IRIP sont correctes, elles sont soit vraies positives (les zones sont identifiées par IRIP et effectivement impactées), soit vraies négatives (la zone n'a pas été identifiée comme sensible et n'a pas été impactée). A l'inverse, 80% des prédictions d'IRIP sont correctes pour le test n°5. Ces résultats sont finalement assez intuitifs. Le test n° 16 détecte 100% des zones impactées car en prenant en compte les niveaux supérieurs ou égaux à 3 ainsi qu'une zone tampon de 25

m autour des pixels, presque l'intégralité de la zone d'étude est considérée comme sensible au ruissellement. Ceci n'apporte donc pas vraiment d'information. La valeur du Chi-2 est d'ailleurs de 3, non significative. Pour le test n°5, la lecture de la carte montre un résultat intéressant. En effet, il n'y a des pixels forts (supérieurs ou égaux à 4) presque uniquement sur les zones impactées. Ce résultat satisfaisant se retrouve sur l'indicateur de précision qui est de 0,8. Mais, la probabilité de détection, de 0,2 est très faible. Ceci est dû au fait que les pixels ne couvrent pas toute la surface de zone impactée. Si on prend en compte une zone tampon autour des pixels IRIP, comme pour le test n°2, on obtient un meilleur POD, de 0,7 mais on perd en précision. Les tests numéros 5 et 16 montrent les résultats les plus différents. En revanche, les résultats des tests numéros 2 et 11 sont assez similaires. Le test n°11 considère les niveaux IRIP à partir du niveau 3 alors que le test n°2 les considère à partir du niveau 4 avec une zone tampon de 25m autour. Ceci peut s'expliquer par le fait que les niveaux 4 sont souvent entourés par des niveaux 3, tel un gradient des niveaux IRIP de susceptibilité.

### 1.3.3. SYNTHÈSE

Ces premiers résultats montrent, tout d'abord, que les six indicateurs choisis représentent bien ce qui peut être observé sur les cartes, et permet de quantifier certaines caractéristiques, telles que la précision ou le biais. Il a également été montré l'importance de la vérification visuelle des cartes pour formuler des conclusions. A l'issue de ces résultats, il a été montré que les résultats des corrélations sont très dépendants des choix de prétraitement. L'objectif ici n'est pas de déterminer les prétraitements qui donnent la meilleure corrélation, mais de mieux appréhender l'influence des choix des prétraitements sur les scores des indicateurs, et de déterminer les prétraitements les plus pertinents. L'analyse détaillée d'une zone permet de dire, par exemple, que prendre en compte les niveaux IRIP 3 et une zone tampon autour, surestime largement les zones sensibles et fait perdre en significativité. On peut déjà dire que le prétraitement n°16 ne sera pas retenu. Par ailleurs, pour les autres prétraitements, certains sont précis mais font perdre trop d'information, par exemple lorsque l'on considère les niveaux supérieurs ou égaux à 4. D'autres montre de bonnes probabilités de détection mais font perdre en précision, par exemple lorsque l'on considère une zone tampon autour des pixels IRIP. Les tests où l'on considère les pixels à partir du niveau 3, sans prendre en compte de zone tampon, semblent être un bon équilibre (tests numéros 9 et 11). Davantage de discussions sur ces prétraitements devraient permettre de mieux faire la part des choses.

## 1.4. DISCUSSION

Pour analyser les choix de prétraitement et déterminer les plus pertinents, ils sont étudiés uns à uns dans cette section. Afin de pouvoir estimer si un prétraitement influence ou non le calcul des indicateurs de performance, les résultats des indicateurs sont moyennés selon ce prétraitement. Les valeurs des indicateurs sont moyennées afin de mieux identifier des variations globales des tests réalisés, qui sont assez nombreux. L'objectif ici est de simplifier la méthode de comparaison en déterminant les prétraitements les plus pertinents.

### 1.4.1. CHOIX DU NIVEAU IRIP MINIMUM A CONSIDÉRER

Pour le Tableau II-17, les moyennes des indicateurs ont été calculées pour les tests considérant au minimum les niveaux 4 (première ligne), et pour les tests considérant au minimum les niveaux 3 (deuxième ligne). Ceci confirme que le choix du niveau IRIP minimum fait fortement varier les scores des indicateurs, et que ce choix de prétraitement est critique. La prise en compte des niveaux 3 augmente globalement la probabilité de détection, mais fait baisser la précision. Les niveaux 3 augmentent

également le biais, signifiant une surestimation des zones sensibles au ruissellement. En conclusion, les scores moyennés des indicateurs montrent que les niveaux 3 apporter eux aussi des informations pertinentes mais détectent beaucoup de zones non impactées. Les niveaux 3 doivent donc être considérés. Pour avoir plus de précision sur l'influence de ce choix, des tests ont été effectués pour les niveaux 5 et pour les niveaux supérieurs ou égaux à 2.

**TABLEAU II-17: MOYENNE DES INDICATEURS DE PERFORMANCE SELON LE CHOIX DES NIVEAUX IRIP CONSIDERES**

Niveaux IRIP	POD	FAR	Précision	Biais	X <sup>2</sup>	Φ
≥ 4	0,4	0,8	0,6	1,7	39236	0,1
≥ 3	0,8	0,8	0,3	4,3	698	0,0

Le Tableau II-18 présente les indicateurs de performance pour quatre tests avec des niveaux IRIP différents. Ces tests sont effectués en prenant en compte les pixels isolés, en considérant une distance tampon de 25 m de part et d'autre de la voie ferrée et sans considérer de zone tampon autour des pixels IRIP (tests numéros 1 et 9). La même tendance que sur le tableau précédent est observée. Les niveaux 5 font baisser davantage la probabilité de détection mais augmentent la précision jusqu'à près de 1. De la même manière, les niveaux 2, font atteindre une probabilité de détection de 100%, mais font perdre en précision et augmente le biais.

**TABLEAU II-18 : INDICATEURS DE PERFORMANCE POUR DIFFERENTS NIVEAUX IRIP MINIMUM ET POUR LES MEMES PARAMETRAGES DE TEST**

Niveaux IRIP	POD	FAR	Précision	Biais	X <sup>2</sup>	Φ
= 5	0,0	0,5	0,9	0,1	126241	0,1
≥ 4	0,2	0,7	0,8	0,7	25202	0,1
≥ 3	0,7	0,8	0,4	3,7	1344	0,0
≥ 2	1,0	0,8	0,6	5,4	711841	0,3

En conclusion, tous les niveaux IRIP semblent apporter leur lot d'informations. Ces niveaux de susceptibilité représentent-ils finalement une certaine notion d'intensité ou de fréquence de l'aléa ruissellement ? Néanmoins, ils ne peuvent pas tous être pris en compte sinon l'ensemble des pixels est considéré et il n'est plus possible de discerner entre les zones exposées ou non ? Ces niveaux de susceptibilité devraient-ils être croisés avec une notion de vulnérabilité pour savoir quel niveau IRIP minimum il faut considérer ? Les niveaux IRIP les plus faibles pourraient être considérés seulement pour les zones les plus vulnérables. Mais la question de la caractérisation de la vulnérabilité de la voie ferrée au ruissellement se pose alors. De plus, pour caractériser la vulnérabilité de la voie ferrée il faut disposer des informations sur l'infrastructure sur l'ensemble du tronçon d'étude. Ces propositions feront l'objet du prochain chapitre. Pour la suite de l'analyse, les moyennes des indicateurs sont séparées entre les niveaux IRIP 3 et plus et entre les niveaux IRIP 4 et plus puisqu'il a été montré que ce choix a une influence sur les scores des indicateurs.

#### 1.4.2. CHOIX DE PRISE EN COMPTE DES PIXELS IRIP ISOLES

Le Tableau II-19 présente les six indicateurs moyennés selon les tests de prise en compte ou non des pixels isolés et selon le niveau IRIP minimum à considérer. Ces résultats montrent qu'il n'y a pas de différence importante si l'on prend en compte ou non les pixels isolés. Ceci semble dû au fait que les pixels isolés ne représentent que très peu de surface sur l'ensemble de la zone d'étude. Ce choix ne semble pas influencer les résultats de l'évaluation d'IRIP. Pour les prochains tests, les pixels isolés ne seront pas supprimés afin de simplifier les prétraitements.

**TABLEAU II-19: MOYENNE DES INDICATEURS DE PERFORMANCE SELON LE CHOIX DE CONSERVATION DES PIXELS ISOLES**

Niveaux IRIP	Pixels isolés	POD	FAR	Précision	Biais	$\chi^2$	$\Phi$
≥ 4	Avec	0,4	0,8	0,6	1,8	38756	0,1
	Sans	0,4	0,8	0,7	1,6	39716	0,1
≥ 3	Avec	0,8	0,8	0,3	4,4	671	0,0
	Sans	0,8	0,8	0,3	4,3	725	0,0

#### 1.4.3. CHOIX DE LA DISTANCE TAMPON DE PART ET D'AUTRE DE LA VOIE FERREE ET DES IMPACTS

Le calcul des moyennes pour chaque indicateur, selon la taille de la zone tampon considérée et selon le niveau IRIP minimum à considérer, montre que le choix de la distance tampon de 25 ou 50 m ne semble pas influencer la méthode d'évaluation (Tableau II-20). Pour les prochains tests, on ne gardera qu'un seul choix pour la distance tampon, ce sera 25 m car plus proche de la réalité. L'essentiel de la voie ferrée entre en effet dans cette zone tampon.

**TABLEAU II-20: MOYENNE DES INDICATEURS DE PERFORMANCE SELON LA TAILLE DE LA ZONE TAMPON AUTOUR DE LA VOIE FERREE ET DES IMPACTS**

Niveaux IRIP	Tampon voie + impacts	POD	FAR	Précision	Biais	$\chi^2$	$\Phi$
≥ 4	25 m	0,4	0,8	0,7	1,8	37041	0,1
	50 m	0,4	0,8	0,6	1,5	41430	0,1
≥ 3	25 m	0,8	0,8	0,3	4,6	767	0,0
	50 m	0,8	0,8	0,3	4,1	629	0,0

#### 1.4.4. CHOIX DE LA PRISE EN COMPTE D'UNE ZONE TAMPON AUTOUR DES PIXELS IRIP FORTS

En revanche, le Tableau II-21 montre que considérer ou non une zone tampon autour des pixels IRIP influence fortement le résultat de l'évaluation. Prendre une zone tampon de 25 m augmente en moyenne la probabilité de détection mais ceci fait perdre en précision et surestime davantage le nombre de zones considérées comme sensibles au ruissellement (le biais augmente).

**TABLEAU II-21: MOYENNE DES INDICATEURS DE PERFORMANCE SELON LA TAILLE DE LA ZONE TAMPON AUTOUR DES PIXELS IRIP FORTS**

Niveaux IRIP	Tampon pixels IRIP	POD	FAR	Précision	Biais	$\chi^2$	$\Phi$
≥ 4	0 m	0,2	0,7	0,8	0,6	19760	0,1
	25 m	0,6	0,8	0,5	2,7	58711	0,1
≥ 3	0 m	0,7	0,8	0,4	3,4	1239	0,0
	25 m	1,0	0,8	0,2	5,2	157	0,0

Ceci se confirme sur les représentations cartographiques, où presque tout le tronçon d'étude est identifié par IRIP lorsque l'on prend en compte une zone tampon autour des pixels. La Figure II-37 présente, sur une même zone, deux tests réalisés pour lesquels seul le choix d'une zone tampon autour des pixels change. La représentation cartographique du test n°1, sans zone tampon autour des pixels, semble plus pertinente car il y a davantage de détails et il est plus facile de discerner entre zone exposée ou non à l'aléa ruissellement. Avoir une information plus précise, avec plus de détails permet d'avoir plus d'éléments à disposition pour nuancer son interprétation des cartes. Pourtant, si on ne prend pas en compte une zone tampon autour des pixels IRIP, les valeurs des probabilités de détection chutent. La zone tampon semble finalement améliorer artificiellement la surface de recoupement entre les pixels et les impacts. Pour la suite, il est préconisé de ne pas utiliser de zone tampon autour des pixels pour ne pas perdre la précision des cartes IRIP. Par ailleurs, la méthode de comptage des corrélations en mesurant la surface de recoupement doit être davantage discutée.

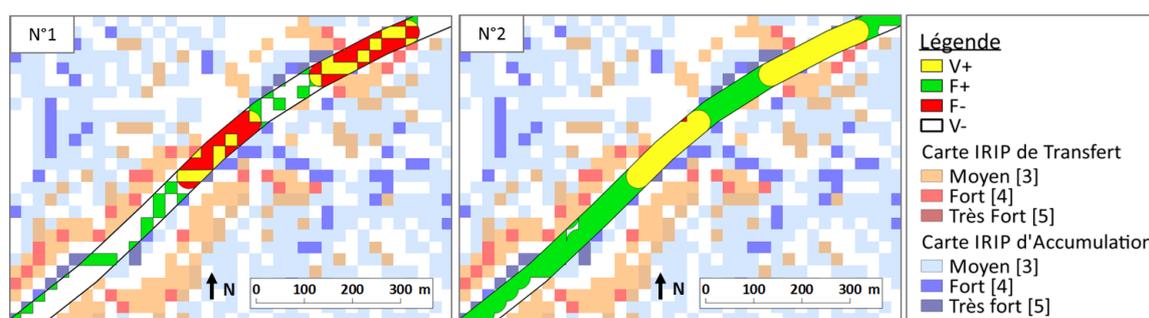


FIGURE II-37: ILLUSTRATION D'UNE MEME ZONE POUR DEUX TESTS DIFFERENTS OU LE SEUL CHOIX DE PRETRAITEMENT QUI CHANGE EST LA PRISE EN COMPTE (TEST N°2) OU NON (TEST N°1) D'UNE ZONE TAMPON AUTOUR DES PIXELS IRIP.

#### 1.4.5. METHODE DE COMPTAGE DES CORRELATIONS

L'analyse des résultats des corrélations, notamment les résultats visuels, montre que la méthode de comptage des corrélations, en mesurant les surfaces de recoupement, pourrait ne pas être efficace pour juger de la performance des cartes IRIP à retrouver les zones impactées. En effet, pour qu'une zone ait été impactée par du ruissellement, il suffit qu'il y ait eu au moins une zone d'arrivée d'eau. Donc potentiellement, au moins un pixel IRIP fort suffit à montrer une zone sensible. L'étendue de la zone impactée serait ensuite dépendante de la configuration de l'infrastructure ferroviaire. Par exemple, la Figure II-38 montre un déblai de faible hauteur dont la submersion des pistes est due à l'arrivée de ruissellement en un point précis du déblai. Une fois que l'eau s'est engouffrée dans l'emprise de l'ouvrage en terre, l'eau peut alors faire des dégâts sur une zone différente du point d'arrivée d'eau. Il serait donc pertinent de considérer un impact détecté par IRIP (vrai positif) à partir d'au moins un pixel fort. Il serait d'ailleurs pertinent de considérer un impact comme bien détecté par IRIP à partir d'au moins un pixel fort dans l'emprise de l'ouvrage en terre, même si le pixel n'est pas directement corrélé avec la zone impactée. Par contre, pour identifier les corrélations, les informations sur les limites des ouvrages en terre le long de la voie sont nécessaires. Pour aller plus loin sur l'évaluation de la méthode IRIP, davantage de données sont donc nécessaires concernant l'infrastructure ferroviaire.



**FIGURE II-38: LE RUISSELLEMENT EST ARRIVE EN UN POINT DE LA VOIE FERREE MAIS A PROVOQUE UN IMPACT ETENDU CAR LA CONFIGURATION DE L'INFRASTRUCTURE A MODIFIE LES ECOULEMENTS.**

#### 1.4.6. SYNTHESE

L'influence de chacun des choix de prétraitement sur les valeurs des indicateurs et sur les rendus visuels montre que certains choix sont critiques, tandis que d'autres semblent négligeables. Le choix de prise en compte des pixels isolés, ainsi que le choix de la distance tampon autour de la voie ferrée et des impacts ne semblent pas influencer les valeurs des indicateurs. Pour simplifier la méthode de comparaison pour la suite de l'évaluation, les pixels isolés seront conservés et une seule distance tampon sera utilisée autour de la voie ferrée et des impacts, elle sera de 25 m.

Concernant le choix du niveau IRIP minimum, tous les niveaux, entre 2 et 5, semblent apporter de l'information sur la sensibilité au ruissellement. Les niveaux 2 permettent de retrouver tous les impacts, mais aussi beaucoup d'autres zones non impactées, et les niveaux 5 sont très précis, ils ne montrent presque que les impacts. Ces niveaux seraient intéressants à croiser avec une notion de vulnérabilité de la voie ferrée afin de mieux discerner les niveaux à considérer selon les zones. Par ailleurs, le choix de la prise en compte d'une zone tampon autour des pixels IRIP ne semble pas pertinent. Lorsque l'on considère une zone tampon autour des pixels ceci augmente la probabilité de détection mais de manière artificielle. Les pixels IRIP sont déjà présents sur les zones impactées. Simplement, ils ne recouvrent pas toute la surface de la zone impactée. De plus, la zone tampon autour des pixels fait perdre en précision. Il semble davantage pertinent de ne pas prendre en compte de zone tampon autour des pixels IRIP, et de modifier la méthode de comptage des corrélations par surface de recoupement. En effet, la méthode actuelle ne considère que la corrélation spatiale d'un pixel IRIP avec une zone impactée, alors que la zone d'arrivée d'eau sur les voies ferrées (zone identifiée par les cartes IRIP) peut potentiellement ne pas être corrélée spatialement avec la zone d'impact. La configuration de l'infrastructure semble essentielle à prendre en compte pour bien étudier la correspondance entre les impacts et les cartes IRIP, mais ceci nécessite de collecter davantage de données.

Pour la suite de l'évaluation, les prétraitements se feront donc sur le modèle des tests numéros 1 et 9. Davantage de niveaux de susceptibilité seront considérés, et ils seront croisés avec une notion de vulnérabilité de l'infrastructure. La méthode de comptage des corrélations sera modifiée. Elle se fera par tronçon, selon les ouvrages en terre, et un pixel IRIP fort suffira pour considérer un tronçon comme sensible au ruissellement. Ces nouvelles propositions de tests de comparaison feront l'objet du prochain chapitre.

## 1.5. CONCLUSION

Ce chapitre montre la complexité de l'évaluation de la méthode IRIP et présente une première mise en œuvre de la méthode de comparaison entre les cartes IRIP et les données d'impacts sur les 80 km du tronçon d'étude de Rouen au Havre. Afin de disposer de données de comparaison, une base de données des impacts liés au ruissellement sur la voie ferrée a été construite grâce à un long travail de collecte et de traitement. Durant 6 mois, 520 documents en lien avec le ruissellement ont été référencés. Ceci a permis de créer une couche SIG, aussi exhaustive et précise que possible, des zones de la voie ferrée impactées par le ruissellement. Les cartes IRIP de production, de transfert et d'accumulation ont été produites sur les bassins versants interceptés par le tronçon d'étude, avec en données d'entrée le MNT de la BD ALTI® de l'IGN d'une résolution de 25 m, la base de données sol européenne d'une résolution de 500 m et la carte d'occupation du sol régionale d'une échelle de 1/5000. La méthode de comparaison est issue des méthodes classiques d'évaluation de modèles de prévision, via des tableaux de contingence et des indicateurs de performance. Six indicateurs ont été choisis pour quantifier la corrélation entre les niveaux forts des cartes IRIP et les données d'impacts : la probabilité de détection, le taux de fausses alarmes, la précision, le biais, le Chi-2 et le coefficient Phi. Dans notre cas, la difficulté était de comparer deux données de fond et de forme différentes : les cartes IRIP, images pixélisées, et les impacts, données linéaires. Les deux données doivent être mise en forme pour être comparées. L'objectif de ce chapitre était de tester différents prétraitements afin de bien appréhender leur influence sur les valeurs des six indicateurs et sur les représentations visuelles de corrélations, dans le but de consolider la méthode de comparaison pour la suite de l'évaluation.

Seize prétraitements différents ont été testés. Les prétraitements diffèrent dans les différents niveaux IRIP minimum à considérer, la taille de la zone tampon autour de la voie ferrée et des impacts, la prise en compte ou non d'une zone tampon autour des pixels IRIP et la prise en compte ou non des pixels isolés. Le principal résultat est que la mise en forme des données influence fortement le résultat des corrélations. Les choix de mise en forme doivent donc être rigoureusement justifiés et reposer sur des critères pertinents par rapport à la réalité. Les prétraitements retenus pour la suite de l'évaluation seront : une zone tampon de 25 m autour de la voie ferrée et des impacts, la prise en compte des pixels isolés et pas de zone tampon autour des pixels IRIP. D'autre part, la prise en compte de l'infrastructure semble indispensable pour aller plus loin dans la comparaison entre les cartes IRIP et les données d'impacts. Les niveaux IRIP minimum à considérés, seront choisis selon une notion de vulnérabilité de l'infrastructure, de façon à ce que plus une zone soit vulnérable, moins un niveau IRIP fort est requis pour considérer une zone à risque. Enfin, la méthode de comptage des corrélations via le calcul des surfaces de recoupement sera modifiée. Les corrélations seront comptées par ouvrages en terre. Un pixel IRIP fort dans l'emprise de l'ouvrage en terre pourra suffire à le considérer comme exposé au ruissellement.

Pour conclure, ce premier chapitre a permis de perfectionner la méthode de comparaison. Les six indicateurs de performance choisis semblent convenir pour décrire la corrélation entre les cartes IRIP et les zones d'impact dans son ensemble. Le couple POD/FAR montre la capacité des cartes à retrouver les zones d'impact. Le couple précision/biais illustre l'aspect visuel des représentations cartographiques. Quant au couple Chi-2/coefficient Phi, il permet de s'assurer de la significativité des résultats et apporte une information sur l'intensité du lien entre les données. L'objectif, ici, n'était pas d'identifier le test de comparaison qui donne le meilleur résultat. Il a été montré que le résultat d'une évaluation dépend pour une grande partie de la façon de mettre en forme les données et de choisir les indicateurs de performance. Si on cherche à prouver quelque chose, il est toujours possible d'y parvenir si on prend de multiples hypothèses. Il est nécessaire pour une évaluation objective de concevoir une méthode d'évaluation simple, avec des critères pertinents, c'est à dire des critères qui ont une signification

physique et dont on connaît les intervalles d'interprétation. Ce qui est important également est de montrer les différents résultats possibles. Si quels que soient les choix effectués durant l'évaluation les résultats restent assez stables alors il est possible de commencer à tirer des conclusions. A l'issue de ce premier chapitre, il n'est donc pas encore possible de donner une estimation quantitative de la capacité de la méthode IRIP à identifier les zones exposées au ruissellement. Mais, la méthode d'évaluation a été consolidée et peut être à présent complexifiée par la prise en compte de l'infrastructure ferroviaire.



## CHAPITRE 2 : PRISE EN COMPTE DE L'INFRASTRUCTURE FERROVIAIRE DANS LA METHODE D'EVALUATION

### 2.1. INTRODUCTION

Le précédent chapitre a permis de mettre en œuvre une méthode d'évaluation des cartes IRIP par comparaison aux données d'impacts sur la voie ferrée. La méthode est basée sur la réalisation de tableaux de contingence et sur le calcul de six indicateurs de performance. Cette première mise en œuvre a permis de justifier certains choix de mise en forme des données et a permis de proposer des améliorations pour la suite de l'évaluation. Notamment, il a été montré que pour donner une estimation de la performance de la méthode IRIP à retrouver les zones impactées, il est essentiel de prendre en compte l'infrastructure ferroviaire. La prise en compte de la l'infrastructure ferroviaire soulève trois problématiques. Il faut d'abord capitaliser les données sur l'infrastructure sur l'ensemble de la zone d'étude. La difficulté est que la configuration de l'infrastructure n'est pas connue en tout point du réseau ferré national. Il existe diverses sources de données relatives au patrimoine ferroviaire, mais ces sources sont très hétérogènes dans le fond et dans le forme. Après avoir capitalisé les données sur l'infrastructure, il faut déterminer s'il existe des types de configurations plus ou moins vulnérables au ruissellement. Comment caractériser la vulnérabilité de l'infrastructure ferroviaire ? Peut-on créer une échelle de vulnérabilité avec différents niveaux? Une fois la vulnérabilité déterminée, ce nouveau paramètre doit être intégré à la méthode de comparaison entre les cartes IRIP et les données d'impact. Comment analyser la corrélation entre les paramètres d'aléa, de risque, et de vulnérabilité ?

L'objectif de ce second chapitre est de proposer une méthode de caractérisation de la vulnérabilité et de prise en compte de ce nouveau paramètre dans la méthode de comparaison précédemment élaborée. Ainsi, en conclusion de ce chapitre, une estimation de la performance de la méthode IRIP à identifier les zones exposées à l'aléa ruissellement pourra être proposée.

Ce chapitre présente tout d'abord la recherche des données sur l'infrastructure, puis, une méthode de caractérisation de la vulnérabilité est proposée, ainsi qu'une méthode pour intégrer ce nouveau paramètre de vulnérabilité dans la comparaison entre les cartes IRIP et les données d'impacts. Ensuite, les résultats de l'évaluation seront présentés suivant la méthode d'évaluation précédemment élaborée. En discussion, l'ensemble des zones présentant des corrélations de type faux négatif sera analysé en détails, afin d'identifier les raisons des mauvaises corrélations et de mieux appréhender la pertinence des cartes IRIP par des comparaisons visuelles. Enfin, la conclusion ouvrira sur des propositions de modifications des cartes IRIP pour améliorer les corrélations.

## 2.2. MATERIELS ET METHODES

### 2.2.1. RECHERCHE ET CAPITALISATION DES DONNEES SUR L'INFRASTRUCTURE FERROVIAIRE

#### 2.2.1.1. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIF

Afin de caractériser la vulnérabilité de la voie ferrée, il est nécessaire de disposer des données sur l'infrastructure, sur l'ensemble des 80 km du tronçon d'étude. La difficulté se trouve dans le fait que l'information sur l'infrastructure n'est pas disponible en tout point du réseau. Les données sur l'infrastructure sont dispersées à travers diverses bases de données de différents formats, et les informations sur les éléments de l'infrastructure (ouvrages d'art, voie, etc.) sont souvent séparées selon les besoins métiers. Par exemple, il existe des bases de données spécifiques aux ouvrages d'art ou aux ouvrages en terre. Ces bases de données ne sont généralement pas exhaustives. Les éléments qui ne sont plus utilisés ou qui ne posent jamais problème peuvent ne pas être enregistrés. Par ailleurs, il n'existe pas actuellement de base de données pour les dispositifs hydrauliques. Certaines lignes ont fait l'objet d'un inventaire de leur réseau hydraulique, mais ce n'est pas le cas de la ligne Paris-Saint-Lazare – Le Havre. Il existe des plans de ligne répertoriant de nombreuses informations sur l'infrastructure, telles que les profils en long et en travers, la position des ouvrages d'arts, des passages à niveau, etc., mais certains plans sont anciens, ils n'intègrent pas tous les aménagements récents et ils sont souvent sous format papier. La difficulté est également de gérer la quantité d'information où les données peuvent se recouper ou être contradictoires. Par exemple, la position d'un élément peut varier, les limites d'un ouvrage en terre peuvent être différentes sur les plans de ligne et sur les cartes IGN, etc. Lorsque pour des études il est nécessaire de connaître la configuration de l'infrastructure, des repérages sur site sont généralement effectués. Ceci permet également de mieux appréhender l'environnement proche de la voie.

Dans le cadre de l'évaluation de la méthode IRIP, la nécessité est de connaître tous les éléments de l'infrastructure susceptibles d'interférer avec l'aléa ruissellement. Chaque élément doit être caractérisé par sa localisation en points kilométriques de début et de fin, et par sa dimension (longueur, hauteur, largeur). L'objectif est de réaliser des couches d'information géographique (couches SIG) de chaque catégorie d'information. On s'intéressera principalement aux éléments de l'infrastructure à macro-échelle. Considérant la résolution de l'étude (25 m), la précision des données d'impact (types et localisations pas toujours bien référencés) et l'accessibilité des données sur l'infrastructure, les petits éléments, ou les éléments trop précis, tels que la constitution de la plateforme, les matériaux des ouvrages en terre, ou encore la position des poteaux caténaux, ne seront pas pris en compte. Les éléments à rechercher pour caractériser la vulnérabilité de l'infrastructure face au ruissellement sont :

- Les profils transversaux :

Les différents types de profils en travers interceptent et redirigent les écoulements, qu'ils soient des remblais, des déblais, des profils mixtes ou rasant. La répartition des types de profils est donc indispensable à connaître sur l'ensemble de la zone d'étude. De manière plus spécifique, il est utile de connaître la position des zones de gare, car leurs profils transversaux sont marqués par une zone élargie de voies entre les ouvrages en terre. Il est souvent plus adapté de traiter les sites de grandes gares comme des zones particulières, d'autant que les écoulements peuvent y être canalisés dans des réseaux complexes.

- Les ouvrages hydrauliques de traversée :

Ce sont les ouvrages de types aqueducs, buses ou dalots, qui permettent le passage des écoulements sous la voie ferrée. Certains ouvrages de traversée n'ont pas de fonction hydraulique, ils sont conçus pour

permettre le passage de la voie ferrée au-dessus d'un obstacle, par exemple une route ou une autre voie ferrée. Par contre, certains ouvrages à fonction hydraulique laissent également passer des voiries. Il sera important de s'assurer de la fonction hydraulique ou non de l'ouvrage.

- Les singularités :

Les singularités sont les ponts-routes, les têtes de tunnels et les passages à niveau. Ce sont des éléments pouvant perturber les écoulements ou favoriser l'introduction de ruissellement dans l'emprise ferroviaire. Les ponts-routes, ponts créés pour permettre le passage d'une route au-dessus de la voie ferrée, sont généralement équipés de descentes d'eau de part et d'autre du pont pour canaliser les écoulements venant de l'environnement, ce sont des points connus comme sensibles car il peuvent être des points d'entrée des eaux dans le réseau hydraulique ferroviaire. De plus, en pied des ponts-routes, la capacité du drainage et de sa continuité à faire transiter les écoulements le long de la plateforme, peut être réduite géométriquement. Les têtes de tunnels et les passages à niveau, de la même manière, sont des points réputés sensibles, car ce sont des discontinuités dans les ouvrages en terre, pouvant favoriser l'introduction de ruissellement sur les voies.

- Les zones non exposées :

Ce sont les zones de grands viaducs et de tunnels longs pour lesquelles on peut considérer que le ruissellement ne peut pas impacter la voie ferrée.

- Les informations sur le réseau hydraulique :

Les informations sur le réseau hydraulique pertinentes à l'échelle macro pour l'étude de la vulnérabilité sont les bassins de rétention, ceux construits dans un objectif de protection de la voie ferrée au ruissellement. L'information sur le réseau de drainage classique ne sera pas capitalisée car bien que le drainage puisse contribuer à collecter les eaux de ruissellement, il est d'abord conçu pour drainer la plateforme ferroviaire des eaux zénithales. L'efficacité du drainage dépend également beaucoup de son entretien, et évolue donc avec le temps. De plus, la disponibilité et la précision de l'information sur le réseau de drainage n'est pas homogène sur toute la ligne.

#### 2.2.1.2. DOCUMENTS CLES

Les documents clés à rassembler et à étudier pour capitaliser les données sur l'infrastructure et réaliser les couches d'informations sont :

- Le plan de la ligne (Figure II-39) :

Le plan de la ligne est une représentation de la voie selon son axe longitudinal, composé d'un schéma sur sa partie supérieure et des données chiffrées en dessous, à propos de l'altitude, de la déclivité (pente de la voie), de la courbure de la ligne, etc. Le terrain naturel est tracé par rapport à la voie ferrée, on peut ainsi identifier les profils transversaux, lorsque le terrain naturel se situe en dessous de la voie c'est un remblai, et inversement pour un déblai. Le plan de la ligne informe également sur la localisation des ouvrages d'art.

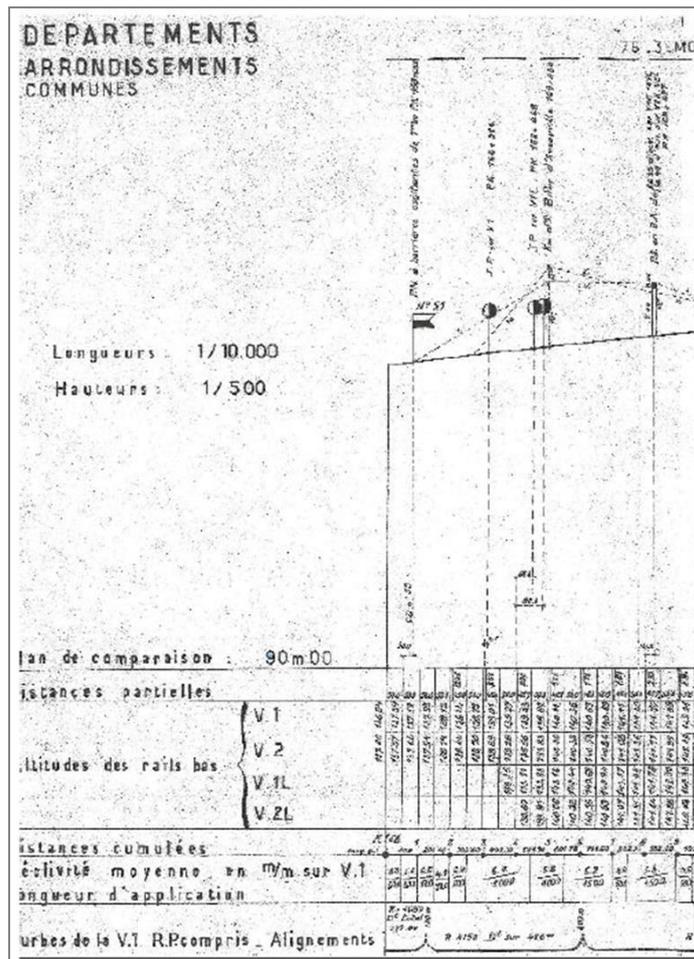


FIGURE II-39: EXTRAIT D'UN SCAN DE PLAN DE LIGNE, SCHEMA DE LA VOIE SELON SON AXE LONGITUDINAL

- Le Référentiel Géographique de l'Infrastructure (RGI) :

Le RGI est un ensemble de couches SIG sur les éléments de l'infrastructure. Sa réalisation s'appuie sur la base de données BD Carto de l'IGN et sur les données internes à l'entreprise. Le RGI fournit entre autres le réseau des lignes SNCF et les repères kilométriques, la position des installations fixes (passages à niveau, ouvrages d'art, etc.) et certains repères de nivellement, mais il n'est pas exhaustif sur certains éléments.

- La vidéo de la ligne :

Dans le cadre du projet SURVEILLE de détection du rail cassé, des vidéos ont été réalisées pour de nombreuses lignes depuis les cabines de conduite des trains. La ligne de Paris-Saint-Lazare au Havre dispose d'une vidéo de ce type (Figure II-40). Elle permet de visualiser les ouvrages en terre et leur hauteur approximative, mais elle n'est qu'une donnée d'appoint pour vérification car difficile à exploiter précisément.



FIGURE II-40: CAPTURE D'ECRAN DE LA VIDEO DE LA LIGNE DE PARIS-SAINT-LAZARE A LE HAVRE DEPUIS LA CABINE DE CONDUITE

- Des inventaires d'autres projets :

Dans le cadre d'un autre projet, un inventaire du réseau hydraulique a été réalisé sur une partie de la zone d'étude (55 km). Ont été référencés, les dispositifs de drainage, les petits ouvrages hydrauliques et les ouvrages d'art, sous forme de tableur. Cet inventaire date de l'année 2001.

- Géoportail<sup>10</sup> et Google Street View<sup>11</sup> :

Les cartes IGN, les images aériennes et les données de Google Street View© sont d'un grand intérêt pour compléter les différentes sources de données disponibles au sein de l'entreprise. Ces données permettent d'avoir une vision globale de l'infrastructure ferroviaire en tout point du réseau ferré. Elles peuvent permettre, par exemple, de trancher sur la géolocalisation d'un élément de l'infrastructure, lorsque différentes sources ne se recoupent pas. La Figure II-41 montre les informations disponibles sur Géoportail©, les talus ferroviaires sont visibles, on peut distinguer les types de profils en travers (déblai en bas à gauche de la figure et remblai en haut à droite), et d'autres éléments, tels que le passage sous voie (en haut à droite de l'image).



FIGURE II-41: CAPTURE D'ECRAN DU SITE DE GEOPORTAIL© OU L'ON PEUT DISTINGUER LE TYPE DE PROFIL EN TRAVERS ET D'AUTRES ELEMENTS DE L'INFRASTRUCTURE TELS QUE LES PASSAGES SOUS VOIE

<sup>10</sup> Géoportail est le portail national de la connaissance du territoire mis en œuvre par l'IGN. Site internet : <https://www.geoportail.gouv.fr/>

<sup>11</sup> Google Street View est le service de navigation virtuelle de Google. Site internet : <https://www.google.fr/intl/fr/streetview/>

## 2.2.1.3. CONSTRUCTION DES COUCHES SIG

Le travail de confrontation de ces différentes sources de données et de création des couches SIG a été réalisé dans le cadre d'une mission de stage (Corentin DESCOURS, IUT 2ème année). Le sujet du stage a porté plus largement sur la gestion des problématiques liées à l'eau en conception ferroviaire. Le Tableau II-22 présente les cinq couches d'informations réalisées, les profils transversaux, les ouvrages hydrauliques de traversée, les singularités, les bassins de rétention et les zones non exposées, ainsi que les sources de données utilisées pour chacune d'entre elles par ordre de priorité. L'ordre de priorité signifie que la première source de données a été utilisée comme base, puis les suivantes ont permis de compléter ou nuancer l'information.

**TABLEAU II-22 : SYNTHESE DES SOURCES D'INFORMATIONS EXPLOITEES PAR ORDRE DE PRIORITE POUR LA CREATION DE CHAQUE COUCHE D'INFORMATION**

Couches d'informations	Sources d'informations par ordre de priorité
Profils transversaux	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Base de données des ouvrages en terre</li> <li>2. Plan de la ligne</li> <li>3. Géoportail + Google Street View</li> <li>4. Vidéo de la ligne</li> </ol>
Ouvrages hydrauliques de traversée	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Plan de ligne</li> <li>2. Inventaire interne</li> <li>3. Documents d'archives</li> <li>4. Géoportail + Google Street View</li> </ol>
Singularités	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. RGI</li> <li>2. Géoportail + Google Street View</li> <li>3. Vidéo de la ligne</li> </ol>
Bassins de rétention	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Inventaire interne</li> <li>2. Documents d'archives</li> </ol>
Zones non exposées	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. RGI</li> <li>2. Géoportail + Google Street View</li> </ol>

Pour déterminer les profils en travers le long du tronçon d'étude, la base de données des ouvrages en terre n'est pas exhaustive et peu précise, mais c'est une bonne base. En revanche, le plan de ligne est presque trop précis puisqu'il donne les ouvrages en terre avec leurs dimensions au mètre près (en longueur et en hauteur), côté voie 1 et côté voie 2. Les cartes IGN et la vidéo de la ligne aident à faire la synthèse de ces informations. La construction de la couche ouvrages hydrauliques de traversée est basée sur le recoupement des informations du plan de ligne, de l'inventaire (disponible sur une partie de la ligne) et des documents d'archives. Durant le travail de recherche en archives, ont été collectés des documents datant du début des années 1950, faisant un diagnostic de l'ensemble des petits ouvrages sous voie. Ces documents ont permis de connaître la position de nombreux ouvrages, souvent des petits aqueducs en maçonnerie ayant pour fonction d'évacuer les eaux pluviales en aval, construits à l'époque de la construction de la ligne. Plusieurs de ces ouvrages sont aujourd'hui invisibles (détruits ou disparu sous les sédiments), mais leurs positions restent des témoins précieux de la présence de ruissellement en certains points. Les ouvrages hydrauliques de traversée de toutes les époques sont inclus dans cette couche d'information. Il est parfois difficile d'affirmer qu'un ouvrage de traversée n'a pas de fonction hydraulique. En cas de doute, les ouvrages assez longs, d'une longueur environ supérieure à 50 mètres

linéaires le long de la voie, sont considérés comme des zones où la voie ferrée n'est pas exposée au ruissellement. La couche d'information des zones non exposées contient donc quatre grands ouvrages de traversée et trois tunnels, à savoir, Les viaducs de Mirville, de Barentin, de Gournay et de Malaunay et les tunnels de Mont-Riboudet, de grand et de petit Pissy-Pôville. La construction de la couche d'information des singularités est basée essentiellement sur le RGI et sur les cartes IGN. Pour les passages à niveau, ceux qui sont fermés à la circulation ont été gardés dans la couche d'information. Ce qui importe, en effet, est la discontinuité topographique qu'apporte un passage à niveau dans une zone, qui peut potentiellement être un point d'entrée du ruissellement dans l'emprise ferroviaire. Pour finir, les informations sur les bassins de rétention sont basées sur l'inventaire interne et sur des documents d'archives.

#### 2.2.1.4. RESULTAT

Le Tableau II-23 présente la configuration globale de la ligne. Le tronçon d'étude, sur ces 80 km, est composé de 189 ouvrages en terre, de 44 ouvrages hydrauliques de traversée principalement localisés au niveau des remblais, de 55 singularités et de 14 bassins de rétention. La Figure II-42 illustre les différentes couches d'informations créées sur un petit tronçon.

TABLEAU II-23: SYNTHESE DES DONNEES SUR L'INFRASTRUCTURE SUR LE TRONÇON D'ETUDE

Type de profil	Nombre d'ouvrages en terre	Longueur cumulée (km)	Nombre d'ouvrages hydrauliques de traversée	Nombre de singularités	Nombre de bassins de rétention
Déblai	67	34,5	0	35	8
Mixte	24	7,6	2	5	2
Rasant	30	9,5	0	7	1
Remblai	61	24,5	42	8	3
Non exposé	7	4,1	0	0	0
Total	189	80,1	44	55	14

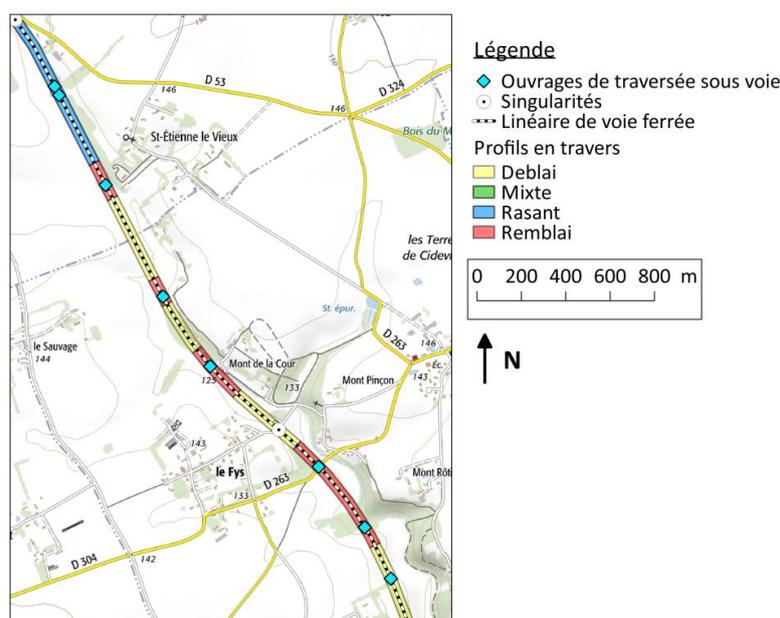


FIGURE II-42 : ILLUSTRATION SUR UNE ZONE REDUITE DES COUCHES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUES CREEES (FOND DE CARTE IGN AU 25000<sup>EME</sup>)

De manière générale, les données collectées sur l'infrastructure sont une synthèse des configurations de plusieurs époques. Lorsque l'information était disponible, certains éléments anciens, tels que certains ouvrages sous voie et certains passages à niveau, ont été ajoutés à la configuration actuelle décrite par Géoportail© et Google Street View© par exemple. Néanmoins, les données d'impacts sont réparties sur près d'un siècle. Pour la suite de l'analyse, l'hypothèse sera faite que la configuration de l'infrastructure a peu évolué durant l'histoire de la ligne. L'information sur l'infrastructure à présent disponible va permettre de caractériser la vulnérabilité sur l'ensemble du tronçon d'étude. Puis, l'information sur la vulnérabilité sera intégrée à la méthode de comparaison entre les cartes IRIP et les données d'impacts.

### 2.2.2. CARACTERISATION DE LA VULNERABILITE DE LA VOIE FERREE

D'après la définition donnée en partie 1, section 1.7.2, la vulnérabilité est l'incapacité d'un enjeu à résister à un impact. L'enjeu, ici, est l'infrastructure ferroviaire. L'impact est un impact lié au ruissellement. L'incapacité à résister peut se formuler également par la capacité à subir des dommages. Y a-t-il des configurations de l'infrastructure ferroviaire qui seraient plus susceptibles que d'autres de subir des dommages, ou qui seraient susceptibles de subir des dommages plus importants ? Est-il possible de quantifier la vulnérabilité de l'infrastructure face à l'aléa ruissellement ?

Il existe, pour certaines de ces questions, des réponses issues de l'expertise des agents du ferroviaire et de leurs habitudes à traiter des problématiques liées à l'eau sur l'infrastructure. Par exemple, il est connu que la voie ferrée est plus vulnérable lorsqu'elle est établie en déblai, par rapport aux autres profils, en particulier lorsqu'il s'agit d'un déblai long. Ceci est intuitif puisque la voie est moins susceptible de recevoir du ruissellement lorsqu'elle est surélevée sur un remblai. De plus, le remblai peut permettre un stockage temporaire de l'eau ruisselée derrière son côté amont. Pour les déblais, la longueur augmente aussi les volumes d'eau à gérer et rend plus complexe la continuité du réseau hydraulique. Néanmoins, on observe également régulièrement des désordres sur des remblais, même lorsqu'ils sont équipés d'ouvrages hydrauliques de traversée sous voie. Par ailleurs, il est connu également que les têtes de tunnels, les ponts au-dessus de la voie et les passages à niveaux (regroupés sous le terme « singularité ») sont des points sensibles pour la gestion de l'eau sur la plateforme. En effet, ces éléments créent des discontinuités dans les ouvrages en terre qui peuvent être complexes à gérer avec des dispositifs hydrauliques. Les habitudes montrent que certaines configurations ou certains éléments de l'infrastructure sont plus souvent que d'autres sujets à des désordres liés au ruissellement. Néanmoins, ces habitudes sont issues d'expertises et d'intuitions, il s'agit d'informations grises, aucune référence n'existe sur le sujet. De plus, ces connaissances sont incomplètes et subjectives, il reste des interrogations sur certaines configurations. Pour les besoins de la thèse, il est nécessaire de quantifier la vulnérabilité de façon plus précise.

Il est proposé de s'appuyer sur les données collectées sur le tronçon d'étude pour compléter les connaissances sur la vulnérabilité de la voie ferrée. Une analyse des données d'impacts, croisées avec les données sur l'infrastructure, pourrait permettre de vérifier les intuitions et de les compléter. Ainsi, cette section présente l'analyse des données collectées, autour de quatre particularités de l'infrastructure, pressenties comme influençant la vulnérabilité de la voie ferrée au ruissellement : le type de profil, sa longueur, la présence ou non d'une singularité et la présence ou non d'un ouvrage hydraulique de traversée. A l'issue de cette analyse, une méthode de quantification de la vulnérabilité de la voie ferrée sera proposée, sous forme d'arbre de décision, selon différents critères de configuration ou de présence d'éléments particuliers.

### 2.2.2.1. ANALYSE DU LIEN ENTRE LES DONNEES SUR LES IMPACTS ET LES DONNEES SUR L'INFRASTRUCTURE

Dans cette section, quatre caractéristiques de l'infrastructure sont testées : le profil de l'ouvrage en terre, sa longueur, la présence d'une singularité dans son enveloppe, et la présence d'un ouvrage hydraulique de traversée. Pour confronter les données d'infrastructure aux données d'impacts, le nombre d'impacts est comptabilisé pour chaque type de configuration. Ensuite, le ratio est calculé entre le nombre d'impacts et la longueur cumulée de chaque type de configuration, afin de ne pas biaiser les résultats pour des configurations très fréquentes ou, à l'inverse, rares, à l'échelle du tronçon. Pour juger si une configuration semble plus susceptible s'être impactée qu'une autre, ce ratio est comparé au ratio global du nombre d'impact au kilomètre, sur l'ensemble du tronçon. Concernant le décompte du nombre d'impacts, une zone impactée qui s'étend sur plusieurs ouvrages en terre différents compte pour un impact pour chaque ouvrage. Ainsi, les 62 zones impactées issues de la base de données d'impacts, deviennent 81 impacts. L'analyse est effectuée sur l'ensemble du tronçon d'étude, excepté les zones non exposées. Le tronçon d'étude est donc d'une longueur d'environ 76 km (80 km moins les 4 km de zones non exposées), et le ratio global est de 1,07 impact par kilomètre (81 impacts divisés par 76 km de ligne).

#### PROFIL DE L'OUVRAGE EN TERRE

Le Tableau II-24 présente le nombre d'impacts subis par type de profil, ainsi que le ratio selon la longueur cumulée de chaque type de profil. Les ratios sont comparés au ratio global de 1,07. Les ouvrages en déblai semblent les plus propices aux désordres liés au ruissellement (ratio de 1,22), suivi par les remblais (1,10). La proportion d'impacts sur les profils mixtes est semblable à la moyenne (1,06). Seuls les profils rasants semblent moins impactés en moyenne par le ruissellement, avec un ratio de 0,42. Ceci peut être expliqué par le fait que les zones où aucun travail de terrassement n'a été réalisé pour construire la voie ferrée, sont des zones plutôt planes, et assez peu exposées à l'aléa ruissellement.

**TABLEAU II-24: NOMBRE D'IMPACTS PAR TYPE DE PROFIL ET RATIO SELON LA LONGUEUR CUMULEE DE CHAQUE PROFIL**

Type de profil	Nombre d'impacts	Longueur cumulée (km)	Ratio nombre d'impacts et longueur cumulée
Déblai	42	34,5	1,22
Mixte	8	7,6	1,06
Rasant	4	9,5	0,42
Remblai	27	24,5	1,10

#### LONGUEUR DE L'OUVRAGE EN TERRE

Pour évaluer l'influence de la longueur d'un ouvrage en terre sur sa susceptibilité à être impacté par le ruissellement, chaque type d'ouvrage est classé en deux catégories, court ou long. La limite entre court et long dépend du type d'ouvrage en terre. La notion de remblai court désigne souvent un remblai créé pour franchir une ravine ou une dépression par exemple. Ces remblais courts sont généralement équipés de petits ouvrages hydrauliques de traversée et sont des zones connues comme sensibles aux aléas hydrologiques. La notion de déblai long désigne également des zones connues comme propices aux désordres. Les déblais longs doivent gérer des quantités d'eau provenant de l'environnement plus importantes. De plus, il est plus probable au sein d'un déblai long d'avoir un dysfonctionnement dans le réseau de drainage (problème d'entretien, malfaçon, etc.). La limite entre un ouvrage court ou un ouvrage long est définie comme la longueur médiane des ouvrages en terre par type de profil. Le Tableau II-25 décrit les longueurs caractéristiques des différents types de profils. La limite pour les déblais sera

donc de 420 m, elle sera de 265 m pour les profils mixtes, de 315 m pour les rasants et de 370 m pour les remblais.

**TABLEAU II-25: LONGUEURS CARACTERISTIQUES SELON LE TYPE DE PROFIL**

Type de profil	Longueur minimale (m)	Longueur médiane (m)	Longueur maximum (m)
Déblai	125	420	1400
Mixte	53	265	770
Rasant	80	315	930
Remblai	50	370	1335

Le Tableau II-26 présente le nombre d'impacts ainsi que le ratio par rapport à la longueur cumulée des ouvrages, selon la catégorie de taille de l'ouvrage. Les ratios obtenus sont comparés au ratio global de nombre d'impacts sur l'ensemble du tronçon d'étude, qui est de 1,07. Ainsi, comme attendu, les déblais longs et les remblais courts semblent plus propices aux désordres liés au ruissellement. On note également que les profils mixtes longs sont davantage impactés. En revanche, la longueur des profils rasants ne semblent pas influencer leurs propensions aux désordres.

**TABLEAU II-26: NOMBRE D'IMPACTS SELON LA LONGUEUR DE L'OUVRAGE EN TERRE ET RATIO SELON LA LONGUEUR CUMULEE DU PROFIL**

Longueur de l'ouvrage en terre		Nombre d'impacts	Longueur cumulée (km)	Ratio nombre d'impacts et longueur cumulée
Déblai	Court	9	9,6	0,94
	Long	33	24,9	1,33
Mixte	Court	2	2,2	0,26
	Long	6	5,4	1,11
Rasant	Court	1	2,4	0,42
	Long	3	7,1	0,42
Remblai	Court	16	6	2,67
	Long	11	18,5	0,59

#### PRESENCE D'UNE SINGULARITE DANS L'OUVRAGE EN TERRE

Le Tableau II-27 présente le nombre d'impacts ainsi que le ratio par rapport à la longueur cumulée selon la présence ou non d'une singularité dans l'ouvrage en terre (Pont-route, tête de tunnel et/ou passage à niveau). Les ratios sont comparés au ratio global de 1,07. Les déblais et les profils mixtes ayant une singularité semblent davantage propices aux désordres. Concernant les profils rasants et les remblais, la présence d'une singularité ne semble pas influencer la survenue de désordres. Ce résultat semble cohérent puisque la présence d'un passage à niveau a moins d'influence sur la topographie globale d'un profil rasant ou d'un remblai. De plus, la présence d'un pont-route ou d'une tête de tunnel est beaucoup moins fréquente pour ces types de profil.

**TABLEAU II-27: NOMBRE D'IMPACTS SELON LA PRESENCE D'UNE SINGULARITE ET RATIO SELON LA LONGUEUR CUMULEE**

Présence d'une singularité		Nombre d'impacts	Longueur cumulée (km)	Ratio nombre d'impacts et longueur cumulée
Déblai	Oui	31	23,6	1,31
	Non	11	10,9	1,01
Mixte	Oui	4	1,5	2,61
	Non	4	6,0	0,66
Rasant	Oui	1	2,8	0,35
	Non	3	6,7	0,45
Remblai	Oui	3	3,2	0,93
	Non	24	21,2	1,13

PRESENCE D'UN OUVRAGE HYDRAULIQUE DE TRAVERSEE

Concernant les ouvrages hydrauliques de traversée, il n'est pas pertinent d'effectuer la même comparaison car les remblais constituent l'essentiel des configurations avec un ouvrage hydraulique de traversée (42 pour les remblais et 2 pour les profils mixte). Néanmoins, le Tableau II-28 présente le nombre d'impacts par profil, selon la présence ou non d'un ouvrage hydraulique de traversée, ainsi que le ratio par rapport à la longueur cumulée. Il n'y a *a priori* pas eu d'impact aux niveaux des deux ouvrages de traversée situés sur des profils mixtes. Concernant les profils en remblai, ils semblent moins impactés lorsqu'ils sont équipés d'ouvrages hydrauliques de traversée, 1,03 impact en moyenne par kilomètre, contre 1,33 sans ouvrage hydraulique de traversée. Néanmoins, le ratio reste élevé pour les deux. En effet, il peut être complexe de vouloir considérer les ouvrages hydrauliques de traversée comme un paramètre de la vulnérabilité de la voie ferrée. Ils ont été placés justement pour gérer un aléa. Ces ouvrages en effet peuvent permettre que la voie ferrée soit moins impactée par le ruissellement, mais, ce sont également des zones sensibles. Pour la plupart des impacts au niveau des remblais équipés d'un ouvrage hydraulique de traversée, le désordre est situé au niveau de l'ouvrage lui-même. Ceci peut être dû, par exemple, au fait que ce type d'ouvrage peut être comblé par les sédiments charriés par les eaux pluviales. Finalement, l'ouvrage hydraulique de traversée fait-il augmenter ou baisser la vulnérabilité de la voie ferrée ? Ces ouvrages ne sont finalement pas vraiment des propriétés intrinsèques à la voie ferrée. Ils ont été mis en place spécifiquement sur les zones exposées, pour protéger la voie ferrée d'un aléa. Ils ont été conçus pour modifier l'aléa dans l'environnement proche de la voie et la rendre moins exposée. La mise en place d'un ouvrage hydraulique de traversée pourrait être davantage considérée comme une action de mitigation, influençant l'exposition de l'enjeu et non sa vulnérabilité.

**TABLEAU II-28 : NOMBRE D'IMPACTS SELON LA PRESENCE D'UN OUVRAGE HYDRAULIQUE DE TRAVERSEE ET RATIO SELON LA LONGUEUR CUMULEE**

Présence d'un ouvrage hydraulique de traversée		Nombre d'impacts	Longueur cumulée (km)	Ratio nombre d'impacts et longueur cumulée
Mixte	Avec	0	1,0	0,00
	Sans	8	6,5	1,22
Remblai	Avec	19	18,5	1,03
	Sans	8	6,0	1,33

## SYNTHÈSE

L'analyse du lien entre les données d'impact et les données sur l'infrastructure a permis de confirmer certaines hypothèses issues de l'expertise et de les compléter. Le type de profil semble, en effet, influencer la survenue d'un désordre, les profils en déblai et en remblai étant les plus propices aux désordres et les profils rasants étant les moins propices. La longueur de l'ouvrage en terre semble également être un facteur de vulnérabilité avec davantage d'impacts aux niveaux des déblais et profils mixtes longs et aux niveaux des remblais courts. De plus, la présence d'une singularité au sein de l'ouvrage en terre (pont, tête de tunnel ou passage à niveau) semble, effectivement, être un facteur de désordre, mais pas pour les profils rasants et les profils en remblai. En revanche les ouvrages hydrauliques de traversée ne devraient pas être considérés comme des facteurs de vulnérabilité mais plutôt comme des actions de mitigation, mises en œuvre pour protéger la voie ferrée des aléas hydrologiques.

### 2.2.2.2. CREATION D'UN ARBRE DE VULNERABILITE

Les connaissances issues de l'expertise et l'analyse croisée des données d'impact et des données sur l'infrastructure permettent de proposer des facteurs de vulnérabilité de l'infrastructure. Ces facteurs peuvent être représentés selon un arbre de décision, comme illustré dans la Figure II-43. L'arbre de décision est un outil d'aide à la décision qui permet de représenter toutes les combinaisons possibles de multiples variables. Utiliser l'arbre de décision pour représenter la vulnérabilité permet de visualiser toutes les configurations possibles que peut prendre l'infrastructure. Les trois facteurs type de profil, longueur du profil et présence ou non d'une singularité, sont considérés dans cet arbre. De plus, un facteur d'exposition est ajouté, permettant ainsi de jamais mettre une vulnérabilité de zéro sur une zone exposée, quelle que soit sa configuration. Une vulnérabilité de zéro signifierait que la zone n'est pas du tout vulnérable, qu'elle ne peut pas subir d'impact. Or le risque zéro n'existe pas. Concernant les niveaux de vulnérabilité, un point est ajouté pour chaque caractéristique qui semble contribuer à augmenter la vulnérabilité de la voie ferrée. Ainsi, une notation de la vulnérabilité sur cinq niveaux est obtenue, allant de 0 à 4. Avec cette notation, seules les zones non exposées (longs ponts et tunnels) ne sont *a priori* pas vulnérables et toutes les zones exposées ont une note de vulnérabilité de 1 à 4. Parmi les zones exposées, la configuration la plus vulnérable serait un déblai long avec une singularité, tandis que les configurations les moins vulnérables seraient les profils rasant indépendamment de leur longueur ou de la présence de singularités, ainsi que les profils mixtes, courts et sans singularité.

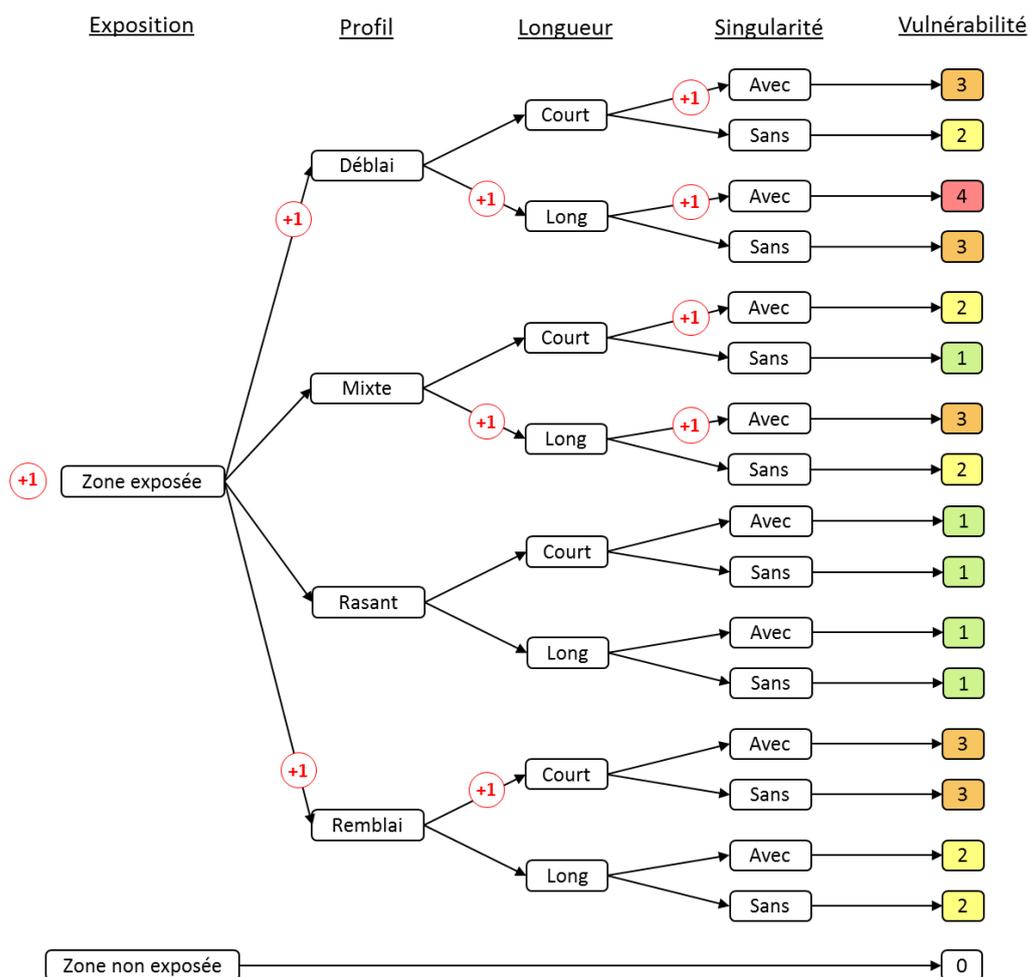


FIGURE II-43: ARBRE DE VULNERABILITE AVEC QUATRE FACTEURS, L'EXPOSITION, LE PROFIL DE L'OUVRAGE, SA LONGUEUR ET LA PRESENCE OU NON D'UNE SINGULARITE

La Figure II-44 montre la répartition des 189 ouvrages en terre selon les différents niveaux de vulnérabilité. Les niveaux de vulnérabilité sont répartis de manière équilibrée sur le tronçon d'étude. Bien que le niveau 4 de vulnérabilité ne soit atteint que pour un seul type de configuration, il apparaît 25 fois sur le tronçon d'étude.

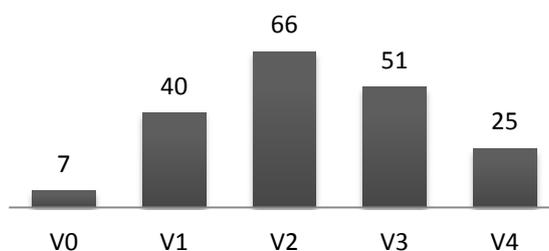


FIGURE II-44 : NOMBRE D'OUVRAGES EN TERRE PAR NIVEAU DE VULNERABILITE

L'arbre de vulnérabilité a été créé en partie par expertise, concernant le choix des facteurs de vulnérabilité à étudier, et en partie, par l'analyse du lien entre les données d'impacts et d'infrastructure. Cet arbre de vulnérabilité est une première caractérisation de la vulnérabilité de la voie ferrée au

ruissellement, il peut être discuté, et surtout, il peut être complété par l'expertise des agents ou davantage de données. Cette proposition de notation de la vulnérabilité peut être considérée comme s'appliquant seulement sur la zone d'étude, elle ne considère peut-être pas certaines configurations non présentes sur le tronçon Rouen – Le Havre, mais les résultats issus de cette analyse ne s'opposent pas aux hypothèses issues de l'expertise des agents ferroviaires. Dans la suite de cette section, il s'agira d'intégrer le paramètre de vulnérabilité à la méthode de comparaison, élaborée au chapitre 1, entre les cartes IRIP et les données d'impacts.

### 2.2.3. PRISE EN COMPTE DE LA VULNERABILITE DANS LA METHODE DE COMPARAISON DES CARTES IRIP ET DES DONNEES D'IMPACTS

#### 2.2.3.1. RAPPEL SUR LA METHODE DE COMPARAISON

La méthode de comparaison élaborée au chapitre 1, permet de comparer les cartes IRIP avec les données d'impacts en comptabilisant les surfaces de recoupement entre les pixels forts et les impacts sous forme de tableaux de contingence. Les vrais positifs (V+) sont les zones identifiées par IRIP et impactées par le ruissellement. Les faux positifs (F+) sont les zones identifiées par IRIP mais non impactées. Les faux négatifs (F-) sont les zones impactées mais non identifiées par IRIP comme sensibles au ruissellement. Enfin, les vrais négatifs (V-) sont les zones ni identifiées par IRIP, ni effectivement impactées par le ruissellement. Pour considérer une zone comme identifiée par IRIP comme sensible au ruissellement, il faut choisir le niveau IRIP seuil à considérer, par exemple à partir du niveau 4/5 ou à partir du niveau 3/5. Plusieurs tests ont été effectués avec différents seuils (2, 3, 4 et 5) montrant des capacités très différentes de retrouver les zones effectivement impactées. Pour analyse de façon quantitative la corrélation entre les cartes IRIP et les données d'impacts, six indicateurs sont calculés sur la base du tableau de contingence. La probabilité de détection et le taux de fausses alarmes montrent la capacité de la méthode IRIP à retrouver les zones impactées. La précision et le biais illustrent davantage la qualité de la représentation cartographique. Enfin, le test du Chi-2 et le coefficient Phi quantifient la dépendance statistique et l'intensité de cette dépendance.

#### 2.2.3.2. MATRICE DE COMBINAISON DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE

L'équation théorique du risque est que le risque est obtenu par croisement de l'exposition à l'aléa et de la vulnérabilité des enjeux. Pour notre cas d'étude, les risques sont représentés par les impacts effectifs issus de la base de données d'impacts, l'aléa est fourni par la méthode IRIP, c'est l'union de la carte de transfert et de la carte d'accumulation, et la vulnérabilité est représentée par l'arbre de vulnérabilité précédemment établi. Le nouveau paramètre vulnérabilité sera donc intégré à la méthode de comparaison en comparant, non pas le risque à l'aléa, comme effectué dans le premier chapitre, mais en comparant le risque à une combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité. Pour combiner l'aléa et la vulnérabilité, il est proposé de construire des matrices aléa-vulnérabilité où les niveaux de susceptibilité des pixels IRIP de 0 à 5 sont croisés avec les notes de vulnérabilité, de 0 à 4. La combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité nécessaire pour considérer une zone comme à risque se fait selon le principe suivant : plus une zone est vulnérable, plus un niveau d'aléa faible peut suffire pour engendrer un désordre ; et inversement, moins une zone est vulnérable, plus un niveau d'aléa fort est nécessaire pour engendrer un désordre. Ainsi, deux matrices aléa/vulnérabilité sont proposées (Figure II-45), présentant deux combinaisons différentes de niveaux d'aléa et de vulnérabilité pour considérer une zone comme à risque. Selon les deux matrices, aucune zone non exposée (V=0) ne peut être considérée comme à risque. Les zones non exposées (grands ponts et longs tunnels) ne seront pas prises en compte dans l'analyse pour ne pas donner des vrais négatifs artificiellement. Ensuite, pour la matrice A, une zone est considéré

comme à risque pour des niveaux IRIP supérieurs ou égaux à 4 et des niveaux de vulnérabilité inférieurs ou égaux à 2, et pour des niveaux IRIP supérieurs ou égaux à 3 et des niveaux de vulnérabilité supérieurs ou égaux à 2. Pour la matrice B, la combinaison des niveaux aléa et vulnérabilité suit davantage un schéma diagonal, avec au niveau IRIP 5 nécessaire pour considérer comme à risque une zone de vulnérabilité 1 et un niveau IRIP 2 nécessaire pour les zones de vulnérabilité 4. Ces deux méthodes, A et B, de combinaison seront testées.

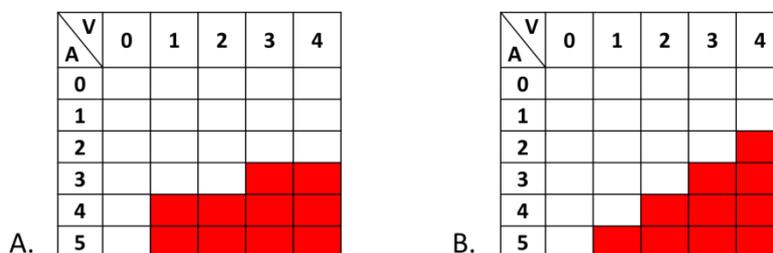


FIGURE II-45: MATRICES DES METHODES A ET B DE COMBINAISON ALEA-VULNERABILITE AVEC DES CONDITIONS DIFFERENTES POUR CONSIDERER UNE ZONE COMME A RISQUE (CASES ROUGES)

### 2.2.3.3. METHODE DE COMPTAGE DES CORRELATIONS

Une fois que la méthode de combinaison des paramètres aléa et vulnérabilité a été définie, la méthode de comptage des corrélations (V+, V-, F+, F-) doit être fixée également. Suite aux résultats du premier chapitre, il a été décidé de procéder par tronçons, le tronçon d'étude étant l'ouvrage en terre. Ensuite, il suffit d'un seul pixel IRIP de niveau correspondant à la note de vulnérabilité de l'ouvrage en terre pour considérer l'ouvrage en terre comme sensible au ruissellement. Si l'ouvrage a effectivement subi un impact, la corrélation sera de type vrai positif. Si l'ouvrage n'a *a priori* pas subi d'impact, la corrélation sera de type faux positif, etc.

La Figure II-46 est une adaptation du schéma utilisé en première partie pour définir la terminologie. Il est ici repris pour illustrer l'assimilation des différents éléments de la comparaison aux différents termes de l'équation du risque. Ce schéma permet également de préciser la méthode de comptage des corrélations. L'aléa est représenté par la combinaison des cartes IRIP de transfert et d'accumulation (le maximum de transfert ou d'accumulation). L'enjeu est l'emprise ferroviaire, ici représentée par le linéaire ferroviaire plus une distance tampon de 25 m de part et d'autre du linéaire. Le terme risque est représenté par les données d'impacts qui sont des risques effectifs. L'exposition est la concomitance spatiale de l'enjeu et de l'aléa. Dans notre cas, les zones exposées sont donc les zones de l'emprise ferroviaire (à l'intérieur de la bande de 50 m de large) où il y a un aléa ruissellement d'après les cartes IRIP (combinaison de transfert et d'accumulation). Pour les tronçons de voie sur un pont ou dans un tunnel, si les cartes IRIP indiquent un aléa, il est considéré que l'aléa passe sous le pont ou en surface par rapport au tunnel. Il n'y a donc pas de concomitance spatiale entre l'enjeu et l'aléa. Pour chaque ouvrage en terre au sein de cette zone, si la combinaison des niveaux IRIP et de la note de vulnérabilité correspond à un risque potentiel et qu'il y a eu effectivement un impact au sein de l'ouvrage en terre, l'ouvrage en terre est considéré comme une corrélation de type vrai positif. Une fois que toutes les corrélations ont été calculées (le nombre de corrélation correspond au nombre d'ouvrages en terre), des informations supplémentaires peuvent permettre d'affiner les résultats.

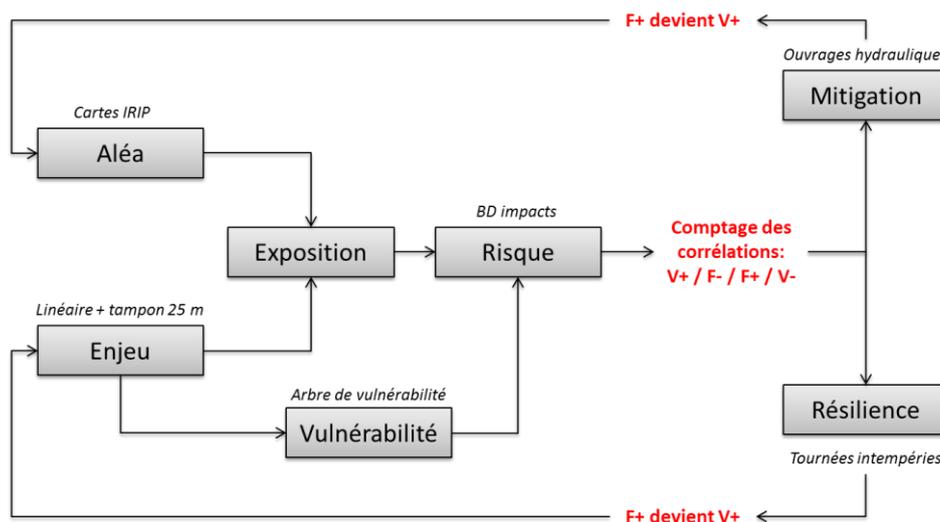


FIGURE II-46: SCHEMA DE LA VISION SYSTEMIQUE DU RISQUE COMPLETE AVEC LES ELEMENTS DE LA COMPARAISON ASSIMILES A DIFFERENTS TERMES DE L'EQUATION DU RISQUE

Les zones avec des ouvrages hydrauliques de protection sont souvent à la fois des zones protégées et à la fois des zones impactées. Si aucun impact n'a été reporté au niveau d'une zone avec un ouvrage hydraulique, cela ne signifie pas forcément que la zone n'est pas exposée à l'aléa ruissellement. Il peut y avoir un aléa mais la zone peut être suffisamment protégée. D'un autre côté, la mise en place d'ouvrages hydrauliques de protection est considérée comme une action de mitigation, puisque jouant sur l'aléa ruissellement. La présence d'un ouvrage hydraulique est en réalité une indication sur la présence d'un aléa ruissellement. Ainsi, un tronçon sensible au ruissellement d'après IRIP mais où aucun impact n'a été reporté, peut être considéré comme un vrai positif, si le tronçon est équipé d'un ouvrage hydraulique de protection. Sont considérés comme ouvrages hydraulique de protection, les ouvrages hydrauliques de traversée et les bassins de rétention.

De la même façon, la détermination de zones de tournées intempéries peut être considérée comme une action de résilience. En effet, si un impact se produit sur une zone de tournée intempérie, il peut être détecté plus rapidement, voire anticipé. Les opérations d'urgence pourront également être optimisées et le retour des circulations se fera dans les plus brefs délais. Ainsi, une ouvrage en terre identifié comme sensible d'après la combinaison des cartes IRIP et de la vulnérabilité mais où aucun impact ne s'est *a priori* produit, aura une corrélation de type faux positif. Si cette zone s'avère être classée comme zone de tournée intempérie, ceci est en réalité une indication que l'ouvrage est réputé sensible à l'aléa ruissellement, et la corrélation pourra alors être considérée comme un vrai positif.

#### 2.2.3.4. SYNTHÈSE

Dans ce chapitre, l'aléa est croisé avec la vulnérabilité, puis la combinaison des deux paramètres est comparée aux données d'impacts, afin de voir si les zones vulnérables et exposées sont bien spatialement corrélées avec les zones impactées. Pour combiner l'aléa et la vulnérabilité, deux méthodes sont proposées : la méthode A qui permet de varier entre les niveaux IRIP 3 et 4, et la méthode B qui permet un gradient plus important des niveaux IRIP, de 2 à 5 selon les niveaux de vulnérabilité de 1 à 4. Ensuite, pour analyser la corrélation entre les paramètres d'aléa et de vulnérabilité et les données d'impacts, il est proposé de procéder en plusieurs étapes. D'abord, les différents types de corrélation sont comptabilisés pour tous les tronçons, ensuite, les tronçons équipés de mesures de mitigation, initialement faux positifs,

évoluent en vrais positifs. Enfin, les tronçons indiqués dans les consignes intempéries, initialement faux positifs, évoluent en vrais positifs.

Concernant l'évaluation de la méthode IRIP, les différents jeux de données sont comparés en utilisant les prétraitements conseillés à l'issue du chapitre précédent, à savoir : une zone tampon de 25 m de part et d'autre de la voie ferrée, la prise en compte des pixels isolés et pas de zone tampon autour des pixels IRIP forts. Le niveau IRIP minimum à considérer est régi par la combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité, et la méthode de comptage des corrélations se fait pour chaque ouvrage en terre (tronçons), où un pixel IRIP fort suffit à considérer l'ouvrage en terre comme sensible. Dans ce chapitre, sept tests de comparaison sont effectués. Tout d'abord, pour chacune de ces deux méthodes de combinaison A et B, trois tests de comparaison sont effectués : en prenant en compte seulement la vulnérabilité, en prenant en compte la vulnérabilité et les ouvrages hydrauliques, puis en prenant en compte la vulnérabilité, les ouvrages hydrauliques, et les zones de tournées intempéries. En plus de ces six tests, un test supplémentaire est effectué sans combinaison entre l'aléa et la vulnérabilité, afin de voir l'apport de la prise en compte de la vulnérabilité. Ce test correspond au test n°1 effectué au premier chapitre (considérant les pixels IRIP supérieurs ou égaux à 4), mais avec la méthode de comptage des corrélations par tronçons. Ce test ne pouvait pas être effectué dans le chapitre précédent puisqu'il nécessitait les données sur l'infrastructure ferroviaire pour délimiter les tronçons. Les sept tests sont synthétisés dans le Tableau II-29. Pour chacun d'entre eux, les tableaux de contingence sont calculés ainsi que les six indicateurs de performance : la probabilité de détection, le taux de fausses alarmes, la précision, le biais, le Chi-2 et le coefficient Phi.

**TABLEAU II-29 : SYNTHÈSE DES SEPT TESTS A EFFECTUER POUR LA COMPARAISON DES CARTES IRIP ET DES DONNÉES D'IMPACT EN PRENANT EN COMPTE LA VULNÉRABILITÉ DE L'INFRASTRUCTURE**

N° test	Combinaison aléa - vulnérabilité	Comptage des corrélations		
		Vulnérabilité	Actions de mitigation	Actions de résilience
1	Niv. IRIP $\geq$ 4	Sans	Sans	Sans
2	Méthode A	Avec	Sans	Sans
3	Méthode A	Avec	Avec	Sans
4	Méthode A	Avec	Avec	Avec
5	Méthode B	Avec	Sans	Sans
6	Méthode B	Avec	Avec	Sans
7	Méthode B	Avec	Avec	Avec

## 2.3. RESULTATS

### 2.3.1. ANALYSE STATISTIQUE

Parmi les 182 tronçons, 61 ont subi un impact d'après la base de données d'impacts. Le Tableau II-30 présente pour chaque test, le nombre de tronçons par type de corrélation. Pour la méthode A (tests n°2 à 4), 57 tronçons ont été correctement identifiés et 100 tronçons ont été identifiés « à tort » comme à risque. Sur ces 100 faux positifs, 33 tronçons possèdent un ouvrage hydraulique de protection (ouvrage de traversée ou bassin de rétention). Ces 33 tronçons évoluent en V+ pour le test n°3, et donnent 90 V+. Parmi les 67 tronçons faux positifs restants, 14 tronçons sont inscrits dans la liste des tournées intempéries. Ce qui donne pour le test n°4, 104 vrais positifs et 53 faux positifs. En revanche, le nombre de faux négatifs et de vrais négatifs ne varie pas, puisqu'ils sont considérés à la base par la méthode IRIP comme non exposés au ruissellement. Pour la méthode A, 4 tronçons impactés n'ont pas été correctement identifiés par la combinaison des cartes IRIP et de la vulnérabilité, et 21 tronçons non

impactés ont correctement été identifiés comme non soumis à un risque lié au ruissellement. La logique est la même pour la méthode B de combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité (tests n°5 à 7).

TABLEAU II-30 : SYNTHÈSE DU NOMBRE DE TRONÇONS PAR TYPE DE CORRELATION POUR CHAQUE TEST

N° test	Combinaison aléa - vulnérabilité	Comptage des corrélations			V+	F+	F-	V-
		Vulnérabilité	Actions de mitigation	Actions de résilience				
1	Aléa $\geq$ 4	Sans	Sans	Sans	55	92	6	29
2	Méthode A	Avec	Sans	Sans	57	100	4	21
3	Méthode A	Avec	Avec	Sans	90	67	4	21
4	Méthode A	Avec	Avec	Avec	104	53	4	21
5	Méthode B	Avec	Sans	Sans	54	78	7	43
6	Méthode B	Avec	Avec	Sans	85	47	7	43
7	Méthode B	Avec	Avec	Avec	95	37	7	43

Le Tableau II-31 présente les valeurs des six indicateurs pour chaque test. Les différents tests présentent des probabilités de détection stables, entre 0,9 et 1. Sans surprise, les valeurs de FAR baissent (de 0,6 à 0,3) et la précision augmente (de 0,4 à 0,8) à mesure que l'on considère les actions de mitigation et de résilience. Le biais montre que le nombre de zones identifiées comme à risque est surestimé pour les sept tests, bien que le biais se rapproche de 1 en considérant les actions de mitigations et les actions de résilience. Le Chi-2 est significatif (supérieur à 10,83) à partir du test n°3 et le coefficient Phi varie de 0,1, à 0,5, avec le meilleur Phi pour le test n°7.

TABLEAU II-31 : SYNTHÈSE DES SIX INDICATEURS POUR CHAQUE TEST DE COMPARAISON

N° test	Combinaison aléa - vulnérabilité	Comptage des corrélations			POD	FAR	Précision	Biais	X <sup>2</sup>	Φ
		Vulnérabilité	Actions de mitigation	Actions de résilience						
1	Aléa $\geq$ 4	Sans	Sans	Sans	0,9	0,6	0,5	2,4	5	0,2
2	Méthode A	Avec	Sans	Sans	0,9	0,6	0,4	2,6	4	0,1
3	Méthode A	Avec	Avec	Sans	1,0	0,4	0,6	1,7	14	0,3
4	Méthode A	Avec	Avec	Avec	1,0	0,3	0,7	1,5	21	0,3
5	Méthode B	Avec	Sans	Sans	0,9	0,6	0,5	2,2	12	0,3
6	Méthode B	Avec	Avec	Sans	0,9	0,4	0,7	1,4	37	0,4
7	Méthode B	Avec	Avec	Avec	0,9	0,3	0,8	1,3	49	0,5

Le test n°1 a été effectué sans prendre en compte la vulnérabilité de l'infrastructure afin de pouvoir évaluer l'apport de la prise en compte de la vulnérabilité. Tout d'abord, en regard des résultats des comparaisons obtenus au chapitre 1, le découpage de la voie ferrée en ouvrage en terre semble permettre de mieux retrouver les zones impactées. Des POD de 0,9 à 1 sont obtenus avec un découpage en tronçons suivant les ouvrages en terre, par rapport à des POD de 0,2 à 1 avec la méthode de calcul des surfaces de recoupement. Ceci peut s'expliquer par le fait que les écoulements de surface peuvent être déviés par les ouvrages en terre et que la zone impactée n'est pas forcément localisée au niveau du point d'arrivée du ruissellement dans l'emprise ferroviaire.

Ensuite, l'apport de la prise en compte de la vulnérabilité (le type de profil de l'ouvrage en terre, sa longueur et la présence ou non d'une singularité) semble différent selon la méthode de combinaison aléa-vulnérabilité. En effet, les résultats des tests n°1 (sans vulnérabilité) et n°2 (méthode A) sont assez similaires, tandis que le test n°5 (méthode B) montre un nombre de corrélation de type faux positif nettement plus faible, ainsi qu'un nombre de corrélation de type vrai négatif nettement plus haut. La

méthode B semble permettre de mieux discriminer les zones non exposées des zones exposées. Ceci s'observe aux niveaux des indicateurs du biais (il est le plus bas des trois tests), du Chi-2 (le seul significatif) et du coefficient Phi (le plus élevé).

Les résultats de ce chapitre montrent également que les actions de mitigation et les actions de résilience sont importantes à prendre en compte pour l'étude des risques liés au ruissellement. C'est le fonctionnement global du système ferroviaire qui doit être pris en compte pour bien gérer les risques. D'un point de vue opérationnel, disposer des informations sur les ouvrages hydrauliques de protection et sur les zones de tournée intempéries semble essentiel. La prise en compte de ces informations permet d'abaisser le taux de fausses alarmes de 0,6 à 0,3. Autrement dit, la connaissance de ces informations permettrait de connaître une bonne partie des zones exposées à l'aléa ruissellement. Ceci permet d'appuyer le fait qu'il est nécessaire pour le gestionnaire d'infrastructure de capitaliser ces informations pour gérer les risques liés au ruissellement.

### 2.3.2. ANALYSE DETAILLEE

L'analyse détaillée permet d'illustrer la méthode de comparaison par des exemples concrets ainsi que de visualiser les représentations spatiales créées par la méthode IRIP. Trois exemples sont présentés, chacun illustrant une étape de l'évaluation : la prise en compte de la vulnérabilité, la prise en compte des ouvrages hydrauliques de protection, et la prise en compte des zones de tournées intempéries.

#### 2.3.2.1. TRONÇONS FAUX NEGATIFS EVOLUANT EN VRAIS POSITIFS APRES PRISE EN COMPTE DE LA VULNERABILITE

La Figure II-47 présente les deux tronçons (177 et 178) ayant des corrélations de type faux négatif sans prendre en compte la vulnérabilité (test n°1) et évoluant en vrais positifs après prise en compte de la vulnérabilité, avec les méthodes A et B. Les deux tronçons sont ceux ayant subi des impacts (indiqués par les étoiles jaunes), ils ont des niveaux de vulnérabilité de 3 et de 4 (indiqué en noir). Le tronçon de vulnérabilité 4 est établi en déblai long avec un pont-route et le tronçon de vulnérabilité 3 est un remblai court. Les deux tronçons sont équipés de bassins de rétention (en vert sur la Figure). Les deux tronçons impactés ne sont effectivement pas identifiés comme exposés au ruissellement d'après les cartes IRIP, il n'y a pas de pixels supérieurs ou égaux à 4 au sein des tronçons. A savoir que pour qu'un pixel soit considéré comme dans l'enveloppe du tronçon, son centre doit être dans l'enveloppe. Il n'y a pas de pixels forts dans l'enveloppe, pourtant la description des impacts dans les rapports d'expertise semble correspondre avec les informations spatiales des cartes IRIP. D'après les rapports, les différents impacts auraient la même origine qui serait l'arrivée de ruissellement par les deux talwegs dessinés par les courbes de niveau et identifiés par les pixels forts d'accumulation et de transfert. L'eau des talwegs est ensuite stockée dans le bassin de rétention. Le désordre aurait été provoqué par la surverse de l'ouvrage de rétention. L'eau arrivée dans le déblai, se serait écoulée le long du déblai en direction du remblai court. Arrivée au niveau du remblai, l'eau de ruissellement aurait percolé l'ouvrage en terre et aurait provoqué de l'érosion au niveau des résurgences sur le côté aval du remblai. La circulation de l'eau est indiquée sur la Figure par les flèches noires. L'impact le plus à l'est est l'érosion du talus de remblai au niveau de la buse de fuite du second bassin de rétention. L'impact le plus à l'ouest est un glissement du talus du déblai lié à l'arrivée d'eau de ruissellement depuis le versant, bien que ne semblant pas être identifié par les cartes IRIP.

D'après les cartes IRIP, ces tronçons sont exposés à un aléa de niveau 3. Ce niveau d'aléa suffit pour les identifier comme à risque au vu de leur niveau de vulnérabilité de 3 et de 4 (pour les méthodes A et B). Ce

qui est effectivement le cas d'après la base de données d'impacts. Sans prendre en compte la vulnérabilité, ces tronçons n'auraient pas été retenus. Cet exemple illustre l'intérêt de croiser les cartes IRIP avec la vulnérabilité de l'infrastructure ferroviaire pour identifier les zones à risque. Néanmoins, les pixels IRIP de niveau 3 sont très présents le long du linéaire de voie et dans le bassin versant, comme l'indique la Figure. Permettent-ils vraiment de discriminer une zone exposée ou non à l'aléa ? Et qu'en est-il des pixels IRIP de niveau 2 ? La méthode de prise en compte de la vulnérabilité semble pertinente, en revanche des tests sur la méthode IRIP seront à effectuer par la suite pour mieux appréhender la significativité des pixels de niveaux faibles.

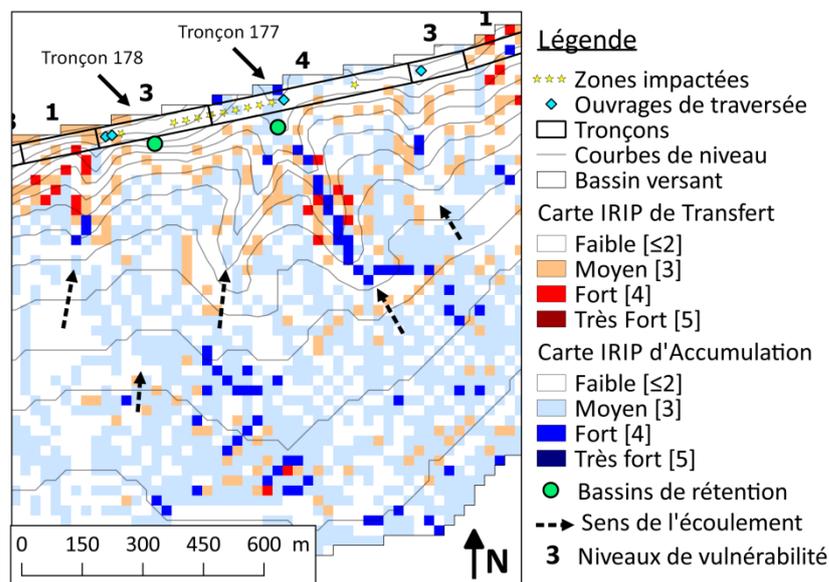


FIGURE II-47 : ILLUSTRATION DE DEUX TRONÇONS FAUX NEGATIFS QUI EVOLUENT EN VRAIS POSITIFS AVEC LA PRISE EN COMPTE DE LA VULNERABILITE

### 2.3.2.2. TRONÇONS FAUX POSITIFS EVOLUANT EN VRAIS POSITIFS APRES PRISE EN COMPTE DES ACTIONS DE MITIGATION

La Figure II-48 présente une zone où la voie ferrée est située dans un talweg sec, les bassins versants se situent donc de part et d'autre de la voie. La voie sur cette zone est établie en une alternance de remblais et de déblai et coupe à plusieurs reprises le fond du talweg. Plusieurs tronçons ont des corrélations de type faux positif (fausses alertes). Ces tronçons sont en effet spatialement corrélés avec des niveaux IRIP de 4 et 5 en transfert et en accumulation, pourtant aucun impact n'a été reporté. Néanmoins, des ouvrages hydrauliques de traversée se situent précisément au niveau des pixels IRIP fort, notamment les pixels d'accumulation (en bleu). La position des ouvrages hydrauliques de traversée, mis en place pour permettre le passage des écoulements de l'amont vers l'aval, peut donc être considérée comme une information permettant de valider la pertinence de la carte IRIP d'accumulation pour indiquer les zones d'écoulements concentrés. Ainsi, après prise en compte des actions de mitigation, la corrélation de ces tronçons faux positifs évolue en vrai positif.

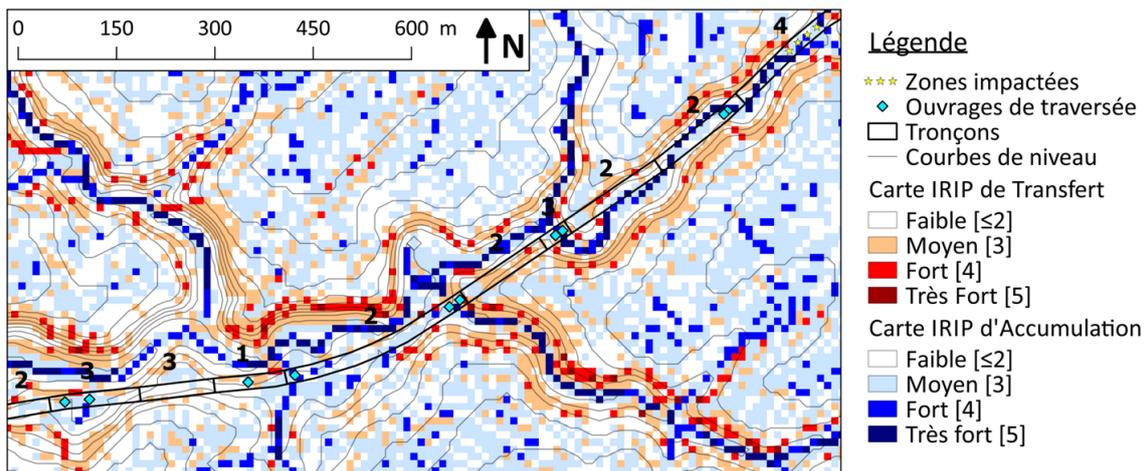


FIGURE II-48 : ILLUSTRATION DE TRONÇONS FAUX POSITIFS QUI ÉVOLUENT EN VRAIS POSITIFS APRES PRISE EN COMPTE DES OUVRAGES HYDRAULIQUES DE TRAVERSEE

### 2.3.2.3. TRONÇONS FAUX POSITIFS ÉVOLUANT EN VRAIS POSITIFS APRES PRISE EN COMPTE DES ACTIONS DE RESILIENCE

La Figure II-49 présente une zone où la voie ferrée est située sur un versant, avec le bassin versant côté est et un cours d'eau côté ouest, en aval. La voie est établie en une alternance de remblais, de déblais et de profils mixtes. Plusieurs talwegs secs coupent la voie aux niveaux de remblais courts. Plusieurs tronçons ont des corrélations de type faux positif (tronçons en vert). Ils sont exposés à l'aléa d'après la méthode IRIP, mais n'ont *a priori* subi aucun impact. Néanmoins, les données sur les zones de tournées intempéries (indiquées en pointillés rouges sur la Figure) montrent que la zone identifiée comme sensible au ruissellement par les services de surveillance de SNCF est en réalité plus étendue que la zone effectivement impactée. La zone où la surveillance est accrue est étendue sur trois tronçons. Ceci permet de confirmer que les deux tronçons au sud de la zone impactée, sont effectivement exposés à l'aléa ruissellement comme l'indiquent les cartes IRIP. Les corrélations de ces deux tronçons évoluent donc en vrai positif après prise en compte des zones de tournées intempéries. De plus, sur cette zone, il est indiqué que les services de surveillance doivent surveiller tout particulièrement le risque de glissement. Ceci semble également correspondre aux cartes IRIP qui indiquent les niveaux maximum en transfert. Par ailleurs, le troisième tronçon faux positif, le plus au sud, de niveau 3 en vulnérabilité est un remblai court. Il pourrait correspondre au passage du talweg, 100 m plus au nord. Il est possible qu'avec l'imprécision des données d'infrastructure et de topographie, les tronçons soient décalés, surtout pour des petits tronçons, ici environ 100 m de long. Quoi qu'il en soit, ce talweg, indiqué par des niveaux 4 en accumulation, ne semble corrélé avec aucun ouvrage hydraulique de traversée. Cette zone pourrait être intéressante à visiter pour évaluer le risque réel en fonction de la configuration locale.

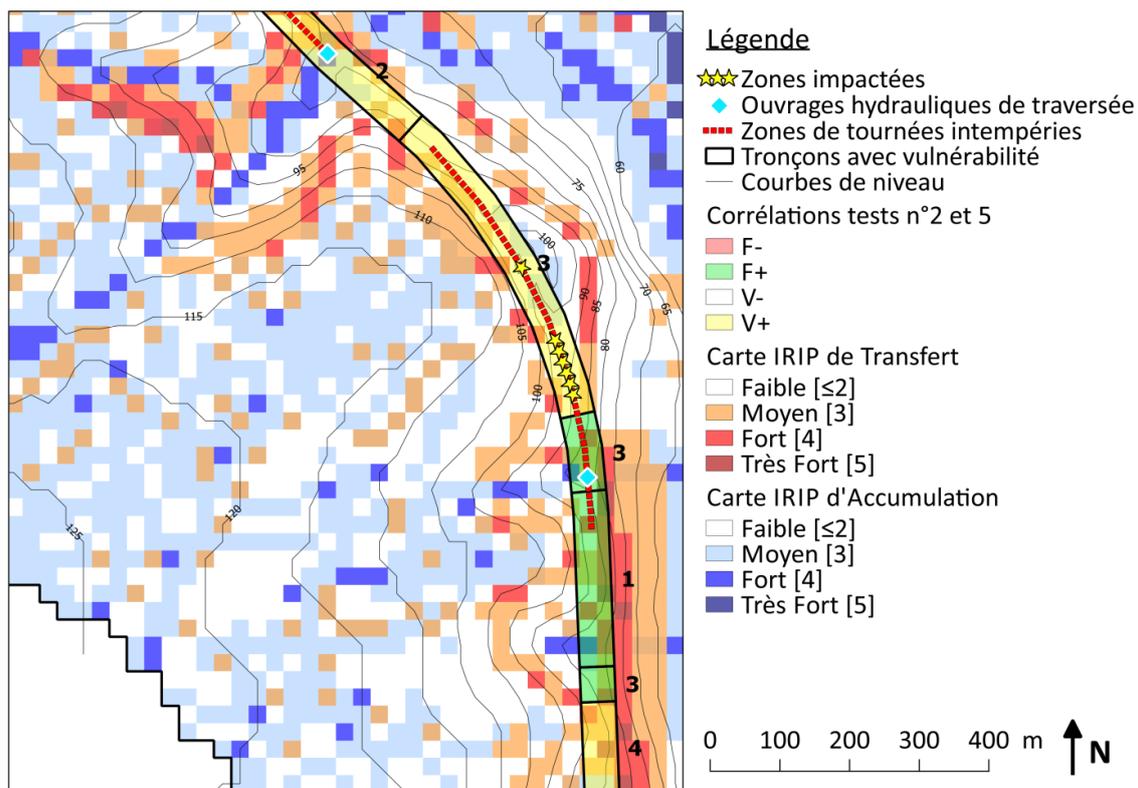
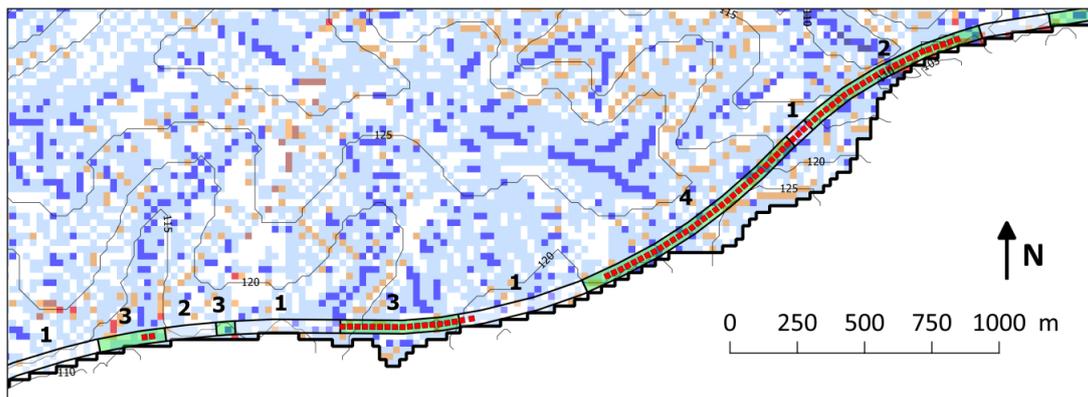


FIGURE II-49 : ILLUSTRATION D'UN TRONÇON FAUX POSITIF QUI EVOLUE EN VRAI POSITIF APRES PRISE EN COMPTE DES ZONES DE TOURNÉES INTEMPÉRIES

Un exemple supplémentaire de l'exploitation des données sur les tournées intempéries confirme davantage leur pertinence pour l'évaluation de la méthode IRIP. La Figure II-50 présente une zone où la voie ferrée est sur un plateau, assez proche de la tête de bassin. Cette zone n'a a priori subi aucun désordre, pourtant elle est recensée, en plusieurs points, en tant que zone à surveiller lors d'intempéries. Il est intéressant de noter que la détermination des zones de tournées par le gestionnaire d'infrastructure se fait par rapport au risque d'impact. Cette détermination prend donc implicitement en compte la vulnérabilité de la voie ferrée (pas seulement l'exposition à l'aléa). On observe que sur la Figure les trois zones de tournées se situent bien au niveau des tronçons faux positifs. En conclusion, les zones de tournées intempéries sont donc bien pertinentes pour évaluer les cartes IRIP, et ces tronçons évoluent en vrais positifs.



**Légende**

--- Zones de tournées intempéries	Transfert	Accumulation	Corrélation test n°5 à 7
□ Tronçons avec vulnérabilité	■ Moyen [3]	■ Moyen [3]	■ F-
▭ Bassin versant	■ Fort [4]	■ Fort [4]	■ F+
— Courbes de niveau	■ Très Fort [5]	■ Très Fort [5]	■ V-
			■ V+

**FIGURE II-50 : ILLUSTRATION DE LA PRISE EN COMPTE DES ZONES DE TOURNÉES INTEMPÉRIÉS POUR L'ÉVALUATION DE LA MÉTHODE IRIP**

Néanmoins, ces zones recouvrent de grands linéaires. Environ 50 % du linéaire d'étude est recensé pour les tournées intempéries, en cumulant les données actuelles et celles des années 1980. Ceci fait perdre en précision pour évaluer la performance des cartes à discriminer les zones les plus exposées. C'est pourquoi, dans le cadre de l'évaluation d'IRIP, les scores des indicateurs de performance doivent être analysés pour les trois cas : en considérant la vulnérabilité seulement, en considérant la vulnérabilité plus les ouvrages hydrauliques de protection, et en considérant la vulnérabilité, les ouvrages de protection et les zones de tournées intempéries.

**2.3.3. SYNTHÈSE**

D'un point de vue de l'évaluation de la méthode IRIP, si l'on considère que les données d'impacts, les données sur les ouvrages hydrauliques de protection et les données sur les tournées intempéries sont des données approchées représentant l'aléa ruissellement, il est possible de quantifier la capacité de la méthode IRIP à identifier les zones exposées à l'aléa ruissellement. La combinaison des cartes de transfert et d'accumulation produites par la méthode IRIP permet d'identifier entre 90 et 100% des zones exposées à l'aléa ruissellement, avec environ 30% de fausses détections. Pour compléter ces résultats, l'analyse visuelle des représentations cartographiques doit être effectuée, afin de mieux juger de la pertinence de l'information spatiale des cartes IRIP et d'expliquer les mauvaises corrélations, les faux négatifs et les faux positifs.

**2.4. DISCUSSION**

Les faux négatifs sont les types de corrélations les plus mauvaises pour l'évaluation de la méthode IRIP. D'un point de vue opérationnel, il est moins pénalisant d'identifier beaucoup de zones à risque mais où il ne s'est *a priori* rien passé, plutôt que de ne pas identifier des zones qui ont été effectivement impactées. La section de discussion portera donc essentiellement sur l'étude des corrélations de type faux négatif. Les faux positifs (fausses alarmes) sont également gênants puisqu'ils rendent difficile la priorisation des zones le plus à risque. Mais ils sont trop nombreux pour être analysés de façon exhaustive, et l'étude des

faux négatifs permet déjà de présenter un large panel d’explications possibles pour les mauvaises corrélations en général. L’ensemble des tronçons faux négatifs est donc analysé afin de comprendre pourquoi ils n’ont pas été identifiés comme à risque. Le Tableau II-32 liste les tronçons faux négatifs pour les différentes méthodes de prise en compte de la vulnérabilité (A, B et sans vulnérabilité). Sur ces neuf tronçons différents, les tronçons 177 et 178 ont été analysés dans la section précédente, sept tronçons restent donc à analyser dans cette section : les tronçons 15, 65, 184, 187, 120, 135 et 151. L’analyse de ces tronçons est présentée selon trois justifications possibles :

- l’impact n’est pas lié au ruissellement (tronçon 135),
- la configuration de l’infrastructure n’est pas bien prise en compte (tronçons 65, 151 et 184),
- les cartes IRIP ne sont pas pertinentes (tronçons 15, 120 et 187).

**TABLEAU II-32 : LISTE DES TRONÇONS FAUX NEGATIFS SELON LA METHODE DE PRISE EN COMPTE DE LA VULNERABILITE**

Sans vulnérabilité	Méthode A	Méthode B
Tronçon 15	Tronçon 15	Tronçon 15
Tronçon 65	Tronçon 65	Tronçon 65
Tronçon 184	Tronçon 184	Tronçon 184
Tronçon 187	Tronçon 187	Tronçon 187
X	X	Tronçon 120
X	X	Tronçon 135
X	X	Tronçon 151
Tronçon177	X	X
Tronçon178	X	X

#### 2.4.1. FAUX NEGATIF LIE A UN IMPACT NON INDUIT PAR DU RUISSELLEMENT

##### 2.4.1.1. TRONÇON 135

La Figure I-52 présente les tronçons 134 et 135 qui ont été impactés par le même phénomène. Sur cette zone la voie est établie (d’est en ouest) sur un long viaduc, puis sur un haut remblai (jusqu’à 17 m) (tronçon 134), puis en profil rasant (tronçon 135) et enfin en déblai. Le niveau de vulnérabilité (indiqué sur le Figure par les chiffres noirs) au niveau du viaduc est de 0 puisque la voie est en hauteur et est considérée comme non exposée au ruissellement. Le bassin versant relatif à la zone impactée est quasi inexistant au vu des courbes de niveau. Le désordre s’est en réalité produit sur le côté sud du talus ferroviaire. D’après les rapports d’expertise, le désordre est un glissement lent, sur plusieurs jours, lié à une longue période pluvieuse. La Figure I-53 est une photo de la zone du désordre au moment des travaux, elle montre l’ampleur du glissement. Au vu du type de désordre et de la configuration locale de l’environnement, l’impact ne semble pas induit par du ruissellement, ce qui expliquerait la mauvaise corrélation avec les cartes IRIP. L’origine du glissement semble davantage être hydrogéologique ou lié à une instabilité géotechnique. Dans le cadre de l’évaluation de la méthode IRIP, cet impact est donc retiré de la base de données. Ce faux négatif est finalement un vrai négatif. Par contre, le tronçon 134 évolue en faux positif, il est identifiée comme sensible par la carte IRIP de transfert mais aucun impact lié au ruissellement n’a eu lieu *a priori*.

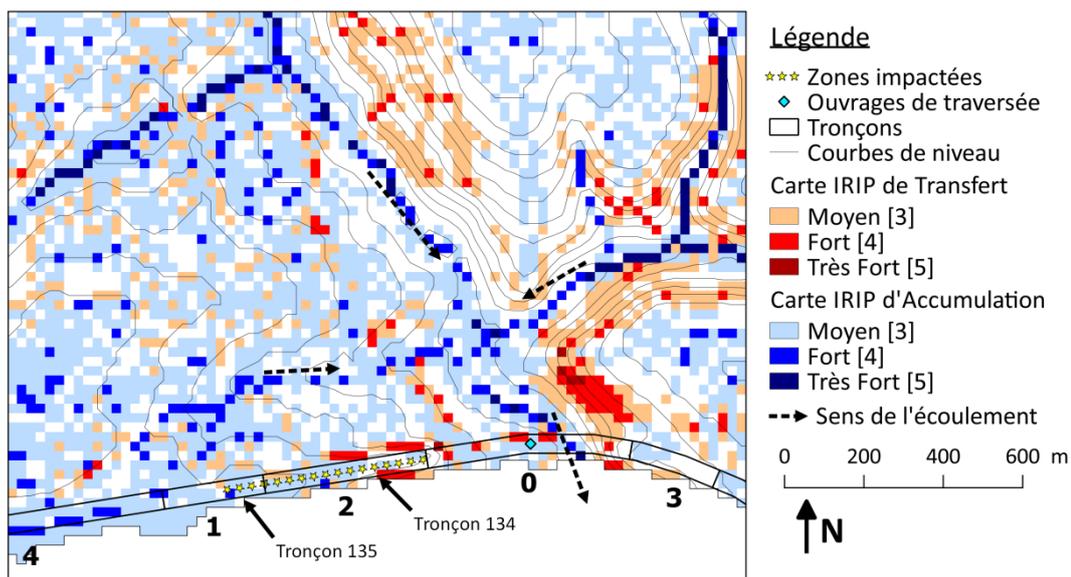


FIGURE II-51 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 135, FAUX NEGATIF DU FAIT QUE L'IMPACT NE SOIT PAS LIE AU RUISSELLEMENT



FIGURE II-52 : PHOTOS DE LA ZONE IMPACTEE AU MOMENT DES TRAVAUX

## 2.4.2. FAUX NEGATIFS LIES A LA CONFIGURATION LOCALE DE L'INFRASTRUCTURE

### 2.4.2.1. TRONÇON 65

La Figure II-53 présente le tronçon 65 établi en déblai court. Ce faux négatif est obtenu quelle que soit la méthode de prise en compte de la vulnérabilité (A, B ou sans vulnérabilité). Cette section de ligne est établie dans un fond de vallée avec une alternance de déblais et de remblais. Les niveaux de vulnérabilité des tronçons sont indiqués sur la Figure par les chiffres en noir. Le bassin versant se situe de part et d'autre de la voie ferrée et est principalement occupé par des zones de culture. La voie ferrée coupe à plusieurs reprises le talweg principal, et des ouvrages hydrauliques de traversés sont localisés aux niveaux de ces intersections. Les impacts sont étendus sur environ 1 km de long. Ces impacts ont été provoqués par des eaux de ruissellement apportant de la boue au niveau des ouvrages de traversés. Ceux-ci ont été comblés, plusieurs remblais ont alors été mis en charge par l'eau et deux ont été détruits par emportement (tronçon 64 et 66). Les pistes et le ballast ont également été détruits au niveau des déblais. Ce phénomène s'est produit à deux reprises provoquant les mêmes types de désordre. La description de ces désordres semble correspondre avec la carte IRIP d'accumulation. D'après les cartes IRIP, le ruissellement peut effectivement arriver des deux côtés de la voie (les flèches noires montrent la

direction des écoulements), et la localisation des ouvrages de traversée correspond aux intersections de la voie ferrée avec les niveaux forts d'accumulation. Néanmoins, le tronçon 65 est considéré comme faux négatif car il n'est pas corrélé avec des niveaux 4 d'aléa. L'hypothèse qui est faite ici est que le tronçon n'est pas directement exposé à un aléa fort mais que la configuration des talus ferroviaires a dévié les écoulements. Il semble que le ruissellement venant de l'amont ait été bloqué au niveau du remblai du tronçon 66, a donc débordé et s'est engouffré dans le déblai du tronçon 65, en faisant des désordres sur la piste et le ballast. En conclusion, la visualisation des cartes IRIP permet de comprendre que ce tronçon peut être exposé au vu de la configuration d'ensemble malgré le fait qu'il ne soit pas directement corrélé avec des pixels forts.

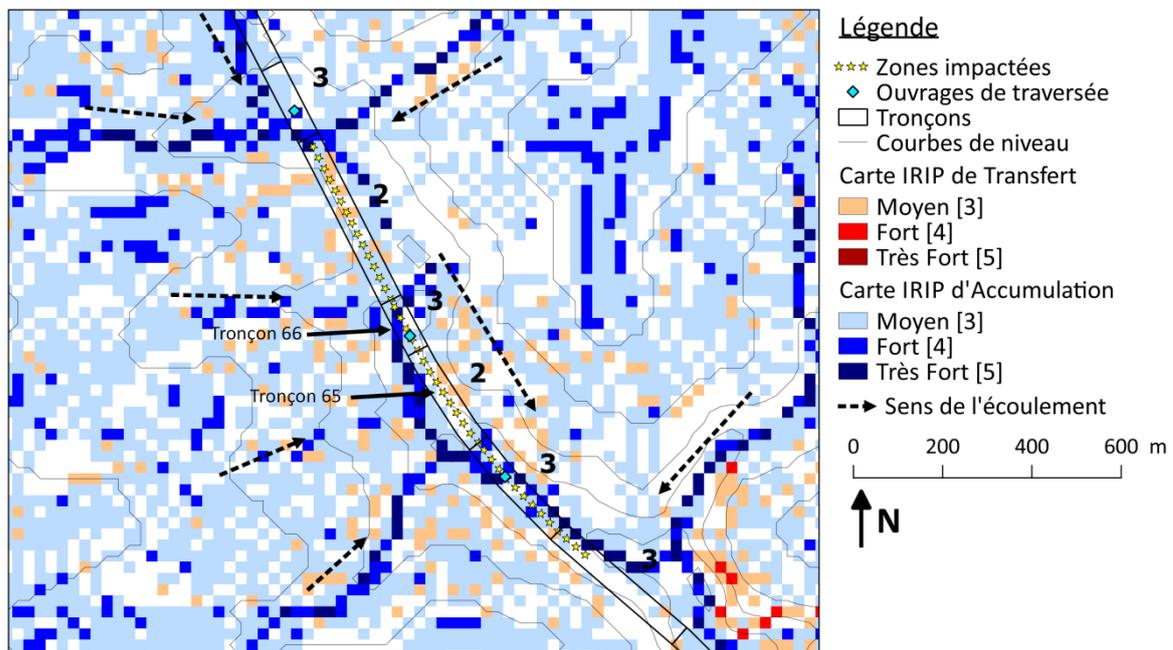


FIGURE II-53 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 65 NON EXPOSE DIRECTEMENT MAIS IMPACTE A CAUSE DE LA CONFIGURATION DE L'INFRASTRUCTURE

#### 2.4.2.2. TRONÇON 151

La Figure II-54 présente le tronçon 151 avec un niveau de vulnérabilité de 1, car d'après les données d'infrastructure ce tronçon est établi en profil rasant. Un niveau IRIP de 5 est donc requis pour considérer ce tronçon comme à risque d'après la méthode B, or, ce tronçon possède au maximum des niveaux 4 en accumulation et 3 en transfert. Ce tronçon est situé en aval de zones de cultures et possède un bassin versant d'une quinzaine d'hectares environ. Le désordre recensé est un apport de boue dû à un écoulement d'eau de surface depuis le bassin versant. Les matériaux ont atteint le ballast et pollué la piste sur environ 50 ml. Le champ aurait ses sillons en direction de la voie, jusqu'en limite d'emprise. On apprend également à la lecture des rapports d'expertise, que ce tronçon de voie serait en réalité établi en déblai, de faible hauteur. Pourtant ce tronçon n'est pas plus signalé sur les cartes IGN au 25 000<sup>ème</sup>, peut-être à cause de sa faible hauteur. Mais un déblai, même de 1 m de haut peut suffire à rendre la zone vulnérable aux apports de boue, le profil rasant donnant plus la possibilité aux apports de sédiments de ralentir et de se déposer au sol avant les voies. Ce déblai serait donc un déblai long et devrait avoir un niveau de vulnérabilité de 3. Au vu des niveaux d'aléa de 4 en accumulation, ce tronçon devrait donc bien être identifié comme à risque et être de type vrai positif. Pour la suite de l'étude, le niveau de vulnérabilité de ce tronçon sera corrigé à 3 et le tronçon sera considéré comme un vrai positif.

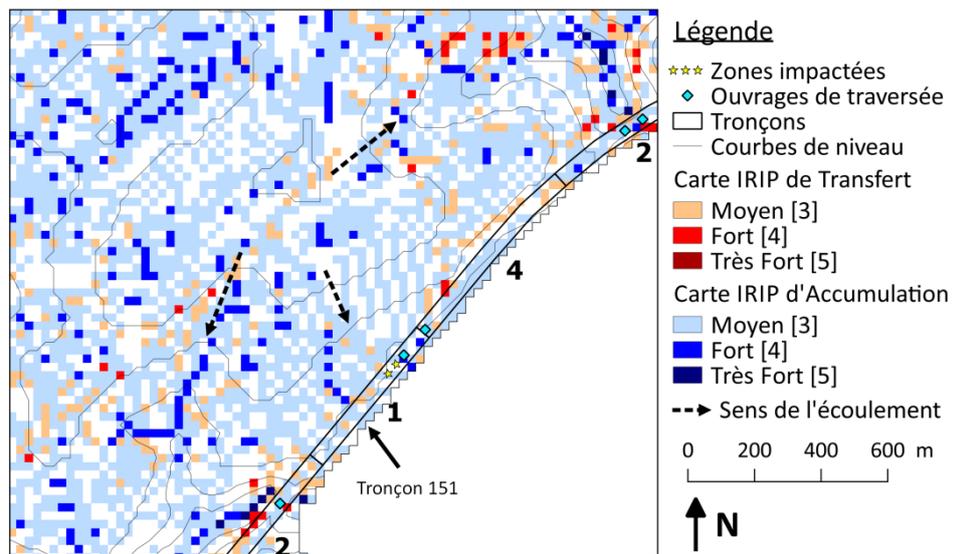


FIGURE II-54 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 151

#### 2.4.2.3. TRONÇON 184

La Figure II-55 présente l'ensemble des tronçons 182 à 184 qui sont établis en une alternance d'un profil mixte (le 183), et de deux déblais (182 et 184). Un passage à niveau se trouve sur le profil mixte. Ces trois tronçons ont été impactés lors d'un même épisode. Cet épisode du début des années 2000 a provoqué des arrivées de ruissellement depuis l'amont sur le passage à niveau. L'eau a traversé la voie en direction de l'aval mais elle a légèrement été déviée de part et d'autre du passage à niveau dans les deux déblais. Ceci explique que l'impact n'ait pas été reporté comme ponctuel et que l'étendu du désordre dépasse légèrement sur les deux tronçons adjacents. La dynamique spatiale du ruissellement sur cette zone et l'exposition du passage à niveau ont bien été détectées par la méthode IRIP, néanmoins, l'effet de la configuration locale de l'infrastructure n'a pas été anticipé, c'est pourquoi le tronçon 184 n'est pas considéré comme exposé au ruissellement. Il serait intéressant de tester une résolution plus fine sur cette zone afin de voir si l'influence des talus ferroviaires sur le ruissellement peut être visible sur les cartes IRIP. En conclusion, les cartes IRIP correspondent bien à la description des impacts sur cette zone, c'est la configuration locale du passage à niveau qui a engendré des écoulements dans le déblai 184, qui n'était a priori pas considéré comme à risque.

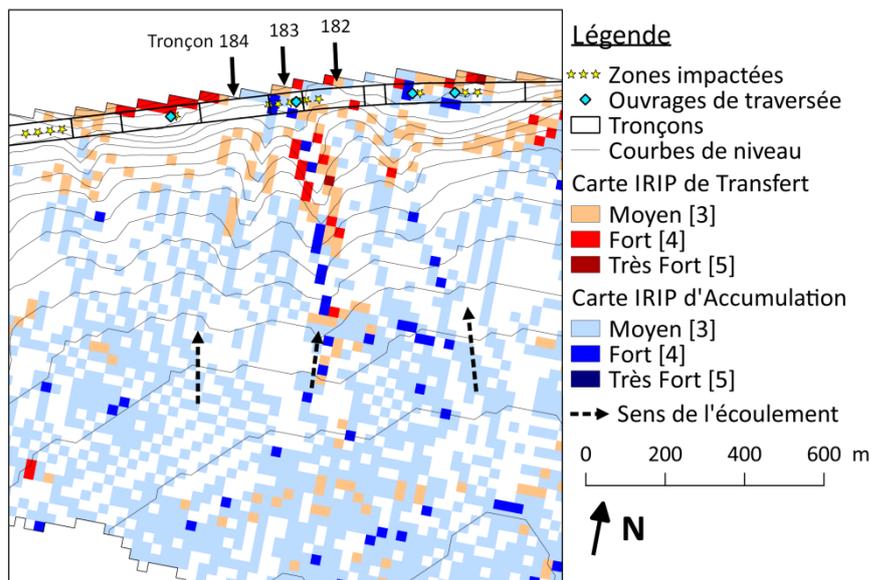


FIGURE II-55 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 184 QUI A ETE IMPACTE PAR DU RUISSellement A CAUSE DE LA CONFIGURATION LOCALE DE L'INFRASTRUCTURE MAIS QUI N'EST A PRIORI PAS EXPOSE AU RUISSellement

### 2.4.3. FAUX NEGATIFS LIES AUX CARTES IRIP PEU PERTINENTES

#### 2.4.3.1. TRONÇON 15

La Figure II-56 présente le tronçon 15 qui est de type faux négatif (impact manqué). Sur ce tronçon, la voie ferrée est établie en profil mixte (remblai côté est, déblai côté ouest). L'amont proche de la voie ferrée est une zone boisée et des zones de cultures sont situées en tête de bassin. L'aléa qui a impacté la voie ferrée est une coulée de boue. La localisation est assez incertaine, puisque seulement un PK arrondis au kilomètre est disponible, mais la coulée de boue aurait impacté la voie sur 150 m. Des consignes de tournées intempéries précisent également que les talus ferroviaires doivent être vérifiés sur une zone de 200 m de part et d'autre de l'impact en cas de pluie prolongée. Le tronçon 15 présente un niveau de vulnérabilité de 2, mais son niveau maximum d'aléa est de 3 en transfert (il devrait être de 4 au minimum pour que le tronçon soit considéré comme à risque). Les cartes IRIP montrent un fort potentiel d'accumulation sur le plateau avec beaucoup de niveaux 3 et quelques niveaux 4, ainsi qu'un potentiel de transfert du ruissellement sur les coteaux avant la voie ferrée, mais les niveaux sont de 3 et assez éparés. Un petit talweg est détecté au niveau du tronçon adjacent au tronçon 15, avec des pixels de 3 et 4 en accumulation. Aucun ouvrage de traversée n'a d'ailleurs été recensé sur cette zone, il serait intéressant d'effectuer une visite terrain pour voir si le tronçon est effectivement à risque au vu de la configuration locale. La raison de la mauvaise corrélation du tronçon 15 peut être liée à une imprécision dans la localisation de l'impact ou bien à une mauvaise connaissance de l'infrastructure, mais la raison peut aussi venir des cartes IRIP. La carte IRIP de transfert semble en effet un peu faible au vu de la configuration de la zone avec des pentes fortes. Pour analyser davantage cette hypothèse, les cinq indicateurs de la carte de transfert sont décomposés et étudiés séparément.

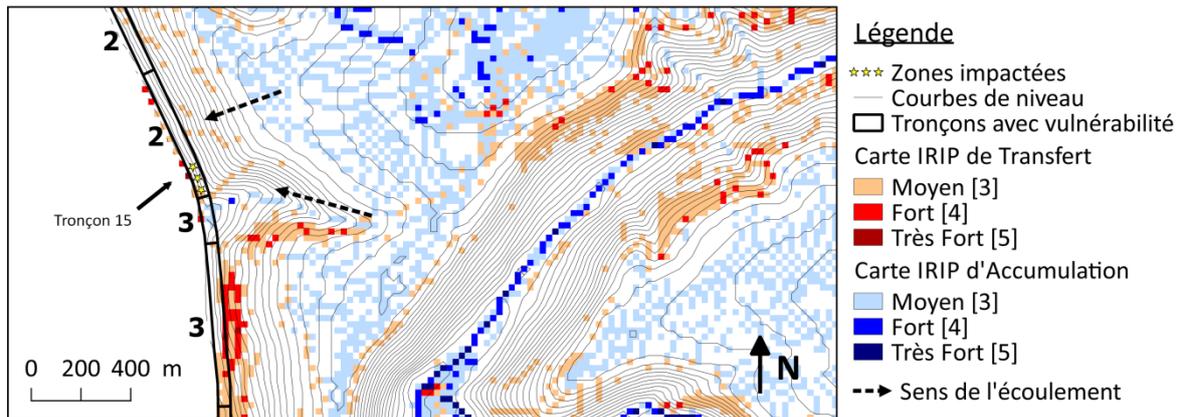


FIGURE II-56 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 15 QUI A ÉTÉ IMPACTÉ PAR UNE COULÉE DE BOUE MAIS QUI N'A PAS BIEN ÉTÉ IDENTIFIÉ PAR LES CARTES IRIP

La Figure II-57 montre les cinq indicateurs binaires pour la carte de transfert. La carte des ruptures de pentes convexes semble cohérente au niveau de la rupture bien marquée, mais montre une pixellisation qui semble aléatoire sur les zones plus planes. La carte des pentes forte semble également cohérente ainsi que la carte du potentiel de production amont, qui montre de forts potentiels sur le plateau au niveau des zones de cultures. Ces trois cartes sont en accord avec la localisation de la coulée de boue. En revanche, la carte de l'indice de Horton ne semble pas donner d'information spatiale cohérente sur l'ensemble du bassin. La carte des axes linéaires au sol représente les routes principales, elle apporte globalement peu d'information, et semble, par ailleurs, surestimer la largeur de l'emprise des routes et donc leur effet sur le ruissellement. Pour conclure, trois indicateurs sur cinq semblent correspondre avec le peu d'informations disponibles sur la coulée de boue. L'origine de la mauvaise corrélation pourrait alors être due à certains indicateurs de la méthode IRIP, notamment à l'indice de Horton ou à l'indicateur des axes linéaires au sol. Des tests sur la méthode IRIP devraient être effectués pour tenter d'améliorer certains indicateurs de la carte de transfert.

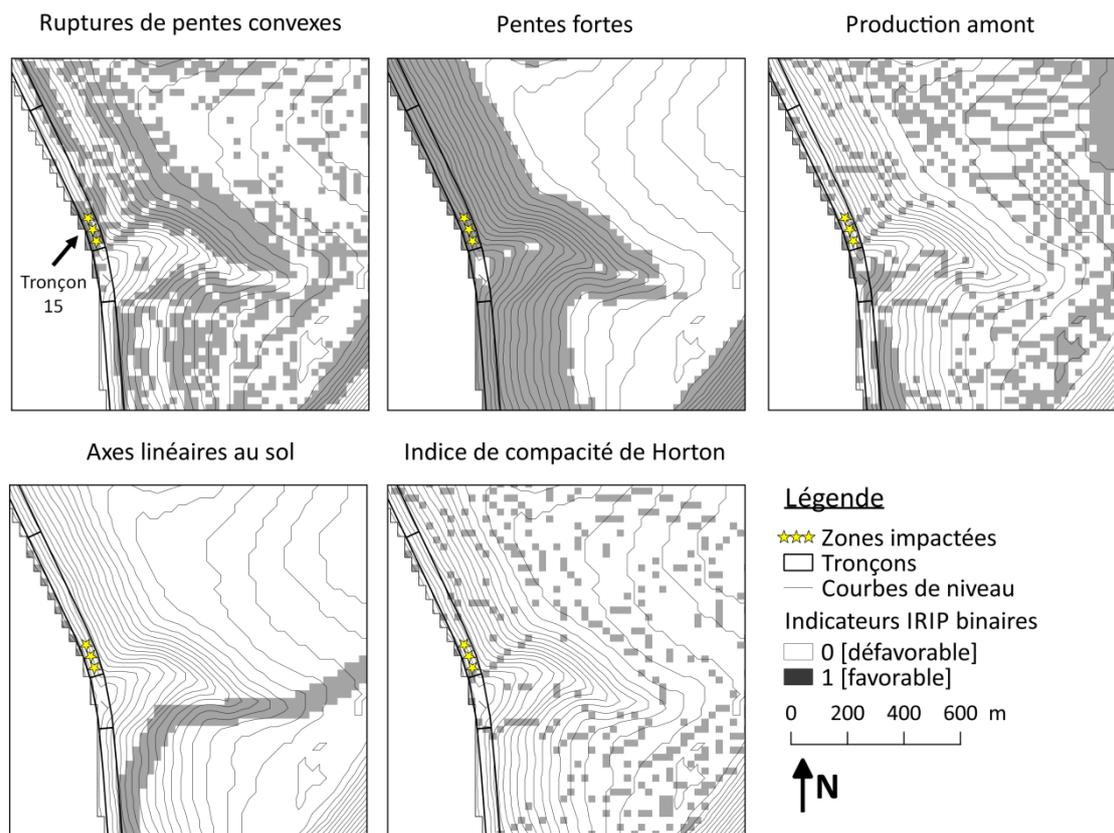


FIGURE II-57 : DECOMPOSITION DE LA CARTE IRIP DE TRANSFERT EN INDICATEURS BINAIRES SUR LA ZONE DU TRONÇON 15

#### 2.4.3.2. TRONÇON 120

La Figure II-58 présente le tronçon 120 avec une corrélation de type faux négatif, obtenue en appliquant la méthode B de combinaison aléa- vulnérabilité. Le tronçon 120, établi en profil rasant, a un niveau de vulnérabilité de 1. Le tronçon adjacent de vulnérabilité 4 est un déblai long avec un pont-route. Le bassin versant relatif à la zone impactée est situé côté sud, il est occupé principalement par des zones de culture et a une superficie d'environ 1 km<sup>2</sup>. D'après les rapports d'expertise, l'impact serait un apport de fines venant du bassin versant. Les fossés préfabriqués couvrclés ne seraient plus visibles. Ce tronçon est considéré comme vrai positif avec la méthode A, mais avec la méthode B, un niveau d'aléa de 5 est nécessaire pour considérer le profil rasant comme à risque. Or, le niveau d'aléa maximum est de 4, obtenu avec la carte IRIP d'accumulation. La raison de la mauvaise corrélation peut avoir différentes origines. Elle peut être liée aux choix de découpage de la voie ferrée en tronçons (la distinction entre les ouvrages en terre n'est pas toujours précise), à une imprécision dans la localisation de l'impact, ou aux cartes IRIP elles-mêmes, qui n'apparaissent d'ailleurs pas très pertinentes.

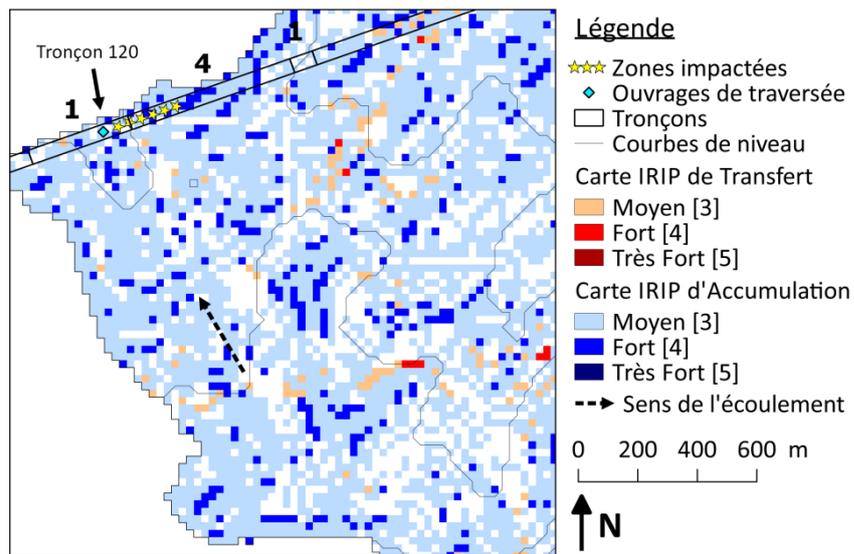


FIGURE II-58 : CARTES IRIP DE TRANSFERT ET D'ACCUMULATION SUR LE BASSIN VERSANT RELATIF AU TRONÇON 120

L'information spatiale apportée par les cartes IRIP dans le bassin versant semble difficile à interpréter. Il y a une persistance spatiale des niveaux 3, mais les pixels de niveau 4 ne semblent pas apporter d'information, aucun schéma particulier ne semble ressortir. Néanmoins, au niveau de l'emprise ferroviaire, un amas de pixel 4 en accumulation dans le déblai semble correspondre à la zone de dépôt de fines. La décomposition de la carte d'accumulation en indicateurs binaires permet de mieux comprendre les mécanismes en jeu. La FIGURE II-59 présente les cinq indicateurs de la carte accumulation sur la même zone : le potentiel de production amont, l'indice topographique, les pentes, les ruptures de pente ainsi que la combinaison de l'indice de forme de Horton et de l'aire drainée. La production amont montre un bassin presque entièrement favorable à la production d'eau de surface, ceci est dû notamment au sol argileux limoneux et à une occupation du sol majoritairement agricole. La carte des pentes montre que la zone est plane est donc favorable à l'accumulation. L'indice topographique montre les zones favorables à l'engorgement. On observe des chemins préférentiels en direction de la zone de dépôt de fines. Ces chemins ne sont pas très bien dessinés, ceci pourrait indiquer une zone de ruissellement diffus, qui correspondrait à la description de l'impact. La carte des ruptures de pentes concaves ne semble par contre pas cohérente. L'organisation spatiale des pixels évoque un effet peu naturel, peut-être lié à la qualité de la donnée topographique. Enfin, l'indicateur combinant l'indice de forme de Horton et l'aire drainée supérieure à 1 km<sup>2</sup>, montre essentiellement l'indice de forme puisque la surface drainée est faible. La carte de cet indicateur ne semble pas pertinente. Aucune dynamique spatiale ne semble ressortir. Pour conclure, sur les cinq indicateurs, deux ne semblent pas pertinents. Ceci pourrait être à l'origine de la mauvaise corrélation. Davantage de tests sur la méthode IRIP devraient permettre de confirmer ces observations et de proposer des améliorations.

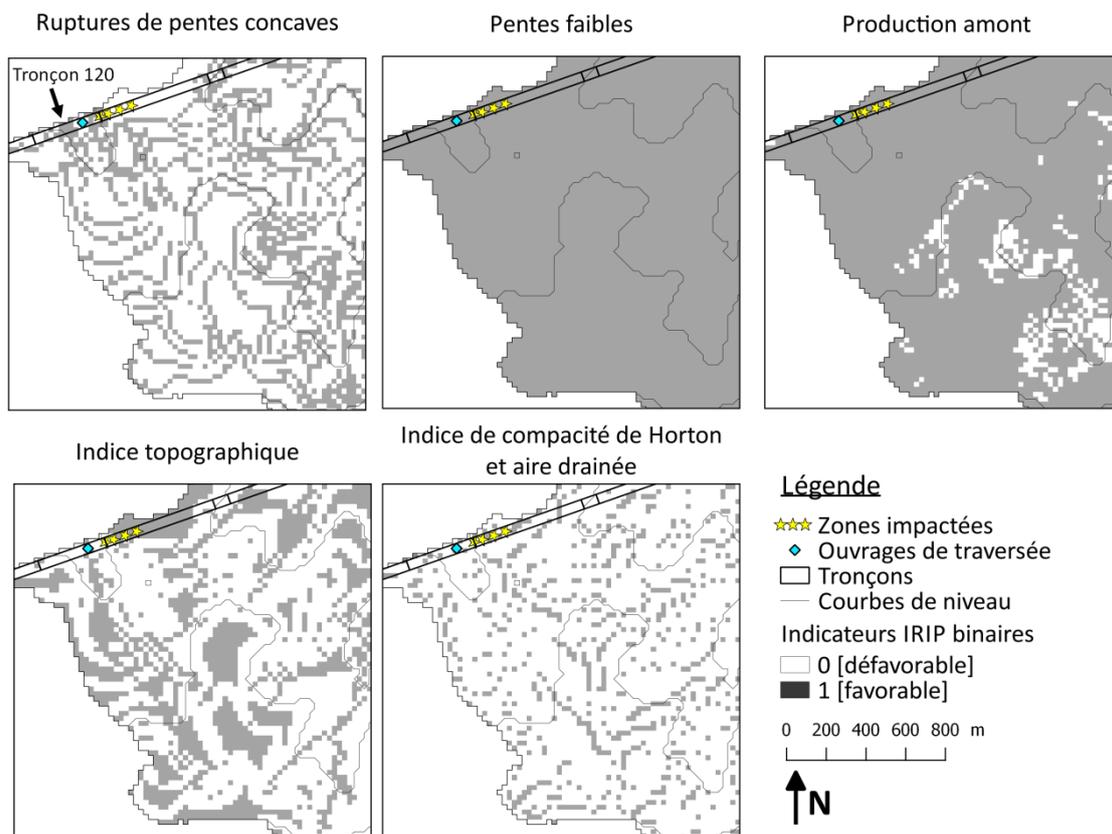
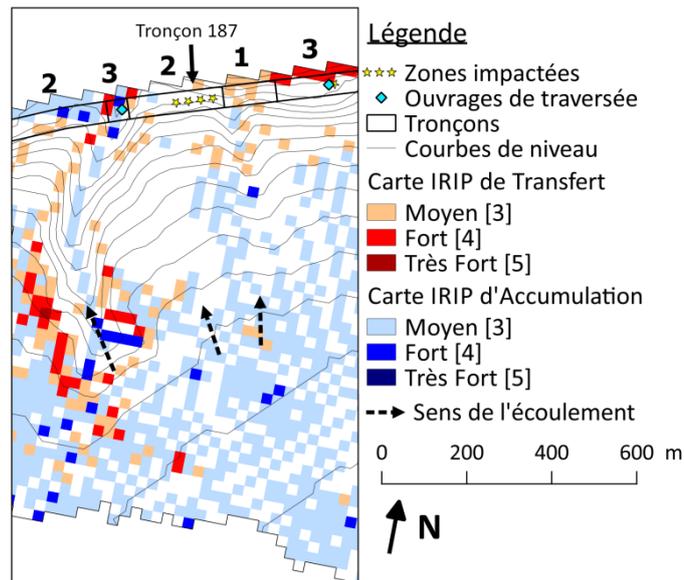


FIGURE II-59 : LES CINQ INDICATEURS BINAIRES DE LA CARTE IRIP D'ACCUMULATION SUR LA MEME ZONE DU TRONÇON 120

#### 2.4.3.3. TRONÇON 187

La Figure II-60 présente le tronçon 187 qui est établi en déblai court et qui a un niveau de vulnérabilité de 2. Ce tronçon a subi un impact de type glissement de déblai dans les années 1980. Assez peu d'informations sont disponibles sur ce désordre, si ce n'est le nom de l'ouvrage en terre et l'étendue du glissement qui fait 15 ml. Pour la localisation précise de l'impact, deux sources donnent deux PK différents à 100 m de différence. Pour les besoins de la base de données d'impacts, le désordre a été localisé par les PK minimums et maximums, ce qui donne une étendue de 100 m, et une note d'incertitude de 1 sur 2 lui a été attribuée. Néanmoins, sur toute la zone du déblai, les cartes IRIP ne semblent pas correspondre aux informations disponibles. Aucune sensibilité particulière ne semble identifiée sur le tronçon ainsi qu'à l'amont. La carte de transfert est décomposée en indicateur binaire afin de mieux comprendre les mécanismes en jeu sur la zone d'après la méthode IRIP. Il est décidé de se focaliser sur la carte de transfert et non d'accumulation, au vu de la configuration de la zone, qui présente des pentes fortes, et du type de désordre, qui est un glissement, potentiellement induit par du ruissellement plutôt intense.



**FIGURE II-60 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 187 QUI A SUBIT UN GLISSEMENT MAIS DONT LES CARTES IRIP NE SEMBLENT PAS PERTINENTES**

La Figure II-61 présente la décomposition de la carte de transfert en cinq indicateurs binaires. Tout d'abord, la carte des ruptures convexes semble pertinente sur les zones au relief bien marqué (le talweg à l'est par exemple) mais elle semble bruitée sur le reste du bassin. La carte des pentes fortes semble cohérente. L'indicateur de production amont, issue de la reclassification de la carte de production, montre assez peu de potentiel de genèse d'eau de surface. Cet indicateur paraît difficile à interpréter. Enfin, Les cartes des axes linéaires et de l'indice de Horton paraissent peu pertinentes. Les axes linéaires apportent peu d'informations, il serait intéressant d'utiliser un indicateur plus pertinent pour l'étude de l'aléa érosion par ruissellement. Davantage de tests sur l'indice de Horton permettraient de comprendre la construction de cette carte. En conclusion, sur les cinq indicateurs, seul l'indicateur des pentes fortes est satisfaisant. Les cartes des ruptures convexes et de la production amont semblent intéressante mais peu cohérentes sur certaines zones. Enfin, les axes linéaires et l'indice de Horton doivent être étudiés en détails afin de proposer des améliorations.

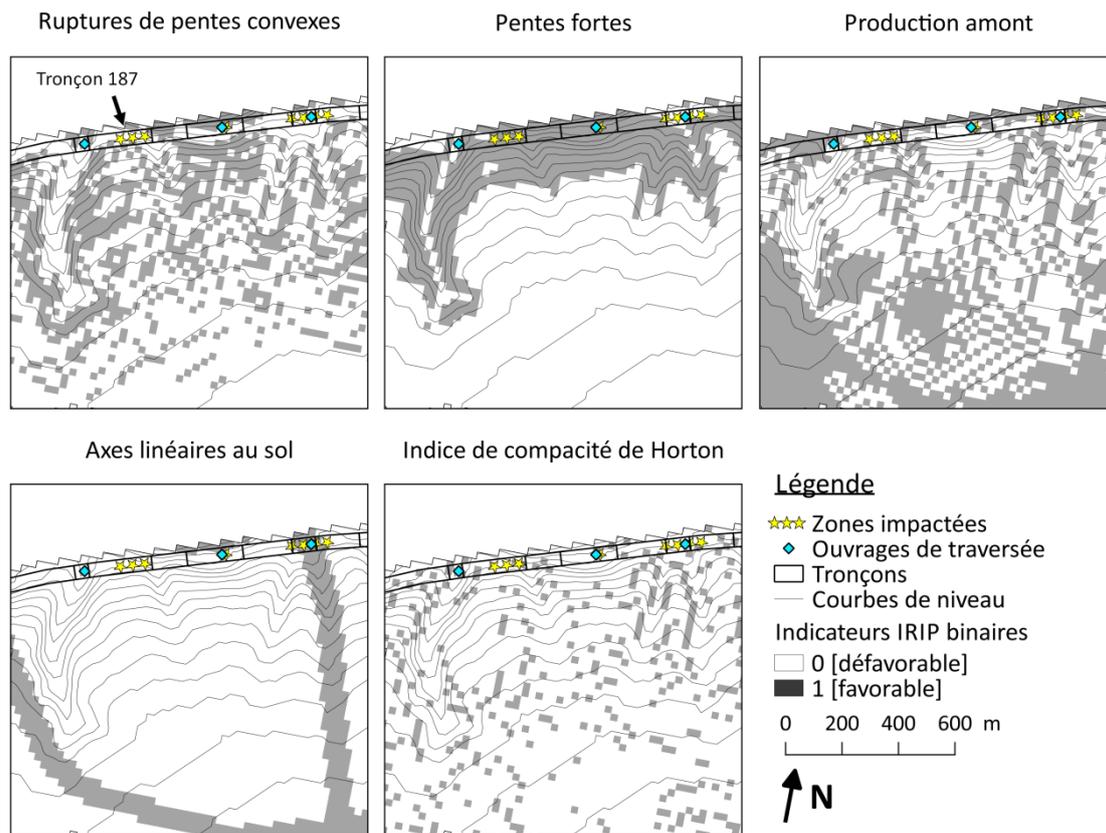


FIGURE II-61 : DECOMPOSITION EN INDICATEURS BINAIRES DE LA CARTE IRIP DE TRANSFERT SUR LE TRONÇON 187

#### 2.4.4. SYNTHÈSE

L'étude de ces six tronçons faux négatifs permet de réajuster les corrélations et les scores des indicateurs de performance pour deux tronçons : le 135 et le 151. Le tronçon 135 est lié à un impact non induit par du ruissellement. Ce tronçon passe donc de faux négatif à vrai négatif. Son tronçon adjacent, également localisé au niveau de l'impact erroné, passe quand à lui de vrai positif à faux positif. Le tronçon 151 est en réalité établi en déblai, son niveau de vulnérabilité n'est pas de 1 mais de 3. Sa corrélation devient donc correcte par rapport à l'information des cartes IRIP. Il passe de faux négatif à vrai positif. Ces modifications seront prises en compte pour la suite de l'évaluation. Les autres tronçons faux négatifs, bien que pouvant être expliqués, sont conservés ainsi, afin de voir si des tests sur la méthode IRIP pourraient améliorer les détections de ces zones.

Pour conclure, ces exemples montrent que la réalisation d'une vérification visuelle est essentielle en complément de l'évaluation statistique. L'évaluation statistique permet d'avoir une indication de la performance globale à l'échelle de la ligne, tandis que l'évaluation visuelle permet de juger la pertinence de l'information spatiale au sein du bassin versant, en dehors de l'emprise ferroviaire. La vérification visuelle permet également de mieux appréhender le fonctionnement de l'évaluation quantitative, les raisons pour lesquelles les corrélations peuvent être correctes ou incorrectes.

Finalement, une mauvaise corrélation peut être due soit à l'influence de l'infrastructure mal représentée dans la prise en compte de la vulnérabilité, soit aux données d'impacts erronées ou imprécises, soit aux cartes IRIP qui ne donnent pas la bonne information. Sur un même tronçon il peut également y avoir un cumul d'imprécision pour les trois paramètres (les cartes IRIP, les données d'infrastructure et les données

d'impacts). L'imprécision peut-être due au choix de la largeur de l'emprise ferroviaire de 50 m, du découpage des tronçons en ouvrages en terre, de la localisation des impacts ainsi que de leur description. A cela s'ajoute l'imprécision liée aux pixels des cartes IRIP d'une résolution de 25 m. certaines corrélations ne sont pas considérées comme correctes pour moins de 100 m de distance, ce qui pourrait être considéré comme une marge d'erreur possible. A l'inverse, il est également possible que certaines corrélations soient correctes justement grâce à des erreurs d'imprécision, bien que ces cas n'aient pas été vus. Sur l'ensemble des 80 km de la zone d'étude, peut-on considérer que ces imprécisions s'équilibrent ? Sont-elles négligeables si les Chi-2 des tests de comparaison sont significatifs ? Pour pallier à l'imprécision des pixels IRIP de 25 m, il serait intéressant d'évaluer la méthode IRIP avec des données topographiques plus fines, permettant de détecter les talus ferroviaires. Si les talus sont détectés, la méthode IRIP pourrait-elle être en mesure de prendre en compte l'influence des talus ferroviaires sur les écoulements de surface ? Sur le principe, si la topographie des talus est identifiée dans le plan de drainage, leur influence devrait être visible.

La décomposition des cartes de transfert et d'accumulation en indicateurs binaires permet de mieux appréhender les effets du paysage qui ont un rôle dans la survenue d'un désordre. Tout d'abord, l'indicateur de production amont semble assez pertinent, au vu de l'occupation du sol et du type de sol, bien qu'assez bruité par endroit. Davantage de tests doivent être effectués afin de s'assurer que ces pixels apportent une réelle information. L'indicateur des ruptures de pentes semble être peu pertinent sur les zones planes. En effet pour le tronçon 15, les ruptures de pentes convexes correspondent à la localisation de l'impact et sont cohérentes avec les courbes de niveau. Par contre, les tronçons 120 et 151 sont situés sur le plateau, sur des zones planes, et la localisation des ruptures de pentes concaves ne semble pas pertinente par rapport à la topographie naturelle. Cette difficulté sur les zones planes peut être due à la méthode de calcul des ruptures de pentes. Cette méthode de calcul semble également très sensible à la qualité du MNT, puisqu'on peut parfois observer un effet « terrasse » le long des courbes de niveau. Concernant la carte des pentes, les quelques exemples étudiés semblent montrer que la distinction entre pente forte (favorable au transfert) et pente faible (favorable à l'accumulation) correspond aux données d'impact sur la voie ferrée. L'indicateur qui combine l'indice de Horton et l'aire drainée pour créer un des cinq indicateurs de la carte accumulation, semble assez peu pertinent. Les aires drainées sont considérées comme favorables à partir d'un seuil beaucoup trop grand pour les petits bassins versants étudiés. Ce seuil pourrait être revu après davantage de tests. Cet indicateur ne montre finalement que l'indice de forme de Horton avec un seuil à 1. L'indice de Horton semble par ailleurs également peu pertinent. Les cartes semblent bruitées, et aucun schéma spatial correspondant à des caractéristiques de surface du territoire ne semble ressortir. L'indice de forme devra être davantage étudié, notamment pour savoir s'il est pertinent de calculer un indicateur géométrique de façon distribuée sur un bassin versant et avec des données topographiques grossières. Concernant l'indice des axes linéaires au sol, il semble apporter peu d'information puisqu'il nécessite d'avoir de la données sur tous les types d'axes linéaires (routes, chemin, drainage, etc.). De plus, la méthode de prise en compte des axes linéaires semble surestimer leur effet sur le transfert du ruissellement (zone tampon autour des axes peut-être trop large). Pour finir, l'indice topographique semble apporter une information pertinente concernant les chemins d'écoulements préférentiels. Cet indicateur semble également informer sur le type d'écoulement, diffus ou concentré. Globalement, il semble y avoir de nombreuses pistes d'amélioration de la méthode IRIP. Néanmoins, des modifications de la méthode IRIP doivent être bien réfléchies au vu du nombre de tests possibles à réaliser. Les propositions de modifications seront intéressantes à comparer aux données d'impact et d'infrastructure sur les zones déjà étudiées pour savoir si les mauvaises corrélations sont effectivement liées à la méthode IRIP.

Ces exemples rappellent le fait que les données de validation sont des données approchées, qui ne sont pas complètement précises, ni exhaustives. Ainsi, un taux de probabilité de détection de 100 % n'est pas possible et n'est pas souhaitable. Certaines corrélations peuvent être correctes pour de mauvaises raisons, et certaines corrélations pourtant incorrectes peuvent permettre de valider les cartes IRIP. Se rapprocher des scores parfaits pour les indicateurs permet déjà de juger de la pertinence de la méthode IRIP. L'utilisation de données approchées, tels de les impacts, ne pourra jamais permettre de valider totalement la méthode IRIP. En revanche ce type de données permet de mieux appréhender ce que peut être l'utilisation de la méthode IRIP dans le contexte opérationnel ferroviaire.

Pour la suite de l'évaluation de la méthode IRIP, seule la méthode B de combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité sera utilisée. Elle semble en effet plus pertinente. Bien que les probabilités de détection soient légèrement inférieures que pour la méthode A, la précision est plus proche de 1, le Chi-2 est toujours significatif et le coefficient Phi montre une relation plus forte entre les cartes IRIP et les données d'évaluation. Bien qu'il serait intéressant de continuer à comparer les méthodes A et B, et de comparer avec et sans prise en compte de la vulnérabilité, il est nécessaire de faire des choix sur les éléments à tester. Générer trop de résultats peut rendre difficile leur interprétation.

## 2.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, une méthode de caractérisation de la vulnérabilité de la voie ferrée face au ruissellement a été proposée. Pour y parvenir un long travail de capitalisation des données sur l'infrastructure a été effectué, et plusieurs couches SIG ont été constituées. L'expertise interne du gestionnaire d'infrastructure et l'analyse croisée de ces données sur l'infrastructure et des données d'impacts a permis de construire un arbre de vulnérabilité sur 5 niveaux, de 0 à 4. Cet arbre de vulnérabilité prend en compte, le type de profil, la longueur de l'ouvrage en terre et la présence ou non d'un pont-route, d'un passage à niveau ou d'une tête de tunnel. Cet arbre de vulnérabilité est simple, il ne prend pas en compte tous les éléments de l'infrastructure, ni les configurations locales, mais il a été construit de façon à pouvoir être intégré à la méthode de comparaison entre les cartes IRIP et les données d'impacts. Cette arbre pourra éventuellement par la suite être complété selon les usages et selon les expertises des acteurs du ferroviaire. Pour analyser la corrélation entre ces trois paramètres d'aléa, de risque et de vulnérabilité, les niveaux IRIP sont d'abord combinés avec les niveaux de vulnérabilité, puis ils sont comparés aux données d'impact. Deux méthodes de combinaison sont proposées (A et B). Ces deux méthodes considèrent que plus une zone est vulnérable, moins un fort niveau d'aléa est requis pour engendrer un impact. La méthode A ne prend en compte que les niveaux IRIP 3 et 4, tandis que la méthode B permet de considérer les niveaux IRIP 2 et 5. Plusieurs cycles de comparaison permettent de prendre en compte d'abord seulement la vulnérabilité de l'infrastructure, puis les actions de mitigation (les ouvrages hydrauliques de protection), et ensuite les actions de résilience (les tournées intempéries). Finalement, les résultats de l'évaluation statistique montrent que la méthode B de combinaison aléa-vulnérabilité permet de détecter plus de vrais négatifs, et la considération des actions de mitigations et de résilience permet d'expliquer de nombreuses fausses alarmes. L'analyse détaillée des corrélations de type faux négatif, permet de justifier certaines corrélations par l'imprécision des données et permet aussi de faire ressortir des indicateurs IRIP potentiellement problématiques dans le contexte d'étude.

Pour conclure seuls les tests avec la méthode B de combinaison aléa-vulnérabilité sont retenus. D'abord pour simplifier l'interprétation des résultats, mais aussi parce qu'ils sont les plus pertinents pour estimer la performance de la méthode IRIP. En effet, la méthode B permet de mieux discerner les zones vulnérables des zones non vulnérables et discrimine davantage les niveaux IRIP. Ceci permet de

pleinement exploiter les nuances dans l'information apporté par IRIP. Il est d'ailleurs observé que de nombreux tronçons peu vulnérables, souvent des profils rasant avec un niveau de vulnérabilité de 1, sont considérés comme vrai négatifs, car n'ayant pas de niveaux IRIP à 5 dans leur emprise. L'analyse détaillée de plusieurs zones a permis également de confirmer l'importance de tenir compte des ouvrages hydrauliques de protection et des zones de tournées intempéries dans l'évaluation des cartes IRIP. Prendre en compte seulement la vulnérabilité est intéressant pour faire des tests sur la méthode d'évaluation, mais pour obtenir des estimations quantitatives sur la valeur des cartes IRIP, les données sur les actions de mitigation et de résilience sont indispensables.

Les résultats à retenir concernant l'évaluation de la méthode IRIP sont présentés dans les Tableau II-33 et Tableau II-34. Ces résultats tiennent compte des modifications effectuées grâce à l'analyse des faux négatifs. La combinaison de la méthode IRIP avec la configuration de l'infrastructure ferroviaire permet donc de détecter entre 90 et 100 % des zones à risques, avec entre 30 et 60 % de fausses détections. La précision est entre 0,5 et 0,8, signifiant que 50 à 80 % des prédictions sont justes en considérant également les tronçons vrais négatifs. Le nombre de zones considéré comme à risques est légèrement surestimé à l'échelle de la zone d'étude (biais de 1,3 à 2,3). La dépendance statistique entre les données d'impacts, les données sur l'infrastructure et les cartes IRIP est extrêmement significative ( $\chi^2 > 10,83$ ) et le coefficient Phi varie de 0,3 à 0,5, montrant une relation moyennement intense, ce qui est déjà satisfaisant au vu des Phi obtenus au premier chapitre et sachant que le score parfait de Phi de 1 ne pourra jamais être obtenu avec des données approchées.

**TABLEAU II-33 : RESULTATS A RETENIR POUR L'EVALUATION DE LA METHODE IRIP EN TERMES DE COMPTAGE DES CORRELATIONS**

Combinaison aléa - vulnérabilité	Comptage des corrélations				V+	F+	F-	V-
	Vulnérabilité	Actions de mitigation	Actions de résilience					
Méthode B	Avec	Sans	Sans		54	79	5	44
Méthode B	Avec	Avec	Sans		85	48	5	44
Méthode B	Avec	Avec	Avec		95	38	5	44

**TABLEAU II-34: RESULTATS A RETENIR DE L'EVALUATION DE LA METHODE IRIP EN TERMES D'INDICATEURS DE PERFORMANCE**

Combinaison aléa - vulnérabilité	Comptage des corrélations				POD	FAR	Précis.	Biais	X <sup>2</sup>	Φ
	Vulnérabilité	Actions de mitigation	Actions de résilience							
Méthode B	Avec	Sans	Sans		0,9	0,6	0,5	2,3	15	0,3
Méthode B	Avec	Avec	Sans		0,9	0,4	0,7	1,5	41	0,5
Méthode B	Avec	Avec	Avec		1	0,3	0,8	1,3	54	0,5

A l'issue de ce second chapitre, une estimation chiffrée de la méthode IRIP avec son paramétrage par défaut a été proposée. Néanmoins, l'analyse détaillée des faux négatifs, a permis de mettre en lumière que dans certains cas, la méthode IRIP semble peu pertinente. Pour certains tronçons, les cartes IRIP ont été décomposées en indicateurs binaires, montrant plusieurs indicateurs comme problématiques, tels que l'indicateur des ruptures de pente, l'indicateur des axes linéaires au sol, et l'indicateur de compacité. Des tests doivent être effectués sur ces indicateurs afin de confirmer leurs défauts et de proposer des alternatives. Les alternatives seront évaluées grâce à la méthode d'évaluation élaborée, par comparaison aux données d'impacts et d'infrastructure, afin de s'assurer du réel apport des modifications. Ces tests d'amélioration de la méthode IRIP font l'objet du chapitre suivant.



## CHAPITRE 3 : PROPOSITIONS DE DEVELOPPEMENTS POUR LA METHODE IRIP

### 3.1. INTRODUCTION

L'évaluation de la méthode IRIP par comparaison avec les données d'impacts sur la voie ferrée a permis de donner une estimation de la capacité à identifier les zones exposées à l'aléa ruissellement. La capitalisation des données historiques sur les impacts a permis de réduire autant que possible la non exhaustivité de la base de données d'impacts. La combinaison des cartes IRIP avec une estimation de la vulnérabilité de la voie ferrée a permis de réduire le biais entre les données d'aléa et les données de risques. Au vu des données actuellement disponibles, les possibilités d'évaluation de la méthode IRIP atteignent leurs limites. Le seul paramètre que l'on peut encore faire varier est la méthode IRIP elle-même.

Ainsi, dans ce chapitre, ce sont les données d'impacts et d'infrastructure qui vont être utilisées pour tenter d'améliorer la méthode IRIP. Les indicateurs de performance vont servir de repères pour estimer si une modification améliore ou non la pertinence de la méthode par défaut. De multiples tests sont possibles sur la méthode IRIP. Par exemple, il est possible de modifier les choix des indicateurs, leurs méthodes de calcul, leurs méthodes de combinaison, leurs seuils de valeurs favorables, etc. Tous les tests ne pouvant pas être effectués dans le temps imparti, des choix ont été faits, s'appuyant sur les résultats des analyses détaillées, des deux chapitres précédents. Des hypothèses ont été émises sur certains indicateurs qui semblent problématiques. Il s'agit à présent d'approfondir ces indicateurs, leurs méthodes de construction, leurs défauts et si besoin, de proposer des améliorations. Au début de ce travail, une analyse de la sensibilité des seuils, définissant si un indicateur est favorable ou non au ruissellement, avait été évoquée. Nous ne l'abordons finalement pas car, d'une part les seuils sont souvent définis par classification, en relatif sur la zone d'étude et pas dans l'absolu. D'autre part, si des informations sont disponibles localement, il est toujours possible de les inclure dans la paramétrisation de la méthode (voir des exemples dans la partie 3). Il nous a paru plus intéressant de nous focaliser sur des indicateurs précis, afin de bien appréhender leur rôle dans la méthode IRIP et de proposer des alternatives, dont l'influence peut être vérifiée.

Les résultats des chapitres précédents ont montré que certains indicateurs pourraient ne pas être pertinents, il s'agit notamment de l'indicateur des ruptures de pentes, l'indicateur de compacité et l'indicateur des axes linéaires au sol. Le travail présenté dans cette section se focalise donc sur ces trois indicateurs. L'objectif est de mieux appréhender les défauts qu'ils génèrent et de proposer des alternatives. D'autre part, une comparaison des cartes IRIP construites avec différents MNT, de différentes résolutions, est présentée. L'objectif est de vérifier si les alternatives proposées aux indicateurs problématiques sont toujours valables en changeant de résolution. Le MNT étant la donnée de base pour une grande partie des indicateurs des cartes de transfert et d'accumulation, il semble, en

effet, important d'étudier l'influence de la résolution sur les cartes IRIP. Ainsi, cinq résolutions différentes sont comparées de façon qualitative. Davantage d'observations sont apportées pour les cartes réalisées avec des données haute résolution, afin de voir si la méthode IRIP peut détecter l'influence de la macro-topographie sur les écoulements.

Pour rappel, le Tableau II-35 présente le paramétrage par défaut de la méthode IRIP. Pour chaque carte, production, transfert et accumulation sont listés les indicateurs, ainsi que leurs seuils de favorabilité (attribution de la note de 1). Pour plus de détails sur la construction des cartes IRIP avec le paramétrage par défaut se reporter à la partie 1, section 3.2.

**TABLEAU II-35 : SYNTHÈSE DU PARAMÉTRAGE DE LA MÉTHODE IRIP PAR DÉFAUT AVEC LES INDICATEURS ET LES SEUILS UTILISÉS**

Cartes IRIP	Indicateurs	Seuils de favorabilité (note de 1)
PROD	Perméabilité	$K_s < 10^{-6} \text{ m/s} + \text{ZU}$
	Erodabilité	Erodabilité $\geq 3 - \text{ZU}$
	Épaisseur	Épaisseur $\leq 50 \text{ cm} + \text{ZU}$
	Occupation du sol	Zones urbaines (ZU) et agricoles
	Pentes fortes ou indice topographique	Algorithme de classification
TRANS	Production amont	Mode du bassin versant amont $\geq 3$
	Pentes fortes	Algorithme de classification
	Ruptures de pentes convexes	Mode des pentes du bassin amont $<$ pente locale
	Compacité	Indice de Horton $\geq 1$
	Axes linéaires au sol	Présence d'un axe + zone tampon $2 \times$ résolution MNT
ACC	Production amont	Mode du bassin versant amont $\geq 3$
	Pentes faibles	Algorithme de classification
	Ruptures de pentes concaves	Mode des pentes du bassin amont $>$ pente locale
	Compacité ou aire drainée	Indice de Horton $\geq 1$ OU Aire drainée $\geq 1 \text{ km}^2$
	Indice topographique	Algorithme de classification

L'objectif des modifications testées dans ce chapitre est d'obtenir un paramétrage de la méthode IRIP plus performant, en termes de détection des zones impactées, mais aussi plus pertinent, en termes de représentations spatialisées. Cependant, la modification de certains indicateurs pourra éventuellement engendrer des résultats d'évaluation moins bons que ceux obtenus avec la paramétrisation par défaut. Ceci ne signifie pas pour autant que les propositions d'amélioration ne sont pas satisfaisantes. Ceci peut aussi signifier que les cartes par défaut donnaient certaines bonnes corrélations à tort. La pertinence d'un nouvel indicateur sera donc d'abord jugée sur sa cohérence en termes de méthode de construction, et sur sa pertinence en termes de représentation cartographique. La méthode d'évaluation développée dans les chapitres précédents sera ensuite appliquée aux cartes IRIP modifiées, et les résultats permettront d'alimenter les discussions. Néanmoins, si les indicateurs sont vraiment plus pertinents, les résultats de l'évaluation devraient s'améliorer. On devrait observer, au moins, une baisse du nombre de faux positifs, si ce n'est une augmentation du nombre de bonnes détections. Par ailleurs, les résultats de l'évaluation précédemment obtenus sont déjà satisfaisants, avec un taux de détection proche des 100 % et un taux de fausses alarmes entre 30 et 40 %. Si ces scores n'évoluent pas, mais que les cartes IRIP sont visuellement plus pertinentes et plus lisibles, ceci pourra être considéré comme une amélioration.

### 3.2. L'INDICATEUR DES RUPTURES DE PENTES

#### 3.2.1. DEFANTS LIES A L'INDICATEUR DES RUPTURES DE PENTES

L'indicateur des ruptures de pentes est utilisé dans les cartes de transfert et d'accumulation. Pour la carte de transfert, ce sont les ruptures de pentes convexes qui sont considérées comme favorables au ruissellement (attribution de la note de 1). Les surfaces convexes dans le paysage sont considérées comme des zones où le ruissellement peut potentiellement, accélérer, gagner en puissance et provoquer de l'érosion, des incisions dans le sol. Pour la carte d'accumulation, les ruptures de pentes concaves sont considérées comme favorables. Elles sont des zones où le ruissellement peut potentiellement ralentir et où la hauteur d'eau peut augmenter localement. On peut observer des zones concaves dans les fonds de vallons où le ruissellement se concentre, s'accumule. On peut également observer des zones concaves en versant où les sédiments (même grossiers) contenus dans l'eau de ruissellement sont susceptibles d'être déposés.

La prise en compte de telles caractéristiques de surface est pertinente pour l'étude du ruissellement, néanmoins, la carte des ruptures de pentes issue du logiciel iRIP© semble problématique. Par exemple, l'étude du tronçon 120 a montré que l'indicateur des ruptures de pentes concaves indique des motifs non cohérents. La Figure II-62 présente l'indicateur des ruptures de pentes concaves sur cette zone, et en effet, les pixels à 1 sont localisés sur les courbes de niveau (les courbes de niveau sur la Figure sont issues du même MNT que celui utilisé pour calculer les ruptures de pentes). La carte semble fortement influencée par la qualité du MNT. Par ailleurs, l'étude du tronçon 15, qui est une zone au relief plus marqué, a montré que les ruptures de pentes convexes ne semblent pas non plus satisfaisantes. La Figure II-63 présente l'indicateur des ruptures de pentes convexes sur cette zone. On observe que la rupture importante au niveau de la vallée est bien détectée, en revanche l'amont présente des pixels favorables (1), alors qu'il ne semble pas y avoir de ruptures de pentes convexes au vu des courbes de niveau. L'indicateur semble bruité sur les zones plus planes.

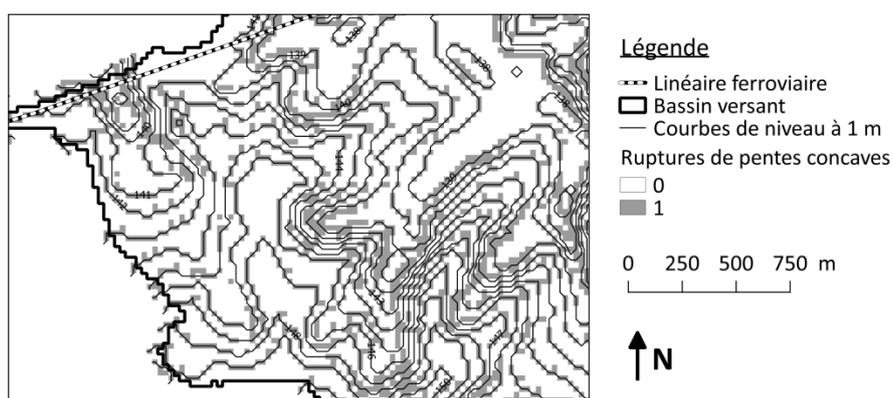


FIGURE II-62 : INDICATEUR DES RUPTURES DE PENTES CONCAVES, SUR UNE ZONE PLANE, INFLUENCE PAR LA QUALITE DU MNT (ZONE DU TRONÇON 120)

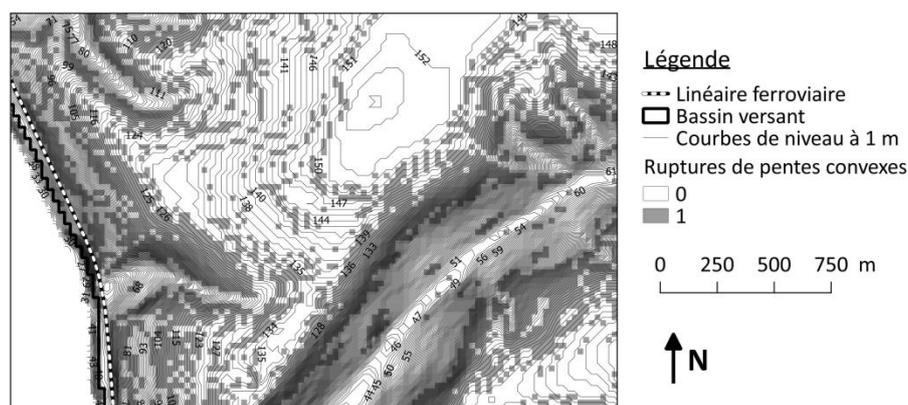


FIGURE II-63 : INDICATEUR DES RUPTURES DE PENTES CONVEXES, SUR UNE ZONE DE RELIEF, OU LES RUPTURES IMPORTANTES SONT DETECTES (ZONE DU TRONÇON 15)

Ces défauts sur les cartes des ruptures de pentes convexes et concaves sont soit liés à la méthode de calcul, soit liés à la qualité du MNT. Pour tester ces deux hypothèses, deux méthodes de calcul sont étudiées, et appliquées sur deux MNT différents. Les deux méthodes testées sont la méthode du logiciel iRIP©, qui compare les pentes du bassin amont à la pente locale, et la fonction « r.param.scale » du logiciel GRASS GIS, qui calcul la courbure locale. Les deux MNT utilisés sont le MNT initial utilisé dans les chapitres précédents, celui de la BD ALTI® de l'IGN d'une résolution de 25 m et le MNT SRTM d'une résolution de 30 m, produit en 2000 par la NASA et la NGA<sup>12</sup>.

### 3.2.2. COMPARAISON DE DEUX METHODES DE CALCUL DES RUPTURES DE PENTE

#### 3.2.2.1. METHODE DU LOGICIEL IRIP© PAR COMPARAISON AU BASSIN AMONT

La méthode de calcul des ruptures de pentes, implémentée actuellement dans le logiciel iRIP©, compare la valeur de pente locale en un pixel au mode statistique (la valeur la plus présente dans l'échantillon) des valeurs de pentes dans le bassin amont relatif au pixel. Afin de bien identifier une valeur modale représentative, la carte des pentes est d'abord classifiée en 40 classes de pente, grâce à un algorithme de classification (la fonction « cluster analysis for grids » du logiciel SAGA GIS). C'est donc la valeur de la classe la plus présente dans le bassin amont qui est comparée à la pente locale. Enfin, si le mode du bassin amont est supérieur à la pente locale, le pixel est considéré comme ayant une rupture de pente concave. Si le mode est inférieur à la pente locale, le pixel est considéré comme rupture convexe.

#### 3.2.2.2. METHODE DU LOGICIEL GRASS GIS PAR CALCUL DU RAYON DE COURBURE

La deuxième méthode de calcul des ruptures de pentes testée est celle utilisée dans le logiciel GRASS GIS via la fonction « r.param.scale » (GRASS Development Team, 2016). Cette fonction utilise une méthode plus classique qui s'appuie sur des algorithmes disponibles dans de nombreux logiciels SIG. Cet algorithme permet pour chaque pixel, de détecter l'axe de plus grande pente, et sur cet axe, de calculer la courbure par rapport au plan défini par les valeurs d'altitude (en z). Si le rayon est négatif, la zone est concave, si le rayon est positif, la zone est convexe. Le nombre de pixels à considérer pour identifier l'axe de plus grande pente et pour calculer la courbure peut être choisi. Ce nombre doit être impair, il détermine le nombre de pixels à considérer de part et d'autre du pixel d'étude. Par exemple, si le nombre est de 3 (choix minimum possible), l'algorithme calculera le rayon de courbure sur le pixel d'étude plus un

<sup>12</sup> <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc>

pixel avant et un pixel après. S'il est de 11, l'algorithme calculera le rayon sur cinq pixels avant et cinq pixels après le pixel d'étude. Plus le nombre de pixel à prendre en compte est grand, moins la carte des ruptures de pente prend en compte les petites irrégularités de la topographie, et plus elle apparaît lissée. Dans le cadre de l'étude, les résolutions des MNT testés étant de 25 et 30 m, un choix de 3 pixels paraît cohérent avec la réalité, c'est-à-dire que la courbure sera calculée sur un axe de 75 à 90 m de long. Prendre un seuil plus grand ferait perdre des informations. Un seuil plus petit n'est pas possible pour ces résolutions. En cas d'utilisation d'une résolution plus fine, la longueur de l'axe pour calculer la courbure devrait tout de même rester aux alentours de 50 à 150 m. Ce seuil reste à discuter, il doit être basé sur l'expertise mais doit rester cohérent avec l'échelle spatiale du phénomène de ruissellement. Pour finir, les courbures sont considérées planes pour des valeurs autour de zéro. La documentation du logiciel GRASS GIS indique que par défaut le seuil pour déterminer une zone comme plane est de  $\pm 0,0001$  (GRASS Development Team, 2016). Ce seuil par défaut sera donc conservé dans le cadre de ce travail mais peut également être discuté.

### 3.2.2.3. CALCUL SUR LE MNT IGN 25 M

La Figure II-64 présente les cartes de ruptures de pentes calculées avec la méthode implémentée dans le logiciel iRIP© (à gauche) et la méthode du logiciel GRASS GIS (à droite) sur le MNT de le BD ALTI® de l'IGN de résolution 25 m. On observe sur les cartes que les deux méthodes sont influencées par la qualité du MNT. En effet, ce MNT a des valeurs d'altitude arrondies au mètre, ce qui engendre un effet « terrasse ». Ceci est dû à la méthode de construction de la donnée, qui a été réalisée, pour cette zone, par numérisation des cartes IGN. De petites zones de ruptures de pentes très régulières sont donc détectées par la méthode de calcul au niveau des courbes de niveau. Les principaux talwegs sont néanmoins bien repérés par des ruptures concaves (en bleu) dans les fonds de talwegs et par des ruptures convexes sur les coteaux (en rouge). En revanche, seuls les artefacts du MNT ressortent sur les plateaux. Par ailleurs, la méthode de calcul d'iRIP© semble avoir des difficultés particulièrement avec les ruptures convexes. Les plateaux ne présentent presque que du bleu, c'est à dire des ruptures concaves. En conclusion, les artefacts liés au MNT ne permettent pas de bien comparer les deux méthodes de calcul des ruptures de pente.

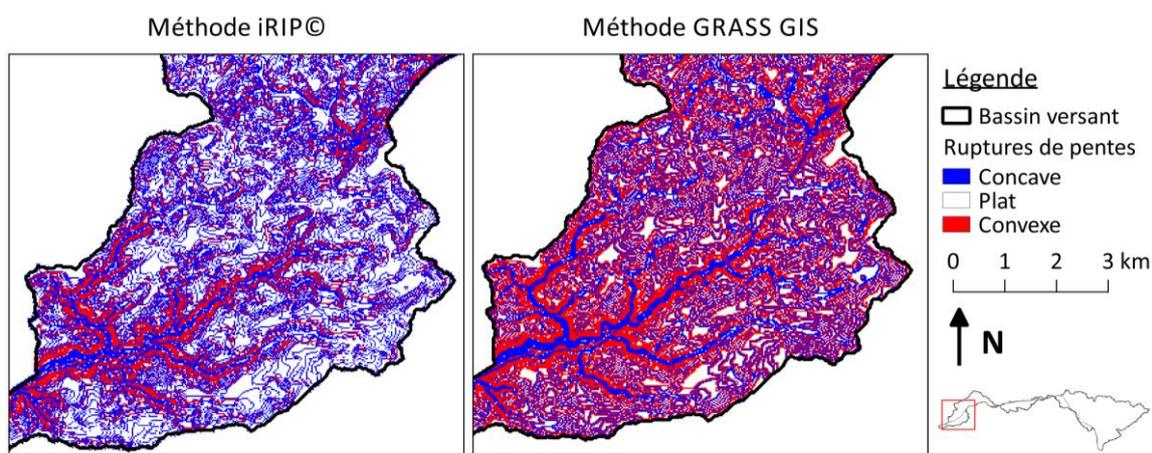


FIGURE II-64 : COMPARAISON DES CARTES DE RUPTURES DE PENTES OBTENUES AVEC LES DEUX METHODES DE CALCUL SUR LE MNT D'UNE RESOLUTION DE 25 M

3.2.2.4. CALCUL SUR LE MNT SRTM 30 M

La Figure II-65 présente, sur la même zone, les cartes des ruptures de pentes calculées avec les deux méthodes, sur le MNT de résolution 30 m. Ce MNT, acquis par satellite via des techniques d'interférométrie Radar, possède des valeurs altimétriques avec plusieurs décimales, il n'y a donc pas cet effet « terrasse » observé avec le MNT de l'IGN. Ces cartes permettent donc de mieux appréhender la différence entre les deux méthodes. Tout d'abord, le réseau de talweg semble mieux détecté avec la méthode de GRASS GIS. Le réseau de talwegs est d'ailleurs très difficilement identifiable sur la carte issue du logiciel iRIP©. Alors que sur la carte créée avec GRASS GIS, les fonds de talwegs (en bleu) et les coteaux (en rouge) sont bien détectés, tout en détectant également des petites zones de rupture sur les plateaux. Ces informations ne sont pas repérables sur la carte créée avec iRIP©.

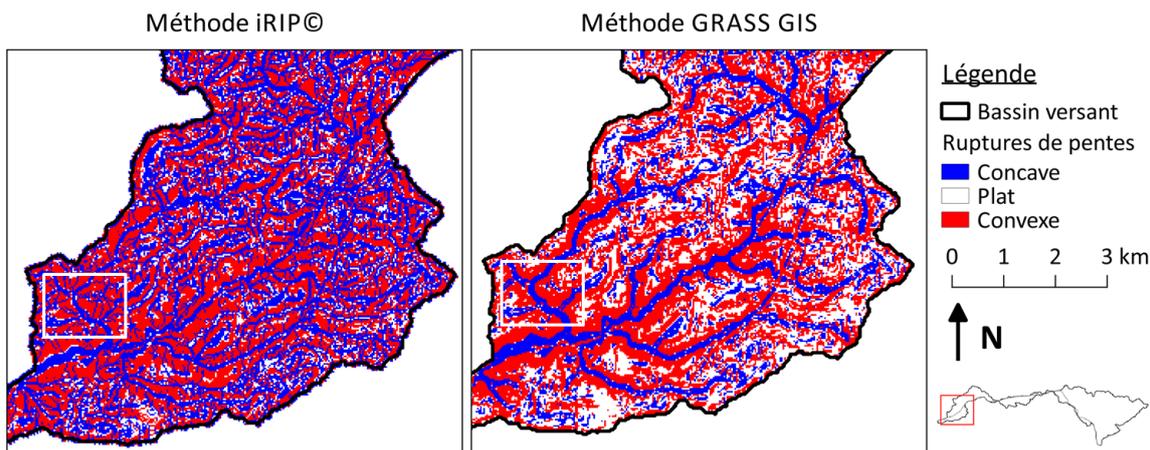


FIGURE II-65 : COMPARAISON DES CARTES DE RUPTURES DE PENTES OBTENUES AVEC DEUX METHODES DE CALCUL DIFFERENTES SUR LE MNT DU SRTM D'UNE RESOLUTION DE 30 M

La Figure II-66 présente un agrandissement des cartes précédentes sur une petite zone. Les courbes de niveau sont issues du MNT SRTM également. Chaque ligne montre un changement d'altitude de 1 m. Les fonds de talwegs sont bien identifiés par les deux méthodes en tant que ruptures concaves. Par contre, les ruptures convexes semblent être surestimées par le logiciel iRIP© (presque tout le reste de la carte est en rouge), alors que la méthode GRASS GIS permet de mieux détecter les zones planes. De plus, la méthode du logiciel iRIP© met en évidence des ruptures de pentes concaves au niveau de zones qui semblent plutôt être des crêtes (identifiées par les flèches jaunes).

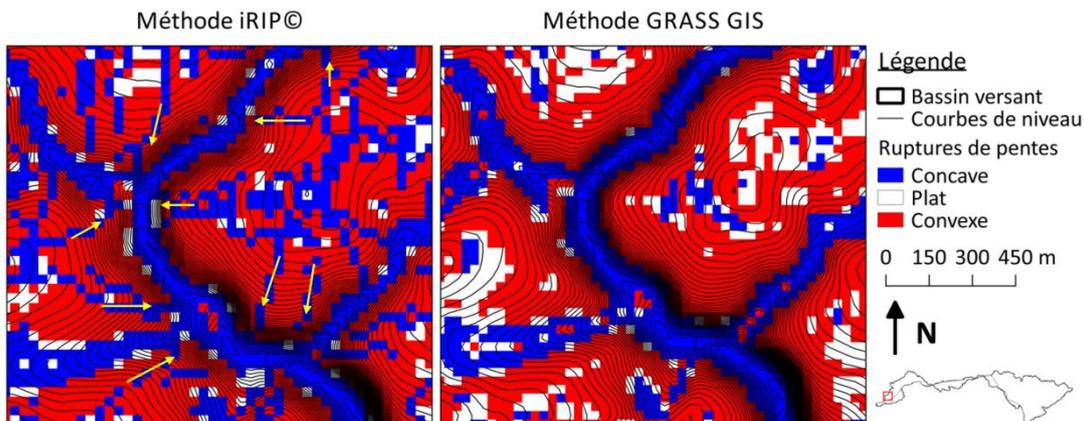


FIGURE II-66 : COMPARAISON DETAILLEE SUR UNE PETITE ZONE DES DEUX METHODES DE CALCUL

#### 3.2.2.5. SYNTHÈSE

Initialement, la méthode de calcul par comparaison au bassin amont, implémenté dans le logiciel iRIP©, a été choisie afin de suivre un raisonnement à l'échelle du bassin versant. Pour chaque pixel, l'ensemble du bassin amont est comparé à la pente locale. On peut se poser néanmoins la question de la pertinence de cette approche. Ce qui est important finalement est de détecter une singularité locale dans le paysage, quelles que soient les caractéristiques du bassin amont. De plus, les cartes produites avec la fonction « r.param.scale » de GRASS GIS semble plus cohérentes par rapport à la réalité, et les cartes produites avec iRIP© semblent moins performantes en indiquant des zones concaves au niveau de zones de crêtes.

Néanmoins, le problème des artefacts liés au MNT de l'IGN n'est pas résolu. Pour les besoins de l'évaluation d'IRIP, nous avons tenté de supprimer ces artefacts, afin de mieux évaluer la pertinence globale de la méthode IRIP et de ne pas être gêné par des pixels détectés à tort comme sensibles au ruissellement. La suppression des artefacts liés au MNT est réalisée seulement sur la carte des ruptures de pente obtenue avec la méthode de GRASS GIS, d'une part car cette méthode est jugée plus pertinente et d'autre part car l'approche est plus simple et donc les cartes plus simples à modifier. Il serait également possible de réaliser des traitements directement sur le MNT, par exemple, en donnant des décimales aux valeurs d'altitude pour éviter l'effet « terrasse », via des techniques d'interpolation. Néanmoins, les contraintes de technique et de temps nous imposent de travailler directement sur la carte des ruptures de pentes.

#### 3.2.2.6. SUPPRESSION DES ARTEFACTS LIÉS AU MNT

La Figure II-67 montre la fréquence de distribution des valeurs de courbure sur l'ensemble de la zone d'étude. Les valeurs de pixels négatifs montrent les zones concaves, et les valeurs positives montrent les zones convexes. Un bruitage lié aux artefacts semble visible sur l'histogramme, par une répartition instable des courbures, notamment pour les valeurs proches de zéro. Il est fait l'hypothèse qu'une distribution de fréquences non continue, instable, traduit des effets de seuils artificiels (dus à la précision métrique). Pour les supprimer, seulement les valeurs de courbure à partir de  $\pm 0.0018$  seront considérées ( $\pm 0.0018$  étant la valeur pour laquelle les instabilités semblent disparaître). Cette méthode est peu précise et elle supprime des petites zones de courbures réelles dans le paysage. Finalement, il sera fait l'hypothèse pour ce test, que seules les courbures de pentes importantes sont prise en compte. La Figure II-68 présente la carte des ruptures de pentes calculées avec GRASS GIS, avant et après suppression des artefacts.

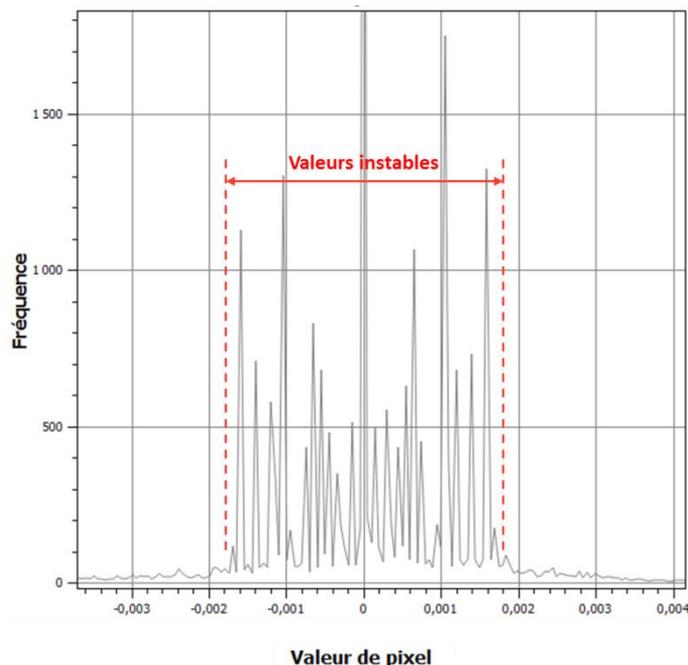


FIGURE II-67 : HISTOGRAMME DES VALEURS DE COURBURES DE PENTES AVEC LA METHODE DU LOGICIEL GRASS GIS SUR L'ENSEMBLE DE LA ZONE D'ETUDE

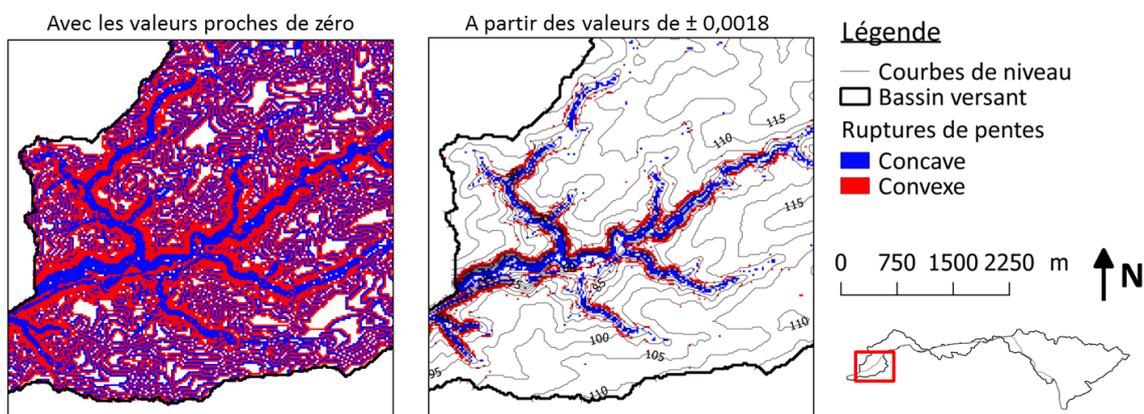


FIGURE II-68 : CARTES DES RUPTURES DE PENTES CALCULEES AVEC GRASS GIS AVANT ET APRES LA SUPPRESSION DES ARTEFACTS

### 3.2.3. RESULTATS SUR L'EVALUATION DE LA METHODE IRIP

Cette section présente la comparaison des cartes IRIP (transfert et accumulation) réalisées avec la méthode IRIP par défaut et avec la méthode IRIP modifiée au niveau des indicateurs de ruptures de pentes concaves et convexes. Pour rappel, ce nouvel indicateur des ruptures de pente est réalisé avec la fonction « r.param.scale » de GRASS GIS et les artefacts liés au MNT ont été supprimés. La comparaison est qualitative et quantitative. Dans un premier temps, les cartes IRIP sont comparées visuellement de façon globale, puis, la méthode d'évaluation par comparaison aux données d'impacts est appliquée. L'objectif est de mieux appréhender l'influence de ce nouvel indicateur des ruptures de pentes sur les cartes finales et de confirmer ou non son utilisation dans la suite du chapitre.

#### 3.2.3.1. RESULTATS CARTOGRAPHIQUES

Les cartes IRIP de transfert et d'accumulation réalisées avec la méthode par défaut (à gauche) et avec l'indicateur des ruptures de pentes modifié (à droite) sont présentées Figure II-69 et Figure II-70. La comparaison se fait sur une zone réduite du bassin versant afin de bien voir les détails des cartes. Globalement, les deux cartes de transfert et d'accumulation semble moins bruitées et plus lisibles. On observe sur la carte de transfert la petite vallée sèche (à l'amont de la rivière Saint-Laurent) ainsi que le début du réseau de talwegs, avec des niveaux 3 à 5. Le reste du bassin met en avant les axes linéaires au sol avec un niveau supplémentaire (l'ensemble du plateau passent de 2 à 3 au niveau des routes). Les niveaux 5 sont très rares. De manière générale, la carte de transfert est très faible, elle ne montre que peu d'informations. La grande majorité de la zone d'étude possède des niveaux inférieurs ou égaux à 2. Concernant la carte d'accumulation, l'amélioration semble notable. La majeure partie du plateau passe des niveaux 3 et 4 à des niveaux 2 et 3. Certaines petites ruptures dans le paysage ne sont plus détectées mais la suppression des artefacts a nettement amélioré la lisibilité de la carte d'accumulation. Notamment les zones d'écoulement concentré sont plus facilement identifiables avec des niveaux 4 et 5. On observe à présent des zones d'accumulation en versant qui n'étaient pas identifiables sur la carte par défaut, il sera intéressant par la suite de voir si ces zones sont bien réelles dans le paysage.

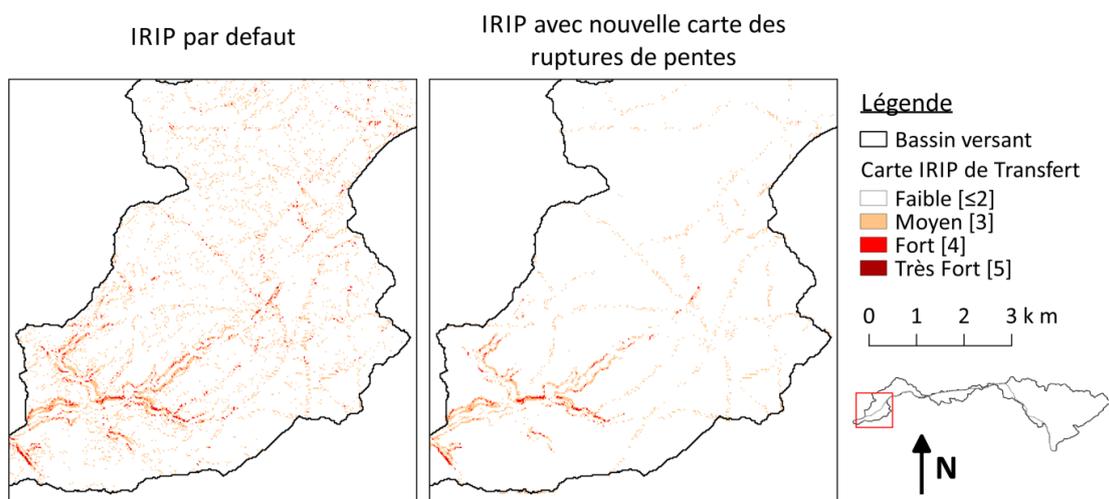


FIGURE II-69 : COMPARAISON DES CARTES IRIP DE TRANSFERT AVEC LA METHODE IRIP PAR DEFAULT ET AVEC LA METHODE DE CALCUL DES RUPTURES DE PENTE DE GRASS GIS ET APRES SUPPRESSION DES ARTEFACTS

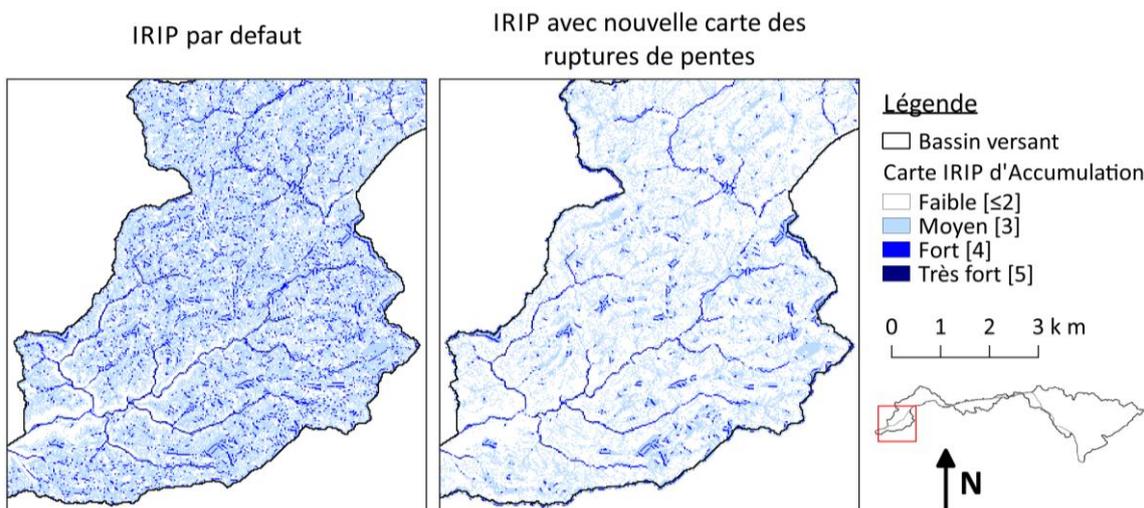


FIGURE II-70 : COMPARAISON DES CARTES IRIP D'ACCUMULATION AVEC LA METHODE IRIP PAR DEFAULT ET AVEC LA METHODE DE CALCUL DES RUPTURES DE PENTE DE GRASS GIS POUR LAQUELLE LES ARTEFACTS ONT ETE SUPPRIMES

## 3.2.3.2. RESULTATS STATISTIQUES

Les résultats de la méthode d'évaluation pour les deux paramétrages, IRIP par défaut et IRIP dont l'indicateur des ruptures de pentes a été modifié, sont présentés Tableau II-36 et Tableau II-37. Le premier tableau présente le détail des tableaux de contingence, les nombres de tronçons par type de corrélation. Le second tableau présente les six indicateurs de performance calculés sur la base du tableau de contingence. Ces résultats ont été obtenus en utilisant la méthode B de combinaison aléa-vulnérabilité et en prenant en compte la vulnérabilité et les actions de mitigation. Les résultats obtenus en prenant en compte les actions de résilience et seulement la vulnérabilité sont présentés en Annexe A.

**TABLEAU II-36 : NOMBRES DE TRONÇONS POUR CHAQUE TYPE DE CORRELATION POUR LES CARTES DES RUPTURES DE PENTES REALISEES AVEC LES LOGICIELS iRIP© ET GRASS GIS SANS LES ARTEFACTS**

Paramétrages	V+	F+	V-	F-
Par défaut	85	48	44	5
Ruptures de pentes modifiées	77	41	55	9

**TABLEAU II-37 : RESULTAT DES SIX INDICATEURS POUR LES CARTES DE RUPTURES DE PENTES REALISEES AVEC LES LOGICIELS iRIP© ET GRASS GIS SANS LES ARTEFACTS**

Paramétrages	POD	FAR	Précision	Biais	X <sup>2</sup>	Φ
Par défaut	0,9	0,4	0,7	1,5	41	0,5
Ruptures de pentes modifiées	0,9	0,3	0,7	1,4	44	0,5

Concernant les tableaux de contingence, on observe que la modification de l'indicateur des ruptures de pentes augmente le nombre de faux négatifs (impacts manqués) de 5 à 9, mais fait également baisser le nombre de faux positifs (fausses alarmes) de 48 à 41. L'augmentation des faux négatifs peut être due soit au fait que les zones impactées étaient bien identifiées grâce à des petites ruptures de pentes en versant, soit que ces zones impactées étaient bien identifiées à tort par des artefacts. D'ailleurs, il est intéressant de voir que le nombre de faux positifs baisse, ce qui signifie que les artefacts identifiaient à tort une petite dizaine de tronçons. Ces tronçons doivent être étudiés en détails pour confirmer ces hypothèses. Concernant le tableau des indicateurs de performance, les scores ne varient presque pas, à l'exception du Chi-2 qui a très légèrement augmenté avec les cartes IRIP modifiées, pourtant les cartes IRIP semblent visuellement bien différentes.

En conclusion, les représentations cartographiques montrent que la carte d'accumulation est nettement plus lisible. La carte de transfert est moins bruitée mais elle reste très faible. Elle fait ressortir peu de zones, peu d'informations. Les résultats quantitatifs montrent que les cartes IRIP modifiées donnent quelques faux négatifs en plus, mais aussi des faux positifs en moins. Pour la suite, les faux négatifs sont analysés de façon détaillée afin de mieux comprendre l'influence de ce nouveau paramétrage, ainsi que pour identifier d'éventuelles autres problématiques.

### 3.2.4. ANALYSE DES FAUX NEGATIFS

Le Tableau II-38 liste les tronçons faux négatifs (impacts manqués) obtenus avec les cartes IRIP de base et avec les cartes modifiées. Les cinq impacts manqués obtenus avec la méthode par défaut le sont aussi avec les cartes modifiées, et les cartes modifiées en donnent quatre supplémentaires. Les tronçons 65 et 69 sont analysés en premier, ils permettent de bien prendre la mesure de l'amélioration des cartes. Ensuite, les tronçons 15, 53, 183, 184 et 187 sont analysés ensemble, ils illustrent les problématiques liées à la carte de transfert. Enfin, les tronçons 120 et 125 illustrent les problématiques liées à la carte d'accumulation.

**TABLEAU II-38 : LISTE DES TRONÇONS FAUX NEGATIFS OBTENUS POUR LES CARTES IRIP PAR DEFAUT ET POUR LES CARTES IRIP MODIFIEES**

Cartes IRIP par défaut	Cartes IRIP avec nouvel indicateur des ruptures de pentes
Tronçon 15	Tronçon 15
X	Tronçon 53
Tronçon 65	Tronçon 65
X	Tronçon 69
Tronçon 120	Tronçon 120
X	Tronçon 125
X	Tronçon 183
Tronçon 184	Tronçon 184
Tronçon 187	Tronçon 187

#### 3.2.4.1. TRONÇONS 65 ET 69

La Figure II-71 présente les cartes IRIP par défaut (à gauche) et modifiées (à droite) au niveau des tronçons 65 (au sud) et 69 (au nord). On peut observer sur cette zone une rencontre de plusieurs petits talwegs qui rejoignent un talweg principal. Le réseau continue ensuite en direction du sud. Sur cette zone, la voie ferrée est établie en profil rasant sur le plateau au nord puis en une alternance de déblais et de remblais à partir du moment où elle emprunte le fond du talweg principal, plus au sud. La raison de la corrélation de type faux négatif pour le tronçon 65 a été détaillée au chapitre 2 section 2.4.2.1, et est toujours valable pour les cartes IRIP modifiées (influence des talus ferroviaires sur la direction des écoulements). Le tronçon 69, de niveau de vulnérabilité 1, était bien détecté avec des niveaux d'aléa 5 sur les cartes IRIP par défaut, mais n'est plus détecté qu'avec des niveaux 4 sur les cartes IRIP modifiées. Néanmoins, La dynamique spatiale du ruissellement au niveau de ce tronçon est toujours bien visible, même davantage sur les cartes modifiées. On peut noter l'amélioration de la lisibilité des cartes IRIP avec la suppression des artefacts liés au MNT sur les ruptures de pentes. En revanche, des ruptures petites mais bien réelles ont également été supprimées, ceci peut éventuellement être la cause du changement de corrélation du tronçon 69. Des tests avec un MNT de meilleure qualité permettrait de confirmer cette hypothèse. La mauvaise corrélation peut également être due à la méthode de caractérisation de la vulnérabilité qui considère que les profils rasants sont de niveau 1. Ce type de profil pourrait en réalité être plus vulnérable au ruissellement. En conclusion, sur cette zone, bien qu'il y ait un faux négatif supplémentaire, les cartes paraissent améliorées et nettement plus lisibles.

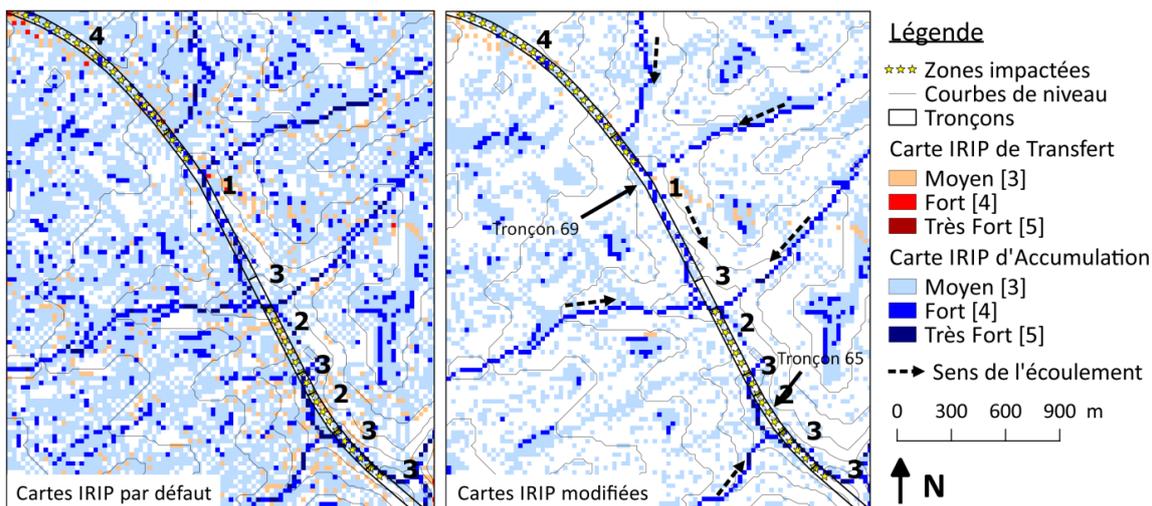


FIGURE II-71 : ILLUSTRATION DES TRONÇONS 65 ET 69 SUR LES CARTES IRIP PAR DEFAULT ET SUR LES CARTES IRIP MODIFIEES AU NIVEAU DE L'INDICATEUR DES RUPTURES DE PENTES

### 3.2.4.2. TRONÇONS 15, 53, 183, 184 ET 187

La Figure II-72 présente le tronçon 15, pour les cartes avant (à gauche) et après (à droite) la modification de l'indicateur des ruptures de pentes. Le tronçon 15 a déjà été étudié précédemment car il était faux négatif avec les cartes IRIP par défaut. Les cartes avant et après modifications pour les tronçons 53, 183, 184 et 187 sont présentées en Annexe B. Pour chacun des tronçons les deux représentations cartographiques sont très différentes. Pour le tronçon 15, la carte d'accumulation présente beaucoup moins de pixels à 3 sur le plateau. Ces pixels étaient dus vraisemblablement aux artefacts du MNT. Les cartes IRIP modifiées semblent plus lisibles et plus pertinentes, néanmoins, le tronçon 15, ainsi que les tronçons 53, 183, 184 et 187, ne sont toujours pas bien détectés. Ces cinq tronçons présentent la particularité d'être tous situés dans des zones propices au transfert. Les zones présentent en effet des pentes fortes, des ruptures convexes et plusieurs pixels IRIP de niveaux 3 ou 4 en transfert peuvent déjà être observés. Pourtant, la carte de transfert ne semble pas pertinente. L'analyse des cinq indicateurs binaires de la carte de transfert sur la zone du tronçon 15 a déjà montré une faiblesse de la carte de transfert, notamment induite par l'indicateur des axes linéaires au sol et l'indicateur de compacité qui ne semblent pas pertinents. Cette faiblesse de la carte de transfert semble encore accentuée sur les cartes IRIP modifiées, avec davantage de niveaux IRIP inférieurs ou égaux à 2. En conclusion, les cartes IRIP modifiées semblent globalement plus lisibles mais affaiblies. Des tests restent encore à effectuer, notamment pour améliorer la carte de transfert.

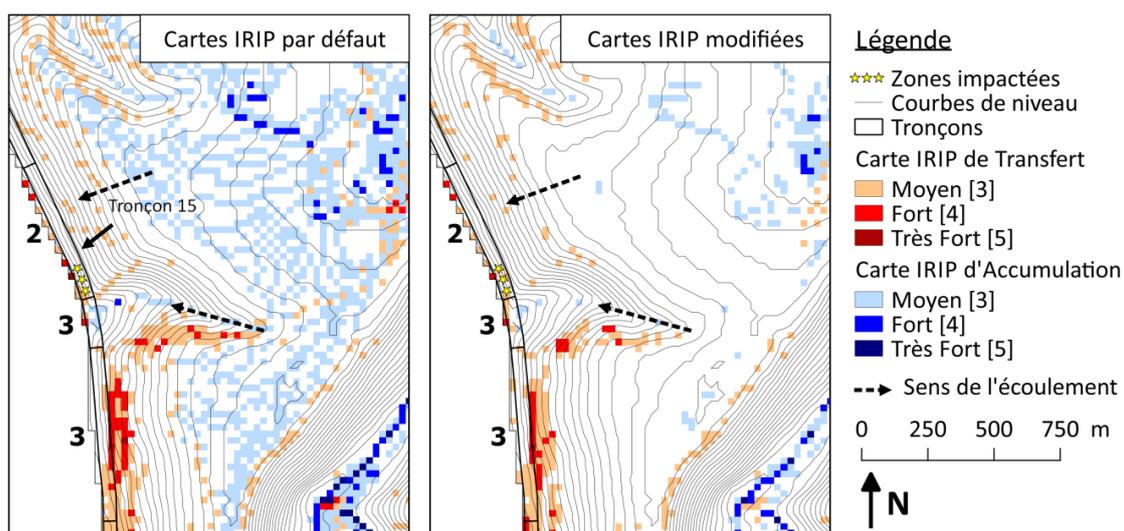


FIGURE II-72 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 15 AVANT ET APRES MODIFICATION DES CARTES IRIP OU DES DEFAUTS SUR LA CARTE DE TRANSFERT SEMBLENT ETRE A L'ORIGINE DE LA MAUVAISE CORRELATION AVEC L'IMPACT

### 3.2.4.3. TRONÇONS 120 ET 125

La Figure II-73 présente la zone du tronçon 120, avant (à gauche) et après (à droite) la modification des cartes IRIP. Ce tronçon a été détaillé dans le chapitre 2, section 2.4.3.2, car il était déjà faux négatif avec la carte IRIP par défaut. On peut voir que la modification de l'indicateur des ruptures de pentes améliore l'aspect global de la carte. La carte par défaut présente des pixels de niveau 3 presque partout sur la zone, cela rend difficile à identifier les zones les plus favorables au ruissellement. Néanmoins, sur les cartes modifiées, le tronçon 120 n'est toujours pas détecté comme exposé à l'aléa, et la carte de la zone ne paraît pas non plus pertinente. La dynamique spatiale du ruissellement reste difficile à appréhender. Le tronçon 125 (Annexe C) présente les mêmes caractéristiques. La carte IRIP modifiée semble améliorer la lisibilité, néanmoins, l'information sur le bassin versant reste peu pertinente. En conclusion, cette nouvelle méthode pour calculer les ruptures de pentes est en effet plus adaptée, mais il reste des tests à effectuer sur les cartes de transfert et d'accumulation afin de proposer des améliorations pour la méthode IRIP.

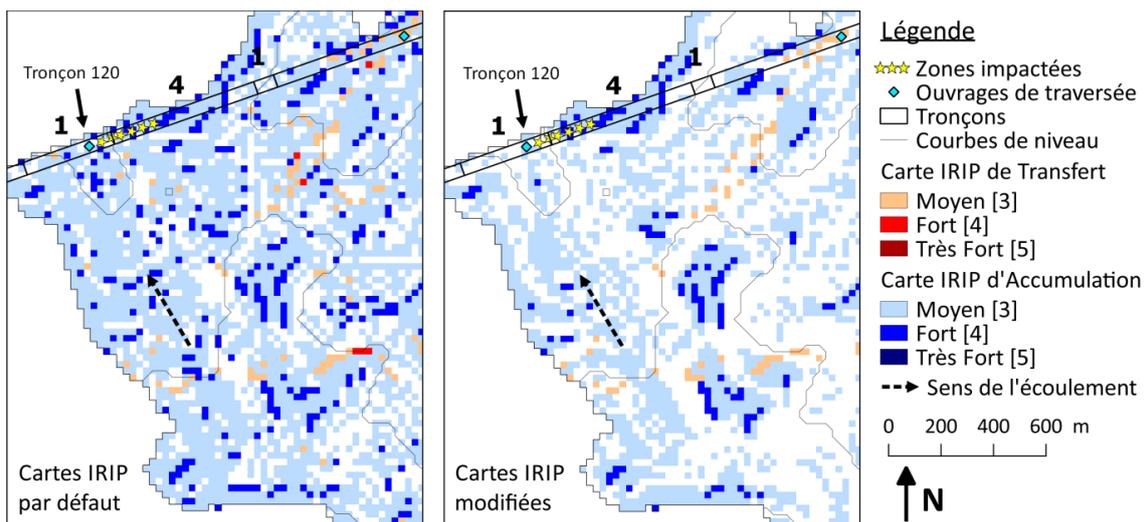


FIGURE II-73 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 120 OU LA CARTE ACCUMULATION PARAÎT PLUS LISIBLE APRÈS LA MODIFICATION DE L'INDICATEUR DES RUPTURES DE PENTE MAIS NECESSITE ENCORE DES AMÉLIORATIONS

### 3.2.5. CONCLUSION SUR L'INDICATEUR DES RUPTURES DE PENTES

Dans cette section, nous avons montré que la méthode de calcul des ruptures de pentes actuellement implémentée dans le logiciel iRIP© ne paraît pas adaptée. Il est testé une autre méthode de calcul, celle de la fonction « r.param.scale » du logiciel GRASS GIS, qui se focalise sur une caractéristique locale de la surface plutôt que de comparer la pente locale au bassin amont. Nous avons montré également que la qualité du MNT peut influencer de façon importante la qualité de l'indicateur des ruptures de pentes et donc des cartes finales. Nous avons donc tenté de supprimer les artefacts liés au MNT directement sur la carte des ruptures de pente, via la suppression des petites courbures de pentes. Ce post traitement est uniquement dû à la donnée topographique utilisée et ne devrait pas être réalisé si la donnée est de qualité suffisante.

Pour évaluer l'influence de ce nouvel indicateur sur les cartes IRIP de transfert et d'accumulation, des comparaisons visuelles et quantitatives sont réalisées. Les comparaisons visuelles montrent que la carte d'accumulation est nettement plus lisible, avec beaucoup moins de pixels de niveau 3 sur les plateaux et des axes d'écoulements concentrés plus facilement identifiables. La carte de transfert est également moins bruitée mais reste très faible, avec une grande majorité de niveaux inférieurs ou égaux à 2. Ensuite, la méthode d'évaluation par comparaison aux données d'impacts est appliquée aux cartes IRIP avant et après modification. Ceci montre que, bien que les cartes soient visuellement améliorées, davantage de tronçons sont identifiés par IRIP comme faux négatifs après modification des ruptures de pentes (de 5 à 9 faux négatifs après modification).

Néanmoins, l'analyse détaillée de ces tronçons montre que cinq d'entre eux semblent induit pas la carte de transfert qui ne semble pas donner assez d'informations dans le paysage. Ceci sera le prochain axe de travail. Deux d'entre eux sont liés davantage à la carte d'accumulation qui nécessite également des améliorations. Cette carte sera travaillée dans un second temps. Enfin, Les différentes zones étudiées permettent de visualiser les cartes avant et après modification, montrant une nette amélioration après le changement de l'indicateur des ruptures de pentes. En conclusion, pour la suite de ce travail, le nouvel indicateur des ruptures de pentes sera conservé, afin de ne pas garder des informations potentiellement

liées aux artefacts et d'être en mesure de bien évaluer les améliorations proposées pour les autres indicateurs.

### 3.3. L'INDICATEUR DES AXES LINEAIRES AU SOL

#### 3.3.1. DEFAUTS LIES A L'INDICATEUR DES AXES LINEAIRES AU SOL

L'indicateur des axes linéaires au sol est un des cinq indicateurs utilisés pour la construction de la carte de transfert. Cet indicateur est ici discuté en termes de méthode de création et en termes d'effet que l'on cherche à représenter par la prise en compte de ces axes. Tout d'abord, pour les besoins de construction de cet indicateur via des processus géomatiques, il est nécessaire de créer une zone tampon autour des axes. La taille par défaut de la zone tampon dépend de la résolution des cartes IRIP et est actuellement de deux fois la résolution. Pour une résolution de 25 m, la zone tampon sera de 50 m de part et d'autre du linéaire. Pour des résolutions assez grossières, la prise en compte d'une zone tampon peut réellement surestimer la surface occupée par l'axe linéaire. Des zones éloignées de ces axes pourraient se retrouver favorables au ruissellement pour de mauvaises raisons. La prise en compte de ces axes pour la construction des cartes IRIP pose donc un problème technique.

Par ailleurs, la question peut se poser de savoir en quoi les axes linéaires au sol influencent les écoulements de surface. Et, s'ils influencent le ruissellement, quel est l'importance de cet effet ? Les axes linéaires au sol, tels que les routes, les voies ferrées, les réseaux de drainage de surface (fossés, noues, etc.), peuvent effectivement rediriger les écoulements de par la modification de la topographie qu'ils engendrent. L'importance de la quantité d'eau déviée sera-t-elle fonction des dimensions et caractéristiques de l'obstacle ? Par exemple, s'il s'agit d'une autoroute l'impact sera-t-il différent de s'il s'agit d'un chemin rural ? Le revêtement de l'obstacle peut-il influencer également les écoulements ? Si l'axe est en macadam, la capacité d'infiltration sera réduite. Cependant, l'effet de la topographie semble davantage en mesure d'influencer les écoulements à échelle macro, que le revêtement au sol. Actuellement seule la présence de l'axe permet de rendre un pixel favorable. L'impact sur la topographie, le type d'axe linéaire au sol et le sens de déviation des écoulements n'est pas pris en compte. Par ailleurs, pour des résolutions très fines, obtenues par techniques LiDAR par exemple, les modifications de topographie engendrées par ces axes peuvent être détectées dès le calcul du réseau de drainage qui est uniquement basé sur la topographie. La présence des axes linéaires au sol est alors prise en compte via les autres indicateurs basés sur le MNT. Par ailleurs, un MNT de résolution 25 m détecte déjà les grands axes tels que les autoroutes ou les grands talus ferroviaires. L'utilisation ou non de l'indicateur des axes linéaires doit-il dépendre de la résolution de l'étude ?

Finalement, la méthode actuelle de prise en compte des axes linéaires représente mal leur effet sur le ruissellement. De plus l'effet des axes linéaires sur la topographie est détecté par le MNT si la résolution est assez fine. La question de la pertinence de cet indicateur pour la construction de la carte de transfert peut alors être posée. Si cet indicateur est jugé peu utile, il est donc possible d'utiliser une autre information en remplacement, qui représenterait davantage le potentiel d'érosion par ruissellement que cherche à représenter la carte de transfert. Il est donc proposé de tester un indicateur davantage basé sur les propriétés du sol et dont l'information soit plus spatialisée que l'effet des axes linéaires, afin d'apporter plus d'informations sur l'ensemble du bassin.

### 3.3.2. L'ÉRODABILITE EN REMPLACEMENT DES AXES LINEAIRES AU SOL ?

La carte de transfert a pour objectif d'indiquer les zones favorables à la mise en mouvement des eaux de surface, à leur accélération. Cette carte a également pour objectif d'indiquer les zones soumises à l'aléa érosion par ruissellement. Il pourrait donc être intéressant de faire intervenir un indicateur de sol dans la carte de transfert. L'indicateur d'érodabilité du sol pourrait être pertinent. Cet indicateur intervient actuellement dans la construction de la carte de production. L'apparition de l'érodabilité dans la carte production représente le potentiel de production d'eau chargée en particules de sol. Cette information est intéressante mais l'eau peut aussi se charger en particules au moment du transfert, lorsqu'il y a de l'érosion. Par ailleurs, un paramètre de sol important pour étudier la capacité de production d'eau de surface, et qui n'est actuellement pas pris en compte, est la propension d'un sol à la battance. Le phénomène de battance est l'apparition d'une croûte en surface générée par l'impact des gouttes de pluie. Cette croûte de battance diminue fortement la capacité d'infiltration du sol et augmente le potentiel de production d'eau de ruissellement. Il est donc proposé d'utiliser l'indicateur de battance dans la carte de production à la place de l'érodabilité, et d'utiliser l'érodabilité à la place de l'indicateur des axes linéaires au sol, dans la carte de transfert.

Concernant le nouvel indicateur de battance, il peut être calculé grâce aux fonctions de pédo-transfert de façon similaire à l'indicateur d'érodabilité (Figure II-74). Comme pour l'indicateur d'érodabilité, le seuil de favorabilité à la battance sera fixé à partir de 3. De plus, dans la paramétrisation par défaut, les indicateurs liés à la pédologie dans la carte de production subissent un post-traitement pour les zones urbaines qui n'ont pas de sol. La perméabilité et l'épaisseur  $y$  sont automatiquement mises à 1 (favorable), et l'érodabilité  $y$  est mise à 0 (défavorable). Pour garder cette logique, il y aura également un traitement spécial sur les zones urbaines pour les indicateurs d'érodabilité et de battance. L'érodabilité, dans la carte de transfert, sera considérée comme défavorable sur les zones urbaines, par contre, il semble plus logique pour l'indicateur de battance dans la carte de production qu'il soit considéré comme favorable sur les zones urbaines. Considérer l'érodabilité défavorable sur les zones urbaines peut-être discuté. En effet, la force du ruissellement peut parfois éroder les revêtements des routes, ou bien déplacer des obstacles (nombreux dans les villes) qui peuvent être transportés et rendre l'écoulement plus dangereux. Néanmoins, dans un premier temps, l'effet que l'on cherche à représenter avec l'indicateur d'érodabilité est le potentiel d'érosion du sol, diffuse ou concentrée, et le potentiel de chargement de l'écoulement en sédiments fins et grossiers. Pour d'autres utilisateurs de la méthode IRIP, ce choix peut donc être discuté, comme un certain nombre d'autres choix possibles pour la paramétrisation.

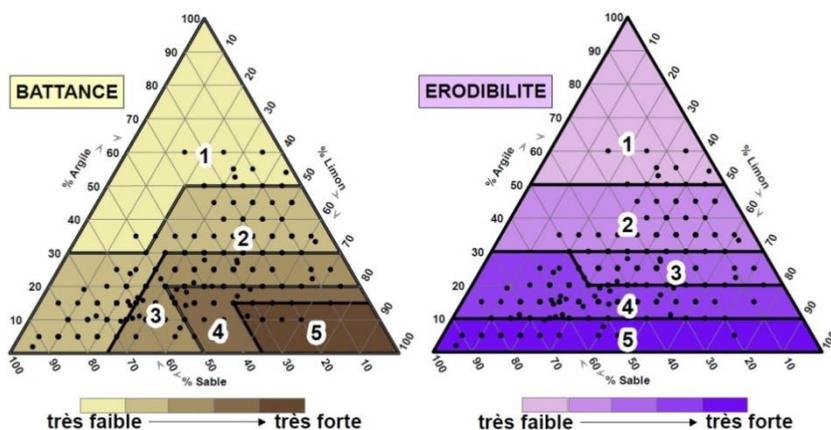


FIGURE II-74 : REGLES DE PEDOTRANSFERT PERMETTANT DE CONVERTIR LES DONNEES TEXTURALES EN CLASSES DE BATTANCE ET D'ERODABILITE PAR PROJECTION DANS LES TRIANGLES DE TEXTURE REDECOURTES EN 5 CLASSES DE SENSIBILITE DE 1 (TRES FAIBLE) A 5 (TRES FORTE) (SOURCE : CERDAN ET AL., 2006 ET INRA/IFEN)

Les indicateurs d'érodabilité et de battance utilisés pour la création des cartes IRIP dans cette section sont présentés Figure II-75 et Figure II-76. Le type de sol sur la zone fait que l'indicateur d'érodabilité est favorable au transfert sur toute la zone. Seules les zones urbaines ressortent en défavorables (les zones urbaines sont issues de la données d'occupation du sol utilisée, le Mode d'Occupation des Sols de Haute-Normandie). L'indicateur de battance est quant à lui favorable presque en tout point de la zone, puisqu'il est considéré comme favorable également sur les zones urbaines. Ceci a donc une influence sur la carte de production. La Figure II-77 présente la carte IRIP de production avant et après remplacement de l'érodabilité sur la battance. La différence entre ces deux indicateurs est que l'indicateur de battance est aussi favorable sur les zones urbaines. Ceci ajoute donc un niveau de production supplémentaire sur les zones urbaines. On peut voir qu'elles sont en effet davantage visibles, ce qui semble cohérent avec le phénomène de ruissellement. Concernant l'indicateur de production amont, reclassification de la carte production, utilisé pour la construction des cartes de transfert et d'accumulation, le changement d'érodabilité à battance n'impacte pas l'indicateur. En effet, pour considérer un pixel comme favorable à la production amont, les niveaux de production dans le bassin versant relatif au pixel sont considéré et si la valeur modale est supérieure ou égale à 3 sur 5, le pixel est considéré favorable. Les zones urbaines dans la carte de production par défaut étant déjà de niveau 3 au minimum, le fait qu'elles augmentent d'un niveau ne change pas le résultat de la reclassification. L'indicateur de production amont est donc identique, la modification de la carte production avec l'indicateur de battance n'impacte donc pas les cartes d'accumulation et de transfert.

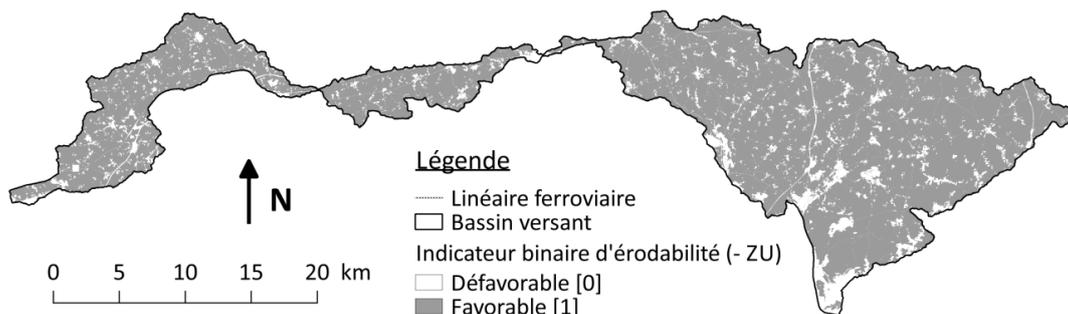


FIGURE II-75 : CARTE DE L'INDICATEUR BINAIRE D'ERODABILITE UTILISE DANS LA CARTE DE TRANSFERT

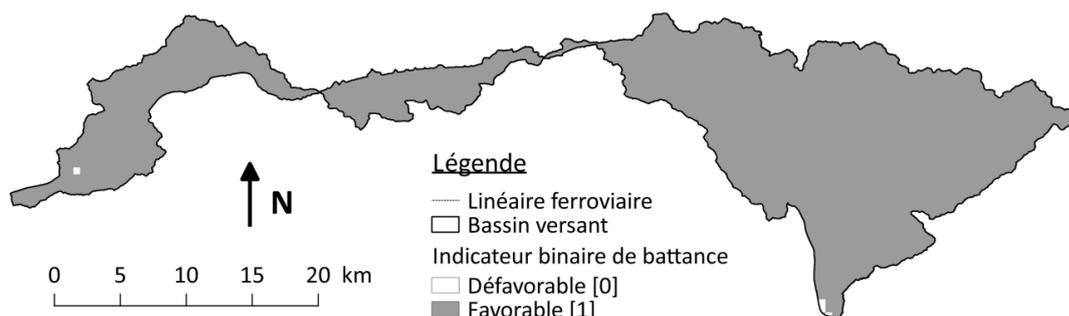


FIGURE II-76 : CARTE DE L'INDICATEUR BINAIRE DE BATTANCE UTILISE DANS LA CARTE ACCUMULATION

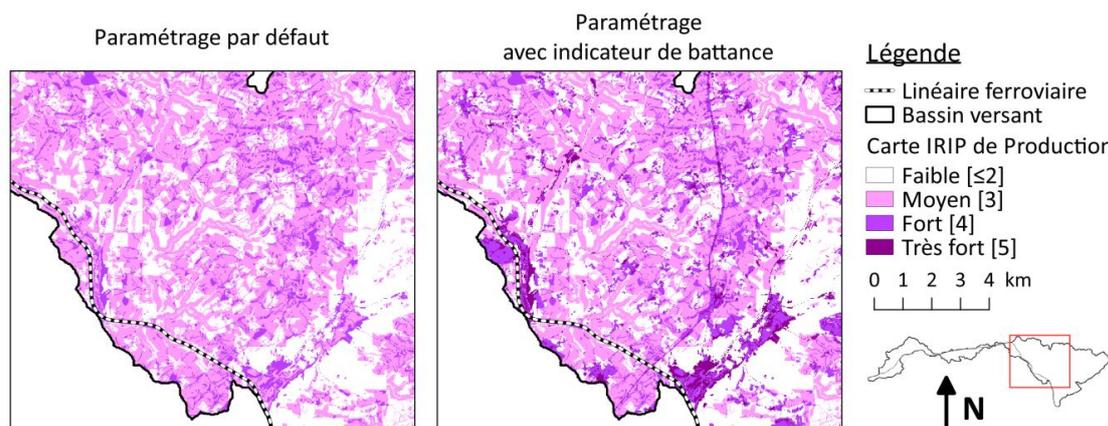


FIGURE II-77 : CARTE IRIP DE PRODUCTION AVANT ET APRES REMPLACEMENT DE L'INDICATEUR D'ERODABILITE PAR L'INDICATEUR DE BATTANCE

### 3.3.3. RESULTATS SUR L'ÉVALUATION DE LA METHODE IRIP

Pour évaluer l'impact du changement de l'indicateur des axes linéaires en indicateur d'érodabilité sur la carte IRIP de transfert, les cartes IRIP sont comparées visuellement dans un premier temps, puis, la méthode d'évaluation par comparaison aux données d'impacts est appliquée sur les cartes IRIP de transfert et d'accumulation. La carte IRIP d'accumulation utilisée dans cette section ne subit pas de modifications, elle est la même que celle obtenue dans la section précédente (avec le nouvel indicateur des ruptures de pentes). Dans cette section, les résultats de la section précédente sont également affichés, en plus des nouveaux résultats, afin de bien observer l'évolution globale des cartes IRIP.

#### 3.3.3.1. RESULTATS CARTOGRAPHIQUES

La Figure II-78 présente l'évolution de la carte IRIP de transfert. La carte en bas à gauche présente la nouvelle carte après prise en compte du nouvel indicateur des ruptures de pentes et du nouvel indicateur d'érodabilité. L'érodabilité étant favorable presque sur toute la zone, la carte de transfert augmente donc de un niveau presque partout. Les flancs de vallons évoluent avec des pixels 4 et 5 au lieu de pixels 3 et 4, ce qui est cohérent pour des zones de transfert fort. Par contre, sur les plateaux, on observe de nombreux pixels de niveaux 3, ce sont les pixels liés à l'indicateur de compacité. Ils étaient sur les cartes précédentes avec des niveaux inférieurs ou égaux à 2 et n'étaient pas visibles. En conclusion, la carte de transfert semble à présent montrer plus d'informations, c'est ce qui était souhaité. Globalement, la carte

semble pertinente, l'apparition de pixels liés à l'indicateur de compacité va permettre de mieux étudier cet indicateur.

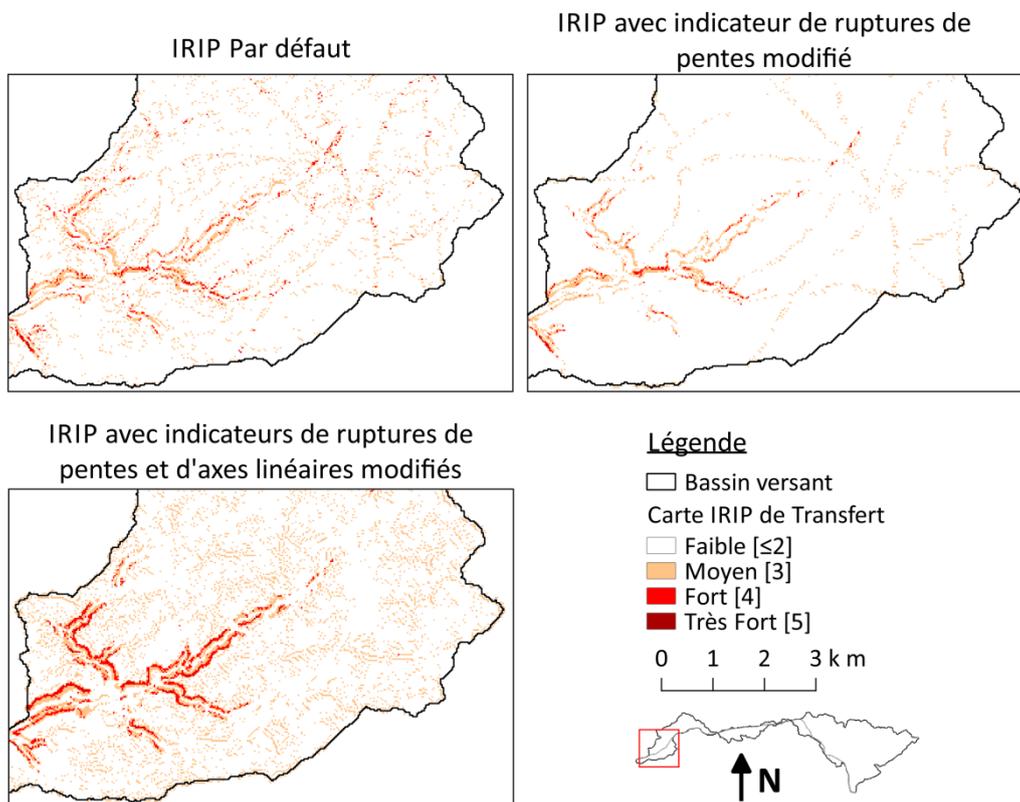


FIGURE II-78 : CARTE IRIP DE TRANSFERT REALISE AVEC LES PARAMETRISATION PAR DEFAULT, AVEC RUTURES DE PENTES MODIFIEES ET AVEC RUPTURES DE PENTES ET AXES LINEAIRES MODIFIES

### 3.3.3.2. RESULTATS STATISTIQUES

Les résultats de l'évaluation quantitative sont présentés Tableau II-39 et Tableau II-40. Le premier tableau présente les nombres de tronçons par type de corrélations pour les trois paramétrages testés jusqu'à présent. Ces résultats sont obtenus en utilisant la méthode B de combinaison aléa-vulnérabilité et en prenant en compte la vulnérabilité ainsi que les actions de mitigation. Les résultats avec la prise en compte des actions de résilience et seulement la vulnérabilité sont présentés en Annexe D. Sur ce tableau on peut voir que les trois impacts supplémentaires ont été détectés par rapport au paramétrage précédent, par contre, huit faux positifs de plus sont également détectés. Concernant les scores des indicateurs de performance, présentés dans le second tableau, ils ne varient pas beaucoup. Le taux de fausses alarmes remonte en effet, et le Chi-2 perd six points. Finalement, les impacts non détectés (les faux négatifs) doivent être étudiés en détails afin de mieux comprendre l'influence de ce nouvel indicateur d'érodabilité.

TABLEAU II-39 : NOMBRES DE TRONÇONS POUR CHAQUE TYPE DE CORRELATION POUR TROIS PARAMETRAGES DIFFERENTS

Paramétrages	V+	F+	V-	F-
Par défaut	85	48	44	5
Ruptures de pentes modifiées	77	41	55	9
Ruptures de pentes modifiées et Axes linéaires remplacés par érodabilité	81	49	46	6

TABLEAU II-40 : RESULTAT DES SIX INDICATEURS DE PERFORMANCE POUR TROIS PARAMETRAGES DIFFERENTS

Paramétrages	POD	FAR	Précision	Biais	X <sup>2</sup>	Φ
Par défaut	0,9	0,4	0,7	1,5	41	0,5
Ruptures de pentes modifiées	0,9	0,3	0,7	1,4	44	0,5
Ruptures de pentes modifiées et Axes linéaires remplacés par érodabilité	0,9	0,4	0,7	1,5	38	0,5

### 3.3.4. ANALYSE DES FAUX NEGATIFS

Le Tableau II-41 liste les tronçons faux négatifs obtenus pour les trois paramétrages testés jusqu'à présent. On observe que les tronçons 15, 53 et 187 sont bien détectés comme prévu. Les tronçons 183 et 184 qui étaient situés dans des zones de transfert fort ne sont toujours pas bien détectés. Les tronçons 65, 69 et 120, situés dans des zones plus propices à l'accumulation sont également toujours notés comme non détectés. Par ailleurs, le tronçon 125 passe de faux négatif à vrai positif. Enfin, le tronçon 10 est un nouveau faux négatif. Ces différents tronçons sont analysés en détails, afin de mieux comprendre l'influence du nouvel indicateur d'érodabilité.

TABLEAU II-41 : LISTE DES TRONÇONS FAUX NEGATIFS SELON LE PARAMETRAGE IRIP UTILISE

Cartes IRIP par défaut	Cartes IRIP avec nouvel indicateur des ruptures de pentes	Cartes IRIP avec nouveaux indicateurs des ruptures de pentes et d'érodabilité
X	X	Tronçon 10
Tronçon 15	Tronçon 15	X
X	Tronçon 53	X
Tronçon 65	Tronçon 65	Tronçon 65
X	Tronçon 69	Tronçon 69
Tronçon 120	Tronçon 120	Tronçon 120
X	Tronçon 125	X
X	Tronçon 183	Tronçon 183
Tronçon 184	Tronçon 184	Tronçon 184
Tronçon 187	Tronçon 187	X

#### 3.3.4.1. TRONÇONS 15, 53 ET 187

La Figure II-79 présente le tronçon 15, pour les cartes IRIP réalisées, à gauche, avec le nouvel indicateur des ruptures de pentes pour les cartes de transfert et d'accumulation, et à droite, avec en plus le nouvel indicateur d'érodabilité pour la carte de transfert. Pour rappel, le tronçon 15 a subi une coulée de boue. Son niveau de vulnérabilité est de 2 (indiqué par les chiffres en noirs sur la figure), il requiert donc un

niveau IRIP 4 au minimum pour être considéré comme à risque. Le nouveau paramétrage proposé pour les cartes IRIP permet d'obtenir des niveaux 4 en transfert au niveau de la zone impactée, ce qui n'était pas le cas pour le paramétrage précédent. Le potentiel d'érodabilité du sol étant fort sur cette zone, ceci permet d'augmenter d'un niveau les pixels de carte de transfert, les pixels précédemment de niveaux 3 évoluent ainsi en niveaux 4 et de nouveaux niveaux 3 apparaissent. Ce même résultat est obtenu pour les tronçons 53 et 187 dont les cartes avant et après utilisation de l'indicateur d'érodabilité sont présentées en Annexe E. Ceci confirme la pertinence de ce nouvel indicateur.

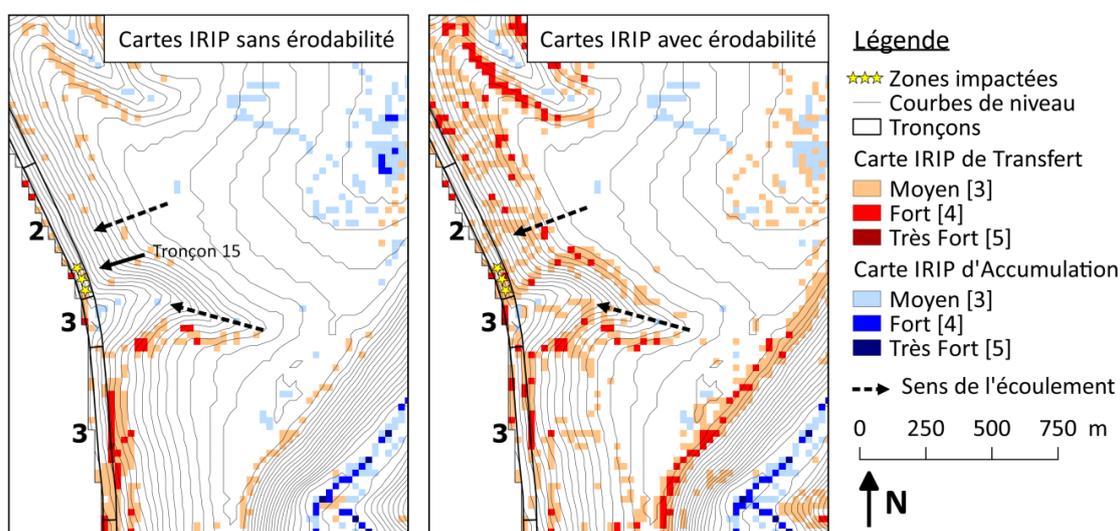
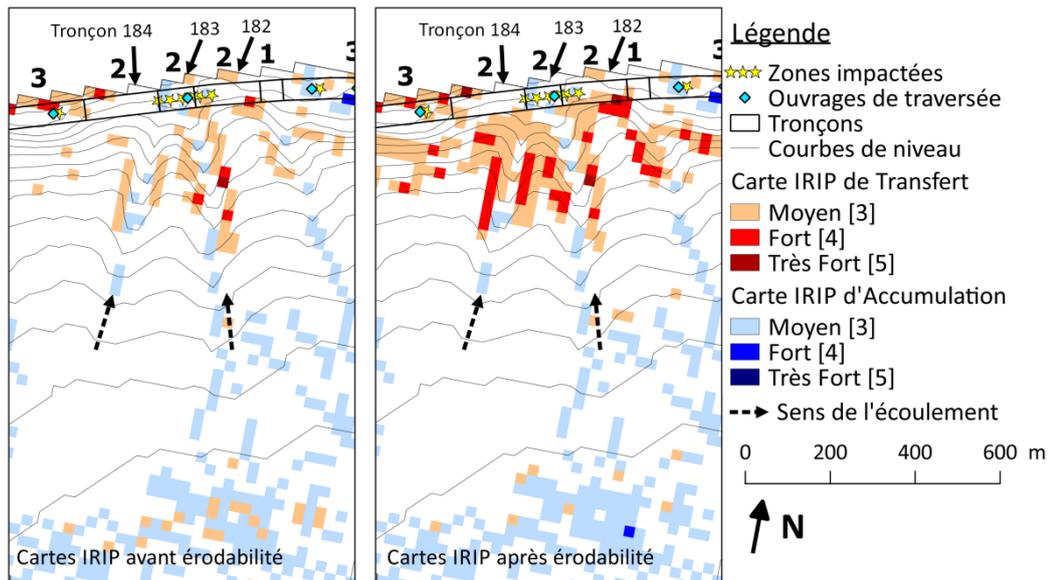


FIGURE II-79 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 15 QUI EST A PRESENT BIEN DETECTE COMME A RISQUE GRACE A L'INDICATEUR D'ERODABILITE QUI PERMET D'OBTENIR DES NIVEAUX 4 EN TRANSFERT SUR CETTE ZONE

#### 3.3.4.2. TRONÇONS 183 ET 184

La Figure II-80 présente les cartes IRIP au niveau des tronçons 183 et 184 pour les deux paramétrages proposés. Pour rappel, le tronçon 183 est établi en profil mixte avec un passage à niveau, les tronçons adjacents 182 et 184 sont des déblais courts. Les deux tronçons 183 et 184 ont des niveaux de vulnérabilité de 2 et requièrent donc des niveaux 4 pour être considérés comme à risque, ce qui n'est le cas pour aucun des paramétrages proposés. La carte de droite (paramétrage avec indicateur d'érodabilité pour la carte de transfert) paraît néanmoins plus cohérente que celle de gauche, au vu des caractéristiques de la topographie. La nouvelle carte de transfert montre que l'ensemble de la zone a un fort potentiel de transfert du ruissellement sur les coteaux en amont direct de la voie ferrée. Cette zone est d'ailleurs régulièrement sujette à des désordres liés au ruissellement d'après la base de données d'impacts. En revanche, les tronçons 183 et 184 ne sont toujours pas bien détectés. La carte de transfert montre davantage d'informations que précédemment, mais la carte d'accumulation paraît à présent très peu pertinente. En effet, le désordre sur le passage à niveau a été induit par du ruissellement intense qui semble venir des deux talwegs indiqués par les courbes de niveau. Néanmoins, la carte d'accumulation ne fait ressortir ces talwegs qu'avec des niveaux 3. Ceci semble être la cause de la mauvaise corrélation avec l'impact. En conclusion, la carte de transfert semble effectivement améliorée, mais un travail sur la carte d'accumulation est nécessaire afin de comprendre pourquoi ces talwegs ne sont pas bien détectés.



**FIGURE II-80 : ILLUSTRATION DES TRONÇONS 183 ET 184 QUI NE SONT PAS BIEN DETECTES AVEC LES DEUX PARAMETRAGES PROPOSES, LA MAUVAISE CORRELATION SEMBLE LIEE A LA CARTE D'ACUMULATION QUI NE FAIT PAS BIEN RESSORTIR LES AXES DE RUISSELLEMENT CONCENTRES**

#### 3.3.4.3. TRONÇONS 65, 69 ET 120

Les tronçons 65, 69 et 120 présentés dans les sections précédentes sont localisés sur des zones plutôt propices à l'accumulation du ruissellement. Le tronçon 120 est localisé sur le plateau avec une topographie plane. Les tronçons 65 et 69 sont localisés au début de la formation d'un talweg, sur une zone de ruissellement concentrée. Ces trois tronçons ne sont pas bien détectés avec les deux paramétrages proposés. La Figure II-81 présente la zone du tronçon 120 où les cartes IRIP semblent en effet peu pertinentes. Les tronçons 65 et 69 sont présentés en Annexe F, les cartes IRIP sont un peu plus satisfaisantes car les talwegs bien marqués dans le paysage sont repérés, mais le reste du plateau apparaît également, comme pour le tronçon 120, sans information spatiale pertinente. Pour ces trois tronçons, l'indicateur de compacité est affiché à côté des cartes. Il semble être lié au bruitage apparent sur les cartes de transfert et d'accumulation. Ce bruitage visible sur les cartes de transfert et d'accumulation (l'indicateur de compacité est utilisé pour la construction des deux cartes) pourrait éventuellement être à l'origine des nombreux faux positifs en plus pour ce paramétrage. Cet indicateur ne paraît en effet pas du tout cohérent, aucun schéma spatial particulier ne s'en dégage. Cet indicateur pourrait être à l'origine des défauts remarqués sur la carte d'accumulation. Finalement, la carte accumulation doit être retravaillée et en particulier l'indicateur de compacité.

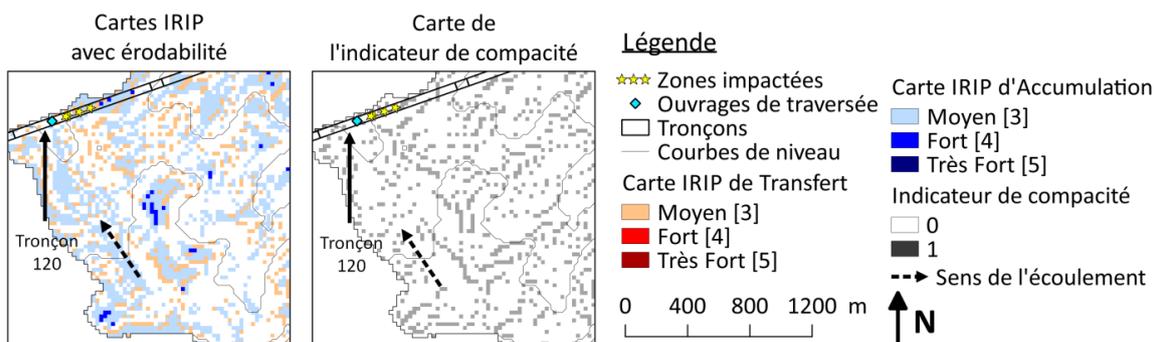


FIGURE II-81 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 120 SUR LEQUEL LES CARTES IRIP NE SEMBLENT PAS PERTINENTES, L'INDICATEUR DE COMPACITE (A DROITE) SEMBLE JOUER UN ROLE DANS CETTE INCOHERENCE

#### 3.3.4.4. TRONÇON 125

La Figure II-82 présente la zone du tronçon 125. Ce tronçon n'était pas bien détecté avec le paramétrage précédent, il est à présent bien détecté comme à risque, après prise en compte de l'érodabilité dans la carte de transfert. En réalité il est bien détecté à tort. Les tronçons 123, 124 et 125 sont établis en déblai. Les 123 et 124 des déblais longs avec des ponts pour le passage de routes, le 125 est un déblai court. Le tronçon 126 est un remblai court avec un ouvrage hydraulique de traversée sous voie. Le désordre signalé par les étoiles jaunes est dû à un même épisode de ruissellement. D'après les rapports d'expertise le ruissellement provient du bassin côté est, qui se trouve des deux côtés de la voie ferrée. Le cheminement du ruissellement dans cette zone apparaît assez complexe, mais l'exutoire naturel est le passage hydraulique sous le tronçon 126, comme indiqué par les flèches en pointillés. Le tronçon 125 est à présent bien détecté, avec la carte de transfert, grâce à une petite rupture de pente entre les tronçons 125 et 126, mais ce n'est pas l'origine du désordre, tel qu'indiqué dans les rapports. Finalement, sur cette zone, la carte IRIP d'accumulation n'apporte pas beaucoup d'informations sur les circonstances de ce désordre. Pourtant, cette zone semble être très propice au ruissellement d'après les expertises. Davantage de travail sur la carte accumulation pourrait permettre de mieux appréhender le phénomène sur cette zone.

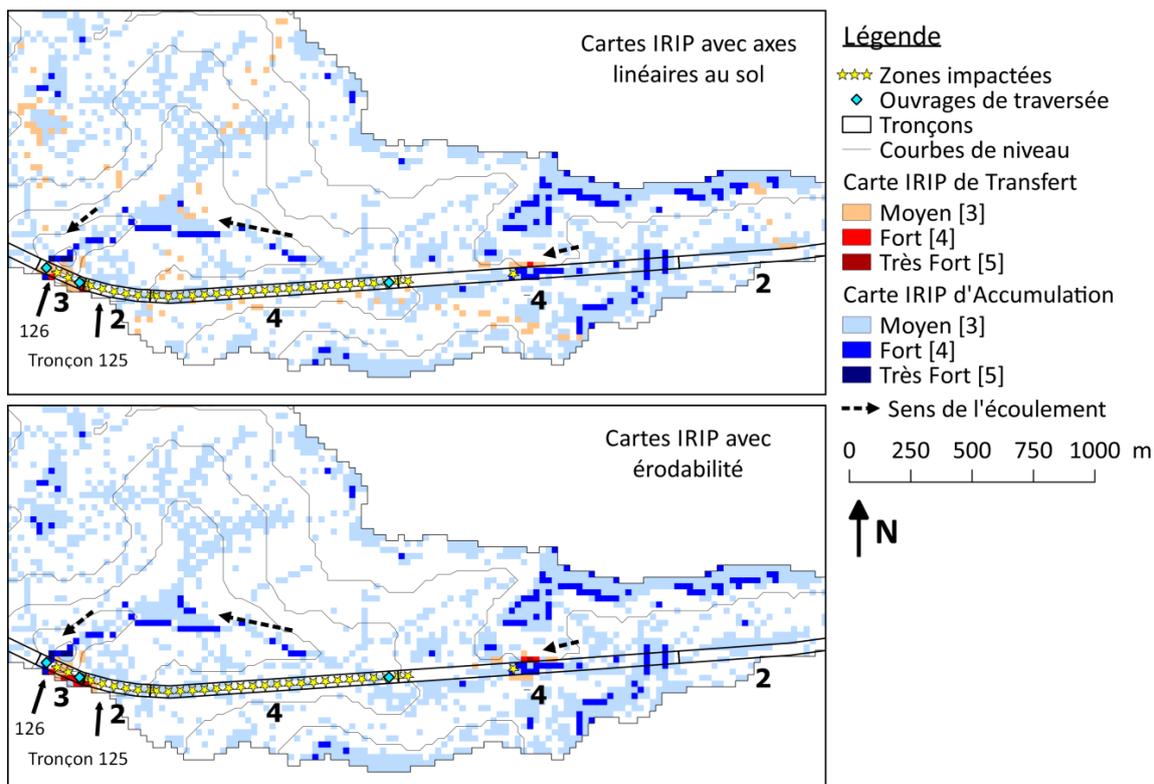


FIGURE II-82 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 125 QUI SEMBLE BIEN DETECTE A TORT GRACE A LA PRISE EN COMPTE DE L'ERODABILITE ALORS QUE L'IMPACT SEMBLE LIE A UN TYPE DE RUISSELLEMENT QUI POURRAIT ETRE DAVANTAGE DETECTE PAR LA CARTE ACCUMULATION.

### 3.3.4.5. TRONÇON 10

Le tronçon 10 était bien détecté avec le paramétrage précédent qui prenait en compte les axes linéaires au sol, il ne l'est plus avec l'utilisation de l'indicateur d'érodabilité. La Figure II-83 présente la zone du tronçon 10. Ce tronçon est établi en remblai, intercepte un zone d'écoulement concentrée et possède plusieurs ouvrages de traversée sous voie. La figure de gauche, qui présente les cartes IRIP avant prise en compte du nouvel indicateur d'érodabilité, illustre également, en superposition des autres cartes, l'indicateur des axes linéaires au sol. Les zones grisées sont les zones considérées comme favorables au transfert à cause de la présence d'une route. La route permettait à tort d'avoir un niveau supplémentaire sur la voie ferrée, au niveau des deux ouvrages de traversée (au nord du tronçon 120). En réalité la route passe sous la voie ferrée et n'est donc pas une problématique pour la voie. En revanche, le désordre localisé au niveau de l'axe d'écoulement concentré n'est pas détecté. L'origine de cette mauvaise corrélation semble donc liée plutôt à des défauts sur la carte d'accumulation. Davantage de tests seront effectués pour tenter d'améliorer la construction de la carte d'accumulation.

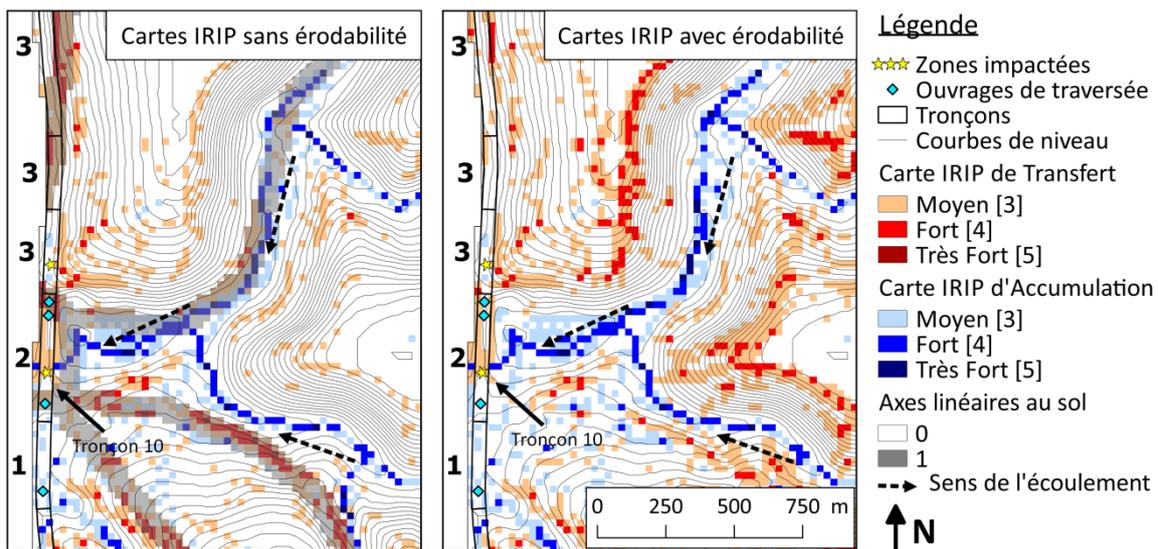


FIGURE II-83 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 10 QUI ETAIT DETECTE A TORT GRACE A UNE ROUTE, SA NOUVELLE CORRELATION DE TYPE FAUX NEGATIF SEMBLE A PRESENT LIEE A DES DEFATS DE LA CARTE ACCUMULATION

### 3.3.5. CONCLUSION SUR L'INDICATEUR D'ERODABILITE

Cette section se focalise sur la carte de transfert et propose de l'améliorer en remplaçant l'indicateur des axes linéaires au sol par l'indicateur d'érodabilité, actuellement utilisé pour construire la carte de production. Cet indicateur d'érodabilité sera alors remplacé par un indicateur de battance dans la carte de production qui semble plus cohérent pour l'étude des zones de genèse du ruissellement. La méthode de prise en compte des axes linéaires surestime l'effet de ces axes sur le ruissellement. De plus, les axes au sol ne paraissent pas pertinents à prendre en compte puisque qu'ils sont souvent détectés par le MNT. Il paraît plus judicieux, pour la carte de transfert, d'inclure un indicateur de sol. L'indicateur d'érodabilité paraît convenir, il représente le potentiel de détachement des particules de sol par le ruissellement et donc le potentiel de ruissellement chargé qui peut avoir davantage d'énergie pour engendrer à nouveau de l'érosion.

La comparaison visuelle et quantitative des cartes montre que la carte de transfert paraît effectivement plus pertinente. Les zones de pentes fortes et des ruptures convexes sont mieux détectées sur les zones qui sont également sensibles à l'érosion. Ceci s'observe également sur le nombre à la baisse de faux négatifs (de 9 à 6 après prise en compte de l'érodabilité). En revanche, le nombre de faux positifs augmente. Ceci peut être dû au bruitage observé sur les cartes de transfert et d'accumulation, bruitage qui semble lié à l'indicateur de compacité. En effet, l'étude des faux négatifs restant montre que cet indicateur perturbe de façon importante les cartes IRIP. Il est donc proposé, pour la suite, de se focaliser sur la carte d'accumulation et particulièrement sur l'indicateur de compacité, afin d'améliorer les prédictions de la carte d'accumulation et de faire baisser davantage les faux négatifs et les faux positifs.

## 3.4. L'INDICATEUR DE COMPACITE

### 3.4.1. DEFATS LIES A L'INDICATEUR DE COMPACITE

L'indicateur de compacité est utilisé pour construire la carte de transfert. Il est également utilisé dans la carte d'accumulation en combinaison avec les aires drainées supérieures à 1 km<sup>2</sup>. L'indicateur de compacité représente l'influence de la forme d'un bassin versant sur la concentration des écoulements.

Un bassin de forme concentrique peut avoir tendance à concentrer les écoulements en un même point et au même moment. Pour le paramétrage de la méthode IRIP par défaut, l'indicateur de compacité est l'indice de Horton, qui est l'aire drainée divisé par le chemin de drainage le plus long au carré. L'indice de Horton est calculé en chaque pixel en prenant en compte le bassin versant à l'amont. Si l'indice de Horton est supérieur à 1, le bassin relatif au pixel est considéré comme compact, la note de 1 est attribuée au pixel. Pour la carte d'accumulation, cet indicateur représente la capacité d'une zone à concentrer les écoulements. Pour la carte de transfert, l'indicateur de compacité représente l'effet de la puissance que peut avoir la concomitance spatiale et temporelle d'écoulements sur le sol, cette puissance pouvant potentiellement engendrer de l'érosion et du transport de matériaux.

Le défaut actuel est que l'indice de Horton apparaît bruité, sans formation spatiale apparente par rapport à la connaissance de la surface de la zone d'étude. En regardant plus en détails, il s'avère que les pixels avec un indice de Horton supérieur à 1 sont presque uniquement des pixels avec une aire drainée entre un et trois pixels (625 à 1875 m<sup>2</sup>). La Figure II-84 montre l'indice de Horton binaire sur une partie de la zone d'étude (à gauche) et montre le même indice de Horton où les aires drainées inférieures ou égales à trois pixels ont été masquées (à droite). La Figure de droite montre qu'il ne reste presque aucun pixel à 1, ceci étant valable pour le reste de la zone d'étude. Le test a également été effectué sur le MNT de SRTM de résolution 30 m (Cartes en Annexe G). Le résultat est identique, c'est-à-dire qu'en dehors des aires drainées inférieures ou égales à 3 pixels (900 à 2700 m<sup>2</sup>), l'indice de Horton n'est presque jamais supérieur à 1. Ceci montre que ce défaut n'est pas lié au MNT mais à l'indicateur lui-même.

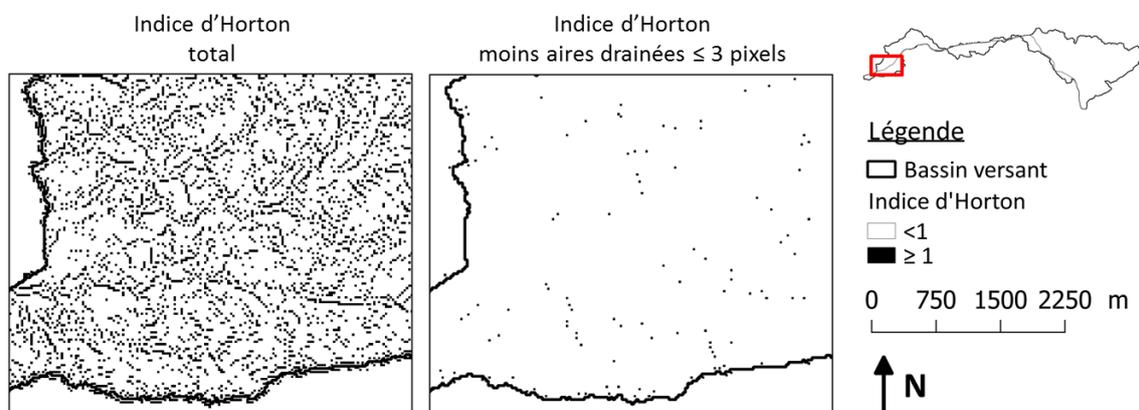


FIGURE II-84 : ILLUSTRATION DE L'INDICE DE HORTON QUI N'EST SUPERIEUR A 1 QUE POUR DES AIRES DRAINEES DE LA TAILLE DE TROIS PIXELS

Il ne paraît, en réalité, pas pertinent de calculer un indice géométrique sur une surface de trois pixels. D'ailleurs, la question peut être posée de savoir s'il est pertinent de calculer l'indice de Horton de manière distribuée sur le bassin versant. D'autres indices pourraient être testés. L'indice de Gravelius par exemple permet également de caractériser la compacité d'un bassin. Néanmoins, sa formule requiert le calcul du périmètre du bassin, ce qui peut engendrer un effet fractal. La longueur du périmètre peut fortement varier avec la sinuosité induite par les pixels sur les contours du bassin. Cet effet fractal peut également se retrouver pour l'indice de Horton, dans le calcul du chemin de drainage le plus long. De manière générale, ces indices n'ont pas été conçus pour des calculs distribués sur un MNT. Ils ont été conçus pour qualifier la forme d'un bassin versant de façon globale. De plus, ils sont généralement utilisés pour des bassins avec des cours d'eau, afin d'appréhender l'allure du pic de crue à l'exutoire. Cet indice semble donc peu pertinent pour une application en versant, pour l'étude du ruissellement pluvial. Il est

donc proposé de remplacer l'indicateur de compacité par un indicateur plus pertinent pour l'étude du ruissellement.

### 3.4.2. L'AIRES DRAINEE EN REMPLACEMENT DE L'INDICE DE COMPACITE ?

La taille de l'aire drainée semble être un facteur du ruissellement. En effet, plus l'aire drainée est grande, plus il est probable de voir arriver de grandes quantités d'eau de ruissellement. Inversement, il doit exister un seuil de surface drainée en dessous duquel, un épisode pluvieux même intense ne pourrait pas générer des quantités d'eau assez importantes pour provoquer des dommages. Il est difficile de déterminer un seuil a priori et le seuil peut varier selon la zone d'étude. Néanmoins, plusieurs seuils sont ici testés pour mieux appréhender l'influence d'un indicateur d'aire drainée.

Pour choisir les seuils à tester, il est proposé de se baser sur la distribution des valeurs d'aires drainées sur l'ensemble du bassin versant. Les seuils à tester doivent représenter des proportions assez variées en termes de couverture de la zone d'étude. La Figure II-85 montre les valeurs d'aires drainées (en hectares) en fonction du nombre de pixels sur la zone d'étude. Ainsi, les pixels avec des aires drainées supérieures à 1 ha représentent environ 15% du bassin versant, les aires drainées supérieures à 10 ha représentent environ 5 % et les aires drainées supérieures à 50 et 100 ha représentent respectivement 2 et 1% de la zone d'étude. Le Tableau II-42 présente les sept seuils sélectionnés pour tester l'indicateur d'aire drainée en remplacement de l'indicateur de compacité. La Figure II-86 présente les cartes binaires des aires drainées pour les sept seuils.

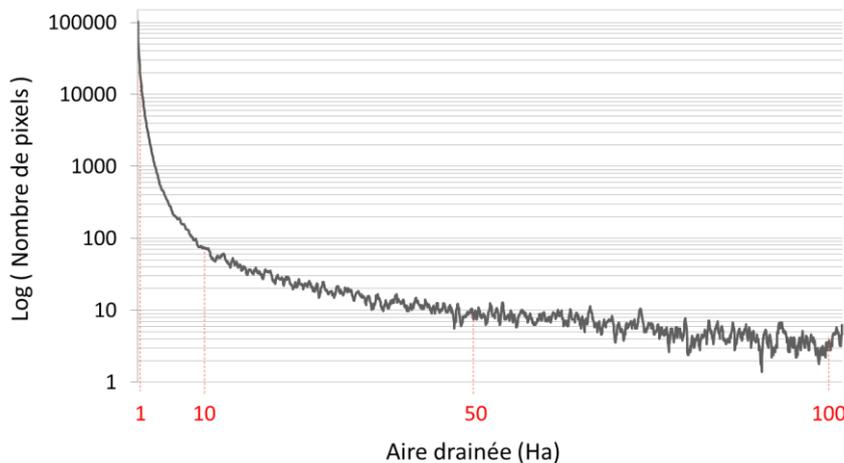


FIGURE II-85 : DISTRIBUTION DES VALEURS D'AIRES DRAINEES SUR LA ZONE D'ETUDE

TABLEAU II-42 : LES SEPT SEUILS D'AIRES DRAINEES A TESTER EN REMPLACEMENT DE L'INDICE DE COMPACITE

Aires drainées (Ha)	Pixels (% du bassin)
≥ 0,5	29
≥ 1	17
≥ 2,5	8
≥ 5	5
≥ 10	4
≥ 50	2
≥ 100	1

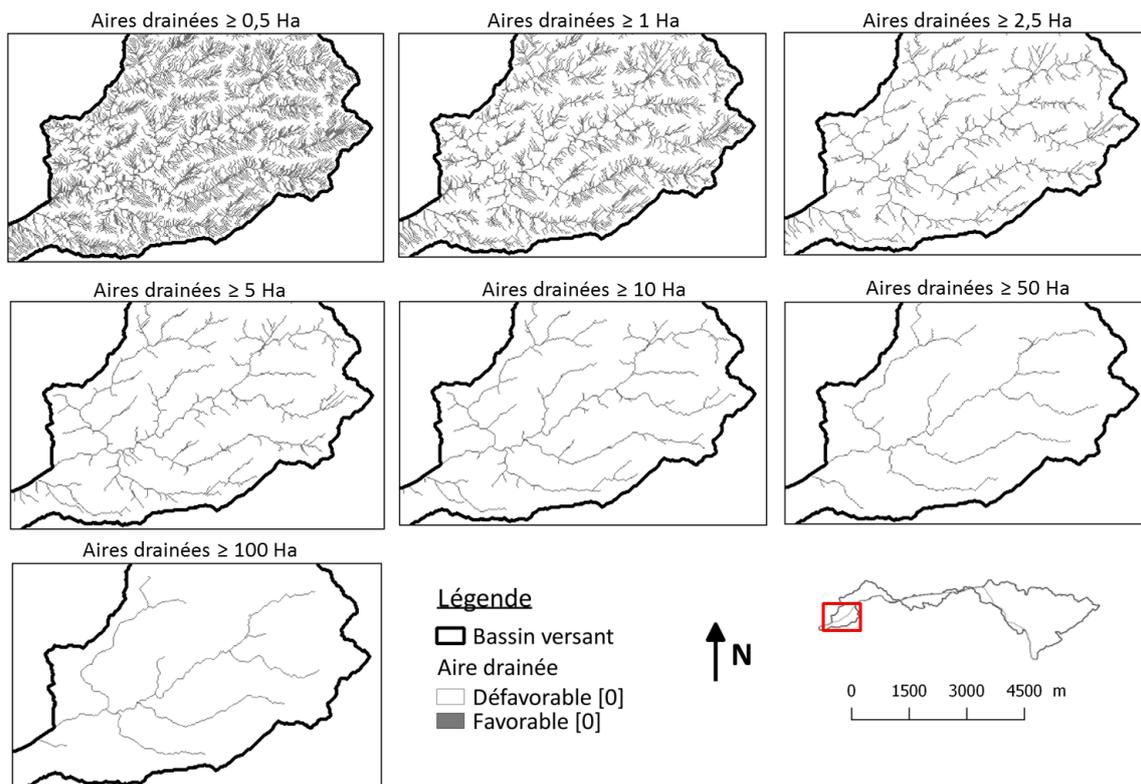


FIGURE II-86 : CARTES DE L'INDICATEUR BINAIRE D'AIRE DRAINEE POUR LES SEPT SEUILS A TESTER

### 3.4.3. RESULTATS SUR L'ÉVALUATION DE LA METHODE IRIP

Pour évaluer l'impact de ce nouvel indicateur, les cartes IRIP sont évaluées visuellement et de façon quantitative, grâce à la méthode d'évaluation par comparaison aux données d'impacts. Les cartes IRIP réalisées avec les sept seuils différents sont comparées aux cartes IRIP précédemment obtenues, c'est-à-dire avec les nouveaux indicateurs de ruptures de pentes et d'érodabilité (pour la suite cette paramétrisation est appelée « référence »).

#### 3.4.3.1. RESULTATS CARTOGRAPHIQUES

Les Figure II-87 et Figure II-88 présentent les cartes IRIP de transfert et d'accumulation pour sept seuils différents d'aires drainées. On observe bien la différence entre ces sept cartes, pour lesquelles davantage de pixels sont identifiés avec des niveaux IRIP forts à mesure que l'on remonte vers les têtes de bassin. Par rapport aux cartes obtenues avec le précédent paramétrage, on peut voir que les cartes de transfert semblent plus bruitées, puisque l'indice de Horton a été retiré. On observe par ailleurs une certaine redondance de l'information sur les aires drainées entre les cartes de transfert et d'accumulation. Bien que ceci fût déjà le cas avec l'indicateur de compacité, l'effet est davantage visible sur les nouvelles cartes. Néanmoins, lorsque l'on superpose ces deux cartes, avec la carte de transfert au-dessus, on peut s'apercevoir que les informations ne sont pas complètement les mêmes (Figure II-89). Le long des axes créés par les aires drainées importantes, on observe une alternance des zones de transfert et d'accumulation. Ceci pourrait illustrer éventuellement un effet alternant entre érosion et dépôt sur un même versant. On pourrait voir des incisions sur les zones en orange et du dépôt de sédiments sur les zones en bleu. Cette hypothèse serait intéressante à vérifier par des visites sur le terrain.

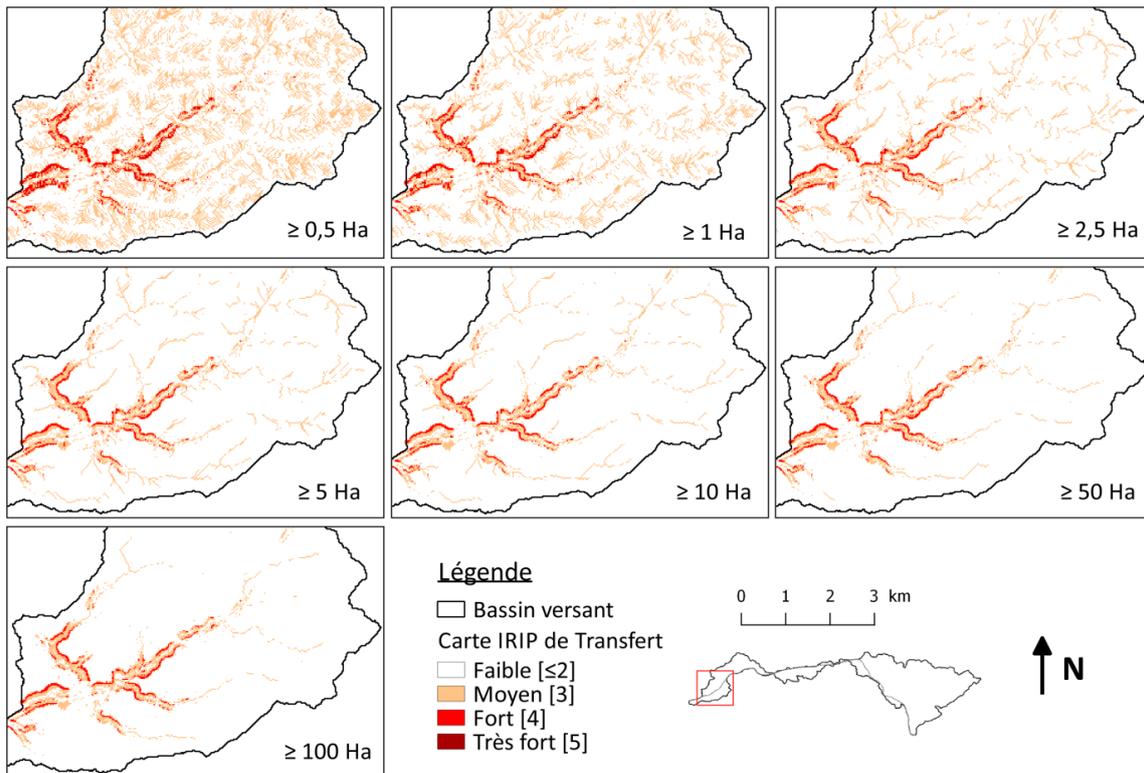


FIGURE II-87 : CARTES IRIP DE TRANSFERT CREEES POUR SEPT SEUILS D'AIRES DRAINEES

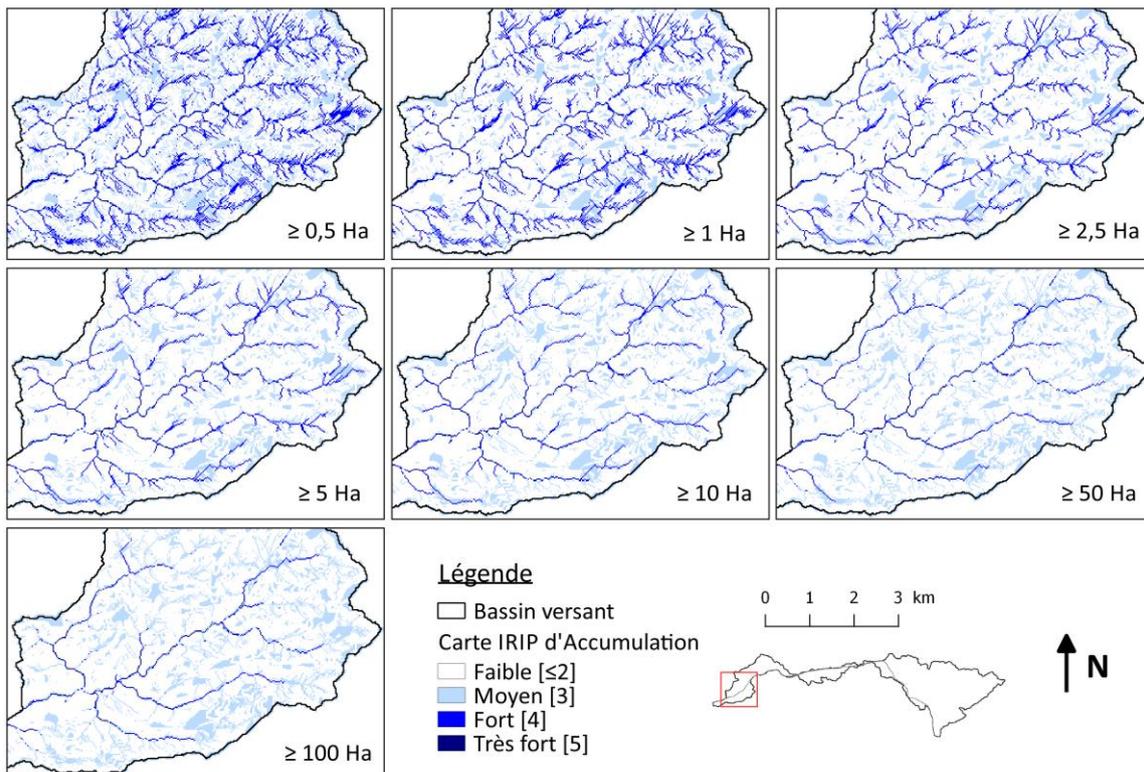


FIGURE II-88 : CARTES IRIP D'ACCUMULATION CREEES POUR SEPT SEUILS D'AIRES DRAINEES

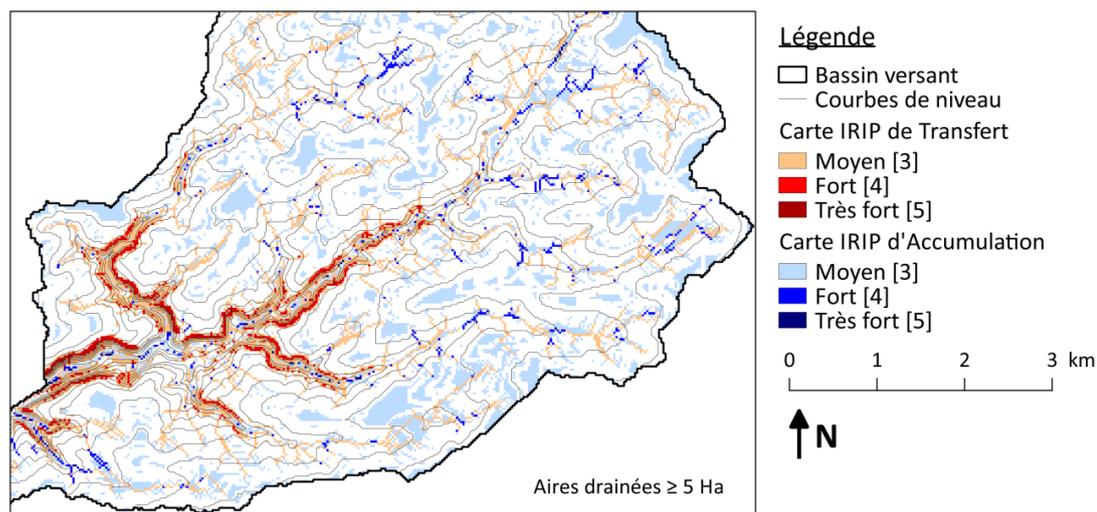


FIGURE II-89 : CARTE IRIP DE TRANSFERT POSITIONNEE SUR LA CARTE D'ACCUMULATION MONTRANT QUE LES CARTES NE SONT PAS REDONDANTES

### 3.4.3.2. RESULTATS STATISTIQUES

Les résultats de l'évaluation des cartes IRIP avec le nombre de tronçons par type de corrélation et avec les six indicateurs calculés sur la base de ces corrélations sont présentés Tableau II-43 et Tableau II-44. Ces résultats sont obtenus en utilisant la méthode B de combinaison aléa-vulnérabilité. Seuls les résultats avec la prise en compte de la vulnérabilité et des actions de mitigations sont présentés. Les autres résultats sont présentés en Annexe H. Pour ces tableaux, la référence correspond au paramétrage obtenu dans la section précédente. On observe sur ces tableaux que le nombre de faux négatifs (impacts manqués) augmentent avec le seuil d'aire drainée. Mais les faux positifs (fausses alertes) diminuent également à mesure que le seuil d'aire drainée augmente. La même tendance s'observe sur les indicateurs de performance, où la probabilité de détection diminue ainsi que le taux de fausses alarmes quand le seuil d'aire drainée augmente. Le chi-2 augmente également avec le seuil d'aire drainée.

TABLEAU II-43 : RESULTATS DU NOMBRE DE TRONÇONS PAR TYPE DE CORRELATION OBTENUS AVEC METHODE B DE COMBINAISON ALEA-VULNERABILITE ET EN PRENANT EN COMPTE LA VULNERABILITE ET LES ACTIONS DE MITIGATION

Seuils aires drainées (Ha)	V+	F+	V-	F-
<b>Référence</b>	<b>81</b>	<b>49</b>	<b>46</b>	<b>6</b>
0,5	86	54	39	3
1	86	52	41	3
2,5	85	47	46	4
5	85	45	48	4
10	85	44	49	4
50	81	41	54	6
100	78	41	57	6

**TABLEAU II-44 : RESULTATS DES SIX INDICATEURS DE PERFORMANCE OBTENUS AVEC METHODE B DE COMBINAISON ALEA-VULNERABILITE ET EN PRENANT EN COMPTE LA VULNERABILITE ET LES ACTIONS DE MITIGATION**

Seuils aires drainées (Ha)	POD	FAR	Précision	Biais	X <sup>2</sup>	Φ
Référence	0,9	0,4	0,7	1,5	38	0,5
0,5	1,0	0,4	0,7	1,6	38	0,5
1	1,0	0,4	0,7	1,6	41	0,5
2,5	1,0	0,4	0,7	1,5	46	0,5
5	1,0	0,3	0,7	1,5	49	0,5
10	1,0	0,3	0,7	1,4	51	0,5
50	0,9	0,3	0,7	1,4	51	0,5
100	0,9	0,3	0,7	1,4	52	0,5

#### 3.4.4. ANALYSE DES FAUX NEGATIFS

Le Tableau II-45 liste les tronçons faux négatifs (les impacts manqués) pour les différents seuils d'aires drainées ainsi que pour la référence. Plus le seuil d'aire drainée augmente, plus on a d'impacts manqués. Le tronçon 65 devient faux négatif lorsque l'on passe le seuil de 2,5 ha et les tronçons 78 et 183 deviennent faux négatifs lorsque l'on passe le seuil de 50 ha.

**TABLEAU II-45 : LISTE DES TRONÇONS FAUX NEGATIFS SELON LE SEUIL D'AIRE DRAINEE ET POUR LA REFERENCE QUI EST LE PARAMETRAGE AVEC LES INDICATEURS DE RUPTURES DE PENTES MODIFIEES ET D'ERODABILITE**

Référence	≥ 0,5 / 1 Ha	≥ 2,5 / 5 / 10 Ha	≥ 50 / 100 Ha
Tronçon 10	X	X	X
Tronçon 65	X	Tronçon 65	Tronçon 65
Tronçon 69	Tronçon 69	Tronçon 69	Tronçon 69
X	X	X	Tronçon 78
Tronçon 120	Tronçon 120	Tronçon 120	Tronçon 120
Tronçon 183	X	X	Tronçon 183
Tronçon 184	Tronçon 184	Tronçon 184	Tronçon 184

##### 3.4.4.1. TRONÇONS 78, 183 ET 184

Les Figure II-90 et Figure II-91 présentent des tronçons non détectés par les cartes IRIP pour des seuils d'aire drainée supérieurs ou égaux à 50 ha, mais détectés lorsque le seuil est abaissé à au moins 10 ha. Ces deux tronçons présentent des niveaux de vulnérabilité de 2, des pixels IRIP de niveau supérieurs ou égaux à 4 sont donc requis pour considérer la zone comme à risque. Or, pour ces tronçons, les niveaux IRIP sont de 3 en transfert ou en accumulation. L'utilisation d'un seuil d'aire drainée plus petit permet d'activer des pixels IRIP plus proches des têtes de bassin. Ces nouveaux pixels activés semblent bien correspondre spatialement avec des zones d'impacts. Ces exemples montrent donc que, grâce à l'indicateur d'aire drainée et au choix d'un seuil pertinent, des zones d'impacts ont pu être identifiées. Ceci justifie, pour le paramétrage de la méthode IRIP d'utiliser un seuil d'au moins 10 ha. Ceci montre également que le ruissellement semble en mesure de générer des désordres pour de très petites aires drainées, inférieures à 50 ha.

La Figure II-91 présente les tronçons 183 et 184 précédemment étudiés. Le tronçon 183 parvient finalement à être détecté grâce à l'utilisation d'un indicateur d'aire drainée et d'un seuil inférieur ou égal à 10 ha. Néanmoins le tronçon 184 est toujours considéré comme faux négatif. Pour rappel, le tronçon 183 est un passage à niveau et les deux tronçons adjacents sont des déblais. Durant l'épisode de

ruissellement qui a inondé le passage à niveau, les écoulements se sont engouffrés au début de ces deux tronçons, c'est pourquoi la zone impactée est plus étendue que le tronçon 183 uniquement. Finalement, seulement l'extrémité est du tronçon 184 est noté comme impactée, ce qui est important est que la dynamique spatiale du ruissellement au niveau du passage à niveau ait bien été détectée par les cartes IRIP. Le tronçon 184 pourrait en réalité être considéré comme un vrai négatif.

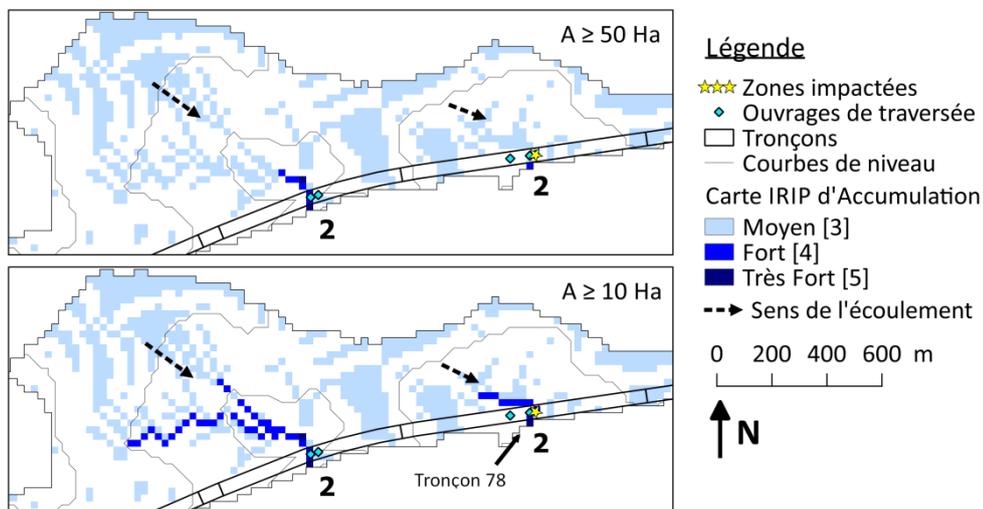


FIGURE II-90 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 78 AVEC DES SEUILS D'AIRES DRAINÉES DIFFÉRENTS, L'IMPACT EST IDENTIFIÉ AVEC LE SEUIL DE 10 HA ET NON IDENTIFIÉ AVEC LE SEUIL DE 50 HA

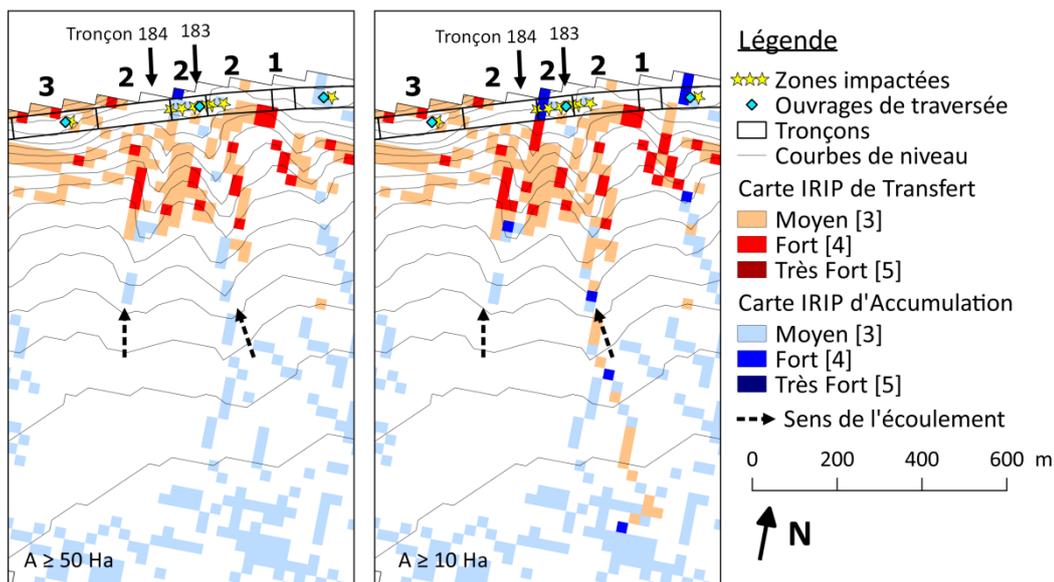


FIGURE II-91 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 183 AVEC DES SEUILS D'AIRES DRAINÉES DIFFÉRENTS, L'IMPACT EST IDENTIFIÉ AVEC LE SEUIL DE 10 HA ET NON IDENTIFIÉ AVEC LE SEUIL DE 50 HA

### 3.4.4.2. TRONÇON 65

La Figure II-92 présente la zone du tronçon 65. Ce tronçon est bien détecté pour un seuil d'aire drainée inférieure ou égale à 1 ha, mais il n'est plus détecté à partir de seuils supérieurs ou égaux à 2,5 ha. Pour rappel, ce tronçon a été étudié précédemment, il est établi en déblai et est localisé entre deux remblais courts qui ont été détruits suite à un épisode de ruissellement intense. Le tronçon 65 a toujours été

détecté comme faux négatifs avec les paramétrages précédents. L'hypothèse avait été faite qu'une partie de l'écoulement avait été déviée par les talus et s'était engouffrée dans le déblai depuis le remblai du tronçon 66. Le tronçon 65 est à présent détecté comme vrai positif, mais grâce à un pixel fort en accumulation seulement. Finalement, la différence au niveau du tronçon 65 entre les cartes IRIP avec un seuil de 2,5 et de 1 ha n'est pas très importante. Ce pixel supplémentaire n'apporte pas d'information supplémentaire quant à la dynamique spatiale de l'écoulement. L'hypothèse de l'influence des talus sur l'écoulement semble toujours la plus probable. En conclusion, l'étude de ce tronçon n'est pas suffisante pour déterminer si le seuil de 1 ha est meilleur que le seuil de 2,5 ha, pour cartographier le ruissellement, mais permet de dire qu'un seuil autour de 1 ou 2,5 ha semble intéressant.

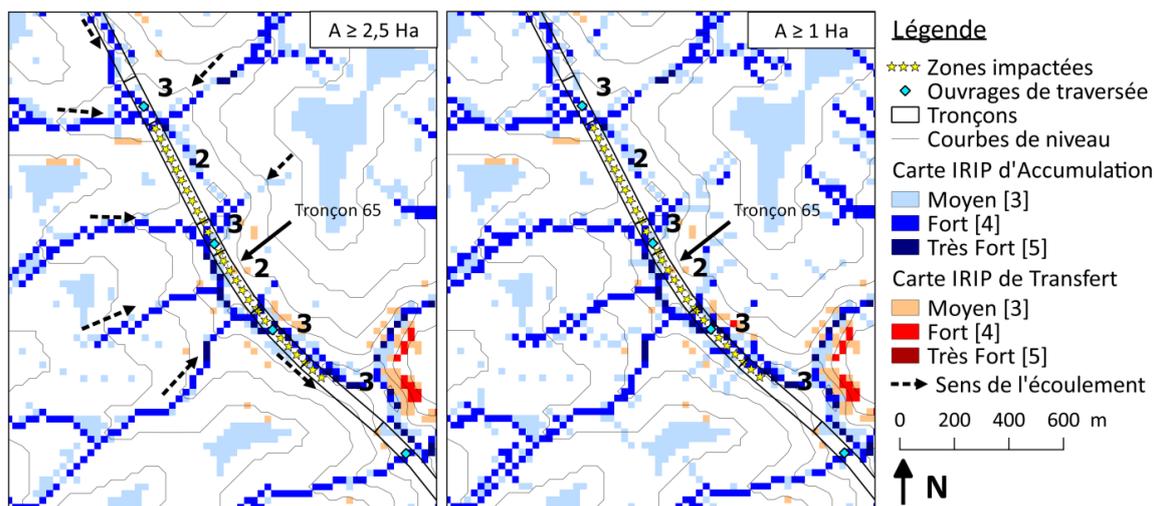


FIGURE II-92 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 65 DETECTE EN VRAI POSITIF POUR UN SEUIL  $\leq 1$  HA MAIS SEULEMENT GRACE A UN PIXEL FORT CE QUI NE PERMET PAS DE CONCLURE QUANT AU CHOIX DE SEUIL POUR CARTOGRAPHIER LE RUISSELLEMENT

#### 3.4.4.3. TRONÇONS 69 ET 120

Les tronçons 69 et 120 sont les derniers tronçons faux négatifs. La corrélation du tronçon 184 a finalement été justifiée dans cette section. La Figure II-93 présente la zone du tronçon 120, la zone du tronçon 69 est en Annexe I. La particularité de ces deux tronçons est qu'ils sont des profils rasants. Ils ont donc un niveau de vulnérabilité de 1. Ainsi, des niveaux 5 sont requis pour considérer ces tronçons comme à risque, d'après la méthode B de combinaison aléa-vulnérabilité. Or, les cartes de ces tronçons montrent qu'ils sont détectés par des niveaux 4 au maximum. Néanmoins, les cartes IRIP obtenues avec la prise en compte de l'aire drainée semblent détecter de façon cohérente la dynamique spatiale du ruissellement autour de cette zone. Les cartes semblent pouvoir expliquer de façon détaillée les circonstances de ces désordres, ce qui n'était pas le cas avec les paramétrages précédents. Par exemple, sur le tronçon 120, les cartes IRIP n'apportaient que peu d'informations au début des tests d'amélioration, mais l'indicateur d'aire drainée a finalement permis d'identifier le chemin d'écoulement. Le chemin semble d'ailleurs bien correspondre avec la position de l'ouvrage hydraulique de traversée sous voie. Ces deux exemples semblent finalement montrer que les profils rasants pourraient être plus vulnérables que ce qui avait été pressenti lors de la création de l'arbre de vulnérabilité. Un niveau IRIP d'aléa de 4 semblerait suffire à déclencher un désordre. Le fait qu'un profil rasant soit vulnérable au ruissellement fait sens, bien que la configuration locale de l'infrastructure et les caractéristiques du bassin versant semblent très importantes à considérer pour les profils rasants. Ceci serait intéressant à discuter avec des agents du ferroviaire. Concernant le seuil d'aire drainée, les cartes sur les tronçons 120 et 69

sont présentées avec un seuil d'aire drainée de 5 ha, car ce sont ces cartes qui ont été jugées plus lisibles pour la démonstration. Néanmoins, le choix du seuil reste à discuter. Ces différents exemples semblent montrer qu'un seuil entre 1 et 5 ha serait pertinent.

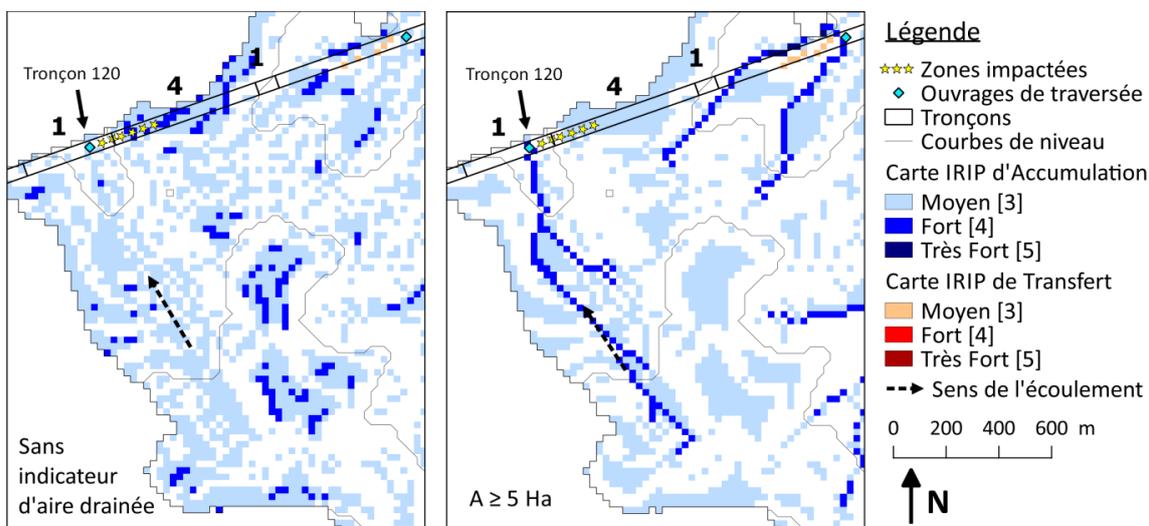


FIGURE II-93 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 120 AVANT ET APRES PRISE EN COMPTE DE L'AIRES DRAINEE QUI AMELIORE NETTEMENT LES CARTES IRIP

#### 3.4.5. CONCLUSION SUR L'INDICATEUR D'AIRES DRAINEE

Cette section se focalise sur la carte d'accumulation et propose d'utiliser un indicateur d'aire drainée en remplacement de l'indicateur de compacité. L'indicateur de compacité, implémenté sous la forme de l'indice de Horton dans le logiciel iRIP©, ne semblait pas pertinent pour être appliqué à un calcul distribué sur un MNT. De plus, l'effet de concentration des écoulements qui souhaitait être représenté par cet indicateur n'était pas convainquant. Il a donc été proposé d'utiliser un indicateur d'aire drainée. L'indicateur d'aire drainée était déjà utilisé pour la carte d'accumulation en combinaison avec l'indicateur de compacité, mais avec un seuil de 1 km<sup>2</sup>. L'aire drainée a été jugée plus pertinente pour représenter le potentiel en certains points du bassin de recevoir des quantités d'eau importantes. Pour utiliser l'aire drainée comme indicateur des cartes IRIP, un seuil doit être défini afin de départager entre favorable et défavorable au ruissellement. Sept seuils ont été testés, de 0,5 ha à 1 km<sup>2</sup>.

La comparaison entre ces différents seuils a été faite de façon visuelle et quantitative. Les représentations cartographiques obtenues semblent en effet plus pertinentes qu'avec l'indice de compacité. Ces nouvelles cartes permettent même, pour les tronçons étudiés, de comprendre la dynamique spatiale de l'épisode de ruissellement qui a conduit au désordre sur la voie ferrée. L'analyse détaillée des tronçons faux négatifs montre également que le ruissellement peut causer des désordres pour de très petites aires drainées bien inférieures au kilomètre carré. L'évaluation quantitative par comparaison aux données d'impact montre, également dans ce sens, que l'augmentation du seuil d'aire drainée vers le kilomètre carré augmente le nombre d'impacts manqués. Finalement, l'évaluation visuelle et quantitative montre qu'un seuil entre 1 et 5 ha semble permettre d'optimiser le nombre d'impacts manqués par rapport au nombre de fausses alertes, et par rapport à la lisibilité des cartes. Le choix final de ce seuil peut alors être laissé à l'utilisateur en fonction de l'objectif de l'étude et s'il est nécessaire d'avoir beaucoup de détails ou bien une carte plus facile à lire.

En conclusion, trois modifications ont été apportées sur les cartes IRIP, concernant l'indicateur des ruptures de pentes, l'indicateur des axes linéaires au sol qui a été remplacé par l'indicateur d'érodabilité, et l'indicateur de compacité qui a été remplacé par l'indicateur d'aire drainée. Le Tableau II-46 fait la synthèse du paramétrage final conseillé. Ce qui est important à retenir est que les tests effectués l'ont été sur des indicateurs vraiment problématiques, dont les défauts ont bien été identifiés. Finalement peu de modifications ont été effectuées. Seuls trois indicateurs ont été modifiés, les effets induits sont donc bien appréhendables. La philosophie de la méthode IRIP n'a pas été changée. Les résultats chiffrés n'ont pas beaucoup évolué mais les représentations cartographiques sont beaucoup plus lisibles et pertinentes. Néanmoins, ces modifications sont-elles toujours valables si l'on change les données d'entrée, et en particulier, si l'on change de MNT, sur lequel repose huit indicateurs sur les neuf utilisés pour construire les cartes IRIP ? Pour la suite, les modifications proposées sur la méthode IRIP seront réalisées sur différents MNT, afin de mieux appréhender l'influence de la qualité et de la résolution de cette donnée, qui est primordiale pour la méthode IRIP.

**TABLEAU II-46 : SYNTHÈSE DU PARAMÉTRAGE FINAL CONSEILLÉ, AVEC EN ROUGE LES MODIFICATIONS PAR RAPPORT AU PARAMÉTRAGE PAR DÉFAUT**

Cartes IRIP	Indicateurs	Seuils de favorabilité (note de 1)
PROD	Perméabilité	$K_s < 10^{-6} \text{ m/s} + \text{ZU}$
	<b>Battance</b>	<b><math>Battance \geq 3 + \text{ZU}</math></b>
	Épaisseur	Épaisseur $\leq 50 \text{ cm} + \text{ZU}$
	Occupation du sol	Zones urbaines (ZU) et agricoles = 1
TRANS	Pentes fortes + indice topographique	Algorithme de classification
	Production amont	Mode du bassin versant amont $\geq 3$
	Pentes fortes	Algorithme de classification
	<b>Ruptures de pentes convexes</b>	<b><math>\leq 0,0018</math> (fonction GRASS GIS <math>r.param.scale</math> ; 3 pixels)</b>
ACC	<b>Aire drainée</b>	<b><math>A \geq \text{entre } 1 \text{ et } 5 \text{ Ha}</math></b>
	<b>Erodabilité</b>	<b><math>Erodabilité \leq 3 - \text{ZU}</math></b>
	Production amont	Mode du bassin versant amont $\geq 3$
	Pentes faibles	Algorithme de classification
ACC	<b>Ruptures de pentes concaves</b>	<b><math>\leq -0,0018</math> (fonction GRASS GIS <math>r.param.scale</math> ; 3 pixels)</b>
	<b>Aire drainée</b>	<b><math>A \geq \text{entre } 1 \text{ et } 5 \text{ Ha}</math></b>
	Indice topographique	Algorithme de classification

### 3.5. L'INFLUENCE DE LA RÉOLUTION DU MNT

#### 3.5.1. IMPORTANCE DE LA DONNÉE TOPOGRAPHIQUE DANS LA MÉTHODE IRIP

Le MNT est une des trois données d'entrée nécessaires à la construction des cartes IRIP, en plus des données de sols et d'occupation du sol. La donnée de sol permet de construire quatre indicateurs : la perméabilité, l'épaisseur, la battance et l'érodabilité. La donnée d'occupation du sol est utilisée pour un indicateur dans la carte de production. Pour les cartes de transfert et d'accumulation l'indicateur de production amont est donc basé en partie sur ces données de sol et d'occupation du sol. Le MNT, quant à lui intervient dans la construction de dix indicateurs sur quinze. Le Tableau II-47 présente les poids relatifs de chaque donnée d'entrée pour construire les cartes IRIP, pour la méthode IRIP par défaut et pour la méthode IRIP modifiée. Pour la combinaison des cartes transfert et accumulation (T+A), le MNT vaut pour 74 % des données d'entrée. La qualité de cette donnée d'entrée est donc primordiale. Quelques éléments de réflexion sont apportés.

**TABLEAU II-47 : POIDS RELATIFS DE CHAQUE DONNEES D'ENTREE POUR LA CONSTRUCTION DES CARTES IRIP, DANS LEUR VERSION PAR DEFAUT ET MODIFIEE (T+A SIGNIFIE COMBINAISON DES CARTES TRANSFERT ET ACCUMULATION).**

Version IRIP	Cartes IRIP	MNT	Pédologie	Occupation du sol	Total
Par défaut	Production	0,20	0,60	0,20	1
	Transfert	0,64	0,12	0,24	1
	Accumulation	0,84	0,12	0,04	1
	T+A	0,74	0,12	0,14	1
	Total	0,56	0,28	0,16	1
Modifiée	Production	0,20	0,60	0,20	1
	Transfert	0,64	0,32	0,04	1
	Accumulation	0,84	0,12	0,04	1
	T+A	0,74	0,22	0,04	1
	Total	0,56	0,35	0,09	1

Le MNT permet le calcul des pentes, des ruptures de pentes, de l'indice topographique, des aires drainées et intervient également dans l'indicateur de production amont. Le MNT permet tout d'abord de créer la carte des pentes, qui est à la base de la construction notamment des indicateurs de pentes faibles et fortes. La carte des pentes permet ensuite de construire le plan de drainage (algorithme de type D8 implémenté dans le logiciel iRIP©). Le plan de drainage est la carte des directions des écoulements de pixels à pixels. Ce plan de drainage permet ensuite de calculer les surfaces drainées, et par la même occasion de définir le bassin versant relatif à chaque pixel. Ces cartes intermédiaires permettent ensuite de calculer l'indice topographique qui fait intervenir la pente et l'aire drainée, ainsi que l'indicateur de production amont qui prend en compte le bassin amont relatif à chaque pixel. Enfin, le MNT permet de calculer les ruptures de pentes, via le calcul des courbures sur les axes de plus grandes pentes en chaque pixel. La bonne qualité du MNT est donc un critère déterminant pour la réalisation de cartes IRIP pertinentes, devant le critère de résolution.

En effet, un MNT peut être de résolution grossière et de bonne qualité, il peut également être à haute résolution mais de qualité médiocre. La résolution indique la densité de pixel, tandis que la qualité indique l'exactitude altimétrique. La qualité d'un même MNT peut varier selon les zones, en fonction des techniques d'acquisition. Par exemple, avec des techniques LiDAR on peut obtenir une précision de l'ordre du centimètre ou de la dizaine de centimètre, avec des techniques Radar, sur les zones de montagnes par exemple, la précision sera davantage de l'ordre de plusieurs mètres, tandis que pour les zones plus planes, la précision peut être inférieure au mètre. La qualité globale du MNT peut aussi être caractérisée par son exactitude en x et en y, parfois les MNT peuvent subir un décalage planimétrique, voire rotationnel. Les décalages peuvent être sources d'erreurs notamment lorsque des données de sources différentes sont utilisées ensemble. Il peut alors y avoir des erreurs dans la géolocalisation. Par ailleurs, il a également été observé que si les valeurs d'altitude ne sont pas assez précises, si elles sont arrondies par exemple, ceci impacte la qualité de la donnée et peut engendrer des effets « terrasse » pour certains calculs topographiques. Finalement, les informations sur la précision des données et sur la résolution sont fournies par les producteurs et souvent disponibles dans les métadonnées fournies avec les données.

Dans cette section, il est proposé d'étudier l'influence du choix du MNT sur les cartes IRIP finales. Cette étude est basée sur des comparaisons qualitatives de cartes IRIP de différentes résolutions. Il avait été évoqué durant la thèse de réaliser une évaluation quantitative de l'influence du choix du MNT (en termes de résolution et de qualité) sur les cartes IRIP finales de transfert et d'accumulation, mais il a finalement

paru plus pertinent d'approfondir l'évaluation et le développement avec un même jeu de données. L'évaluation quantitative pourrait se faire, par exemple, en appliquant la méthode d'évaluation par comparaison aux données d'impacts avec différentes cartes IRIP de résolutions différentes. Néanmoins ceci nécessite d'adapter un minimum la méthode d'évaluation, notamment au niveau de la largeur de la zone tampon autour de la voie ferrée, ou encore au niveau d'un nombre de pixels fort minimum pour considérer une zone comme exposée (pour le MNT 25 m, un pixel fort est considéré suffisant). De plus, la résolution des cartes IRIP, pour être comparées avec des données d'impact sur les voies ferrées, doit rester raisonnable. Une résolution de 100 m paraît déjà trop importante pour retrouver les impacts liés au ruissellement. La résolution d'étude doit être liée à l'échelle du phénomène que l'on souhaite étudier. Finalement, l'évaluation quantitative n'est pas réalisée dans le cadre de la thèse, néanmoins, l'impact du changement de données topographiques semble important à discuter. Il paraît évident que le changement de résolution va changer l'allure des cartes, mais plusieurs aspects sont importants à vérifier. Tout d'abord au niveau de la faisabilité technique. Y a-t-il besoin de réaliser des adaptations du paramétrage de la méthode IRIP selon la résolution de l'étude ? Le nouveau paramétrage conseillé peut-il être réalisé avec d'autres MNT que celui utilisé pour les tests ? Est-il possible de conseiller une résolution optimale pour l'étude des phénomènes liés au ruissellement ? Par ailleurs, concernant les informations spatiales fournies par les cartes IRIP, est-il possible de fournir une méthode d'analyse selon la résolution ? Y a-t-il une persistance spatiale des zones sensibles au ruissellement en changeant de résolution ? Si c'est le cas, est-ce possible de faire une analyse en procédant par agrandissement successifs, c'est-à-dire, depuis des résolutions grossières sur une zone étendue, jusqu'à des résolutions très fines sur des zones précises qui sont ressorties comme sensibles ? De plus, l'utilisation de données haute résolution (de l'ordre du mètre) peuvent-elles permettre de cartographier l'influence de la micro/macro topographie sur les écoulements ?

Pour répondre à ces questions, cette section se divise en deux étapes. Dans un premier temps, les modifications proposées sur le paramétrage de la méthode IRIP sont appliquées pour différents MNT, de sources différentes, afin de voir si le paramétrage proposé est toujours pertinent sur d'autres résolutions et qualités. Ensuite, une analyse détaillée sur deux tronçons précédemment étudiés, les tronçons 125 et 178, sera réalisée pour comparer les résultats obtenus avec une résolution de 25 m et une résolution de 5 m acquise par technique LiDAR.

### 3.5.2. COMPARAISON POUR CINQ RESOLUTIONS DIFFERENTES

#### 3.5.2.1. PRESENTATION DES MNT

Dans cette section, les cartes IRIP sont réalisées pour cinq MNT différents, et en utilisant le paramétrage par défaut, ainsi que le paramétrage final conseillé obtenu à la fin de la section précédente. Le Tableau II-48 présente les cinq MNT utilisés, les sources, les résolutions et leurs caractéristiques. Pour cette comparaison, seuls les 30 derniers kilomètres du tronçon de Rouen au Havre sont étudiés, car le MNT LiDAR n'est disponible que sur cette partie de la zone d'étude. Les objectifs sont, tout d'abord, de savoir s'il y a des contraintes techniques ou des adaptations à faire pour réaliser les cartes IRIP si l'on change de MNT. Ensuite, il s'agit de vérifier si les améliorations conseillées dans ce chapitre sont toujours effectives pour d'autres résolutions. Enfin, la comparaison des différentes résolutions devra permettre de conseiller les utilisateurs potentiels pour une résolution optimale. Ces comparaisons sont effectuées de manière qualitative, en comparant une à une les cartes de transfert et d'accumulation, avec le paramétrage par défaut et le paramétrage conseillé.

TABLEAU II-48 : SYNTHÈSE DES CARACTÉRISTIQUES DES CINQ MNT UTILISÉ POUR LA COMPARAISON

Sources	Résolutions	Techniques d'acquisition	Remarques
IGN	250 m	Radar et Numérisation de cartes	
IGN	75 m	Radar et Numérisation de cartes	
SRTM	30 m	Radar	Décalage planimétrique (en x et y)
IGN	25 m	Radar et Numérisation de cartes	Altitude arrondie au mètre
IGN	5 m	LiDAR	

### 3.5.2.2. ADAPTATION DU PARAMÉTRAGE

Concernant la réalisation des cartes IRIP, aucune adaptation n'est requise pour créer les cartes IRIP avec différents MNT, avec le paramétrage par défaut. Pour le paramétrage conseillé, il est possible également de l'utiliser tel quel, bien que quelques adaptations permettent une meilleure visualisation des cartes, notamment pour les résolutions les plus larges et les plus fines. Sur les figures suivantes, le seuil d'aire drainée a été adapté pour le MNT 250 m, et, le nombre de pixel pour calculer la courbure de pente a été adaptée pour le MNT 5 m.

#### L'INDICATEUR D'AIRE DRAINÉE

Concernant le seuil d'aire drainée, ces cartes ont été réalisées avec un seuil de 2,5 ha. Pour la résolution de 5 m, ce seuil correspond environ à une surface drainée de 1000 pixels, pour les résolutions de 25 et 30 m, cela correspond à environ 40 et 30 pixels. Mais, pour du 75 m, cela correspond à 5 pixels environ, ce qui signifie qu'une grande partie de la zone d'étude est activée pour l'indicateur d'aire drainée. Enfin, pour du 250 m, un pixel fait déjà une surface de 6,3 ha, donc l'indicateur d'aire drainée n'est plus pertinent. Pour cette carte ce seuil a été augmenté de façon à ce que la surface drainée corresponde à 5 pixels environ, comme c'est le cas pour le MNT 75 m. Ceci donne un seuil d'aire drainée d'environ 30 ha, pour les cartes réalisées avec le MNT 250 m. Par ailleurs, pour les cartes réalisées avec le MNT 5 m, le seuil de 2,5 ha a été conservé, néanmoins pour un besoin de clarté de visualisation, selon les utilisations des cartes IRIP, il est possible de relever également ce seuil. Si le seuil est supérieur à 2,5 ha, moins d'informations seront affichées, les cartes sembleront plus lisible, mais de l'information sera perdue. Pour le seuil d'aire drainée, il est donc conseillé d'utiliser un seuil entre 1 et 5 ha (cf. section 3.4), néanmoins l'utilisateur peut adapter le seuil en fonction de ses besoins d'analyse ou de communication par exemple.

#### L'INDICATEUR DES RUPTURES DE PENTES

La proposition qui a été faite, de calculer les ruptures de pentes sur la base de la fonction « r.param.scale » du logiciel GRASS GIS, c'est-à-dire selon les caractéristiques locales, nécessite de définir un paramètre. Ce paramètre est le nombre de pixels à considérer, de part et d'autre du pixel d'étude, pour identifier l'axe de plus grande pente, afin d'en calculer la courbure. Dans la section 3.2, il a été déterminé que l'axe de calcul de la courbure devrait être aux alentours de 50 à 150 m. Ce choix peut être discuté, mais cette longueur permet d'identifier une courbure à l'échelle macro, sans détecter les rugosités de la microtopographie, tout en détectant des ruptures assez légères sur les plateaux par exemple. Sur la base du MNT 25 m, le nombre de pixel a donc été fixé à 3 (1 pixel de part et d'autre du pixel d'étude). Ceci fait une longueur de 75 m. Pour les autres résolutions de MNT, plus grandes que 25 m, ce seuil ne peut pas être réduit. Pour les autres résolutions, un seuil de 3 pixels correspond donc à une longueur de 90, 225 et 750 m pour, respectivement, les résolutions de 30, 75 et 250 m. Par ailleurs, pour une résolution de 5 m, ce seuil correspondrait à 15 m, ce qui a été jugé trop faible pour identifier des caractéristiques de surfaces de plus grande échelle. Ainsi, il a été décidé pour réaliser les cartes IRIP, de se

baser sur le seuil choisi pour le MNT 25 m, qui a été davantage étudié, c'est-à-dire de prendre une longueur de 75 m, correspondant à un seuil de 15 pixels, pour le 5 m.

Pour conclure sur les contraintes techniques, la réalisation des cartes IRIP avec le paramétrage conseillé requiert une adaptation des indicateurs d'aire drainée, pour des résolutions de 250 m et plus, et une adaptation de l'indicateur des ruptures de pentes pour des résolutions de 5 m et moins. Par ailleurs, des adaptations peuvent être réalisées *a posteriori* par les utilisateurs en fonction de leurs besoins. Une analyse hydrologique nécessitera des cartes très détaillées, tandis qu'un objectif de communication nécessitera des cartes plus clarifiées.

#### 3.5.2.3. COMPARAISON DES REPRESENTATIONS CARTOGRAPHIQUES

Les cartes IRIP de transfert et d'accumulation réalisées pour les cinq MNT, de 250 m à 5 m de résolution sont présentées de Figure II-94 à Figure II-103. Les cartes de gauche sont réalisées avec le paramétrage par défaut, les cartes de droites avec le paramétrage conseillé. Ces cartes sont présentées sur la même zone, à l'exception de la carte à 250 m qui est présentée avec un zoom arrière, et de la carte 5 m avec un zoom avant, afin de visualiser les détails (comme indiqué sur la miniature de la zone d'étude). La miniature de la zone d'étude (en bas à droite des Figures) montre d'ailleurs des différences sur la forme du bassin selon les résolutions. Le bassin versant à 250 m semble plus grand que le bassin à 5 m. En effet, le logiciel iRIP©, adaptée à une utilisation dans le contexte ferroviaire, permet de découper le bassin versant relatif à un linéaire, grâce au calcul du plan de drainage. Néanmoins, il est évident que si la donnée topographique est différente, les contours du bassin le seront également. Il est tout de même possible si le bassin versant est connu, de forcer la réalisation des cartes IRIP dans l'emprise décidée.

Globalement, les cartes réalisées avec le paramétrage conseillé semblent plus lisibles et plus cohérentes pour tous les MNT. Tout d'abord, la carte de transfert apporte davantage d'informations sur l'ensemble du bassin avec le paramétrage conseillé par rapport à la carte par défaut. Les flancs du réseau de talwegs principaux (sud-ouest de la carte), zones généralement propices au transfert fort et à l'érosion, sont mieux détectés et plus loin en amont. Les informations sur les plateaux semblent également plus intéressantes avec le paramétrage conseillé. Seule, la carte de transfert au 25 m paraît plus faible. Ceci est lié au fait que l'indicateur des ruptures de pentes a été corrigé des artefacts créés par le MNT. Seules les ruptures fortes dans le paysage ont été conservées. A ce sujet, la carte au 30 m, qui est proche en résolution de celle au 25 m, prend en compte les petites ruptures convexes sur les plateaux et ceci fait ressortir beaucoup de zones avec des pixels de niveau 3, qu'il serait intéressant d'investiguer sur le terrain. S'agit-il de zones où des traces d'érosion diffuse ou concentrée pourraient être observées ? La carte au 5 m quant à elle semble donner des détails très précis. On peut identifier les méandres du talweg autour de la voie ferrée, qui semble être très propices au ruissellement, ainsi qu'un échangeur autoroutier (côté est) qui semble lui moins sensible au transfert du ruissellement. Sur la carte 5 m, on peut également identifier avec des niveaux 4 et 5 les axes de l'indicateur d'aires drainées qui pourraient éventuellement montrer des zones d'érosion concentrée.

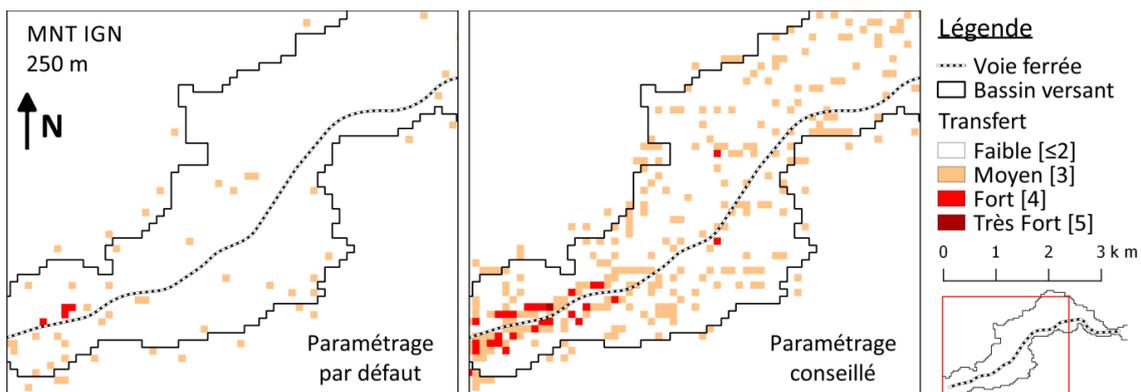


FIGURE II-94 : CARTES IRIP DE TRANSFERT REALISEES AVEC UN MNT 250 M, POUR DEUX PARAMETRAGES DIFFERENTS

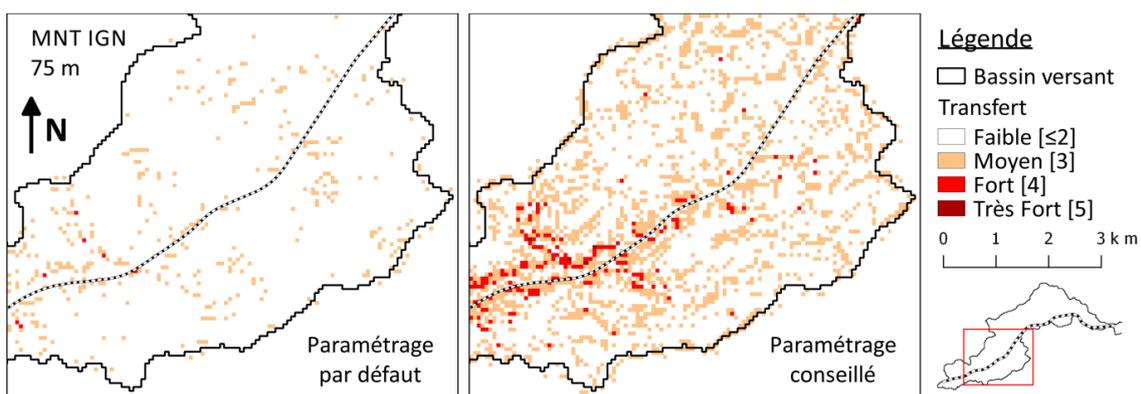


FIGURE II-95 : CARTES IRIP DE TRANSFERT REALISEES AVEC UN MNT 75 M, POUR DEUX PARAMETRAGES DIFFERENTS

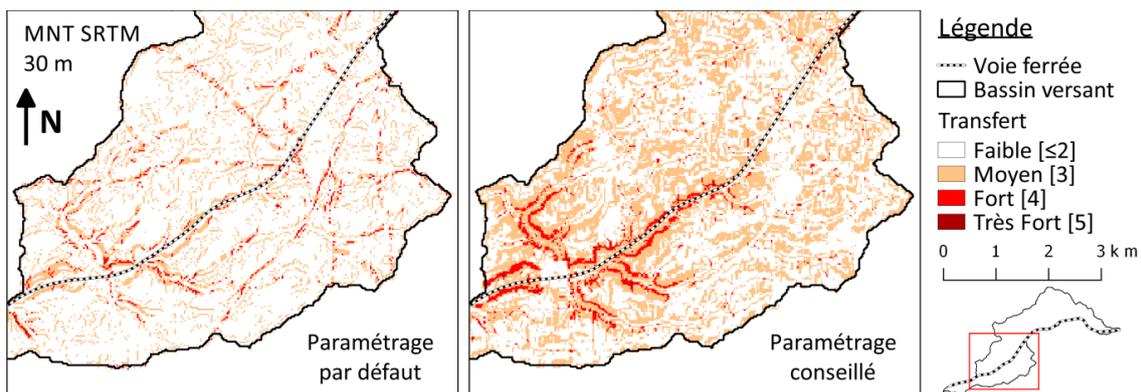


FIGURE II-96 : CARTES IRIP DE TRANSFERT REALISEES AVEC UN MNT 30 M, POUR DEUX PARAMETRAGES DIFFERENTS

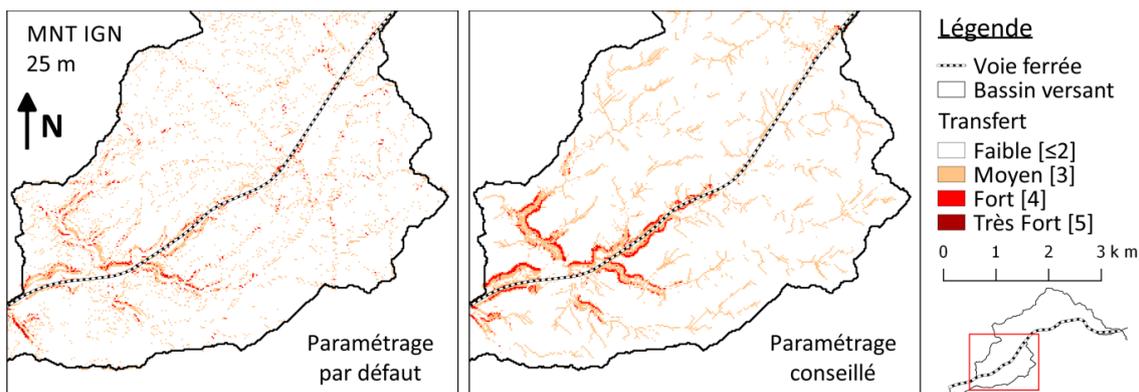


FIGURE II-97 : CARTES IRIP DE TRANSFERT REALISEES AVEC UN MNT 25 M, POUR DEUX PARAMETRAGES DIFFERENTS

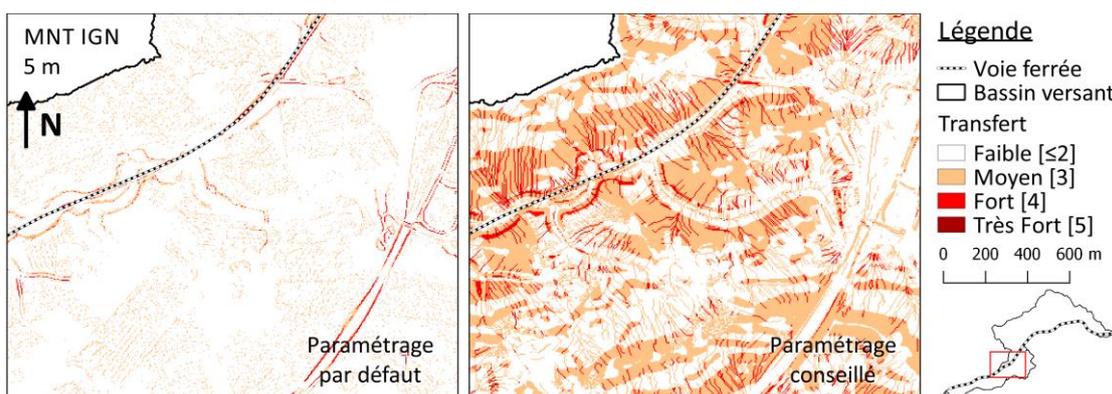


FIGURE II-98 : CARTES IRIP DE TRANSFERT REALISEES AVEC UN MNT 5 M, POUR DEUX PARAMETRAGES DIFFERENTS

Concernant les cartes d'accumulation, elles sont également plus lisibles sur les cartes produites avec le paramétrage conseillé (cartes de droite). Les axes d'écoulement concentrés sont plus facile à identifier, avec des niveaux 4 et 5, par rapport aux plateaux qui ont des niveaux inférieurs, néanmoins, des zones d'accumulation sont également visibles sur les plateaux. Les cartes par défaut présentent davantage de niveaux 3, ceci est dû aux indicateurs de compacité et de ruptures de pentes qui apportent un certain bruitage. De plus, plus la résolution devient fine, plus il est possible d'identifier les dynamiques d'écoulement proche des têtes de bassin. Ceci est nettement visible sur la carte au 5 m, qui montre, comme sur la carte de transfert au 5 m, les axes issus de l'indicateur des aires drainées. Sur la carte d'accumulation ces axes sont accentués par l'indice topographique. On peut voir que la carte réalisée avec le MNT 250 m semble bien reproduire les zones les plus sensibles identifiées avec les résolutions inférieures, néanmoins, cette résolution semble peu pertinente pour l'étude de ruissellement. Elle peut éventuellement être utile pour réaliser des cartographies sur de très grandes surfaces. Ceci pourrait permettre d'appréhender le comportement global du bassin d'étude, mais cette résolution n'est certainement pas suffisante.

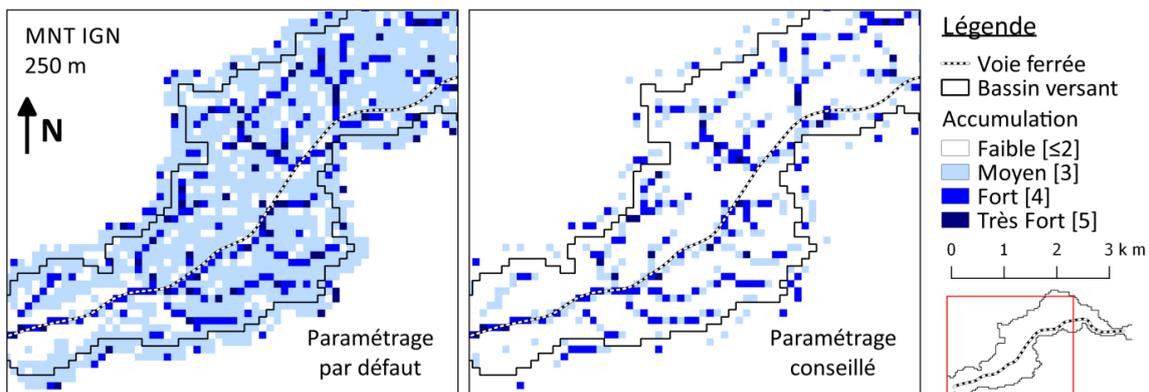


FIGURE II-99 : CARTES IRIP D'ACCUMULATION REALISEES AVEC UN MNT 250 M, POUR DEUX PARAMETRAGES DIFFERENTS

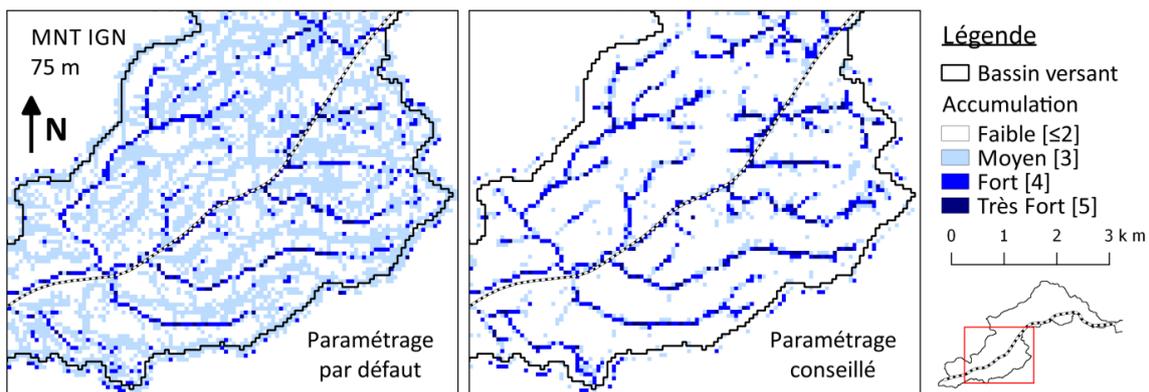


FIGURE II-100 : CARTES IRIP D'ACCUMULATION REALISEES AVEC UN MNT 75 M, POUR DEUX PARAMETRAGES DIFFERENTS

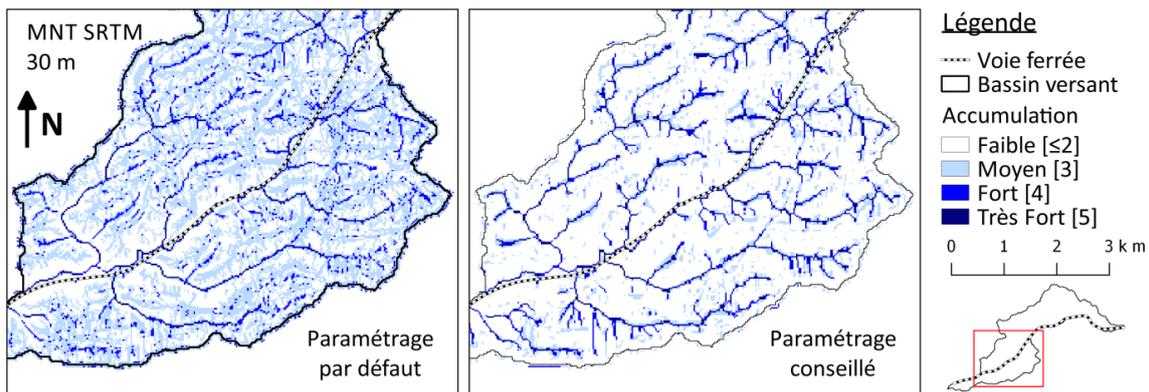


FIGURE II-101 : CARTES IRIP D'ACCUMULATION REALISEES AVEC UN MNT 30 M, POUR DEUX PARAMETRAGES DIFFERENTS

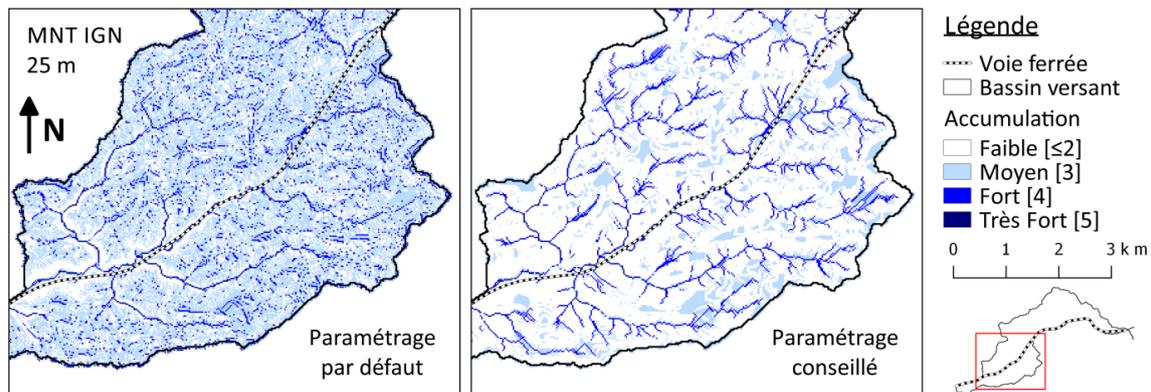


FIGURE II-102 : CARTES IRIP D'ACCUMULATION REALISEES AVEC UN MNT 25 M, POUR DEUX PARAMETRAGES DIFFERENTS

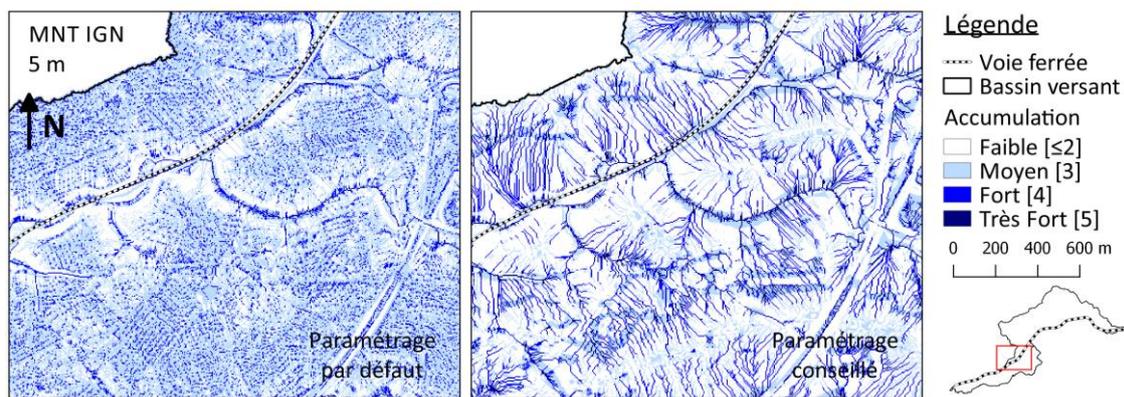


FIGURE II-103 : CARTES IRIP D'ACCUMULATION REALISEES AVEC UN MNT 5 M, POUR DEUX PARAMETRAGES DIFFERENTS

En conclusion, cette comparaison qualitative montre que le paramétrage conseillé semble plus pertinent quelle que soit la résolution de l'étude. Les cartes de transfert apportent davantage d'information, ce qui est plus utile pour identifier les zones les plus sensibles. La carte d'accumulation est plus lisible, les axes d'écoulements concentrés sont rapidement identifiables et de nombreux détails sont disponibles jusqu'en tête de bassin. Néanmoins, cette comparaison est peu approfondie et l'on ne dispose pas de référence chiffrée pour évaluer la performance de chacune de ces cartes pour identifier les zones exposées à l'aléa ruissellement. Il pourrait être intéressant, pour comparer ces différentes cartes, d'utiliser un indicateur spatialisé, qui puisse évaluer le changement entre deux cartes, et quantifier ce changement. Certaines études proposent des méthodes pour comparer des cartes de type raster, il est proposé dans ces études des alternatives à la comparaison par superposition, pixel à pixel, par exemple des méthodes qui permettent de pondérer l'importance des détails de la carte en fonction de leur distance au point d'intérêt (méthodes de type fenêtre mobile) (Hagen-Zanker, 2006; Hagen-Zanker et Martens, 2008). Ces méthodes pourraient être intéressantes à tester mais il faut pouvoir déterminer une référence. Quelle carte choisir en tant que référence pour évaluer toutes les autres ? Ceci pose la question encore une fois du manque de cartes de référence par rapport auxquelles évaluer les cartes IRIP. Par ailleurs, changer la résolution du MNT, impacte évidemment la carte finale puisque l'on change les données d'entrée. Ce qui est important dans notre cas est de savoir s'il y a une persistance spatiale des niveaux forts lorsque l'on change de résolution, et de savoir si l'utilisation de données plus fines permet d'identifier de nouvelles zones. Pour répondre à ces questions, une comparaison plus détaillée est réalisée sur certains tronçons déjà étudiés, afin de mieux appréhender l'effet du changement de

résolution. Cette comparaison est effectuée entre les MNT 25 et 5 m, ainsi il sera possible de voir si de nouvelles zones sensibles apparaissent lorsque l'on affine la résolution.

### 3.5.3. COMPARAISON DETAILLEE A 25 ET A 5 M

#### 3.5.3.1. TRONÇON 125

La Figure II-104 présente les cartes IRIP à 25 et à 5 m sur la zone du tronçon 125, réalisées avec le paramétrage conseillé (seuil aire drainée  $\geq 2,5$  ha). Ce tronçon a été étudié précédemment en section 3.2.4.3 et 3.3.4.4. Pour rappel, la voie ferrée sur cette zone est établie en déblai depuis le côté est, jusqu'au dernier tronçon côté ouest qui est établi en remblai court avec un ouvrage hydraulique de traversée sous voie (zone n°1). Ce tronçon de voie a été impacté à plusieurs reprises par des épisodes de ruissellement qui ont engendré des inondations sur la plateforme ainsi que plusieurs glissements dans le déblai. Des bassins de rétention ont d'ailleurs été construits aux niveaux des zones n°2 et n°5, côté sud de la voie. Tout d'abord, la comparaison entre les cartes au 5 m et au 25 m montre qu'on retrouve les mêmes points d'intersection des chemins d'écoulements et de la voie ferrée sur les deux cartes. Les points d'intersection remarquables sont indiqués avec les cercles rouges. Le cercle noir montre une nouvelle information qui n'était pas visible avec la résolution de 25 m.

Ensuite, la dynamique spatiale du ruissellement est décrite d'est en ouest dans le sens de l'écoulement principal. On peut voir que le ruissellement est susceptible d'arriver depuis l'est. Cette zone est en réalité presque située en tête de bassin. L'écoulement semble aller en direction de la voie ferrée au niveau de la zone n°3 où on peut voir que l'écoulement est dévié et continu dans le déblai, au lieu de continuer vers le sud comme l'indique la carte au 25 m. La carte au 25 m indique néanmoins que l'écoulement retourne en direction de la voie. Cette dynamique peut également être appréciée sur la carte au 5 m. L'arrivée sur la voie ferrée est visible au niveau de la zone n°2, sur les deux cartes. L'écoulement principal est ensuite rejoint par un axe venant du nord-est (visible sur les deux cartes également), et continuent ensemble en direction de l'exutoire au niveau de l'ouvrage de traversée de la zone n°3. La zone n°5 montre également que les écoulements venant du sud sont interceptés par le déblai de la voie ferrée et continuent vers l'ouest au lieu de continuer vers le sud comme l'indique la carte au 25 m. Les écoulements interceptés par ce tronçon semblent retourner en direction du nord puis vers l'exutoire naturel au niveau de la zone n°4, probablement grâce au retour d'une topographie plus plane que celle du déblai. Cet exemple permet d'illustrer le potentiel des talus ferroviaire à intercepter et à dévier le ruissellement. Ceci illustre également la capacité de la méthode IRIP à détecter cet effet, grâce à des données topographie de haute résolution.

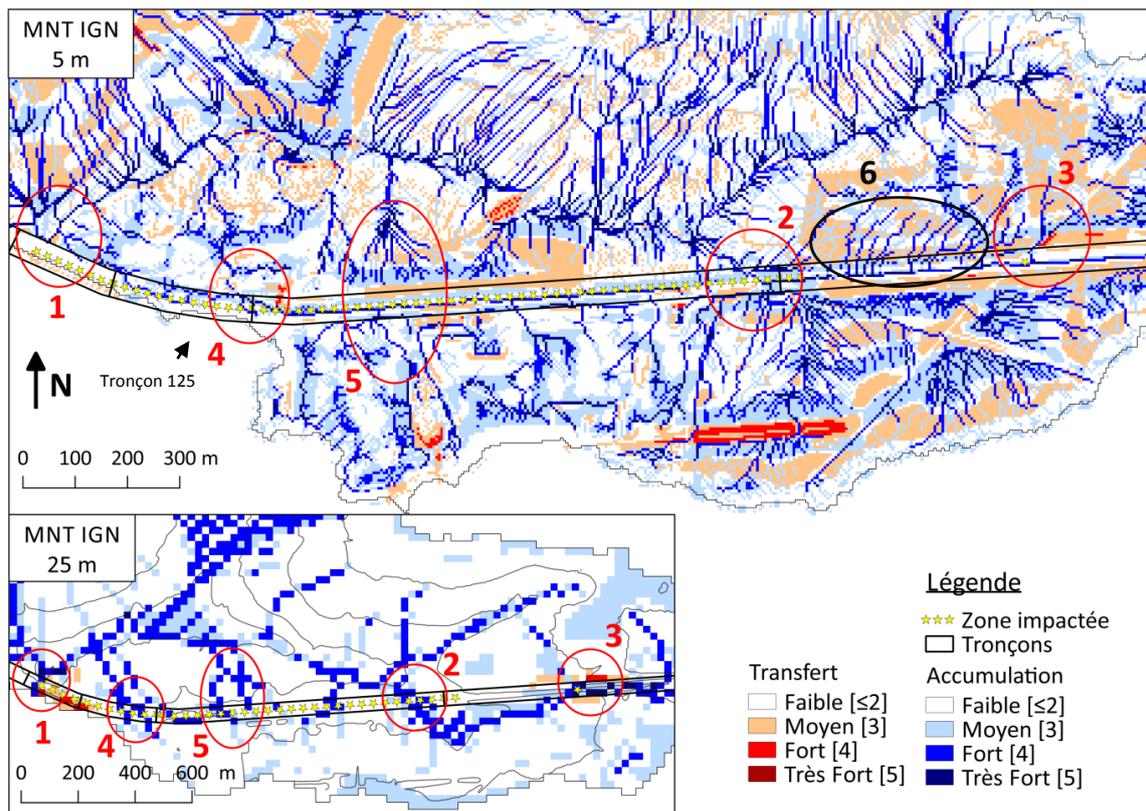


FIGURE II-104 : COMPARAISON SUR LE TRONÇON 125 DES CARTES IRIP AU 5 M ET AU 25 M POUR MONTRER LA PERSISTANCE SPATIALE DE L'INFORMATION ET LE POTENTIEL DES DONNEES HAUTE RESOLUTION

Ce schéma d'écoulement était pressenti sur les cartes IRIP au 25 m mais ce tronçon est complexe puisque situé en zone péri-urbaine. Néanmoins, les cartes au 5 m mettent en avant la zone n°6 qui n'était pas identifiée sur les cartes au 25 m. Cette zone présente plusieurs petits axes d'écoulement, tous en direction de la voie, évoquant un phénomène de ruissellement en nappe. Cette zone est davantage pertinente sur la carte de transfert (Figure II-105). En effet, ces axes d'écoulement se situent sur une surface de niveau 3 détectée, entre autres, grâce à l'indicateur d'érodabilité. L'occupation du sol nous apprend que cette surface est en réalité une parcelle agricole. Les caractéristiques des cartes IRIP sur cette zone correspondent aux informations disponibles dans les rapports d'expertise qui signalent des apports diffus de fines en provenance du champ voisin. Les fines se déposent dans le ballast, ce qui engendre une dégradation accélérée de la structure d'assise. En conclusion, l'analyse du tronçon 125 permet de dire qu'il existe bien une persistance spatiale de l'information lorsque l'on change de résolution, et qu'une résolution plus fine fait apparait de nouvelles zones sensibles au ruissellement.

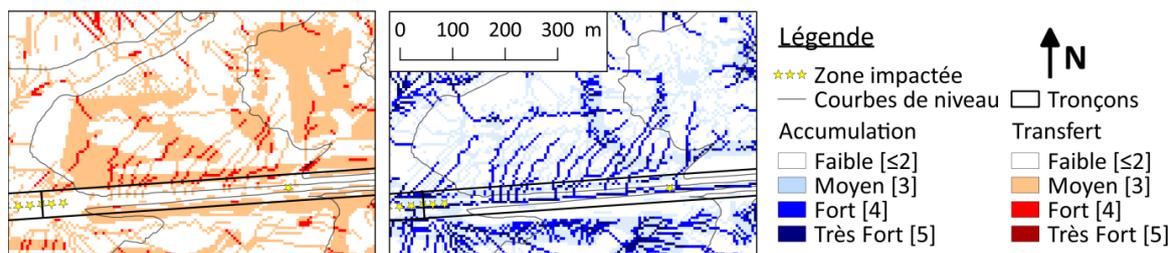


FIGURE II-105 : AGRANDISSEMENT DE LA ZONE N°6 DU TRONÇON 125 POUR ILLUSTRER L'IDENTIFICATION D'UN PHENOMENE D'EROSION DIFFUSE

### 3.5.3.2. TRONÇONS 177 ET 178

La Figure II-106 présente les cartes IRIP à 25 et à 5 m sur la zone des tronçons 177 et 178, réalisées avec le paramétrage conseillé (seuil aire drainée  $\geq 2,5$  ha). Cet exemple a été détaillé au chapitre 2 section 2.3.2.1. Pour rappel, la voie est établie en déblai long au niveau du tronçon 177 et en remblai au niveau du tronçon 178. Un pont au-dessus de la voie permet le passage d'une route au niveau de la zone n°1, et les zones n°2 et 3 sont des passages sous voies, pour des routes, qui ont également une fonction hydraulique. Deux bassins de rétention se situent côté sud de la voie ferrée aux niveaux des zones n°1 et n°4. Trois désordres ont eu lieu sur ces deux tronçons, deux impacts ponctuels au niveau des zones n°5 et n°2 et un impact étendu entre les zones n°1 et n°4. Tout d'abord, en comparant les deux résolutions, on peut voir que les zones d'intersection entre les chemins préférentiels d'écoulement et la voie ferrée sont bien identifiées sur les deux cartes, indiquées avec les cercles rouges. Les cercles noirs montrent des détails davantage visibles avec le MNT LiDAR.

Les dynamiques spatiales des écoulements ayant impacté la voie sont décrites, tels que l'on peut l'imaginer à la lecture des cartes IRIP au 5 m, en commençant par l'impact au centre, puis celui à l'est et celui à l'ouest. Pour rappel, d'après les rapports d'expertise, l'impact au centre a été engendré par la surverse du bassin de rétention (construit pour accueillir les eaux de ruissellement). Cette surverse a transité dans les fossés du déblai du tronçon 177 jusqu'au remblai 178, puis l'eau a percolé dans le corps du remblai engendrant des résurgences et de l'érosion sur le côté aval (côté nord sur la Figure). On distingue en effet sur la Figure le point d'arrivée de l'eau ainsi que son écoulement possible dans le déblai par des niveaux forts en accumulation au niveau des voies, par ailleurs, on observe au niveau de la zone n°4 des détails supplémentaires qui évoquent une arrivée de ruissellement sur cette zone. De plus, la concomitance spatiale de niveaux forts en accumulation et en transfert peut évoquer un apport d'eau chargée en sédiment. Ceci pourrait avoir joué un rôle de pression dans la percolation du remblai par le ruissellement. Il est important pour le gestionnaire d'infrastructure d'avoir connaissance de ces zones d'aléa potentiel, comme celle de la zone 4, afin de pouvoir agir via des mesures de protection bien localisées et adaptées au comportement de la zone. Davantage d'échanges avec des agents du ferroviaire permettrait de confirmer ces hypothèses.

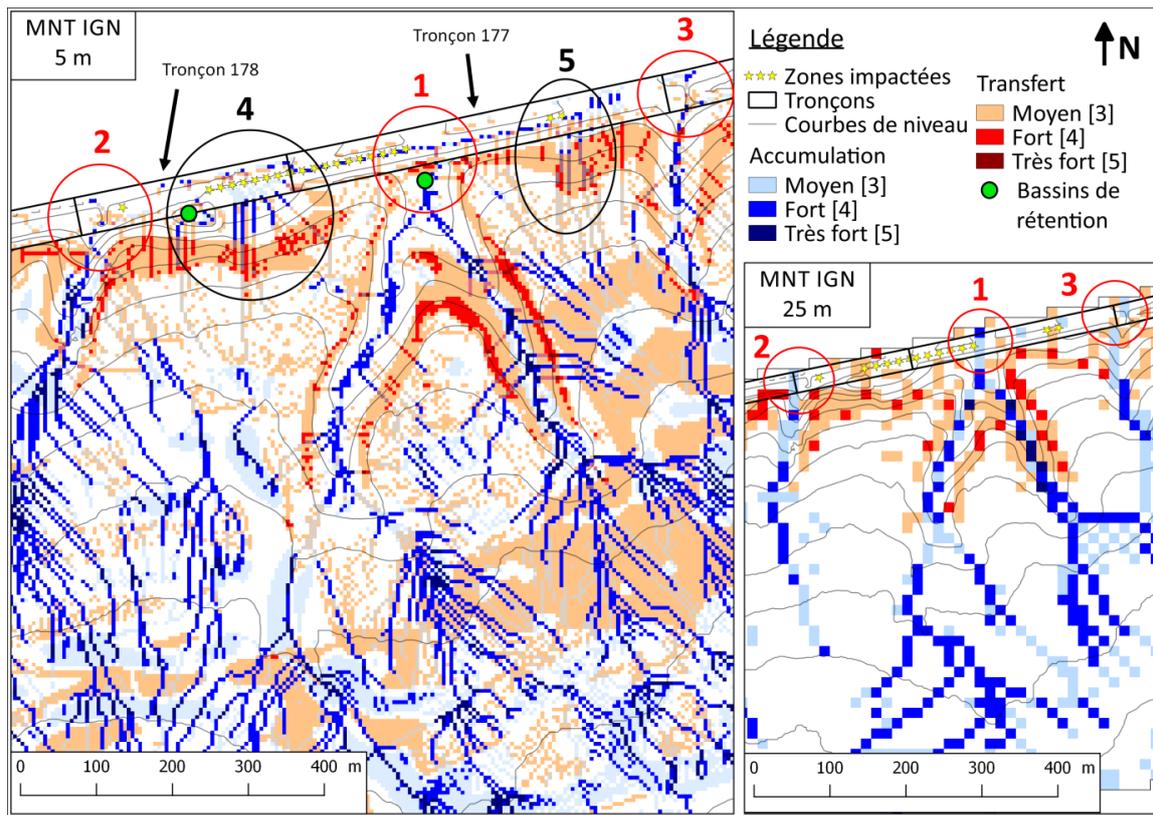


FIGURE II-106 : COMPARAISON SUR LES TRONÇONS 177 ET 178 DES CARTES IRIP AU 5 M ET AU 25 M POUR MONTRER LA PERSISTANCE SPATIALE DE L'INFORMATION ET LE POTENTIEL DES DONNEES HAUTE RESOLUTION

Le désordre de la zone n°3 est, d'après les rapports d'expertise un glissement de déblai, côté sud de la voie. Dans les rapports, le diagnostic semble lier le glissement à des écoulements, chargés en sédiments fins, en provenance du champ voisin à l'amont (côté sud). Ces détails du diagnostic semblent en effet correspondre aux informations apportées par les cartes IRIP. La carte au 25 m présentait un pixel 3 et un pixel 4 en transfert au niveau de l'impact mais ces pixels étaient difficiles à interpréter. La carte au 5 m permet de mieux identifier la zone comme potentiellement exposée à un aléa ruissellement (Figure II-107). La concomitance de pixels forts en transfert (jusqu'à des niveaux 5) et en accumulation évoque là encore un aléa de type érosif avec transport de sédiments et dépôt en aval direct, sur les voies. Pour confirmer cette hypothèse, une visite des lieux et/ou un échange avec des acteurs locaux semblent nécessaires, néanmoins les cartes IRIP sur cette zone sont très encourageantes.

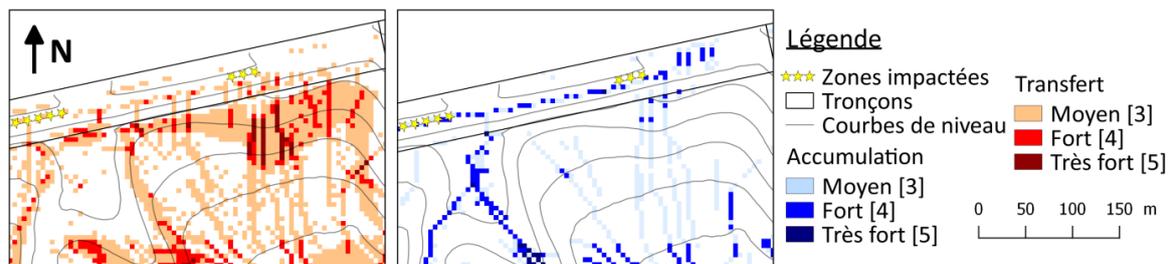


FIGURE II-107 : AGRANDISSEMENT DE LA ZONE N°5 DU TRONÇON 177 POUR ILLUSTRER L'IDENTIFICATION D'UN PHENOMENE DE GLISSEMENT

Le désordre de la zone n°2 est, d'après les rapports d'expertise, l'érosion du talus du remblai côté sud dû à des écoulements au niveau de la buse de fuite du bassin de rétention de la zone n°4. La buse de fuite de ce bassin se déverserait dans les fossés le long du remblai côté sud, en direction de la zone n°2, puis rejoindrait la route comme exutoire et passerait sous la voie. La dynamique de ce désordre est difficile à appréhender sur les cartes IRIP. Même si les points remarquables sont identifiés (bassin de rétention, zone d'écoulement concentré qui sert d'exutoire), ce désordre semble fortement lié à la configuration locale de l'infrastructure et au réseau hydraulique associé. Cet exemple illustre aussi les limites de la cartographie du ruissellement dans un contexte de gestion des risques.

#### 3.5.4. SYNTHÈSE

Le MNT est la donnée de base pour dix indicateurs sur quinze pour la construction des cartes IRIP, il a donc paru important d'étudier l'influence du choix de cette donnée, notamment en termes de résolution, sur les cartes IRIP finales. L'objectif était de montrer les contraintes techniques lorsque l'on change de résolution et de vérifier si le nouveau paramétrage conseillé était toujours pertinent pour d'autres résolutions. Des comparaisons visuelles, globales et détaillées, entre des cartes IRIP de résolutions différentes ont permis également de vérifier la persistance spatiale des zones sensibles au ruissellement lorsque l'on change de résolution. Enfin, cette étude avait également pour but de se prononcer sur une résolution optimale pour l'étude du ruissellement avec les cartes IRIP.

Ce qu'il faut retenir est que pour des résolutions très grossières, le seuil d'aire drainée doit être augmenté, par exemple pour un MNT 250 m. Néanmoins, on peut se demander s'il est toujours pertinent d'étudier le ruissellement avec une résolution aussi large. L'indicateur des ruptures de pente doit également être adapté, mais cette fois pour les résolutions très fines, un MNT de 5 m par exemple. Les comparaisons des différentes résolutions sur l'ensemble du bassin ont montré que le nouveau paramétrage conseillé était plus pertinent que le paramétrage par défaut et ce, quelle que soit la résolution. Les cartes de transfert montrent davantage d'informations et les cartes d'accumulation sont plus lisibles. La persistance spatiale de l'information semblait effective sur l'ensemble du bassin et a été confirmée sur deux zones étudiées en détails. Les comparaisons entre les résolutions de 25 et de 5 m ont montré que les zones d'intersection entre le ruissellement et la voie ferrée sont identifiées par les deux résolutions. Ces comparaisons ont également mis en lumière le potentiel des données LiDAR pour visualiser l'influence de la macro topographie sur la dynamique des écoulements.

Concernant le choix de la bonne résolution, ces exemples illustrent qu'il est possible de procéder par zooms successifs. Une analyse grande maille peut être réalisée sur l'ensemble de la zone d'étude afin d'identifier les principales zones exposées au ruissellement. Ceci permet également de créer les cartes IRIP plus rapidement, mais dépend aussi de la puissance de calcul disponible. Puis, la création de cartes avec des résolutions plus fines, sur les zones pré-identifiées, permet de mieux appréhender la dynamique spatiale du ruissellement autour des enjeux. Ces résultats sont encourageants et montrent une certaine robustesse de la méthode IRIP. Les cartes peuvent être produites pour de nombreuses résolutions tout en restant pertinentes, bien qu'une résolution au-dessus de 75 m semble peu pertinente, au vu de l'échelle spatiale du phénomène lui-même qui peut être très locale.

Pour aller plus loin dans la comparaison des résolutions, il est également possible d'appliquer la méthode d'évaluation par comparaison aux données d'impacts sur les voies ferrées. Ceci permettrait de disposer d'informations quantitatives, quant à la performance des cartes IRIP, pour détecter les zones exposées, en fonction de la résolution. Il serait également possible, pour une comparaison quantitative, d'utiliser des méthodes de comparaison de cartes. Ceci pourrait permettre de quantifier le changement entre deux

cartes. Néanmoins, les problématiques de résolutions nécessiteraient de ré-échantillonner certaines cartes afin d'être en mesure de les comparer. Ceci ouvre la voie à de nombreuses problématiques (méthodes de ré-échantillonnage, recalage planimétrique, etc.). Par ailleurs, pour faire des comparaisons quantitatives, il faut pouvoir déterminer une référence. Pour la comparaison le long de la voie ferrée, la référence était les données d'impacts, mais pour une comparaison plus spatialisée (sur tout le bassin versant), on ne dispose pas actuellement de données de référence (sur ce bassin).

### 3.6. CONCLUSION

Ce chapitre fait suite aux résultats de l'évaluation quantitative de la méthode IRIP par défaut par comparaison aux données d'impacts. Ces résultats sont encourageants avec une probabilité de détection proche de 100 % et des taux de fausses alarmes entre 30 et 40 %. Néanmoins, l'analyse détaillée de certains tronçons montrait certaines difficultés d'interprétation des cartes IRIP. La décomposition des cartes en indicateurs binaires a permis d'identifier certains indicateurs problématiques, qui ont pu être approfondis dans ce chapitre. L'objectif était d'améliorer la pertinence et la lisibilité des représentations cartographiques, tout gardant des scores de performance satisfaisants. Ce chapitre étudie un à un les indicateurs de ruptures de pentes, d'axes linéaires au sol et de compacité et termine par une analyse de l'influence du choix du MNT.

Ce qu'il faut retenir, tout d'abord pour l'indicateur des ruptures de pentes, est que la méthode de calcul semble plus adaptée si l'on se focalise sur une caractéristique locale de la surface (par exemple fonction « r.param.scale » de GRASS GIS) et non si l'on considère l'ensemble du bassin amont pour chaque pixel. L'utilisation du MNT 25 m de l'IGN a nécessité un post-traitement dû à l'apparition d'artefacts liés à la qualité du MNT. Seules les ruptures fortes dans le paysage ont été conservées. Néanmoins, sur d'autres MNT la nouvelle méthode de calcul ne nécessite pas de post-traitement et semble bien plus performante que la méthode actuellement implémentée dans iRIP©. Les cartes modifiées améliorent nettement la lisibilité des cartes de transfert et d'accumulation, mais d'autres indicateurs sont identifiés comme problématiques, notamment des indicateurs pour la carte de transfert.

Pour la carte de transfert, il est proposé de remplacer l'indicateur des axes linéaires au sol par l'indicateur d'érodabilité, remplacé lui-même par un indicateur de battance dans la carte de production. L'indicateur d'érodabilité dans la carte de transfert permet de mieux représenter le potentiel d'érosion du ruissellement notamment au niveau des zones d'accélération (pentes fortes, ruptures convexes). Ceci permet de visualiser beaucoup plus d'information sur la carte de transfert, qui était très faible avec la méthode par défaut. L'évaluation quantitative montre que cette modification permet de détecter de nouvelles zones impactées, diminuant ainsi le nombre de faux négatifs. L'analyse détaillée des tronçons toujours faux négatifs met cette fois en évidence l'indicateur de compacité qui ne semble pas cohérent par rapport aux caractéristiques de surface.

Pour remplacer l'indicateur de compacité, il est proposé d'utiliser un indicateur d'aire drainée. Cet indicateur permet de représenter la potentialité en certains points de recevoir de grandes quantités d'eau de ruissellement. L'aire drainée était déjà utilisée dans la carte d'accumulation mais avec un seuil de 1 km<sup>2</sup> qui paraissait trop important pour l'étude du ruissellement. Ainsi, sept seuils d'aire drainée ont été testés entre 0,5 ha et 1 km<sup>2</sup>, pour définir le seuil de favorabilité. L'évaluation quantitative montre que ce seuil est grand, moins de zones impactées sont détectées. En revanche, plus le seuil est petit, plus de faux positifs sont détectés. L'analyse détaillée de certains tronçons a permis d'identifier un seuil optimal autour entre 1 et 5 ha. Ce seuil peut néanmoins être modifié selon l'expertise et les besoins de l'utilisateur. Les représentations cartographiques montrent que la superposition de la carte de transfert

sur la carte d'accumulation montre une alternance des niveaux forts entre transfert et accumulation sur certains axes, évoquant un effet d'alternance entre érosion et dépôt. Cette hypothèse reste à confirmer par des expertises terrains. De manière générale l'évaluation de la méthode IRIP doit être appuyée par davantage de visites sur site.

L'ensemble de ces modifications a été appliquée pour différents MNT de sources et de résolutions différentes afin de vérifier la pertinence de ces changements si l'on change de donnée topographique. Les comparaisons visuelles sur l'ensemble du bassin confirment les améliorations observées pour les autres résolutions de MNT, montrant même une certaine robustesse de la méthode IRIP qui peut être appliquée à des résolutions très différentes. Le choix de la résolution doit néanmoins rester à l'échelle spatiale du phénomène lui-même. La réalisation des cartes IRIP avec des données LiDAR met également en évidence le fort potentiel des données haute résolution pour cartographier les écoulements de surface avec une grande précision, permettant même de visualiser l'influence de la macro-topographie. Néanmoins, l'ensemble de l'évaluation se focalise sur le tronçon de Rouen au Havre. Bien que les résultats soient encourageants, notamment sur la fiabilité des informations, ainsi que sur la valeur ajoutée, par rapport aux données disponibles actuellement, ils doivent être consolidés en appliquant la méthode d'évaluation sur d'autres zones d'études aux contextes géomorphologiques différents.

Suite à ces résultats, beaucoup d'autres paramétrages peuvent être testés. L'indicateur de pente par exemple peut être discuté. Différentes méthodes de calcul des pentes peuvent être testées comme il a été fait avec la méthode de calcul des ruptures de pentes. Actuellement, l'utilisation d'un algorithme de classification permet de déterminer des seuils de favorabilité pour la pente et pour l'indice topographique, relatifs au bassin versant. Ceci permet de déterminer des seuils lorsque peu de données sur les zones d'étude permettent de la déterminer a priori. Néanmoins, existerait-il un seuil de pente absolu, à partir duquel le ruissellement peut se mettre en mouvement ou s'accumuler ? Les données disponibles sur la zone d'étude pourraient-elles permettre de 'caler' un seuil de pente comme il a été fait pour le seuil d'aire drainée ? Par ailleurs, la carte production n'a pas été évaluée dans cette partie. Elle est prise en compte de manière indirecte via l'indicateur de production amont. Il serait néanmoins intéressant de voir l'information que la carte de production peut apporter, par exemple, pour la priorisation des zones exposées. La méthode de reclassification de la carte de production pourrait également être discutée. Cette méthode prend en compte la répartition des niveaux de susceptibilité sur le bassin amont de chaque pixel, mais ne fait pas intervenir la notion de quantité. Il pourrait être intéressant de croiser la prise en compte des niveaux dans le bassin amont en fonction de la surface qu'ils occupent. Néanmoins, pour évaluer la carte de production, se pose encore une fois la question de savoir à quelles données comparer les cartes de production ? Finalement, chaque indicateur peut être modifié, mais les modifications testées doivent avoir un sens. Les modifications doivent être justifiées physiquement sur l'effet sur le ruissellement que l'on cherche à reproduire. De plus, il faut être en mesure de déterminer si une modification est meilleure qu'une autre. D'autres tests peuvent également être effectués sur la méthode de combinaison des indicateurs, par exemple sur les possibilités de pondérations de certains indicateurs. Mais encore une fois, des critères prédéfinis avec un sens physique doivent permettre de juger de l'intérêt des modifications.



## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette deuxième partie a présenté l'évaluation et des propositions de développements de la méthode IRIP, sur une zone : le tronçon Rouen – Le Havre, de la ligne de Paris-Saint-Lazare au Havre. Afin de pouvoir réaliser l'évaluation de la méthode IRIP de cartographie du ruissellement, un long travail de collecte et de traitement de données sur les impacts et sur l'infrastructure a été réalisé. Mais, ces données de comparaison sont des données approchées. Elles ne représentent pas directement le phénomène de ruissellement. Les impacts sur la voie ferrée sont des témoins du passage de ruissellement en certains points. Pour autant, du ruissellement a pu se produire en d'autres points sans qu'aucun impact ne soit reporté (impact non produit, impact produit nettoyé mais non reporté, impact produit mais information perdue car ancienne). De plus, ces données d'impacts sont des données de risques effectifs, et pour les comparer avec les cartes d'aléa ruissellement, il est nécessaire de prendre en compte la vulnérabilité. Une méthode de caractérisation de la vulnérabilité de l'infrastructure ferroviaire au ruissellement a été développée sous forme d'arbre de décision. Elle est basée sur l'expertise des agents et complétée par l'analyse des données d'impacts et d'infrastructure. Ainsi, différents types de données sont combinés pour retracer au maximum l'historique du ruissellement sur la zone d'étude.

Pour comparer les cartes IRIP avec les données d'impacts et d'infrastructure, une méthode a été développée, basée sur la réalisation de tableaux de contingence et sur le calcul d'indicateurs de performance. Le tableau de contingence permet de compter tous les types de corrélations possibles entre les données : vrais positifs, faux positifs (fausse alerte), faux négatifs (impact manqué) et vrais négatifs. Sur la base de ces corrélations, six indicateurs sont calculés. La probabilité de détection et le taux de fausses alarmes indiquent la performance des cartes IRIP à détecter des zones impactées tout en ne détectant pas trop de zones pour lesquelles il ne s'est rien passé. La précision et le biais indiquent la pertinence de la représentation cartographique. La précision indique le ratio de bonnes détections en prenant en compte les vrais négatifs, et le biais indique si les prédictions sur ou sous-estime l'occurrence du ruissellement. Enfin, le Chi-2 et le coefficient Phi informent sur la significativité statistique du lien entre les cartes IRIP et les données de comparaison. Le Chi-2 donne un seuil de significativité et le Phi donne une échelle d'intensité de la dépendance entre les données. L'application de cette méthode d'évaluation nécessite de mettre en forme les données. Une des difficultés dans l'évaluation de la méthode IRIP est de comparer des données de fond et de formes différentes. Les cartes IRIP sont des cartes pixelisées, elles sont au nombre de trois, et aucun seuil *a priori* ne permet de considérer une zone comme sensible ou non. Les données de comparaison sont des données qualitatives, imprécises et, comme ce sont des données opérationnelles, elles possèdent un biais de représentativité. Les problématiques de mise en forme des données, afin d'être en mesure de les comparer, font l'objet du premier chapitre. La conclusion est que ces choix de mise en forme influencent considérablement les résultats de l'évaluation. Chaque choix doit donc être rigoureusement justifié, tels que la prise en compte ou non des pixels isolés, la distance tampon de part et d'autre de la voie ferrée, la distance tampon autour des pixels IRIP, etc. Les travaux du premier chapitre permettent de consolider la méthode

d'évaluation, de mieux appréhender la variabilité des indicateurs de performance et de se concentrer sereinement sur la prise en compte de la vulnérabilité, qui fait l'objet du second chapitre.

Pour la prise en compte de la vulnérabilité dans la méthode d'évaluation, il est proposé de procéder sur plusieurs niveaux. Trois éléments sont différenciés : la vulnérabilité structurelle de l'infrastructure, les actions de mitigation, (actions de protection de la voie en agissant sur l'aléa), et les actions de résilience, (actions de prévention immédiate agissant sur l'enjeu, sur l'organisation de la gestion des risques). La vulnérabilité structurelle, sous forme d'arbre de décision, est une variable quantitative sur 5 niveaux, elle est combinée aux niveaux de susceptibilité des cartes IRIP, sur cinq niveaux également. Deux méthodes de combinaisons sous forme de matrice aléa-vulnérabilité sont proposées puis une est retenue. Elle permet de considérer des niveaux IRIP de plus en plus faible à mesure que le niveau de vulnérabilité augmente. La combinaison des paramètres aléa et vulnérabilité est ensuite comparée aux paramètres de risques qui sont les données d'impacts. Pour chacun des 182 tronçons d'ouvrages en terre exposés au ruissellement, les corrélations (V+, F+, F-, V-) sont dénombrées et les indicateurs de performance sont calculés. Puis, les tronçons faux positifs qui possèdent une action de mitigation (ouvrage hydraulique de traversée, bassin de rétention) dans leur emprise évoluent en vrais positifs. La localisation de cette mesure de protection contre un aléa est considérée comme indiquant une problématique de ruissellement au niveau de ce tronçon, et est donc une donnée d'évaluation pour la méthode IRIP. Enfin, les actions de résilience (tournées intempéries) localisées au niveau d'un tronçon faux positif permettent de le faire évoluer en vrai positif, ces actions étant considérées également comme indiquant une problématique de ruissellement.

Les résultats à retenir suite à la prise en compte des données sur l'infrastructure sont que le taux de fausses alarmes a pu être diminué de moitié, de 0,6 à 0,3. Autrement dit, 30 % de fausses alarmes sont justifiées grâce aux informations sur l'infrastructure. 30% supplémentaires sont des zones a priori à risque mais où aucun élément ne permet de conclure quant à la performance de la méthode IRIP. Concernant l'évaluation de la méthode IRIP, une quantification de la performance à identifier les zones exposées au ruissellement a pu être estimée. En prenant en compte la vulnérabilité, les actions de mitigation et les actions de résilience, la méthode IRIP a une probabilité de détection proche de 1, signifiant que tous les impacts ont été retrouvés. Le taux de fausses alarmes est de 0,3, signifiant que sur toutes les zones identifiées par IRIP 30% ne correspondent pas à des impacts ou à des actions de mitigation ou de résilience. La précision est de 0,8, signifiant que 80% des prévisions IRIP sont correctes, en tenant compte des vrais positifs et des vrais négatifs (zone où il ne s'est rien passé et où aucune information sur le ruissellement n'a été reportée). Le biais est de 1,3 montrant une légère surestimation des zones exposées par rapport aux données disponibles. Le Chi-2 de 54 est extrêmement significatif et le coefficient Phi est de 0,5 montrant une certaine intensité de la dépendance entre ces données, ce qui est satisfaisant au vu de l'origine très variée des données comparées. Ces scores sont valables pour la méthode IRIP avec sa paramétrisation par défaut et avec les données d'entrée utilisées.

Le dernier chapitre propose des améliorations de la méthode IRIP et se focalise particulièrement sur trois indicateurs, identifiés comme problématiques suite à l'analyse détaillée des faux négatifs (impacts manqués) : L'indicateur des ruptures de pentes, l'indicateur des axes linéaires au sol et l'indicateur de compacité. Des alternatives sont proposées à ces indicateurs et sont évaluées via la méthode d'évaluation développée et via des analyses visuelles sur les faux négatifs restants. En résumé, une autre méthode de calcul des ruptures de pentes a été proposée plus cohérente avec la réalité. Il est proposé d'utiliser l'indicateur d'érodabilité dans la carte de transfert en remplacement de l'indicateur des axes linéaires au sol, et d'utiliser un indicateur de battance en remplacement de l'érodabilité dans la carte de production. Ceci permet de mieux prendre en compte le phénomène d'érosion par ruissellement qui souhaite être représenté avec la carte de transfert. Enfin, un indicateur de l'aire drainée est proposé en remplacement

de l'indicateur de compacité. Le seuil d'aire drainée a été déterminé par expertise et par calibration grâce aux données d'impacts sur la zone d'étude. Il est conseillé de fixer ce seuil entre 1 et 5 ha. Les résultats de l'évaluation suite à ces modifications montrent que presque l'ensemble des faux négatifs sont justifiés, mais surtout que les cartes sont beaucoup lisibles, il est plus facile de les interpréter et d'identifier les zones sensibles au ruissellement. Sur les trois faux négatifs restant

Ce qu'il faut retenir est que les modifications qui ont été réalisées ont été faites sur des indicateurs dont les défauts ont été expliqués, les alternatives à ces indicateurs restent simple et cohérentes avec la réalité du phénomène de ruissellement. Le concept de la méthode IRIP, de cartographier le ruissellement en trois cartes via la combinaison géomatique d'indicateurs du paysage, n'a pas changé. Des tests réalisés sur cinq MNT différents montrent également que les modifications proposées semblent robustes et restent pertinentes à d'autres échelles. L'analyse détaillée de deux zones avec des données topographiques à 25 m et des données issues de techniques LiDAR montre qu'il y a bien une persistance spatiale des zones sensibles au ruissellement en changeant de résolution. De plus, l'application de la méthode IRIP avec des données topographiques de haute résolution permet de visualiser l'influence de la macro topographie sur les écoulements de surface.

La méthode d'évaluation proposée a ses limites. Les indicateurs de performance choisis ne reflètent pas tout ce qui peut être observé sur les représentations cartographiques. Déjà parce qu'ils ne sont calculés que pour l'emprise ferroviaire, mais aussi parce que des choix de simplifications ont été pris pour réaliser les calculs. Les indicateurs ne montrent pas toute la diversité de l'information disponible. Il est montré dans cette évaluation, qu'aucun indicateur de performance ne peut remplacer l'analyse visuelle. Néanmoins l'analyse visuelle reste subjective. Pour réduire au maximum la subjectivité de l'analyse, les cartes doivent être jugées par un grand nombre de personnes. Pour aller plus loin dans l'évaluation, il serait donc intéressant de soumettre ces représentations cartographiques, aux acteurs locaux, ayant des connaissances en contexte ferroviaire, ou dans le phénomène de ruissellement. L'avis des acteurs locaux seraient un moyen de valider davantage les résultats obtenus. Au-delà des avis récoltés sur les cartes, il serait intéressant de voir le retour que pourrait avoir les opérationnels sur le travail d'évaluation fourni ici. En particulier, il serait opportun de soumettre également la méthode de caractérisation de la vulnérabilité de la voie ferrée à un plus large panel d'acteurs du ferroviaire.

Par ailleurs, cette évaluation se focalise sur la ligne de Paris-Saint-Lazare au Havre. Des résultats encourageants sont obtenus sur la fiabilité des informations, ainsi que sur la valeur ajoutée, par rapport aux données disponibles actuellement. Cependant, pour consolider ces résultats, la méthode d'évaluation doit être appliquée sur d'autres zones d'études aux contextes géomorphologiques différents. Mais, pour traiter une nouvelle zone d'étude, le travail de collecte et de traitement des données d'impact et d'infrastructure doit être effectué de nouveau. Dans cette partie, des jeux de données d'évaluation ont été construits et une méthode d'évaluation a été mise en œuvre. La méthode et les données peuvent être utilisées de nouveau pour aller plus loin dans l'apprentissage du phénomène de ruissellement. Elles peuvent également être utilisées pour réaliser l'évaluation d'autres modèles de ruissellement. L'évaluation proposée dans ce travail se focalise sur le contexte ferroviaire. Ceci est un contexte restreint concernant l'étude du ruissellement qui peut impacter bien d'autres enjeux. Mais dans le cas de ce travail, cette évaluation permet d'anticiper les réflexions sur l'apport de la méthode IRIP dans le contexte opérationnel du ferroviaire, et plus précisément, sur l'apport d'IRIP à l'amélioration de gestion des risques liés au ruissellement sur la voie ferrée.

# TROISIEME PARTIE : CONTRIBUTION DE LA METHODE IRIP A LA GESTION DES RISQUES LIES AU RUISSELLEMENT

## INTRODUCTION

La première partie de la thèse expose le contexte de la thèse et les enjeux scientifiques et opérationnels. Le ruissellement est un phénomène naturel, il fait partie du cycle de l'eau, mais son interaction avec les enjeux du territoire peut être problématique. De nombreux enjeux peuvent être impactés par les écoulements de surface. Les personnes et les infrastructures extérieures peuvent être impactées de manière directe par une atteinte à la sécurité ou par des pertes liées à l'arrêt des activités, ou de manière indirecte par l'indisponibilité d'acteurs ou de processus avec lesquels ils sont en interaction. Les routes et les voies ferrées sont particulièrement exposées de par leur caractère continu et leur répartition sur tous types de territoires. L'impact sur des axes de communication peut générer des conséquences sur des échelles spatiales plus importantes. L'agriculture, par l'érosion des terres, et le milieu naturel, par le transfert de polluants, peuvent également subir les effets du ruissellement.

Néanmoins, les risques liés au ruissellement sont encore mal appréhendés et peu étudiés. Peu de données sur le ruissellement sont disponibles pour étudier le phénomène, pour estimer son impact sur la société et pour mettre en œuvre des actions de prévention et de protection. Plusieurs méthodes permettent de cartographier l'aléa ruissellement, mais toutes se heurtent à la problématique de l'évaluation. Pourtant, l'évaluation des méthodes de cartographie est un enjeu majeur. Les représentations du ruissellement peuvent être des éléments décisionnels. Elles peuvent engendrer des actions, parfois coûteuses, ou remettre en question les aspects sécuritaires. Il est essentiel de connaître la valeur et la fiabilité des cartographies de l'aléa.

Les travaux de thèse ont permis de développer une méthode d'évaluation par comparaison à des données historiques d'impacts sur les voies ferrées. La méthode IRIP a pu être évaluée sur un tronçon de 80 km de voie ferrée, recoupant un bassin versant d'environ 500 km<sup>2</sup>. Ainsi, on dispose à présent d'éléments quantitatifs quant à la fiabilité des représentations cartographiques du ruissellement issues de la méthode IRIP. Il est alors possible d'aller plus loin et de réfléchir à son usage opérationnel. Dans quels contextes la méthode IRIP pourrait-elle être utilisée ? A quelles étapes du processus de gestion des risques la méthode IRIP pourrait-elle apporter des éléments utiles ? Peut-elle apporter des informations non disponibles actuellement ? Quels sont les atouts et les inconvénients par rapport aux outils actuels ? Comment favoriser son utilisation auprès des acteurs de la gestion des risques ?

Cette troisième partie présente trois exemples d'application de la méthode IRIP, faisant l'objet des trois chapitres suivants. Ces exemples d'application s'appuient sur trois cas d'utilisation de la méthode IRIP

dans différents contextes. Le premier chapitre présente la comparaison des cartes IRIP aux zonages règlementaires ruissellement et érosion du plan de prévention des risques sur le bassin versant de la Lézarde (Seine-Maritime). L'objectif est de montrer en quoi la méthode IRIP peut aider à réaliser ce type de zonage par rapport aux méthodes actuelles. Le deuxième chapitre présente la comparaison des cartes IRIP à des comptes rendus de visites effectuées suite à des désordres liés au ruissellement sur la ligne ferroviaire de Saint-Germain-des-Fossés à Nîmes (Gard et Lozère). L'objectif est de montrer en quoi la méthode IRIP peut aider à réaliser ce type d'expertises terrain et de montrer comment les cartes peuvent aider à comprendre les origines et circonstances des désordres. Le troisième chapitre présente la comparaison des cartes IRIP à un diagnostic de risque réalisé sur la ligne de Bréauté à Fécamp (Seine-Maritime). Ce diagnostic avait pour but de choisir les tronçons prioritaires pour effectuer la régénération des dispositifs de drainage. L'objectif de cette comparaison est de montrer comment la méthode IRIP peut contribuer à réaliser ces types d'opérations, fréquentes pour le gestionnaire d'infrastructure. Cette comparaison permet d'identifier les étapes du processus de diagnostic pour lesquelles la méthode IRIP peut apporter un gain de temps et de précision. L'objectif global de cette partie est de montrer en quoi la méthode IRIP peut contribuer à l'amélioration de la gestion des risques liés au ruissellement, dans le contexte ferroviaire et dans d'autres contextes.

Pour ces trois exemples d'application, les méthodes de comparaison et les paramétrages de la méthode IRIP varient et sont différents de ceux présentés en partie 2. Ceci s'explique car ces trois études ont été réalisées à différentes étapes de la thèse. Le manque de données relatives au ruissellement étant la problématique principale de la thèse, l'opportunité d'utiliser divers jeux de données pour évaluer les cartes IRIP a été saisie. Ces travaux ont permis d'alimenter les réflexions afin d'aboutir à une méthode d'évaluation générale et une proposition de paramétrage optimal. Les objectifs initiaux de ces travaux étaient l'évaluation des cartes IRIP. Aujourd'hui, ils fournissent des exemples concrets d'utilisation de la méthode IRIP dans divers contextes et pour différentes tâches de la gestion des risques liés au ruissellement.

# CHAPITRE 1 : CONTRIBUTION DE LA METHODE IRIP A LA REALISATION DE PLANS DE PREVENTION DES RISQUES

## 1.1. INTRODUCTION

En France, les Plans de Prévention des Risques sont des documents administratifs, élaborés par l'Etat, qui règlementent l'usage des sols, à l'échelle communale, en fonction des risques auxquels ils sont soumis, naturels ou technologiques (Loi n°2003-699 du 30 juillet). Le Plan de Prévention du Risque Inondation (PPRI), dont le ruissellement fait partie (Article L566-1 du Code de l'environnement), est un document stratégique, règlementaire et cartographique. Le zonage du risque inondation permet d'établir des règlementations allant de l'interdiction de construire, à la construction sous conditions et à l'imposition de mesures de protection. Les cartes des risques sont obtenues par croisement de l'information sur l'aléa avec la localisation des enjeux et de leur vulnérabilité. Concernant la cartographie de l'aléa inondation par débordement, il existe maintenant des méthodes et des cartes de référence<sup>13</sup>, ce qui n'est pas le cas pour l'aléa ruissellement. Pour les communes soumises à l'aléa ruissellement, l'Etat fait souvent appel à des bureaux d'études. Les méthodes employées varient et les cartes finales sont généralement des croisements entre des techniques de modélisation, des approches hydro-géomorphologiques et des données historiques. Mais les données historiques ne sont pas toujours disponibles. Elles peuvent être biaisées et remontent rarement dans le passé à plus d'une génération. Les expertises terrain peuvent être assez fastidieuses et rendent l'étude dépendante de l'expert qui l'a produit. Les études pour différentes communes peuvent être également difficiles à comparer. L'approche par modélisation peut être couteuse et nécessite souvent de nombreuses données d'entrée, ainsi que des étapes de calibration. Il existe donc un réel besoin pour disposer d'une méthode de cartographie de l'aléa ruissellement qui soit à la fois simple à mettre en œuvre et robuste, pour une application sur des territoires très variés.

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer la capacité de la méthode IRIP à réaliser des cartographies règlementaires de l'aléa ruissellement. Pour réaliser cette évaluation, les cartes IRIP sont comparées aux cartes règlementaires du PPRI ruissellement et du décret érosion du bassin versant de la Lézarde (Seine-Maritime), qui ont été réalisées notamment grâce à une très bonne connaissance de l'aléa ruissellement sur cette zone. Cette comparaison contribue au processus d'évaluation, les zonages des PPR sont une source de comparaison. Mais, cette comparaison permet surtout de présenter une mise en application de la méthode IRIP, et de montrer en quoi et comment la méthode IRIP peut être un outil de gestion des risques liés au ruissellement. Sur quels aspects la méthode IRIP peut-elle apporter par rapport aux méthodes actuelles ? Quels sont ses atouts et ses limites ? Cette comparaison permet d'apporter des réponses pratiques à l'utilisation d'IRIP dans un cadre opérationnel.

---

<sup>13</sup> Site du gouvernement avec les cartes interactives pour la cartographie du risque inondation France entière : <http://www.georisques.gouv.fr/cartes-interactives#/>

Ce chapitre se compose de trois sections. La section matériels et méthodes présente la zone d'étude, les cartes du PPRI ruissellement et du décret érosion, le paramétrage utilisé pour la méthode IRIP ainsi que la méthode de comparaison. La méthode de comparaison entre les cartes règlementaires et les cartes IRIP se base en partie sur la méthode d'évaluation développée en deuxième partie. La comparaison est à la fois visuelle et quantitative. Les résultats des comparaisons sont ensuite présentés et discutés.

Ce chapitre est basé sur l'article Lagadec et al., publié en 2016 dans *Journal of Hydrology* et intitulé « Description and evaluation of a surface runoff susceptibility mapping method ». Cet article présente l'exploitation de diverses données liées au ruissellement sur le bassin versant de la Lézarde pour l'évaluation des cartes IRIP, telles que les zonages règlementaires, mais aussi des données de coupures de routes et des données d'impacts sur voies ferrées. Cet article présente une première mise en œuvre d'une méthode d'évaluation par comparaison à des données approchées. On peut retrouver certains indicateurs de performance présentés dans la partie précédente, ainsi que certains choix de mise en forme des données. Les discussions abordent également la problématique de la prise en compte de la vulnérabilité des réseaux de transports. Les réflexions exposées dans cet article ont contribué à l'élaboration de la méthode d'évaluation finale présentées en deuxième partie. Seule la comparaison avec les zonages règlementaires est retranscrite dans ce chapitre, afin d'illustrer l'application de la méthode IRIP dans un contexte opérationnel. Les résultats présentés dans ce chapitre sont différents de ceux publiés dans l'article car nous avons choisi de reprendre l'analyse IRIP en utilisant un MNT de meilleure qualité et la paramétrage final conseillé à la fin de la partie 2.

## 1.2. MATERIELS ET METHODES

### 1.2.1. LA ZONE D'ETUDE

Le bassin versant de la Lézarde est localisé dans le département de Seine-Maritime et situé dans la région géographique du Pays de Caux (Figure III-1). D'une superficie d'environ 210 km<sup>2</sup>, le bassin comprend le Territoire à Risque Important d'Inondation (TRI) du Havre et l'agglomération de Montivilliers. En dehors de ces agglomérations, l'usage du sol dans le bassin versant de la Lézarde est majoritairement agricole. Deux voies ferrées traversent le bassin dont une partie de la ligne de Paris-Saint-Lazare au Havre. Les caractéristiques géographiques de ce bassin sont similaires à la zone précédemment étudiée. La géomorphologie de ce bassin est faite d'un plateau sédimentaire entaillé de vallées étroites. Les cours d'eau pérennes sont peu nombreux, mais le réseau de talwegs sec et de rivières intermittentes est important. Le sol est constitué d'argiles à silex avec une proportion importante de limons ayant tendance à la battance. La géologie est constituée de craie et les réseaux hydrologiques souterrains sont très actifs. De nombreuses routes et villages sont construits en aval de bassins à fort potentiels de ruissellement, générant régulièrement de lourds dommages.

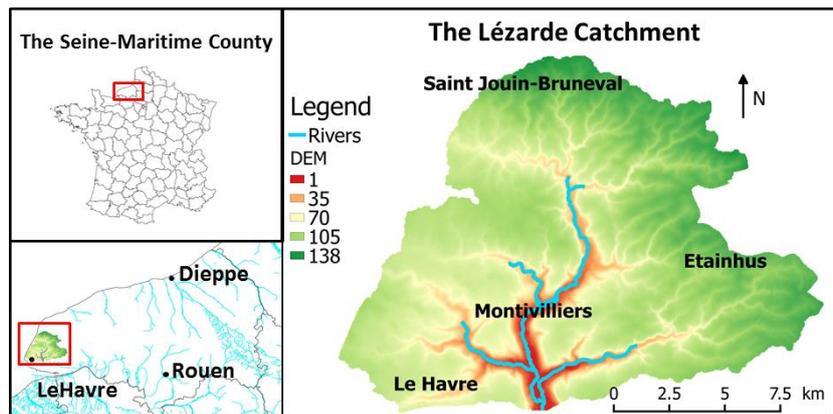


FIGURE III-1 : PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DE LA LEZARDE (LAGADEC ET AL., 2016B)

## 1.2.2. LES ZONAGES REGLEMENTAIRES

### 1.2.2.1. LE PPR RUISSELLEMENT

Le zonage réglementaire du PPR ruissellement a été fourni par l'agglomération du Havre<sup>14</sup> (Direction Départementale de Seine-Maritime, 2013a, 2013b) (Figure III-2). Ce zonage représente les axes de ruissellement concentré et un zonage d'aléa. Il a été établi principalement via des expertises terrain et des informations sur l'historique des épisodes de ruissellement (Hauchard, 2002). Le réseau de talweg sec a été cartographié grâce à des études de terrain et des analyses de la topographie par SIG. Puis, pour créer le zonage final, une zone tampon autour du réseau de talweg a été tracée par SIG. La taille de la zone tampon varie de 5 à 80 m autour des talwegs et a été déterminée grâce aux connaissances du terrain. Le zonage réglementaire ne tient pas compte des ouvrages hydrauliques de protection implantés sur le bassin versant. Enfin, des outils de modélisation ont été utilisés dans les zones les plus exposées afin d'obtenir des vitesses et des hauteurs d'eau. Bien que ces informations de hauteurs et de vitesses de ruissellement soient intéressantes pour l'évaluation de la méthode IRIP, elles ne sont pas prises en compte pour cette comparaison. L'analyse se focalise ici sur l'aspect zonage, c'est-à-dire les délimitations des zones exposées ou non à l'aléa ruissellement.

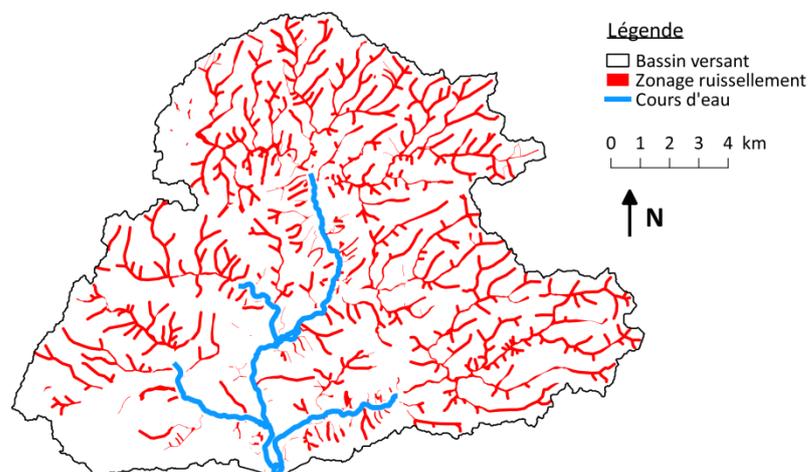


FIGURE III-2 : ZONAGE DU PPR RUISSELLEMENT

<sup>14</sup> <http://www.codah.fr/article/lutte-contre-les-inondations>

Pour la comparaison avec la méthode IRIP, il est choisi de comparer le zonage ruissellement à la carte IRIP d'accumulation. En effet ce zonage représente principalement le réseau de talwegs, c'est-à-dire les zones de concentration du ruissellement. La carte d'accumulation représente aussi ce phénomène par les indicateurs qu'elle prend en compte, notamment l'indice topographique, l'aire drainée et les ruptures de pentes concaves. Pour la comparaison, le réseau hydrographique permanent est masqué. Il n'est pas considéré dans le zonage ruissellement, alors que la carte IRIP d'accumulation détecte les rivières en tant que zone d'accumulation des écoulements de surface. Afin de comparer des informations similaires, l'étude se focalise sur le phénomène de ruissellement hors du réseau permanent.

#### 1.2.2.2. LE DECRET EROSION

Le zonage réglementaire du décret érosion a été fourni par le Syndicat Mixte de Bassin Versant de la Pointe de Caux<sup>15</sup> (Direction Départementale des Territoires et de la Mer de Seine-Maritime, 2012) (Figure III-3). Le zonage a été créé en combinant des cartes issues de deux modèles, le modèle américain RUSLE (Dabney et al., 2011) et le modèle STREAM de l'INRA (Cerdan et al., 2002a). Les modèles ont été ajustés en utilisant des traces d'érosion issues de photos aériennes et validés par concertation avec des experts locaux. Le zonage final est un zonage de risque. Il est la combinaison de l'aléa issu de la modélisation et des enjeux vulnérables à l'érosion.

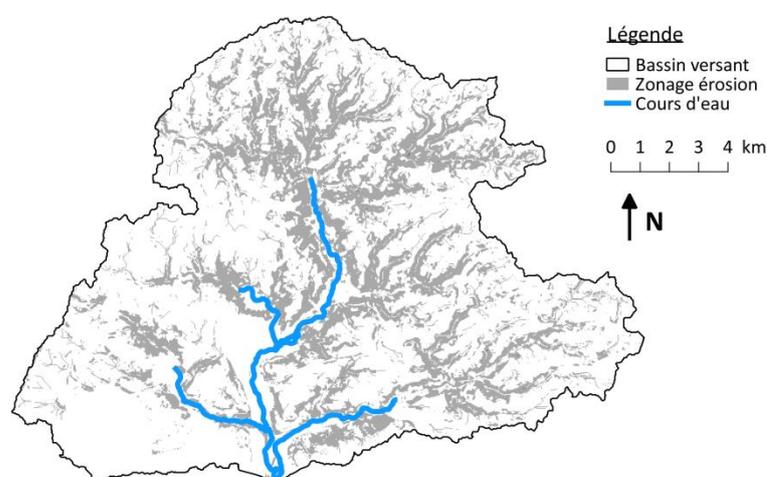


FIGURE III-3 : ZONAGE DU DECRET EROSION

Pour cette étude, le zonage érosion est comparé avec la carte IRIP de transfert. En effet, les indicateurs utilisés pour la construction de la carte de transfert, notamment les pentes fortes et les ruptures de pentes convexes, peuvent être assimilés à des indicateurs d'érosion, davantage que pour la carte d'accumulation. Par ailleurs, le zonage réglementaire se focalise sur les enjeux vulnérables à l'érosion. Pour la comparaison avec la carte de transfert, seules les zones rurales sont étudiées. Les zones urbaines sont masquées afin de rendre les informations à comparer plus homogènes en termes de signification.

#### 1.2.3. PARAMETRAGE DE LA METHODE IRIP ET DONNEES D'ENTREE

Pour cette étude, les données d'entrée utilisées sont le MNT SRTM d'une résolution du 30 m, le Mode d'Occupation des Sols de Haute-Normandie, à une échelle de 1/5000 pour les zones rurales et 1/2000 pour les zones urbaines, ainsi que la base Infosol de l'INRA à une échelle de 1/1 000 000. Le MNT 30 m a

<sup>15</sup> [http://www.smbv-pointedecaux.fr/web/decret\\_erosion2.html](http://www.smbv-pointedecaux.fr/web/decret_erosion2.html)

été choisi plutôt que le MNT 25 m utilisé dans la partie précédente afin de ne pas avoir à faire de post-traitement sur les ruptures de pente. La carte de transfert va être comparée au zonage érosion, donc un maximum d'information doit être cartographié sur la carte IRIP et pas seulement les ruptures de pentes fortes. Concernant le paramétrage de la méthode IRIP, c'est le paramétrage final conseillé qui est utilisé. Un seuil d'aire drainée de 5 ha est utilisé, afin de ne pas afficher trop d'informations proches des têtes de bassin, puisque les zonages ne semblent pas remonter trop loin sur les têtes de bassin. Un seuil de 5 ha pour l'aire drainée est néanmoins dans la gamme de seuil conseillée suite aux résultats de la partie précédente. Le paramétrage de la méthode IRIP et les données d'entrée utilisées sont résumés dans le Tableau III-1.

TABLEAU III-1 : PARAMETRAGE DE LA METHODE IRIP ET DONNEES D'ENTREE (ZU SIGNIFIE ZONES URBAINES)

Cartes IRIP	Indicateurs	Données d'entrée	Seuils de favorabilité
PROD	Perméabilité	Base Infosol INRA	$10^{-6}$ m/s + ZU
	Epaisseur		50 cm + ZU
	Battance		$\geq 3$ + ZU
	Occupation du sol	MOS de Haute-Normandie	Zones urbaines (ZU) et agricoles
	Pentes fortes OU indice topographique	MNT SRTM 30 m	algorithme de classification
TRANS	Production amont	MNT SRTM 30 m	Mode (BV amont) $\geq 3$
	Pentes fortes		algorithme de classification
	Ruptures convexes		Fonction GRASS GIS ; 3 pixels ; courbure $\geq 0,0001$
	Aire drainée		A $\geq 5$ Ha
	Erodabilité	Base Infosol INRA	$\geq 3$ - ZU
ACC	Production amont	MNT SRTM 30 m	Mode (BV amont) $\geq 3$
	Pentes faibles		algorithme de classification
	Ruptures concaves		Fonction GRASS GIS ; 3 pixels ; courbure $\leq -0,0001$
	Indice topographique		Algorithme de classification
	Aire drainée	A $\geq 5$ Ha	

#### 1.2.4. METHODE DE COMPARAISON

Pour comparer les cartes IRIP et les zonages règlementaires, des tableaux de contingence sont réalisés, tels que présenté par le Tableau III-2. Les zonages règlementaires correspondent aux colonnes. Les deux catégories pour compter les types de corrélations sont à l'intérieur et à l'extérieur du zonage. Les cartes IRIP sont représentées sur les lignes, où les deux catégories sont délimitées par le niveau IRIP 4. Ainsi, les pixels IRIP supérieurs ou égaux à 4 sont considérés comme vrais positifs s'ils sont situés à l'intérieur du zonage, et comme faux positifs s'ils sont situés à l'extérieur. De la même manière, les pixels inférieurs ou égaux à 3 sont considérés comme vrais négatifs s'ils sont à l'extérieur du zonage et comme faux négatifs s'ils sont situés à l'intérieur.

TABLEAU III-2 : TABLEAU DE CONTINGENCE THEORIQUE ENTRE LES ZONAGES REGLEMENTAIRES ET LES CARTES IRIP

		Zonage règlementaire	
		A l'intérieur	A l'extérieur
IRIP	$\geq 4$	Vrai positif	Faux positif
	$< 4$	Faux négatif	Vrai négatif

Le Tableau III-3 présente les indicateurs de performance calculés sur la base du tableau de contingence et permettant d'estimer la correspondance entre les cartes IRIP et les zonages règlementaires. Cette fois le taux de succès (SR) est calculé à la place des probabilités de détection (POD) et des taux de fausses alarmes (FAR). Le taux de succès représente le ratio de pixels supérieurs ou égaux à 4 situés à l'intérieur du zonage. Cet indicateur de performance est équivalent à un moins le taux de fausses alarmes (1-FAR). Les indicateurs POD et FAR sont davantage pertinents lorsqu'il s'agit de commenter la performance d'IRIP à retrouver la localisation des impacts, mais le taux de succès illustre mieux, pour cette comparaison, la ressemblance entre les zonages et les cartes IRIP. Ensuite, les indicateurs de précision et de biais, ainsi que le Chi-2 et le coefficient Phi sont utilisés pour quantifier la correspondance entre les données.

TABLEAU III-3 : LES TROIS INDICATEURS DE PERFORMANCE UTILISES POUR COMPARER LES ZONAGES ET LES CARTES IRIP

Indicateurs	Formules	Interprétation
SR	$\frac{\text{Vrais positifs}}{\text{Vrais positifs} + \text{Faux positifs}}$	Intervalle : de 0 à 1 Score parfait : 1
Précision	$\frac{\text{Vrais positifs} + \text{Vrais négatifs}}{\text{Total}}$	Intervalle : de 0 à 1 Score parfait : 1
Biais	$\frac{\text{Vrais positifs} + \text{Faux positifs}}{\text{Vrais positifs} + \text{Faux négatifs}}$	Intervalle : de 0 à $+\infty$ Score parfait: 1 <1 sous-estime, >1 surestime
$\chi^2$	$\sum \frac{(O - E)^2}{E}$ O = Effectifs observés E = Effectifs espérés	Pour 1 degré de liberté : $P(X_2 > 7.88) = 0.005$ $P(X_2 > 10.83) = 0.001$
$\Phi$	$\sqrt{\frac{\chi^2}{\text{Total}}}$	Intervalle : de 0 à 1 Score parfait : 1

Pour chaque test de comparaison, différents choix de mise en forme des données sont testés. Trois comparaisons sont effectuées pour trois seuils différents de niveaux de susceptibilité pour les pixels IRIP : supérieurs ou égaux à 3, supérieurs ou égaux à 4 et égaux à 5. De plus, pour pallier à l'imprécision dans la géolocalisation des cartes IRIP et des zonages règlementaires, les comparaisons sont effectuées avec différentes zones tampons tracées autour des zonages, de 0, 30 et 60 m, correspondant respectivement à un décalage de 0, 1 et 2 pixels IRIP (les données topographiques utilisée pour les cartes IRIP étant de 30 m).

### 1.3. RESULTATS

#### 1.3.1. COMPARAISON ENTRE LA CARTES IRIP D'ACCUMULATION ET LE ZONAGE RUISSÈLEMENT

Le Tableau III-4 présente les scores des cinq indicateurs pour différents seuils de niveaux IRIP (de 3 à 5 sur 5) et pour différentes tailles de zones tampon autour du zonage ruissellement. On observe que le taux de succès, qui est le pourcentage de pixels de niveaux forts situé à l'intérieur du zonage, augmente avec la taille de la zone tampon. Ce résultat était attendu car ces données sont de types différents (vecteur pour le zonage, raster pour la carte IRIP), il y a donc des imprécisions dans le décompte des pixels dans et hors des limites du zonage. Ces décalages peuvent réellement aller jusqu'à plus de deux pixels (60 m). Il est donc plus pertinent de se focaliser sur les résultats obtenus avec une zone tampon de 30 ou 60 m. La

comparaison entre la carte IRIP d'accumulation et le zonage ruissellement montre donc que 90 % des niveaux 5 sont situés à l'intérieur du zonage (+ 60m), ainsi que 70 % des niveaux 4 et 60 % des niveaux 3.

Les scores de précision sont également très encourageants, entre 0,7 et 0,9 pour toutes les comparaisons. Ils montrent le pourcentage de pixels bien placés sur l'ensemble du bassin (à l'intérieur et à l'extérieur du zonage), en comptant les vrais positifs et les vrais négatifs (pixels faibles à l'extérieur du zonage). Par ailleurs, les scores de biais sont très bas. Ceci est également lié à la comparaison entre des polygones et des pixels. Les biais montrent que la carte d'accumulation sous-estime l'aléa ruissellement pour presque toutes les comparaisons. En effet, les pixels IRIP ne recouvrent pas toute la surface du polygone, surtout pour les niveaux forts qui sont moins fréquents. On rappelle néanmoins que la surface du polygone a été réalisée en traçant des zones tampons autour des axes d'écoulement concentrés identifiés sur le terrain. Ce qui est important est donc que la localisation des deux données soit similaire. Enfin, les Chi-2 montrent que toutes les comparaisons sont statistiquement significatives, et les coefficients Phi, montrant l'intensité de la dépendance entre les données, atteignent jusqu'à 0,5 ce qui est encourageant au vu des données qui ne sont pas tout à fait similaires en fond et en forme.

**TABLEAU III-4 : RESULTAT DE LA COMPARAISON QUANTITATIVE ENTRE LE ZONAGE REGLEMENTAIRE SUR LE RUISELLEMENT ET LA CARTE IRIP D'ACCUMULATION**

Niveaux IRIP	Zone tampon	SR	Précision	Biais	$\chi^2$	$\Phi$
≥ 3	0 m	0,4	0,8	1,6	23511	0,3
	30 m	0,5	0,7	0,9	18177	0,3
	60 m	0,6	0,7	0,6	10567	0,2
≥ 4	0 m	0,6	0,9	0,5	23657	0,3
	30 m	0,7	0,8	0,3	15287	0,3
	60 m	0,7	0,7	0,2	9249	0,2
= 5	0 m	0,7	0,9	0,4	44653	0,5
	30 m	0,8	0,9	0,3	36561	0,4
	60 m	0,9	0,9	0,3	28961	0,4

La Figure III-4 présente la superposition du zonage ruissellement (sans zone tampon) avec la carte IRIP d'accumulation (paramétrage conseillé, résolution 30 m, A ≥ 5 ha). Cette comparaison visuelle montre bien la ressemblance entre ces deux données qui ont été réalisées avec des techniques et des données d'entrée différentes. La superposition confirme les tendances observées avec les indicateurs de performance. Les niveaux IRIP 5 montrent en effet de façon très précise les axes de ruissellement concentré. Le taux de succès n'atteint pas le 100 % car on peut voir, sur la partie agrandie, que certains axes du zonage ne sont pas détectés par les cartes IRIP et certains axes des cartes IRIP ne sont pas indiqués sur le zonage. Ceci peut être dû aux données topographiques utilisées dans IRIP qui ne sont pas assez précises pour détecter la totalité des axes, ou bien, à des choix qui ont été faits de ne pas noter certains axes sur le zonage suite à l'expertise terrain. Pour confirmer les informations supplémentaires cartographiées par IRIP, il serait intéressant d'approfondir la comparaison par des visites sur site. Les taux de succès plus bas (70 % et 60 %) obtenus en considérant les niveaux 3 et 4 peut également être justifiés par le fait que la carte IRIP cartographie toutes les zones d'accumulation dans le paysage et pas seulement les axes de concentration. Les pixels 5 semblent indiquer essentiellement ces axes, mais les autres niveaux IRIP indiquent des informations en versant, par exemple des zones de stagnation ou des zones de dépôts, ou encore des informations plus proches des têtes de bassins.

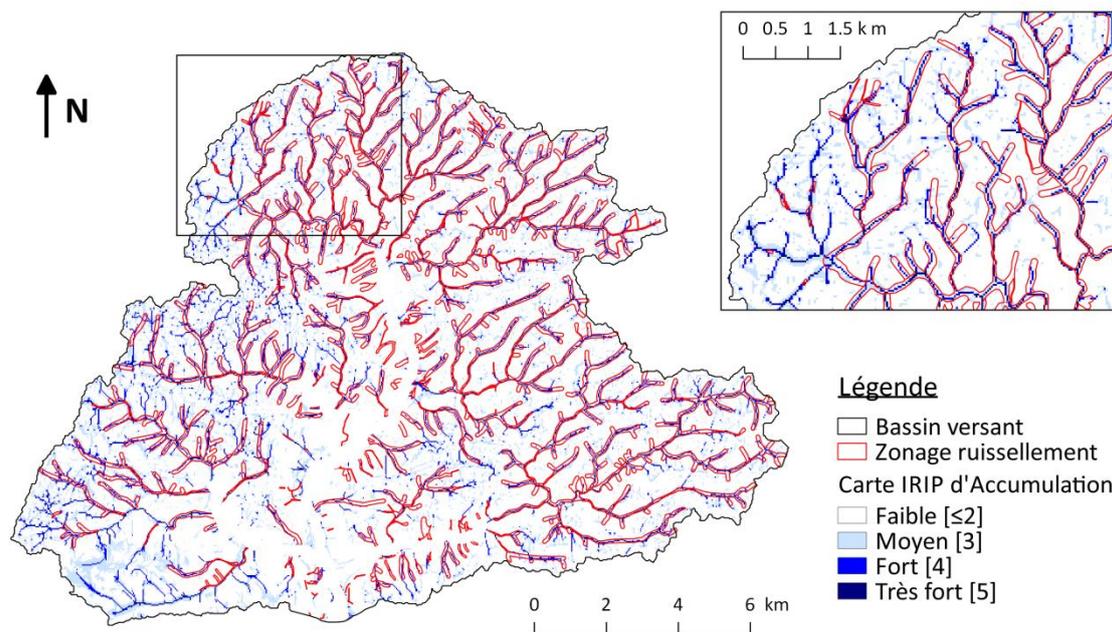


FIGURE III-4 : COMPARAISON VISUELLE DU ZONAGE RUISSÈLEMENT ET DE LA CARTE IRIP D'ACCUMULATION

### 1.3.2. COMPARAISON ENTRE LA CARTE IRIP DE TRANSFERT ET LE ZONAGE EROSION

Le Tableau III-5 présente les scores des cinq indicateurs pour différents seuils de niveaux IRIP (de 3 à 5 sur 5) et pour différentes tailles de zones tampon (de 0 à 2 pixels) autour du zonage ruissellement. Pour cette comparaison également entre la carte de transfert et le zonage érosion on note que le taux de succès augmente avec la taille de la zone tampon, de 0,5 à près de 1. Ceci signifie, par exemple pour les pixels supérieurs ou égaux à 4, que 80 % d'entre eux sont situés à l'intérieur du zonage érosion sans zone tampon, 90 % avec une marge de 1 pixel, et près de 100 % avec une marge de 2 pixels. Néanmoins, les scores de biais de 0,1 montrent que les pixels supérieurs ou égaux à 4 sous-estiment fortement la surface sensible. Ils sont presque tous localisés dans le zonage, mais ils ne recouvrent qu'une petite surface. Ceci est aussi visible sur l'indicateur de précision qui montre des scores moins forts que pour la comparaison précédente. Le zonage d'érosion recouvre davantage de surface que le zonage ruissellement, il y a donc plus de pixels faibles qui sont situés à l'intérieur du zonage. Ceci fait baisser la précision qui prend en compte les vrais positifs et les vrais négatifs. Par ailleurs, les Chi-2 montrent que ces résultats sont tous statistiquement significatifs, mais les coefficients Phi montrent que la dépendance est moins forte entre la carte de transfert et le zonage érosion, qu'elle ne l'était pour la carte accumulation et le zonage ruissellement.

**TABLEAU III-5 : RESULTAT DE LA COMPARAISON QUANTITATIVE ENTRE LE ZONAGE REGLEMENTAIRE SUR L'EROSION ET LA CARTE IRIP DE TRANSFERT**

Niveaux IRIP	Zone tampon	SR	Précision	Biais	$\chi^2$	$\Phi$
≥ 3	0	0,5	0,6	1,2	8395	0,2
	30	0,6	0,6	0,8	7380	0,2
	60	0,8	0,6	0,7	5863	0,2
≥ 4	0	0,8	0,7	0,1	7874	0,2
	30	0,9	0,5	0,1	5797	0,2
	60	1,0	0,4	0,1	3907	0,1
= 5	0	0,7	0,8	0,0	268	0,0
	30	0,9	0,7	0,0	228	0,0
	60	1,0	0,5	0,0	178	0,0

Pour rappel, les zones urbaines ont été masquées pour la comparaison. Le zonage érosion étant un zonage de risque, l'aléa érosion a été croisé avec les enjeux vulnérables à l'érosion, qui sont davantage les surfaces rurales que les surfaces urbaines. Les informations comparées n'étant pas vraiment similaires dans le fond, il est compréhensible que les scores soient meilleurs avec la comparaison du zonage ruissellement. Concernant la comparaison visuelle du zonage érosion et de la carte de transfert (Figure III-5), la même tendance est observée que pour la comparaison quantitative. L'agrandissement montre, en effet, que les pixels 4 et 5 sont bien localisés dans le zonage mais qu'ils ne représentent qu'une petite surface. Il peut être fait l'hypothèse que ces pixels forts indiquent les zones les plus sensibles parmi toute la surface du zonage. IRIP donne davantage de nuances que le zonage. Il serait intéressant d'approfondir cette hypothèse en faisant varier certains seuils IRIP (de pentes ou de ruptures de pentes) pour voir si davantage de surface est détectée. Par ailleurs, les niveaux 3 se trouvent à 80 % à l'intérieur du zonage érosion (+ 60 m) et ils couvrent une surface à peu près équivalente à celle du zonage (biais en dessous et au-dessus de 1 selon la zone tampon). Ceci indique que niveaux 3 présentent un bon potentiel pour détecter les zones sensibles à l'érosion. Par ailleurs, la forte présence des niveaux 3 est due à l'indicateur d'érodabilité du sol qui est activé sur une grande partie du bassin versant (tout le bassin excepté les zones urbaines). Il pourrait être intéressant dans la carte de transfert de considérer davantage d'information sur les types de cultures, ainsi que les pratiques culturales, afin de d'affiner cet indicateur d'érodabilité.

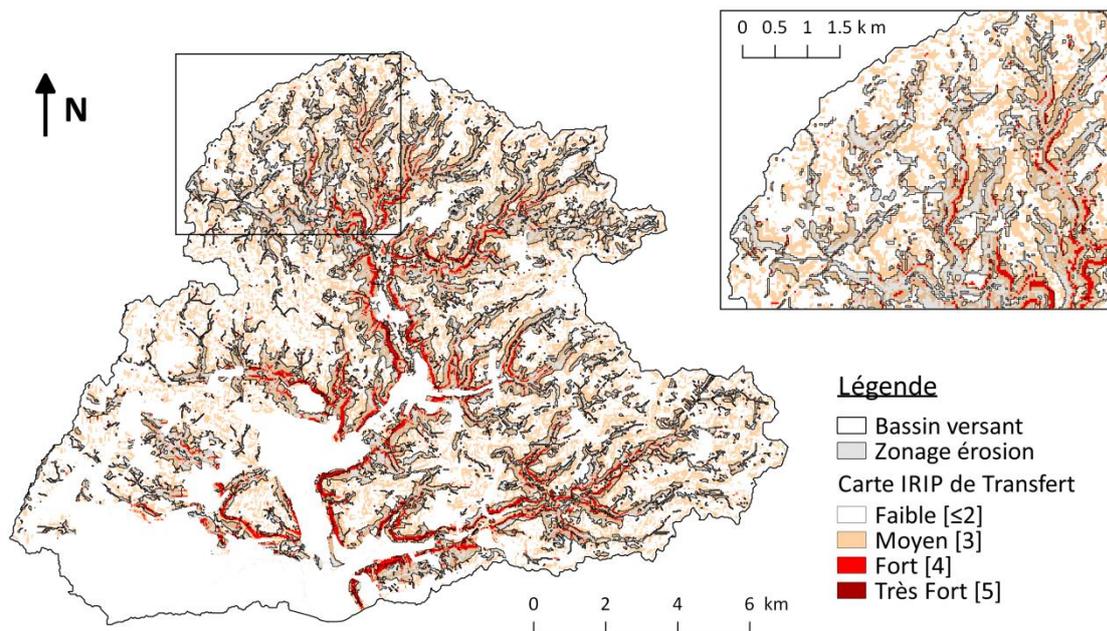


FIGURE III-5 : COMPARAISON VISUELLE DU ZONAGE EROSION ET DE LA CARTE IRIP DE TRANSFERT

### 1.3.3. SYNTHESE

Ces deux comparaisons montrent qu'il y a en effet une bonne correspondance entre la carte d'accumulation et la localisation des axes d'écoulement concentrés, ainsi qu'entre la carte de transfert et le phénomène d'érosion par ruissellement. En termes de comparaison quantitative, les scores montrent une dépendance statistiquement significative entre ces données. Les niveaux 5 de la carte d'accumulation sont localisés à 90 % dans le zonage ruissellement, et les niveaux 4 et 5 de transfert sont localisés à près de 100 % dans le zonage érosion. Les scores de précision et de biais peuvent être faibles pour certaines comparaisons mais ceci est dû au fait que l'on compare des données de formes différentes (des polygones et des rasters). Les représentations cartographiques sont assez proches alors que les techniques utilisées sont très différentes. Le zonage ruissellement a été fait essentiellement par expertise terrain et le zonage érosion par modélisation sur RUSLE et sur STREAM. Les scores obtenus sont donc d'autant plus intéressants.

Concernant la méthode d'évaluation quantitative, cet exemple montre que la méthode développée dans la partie précédente peut s'appliquer pour des comparaisons avec d'autres types de données que des impacts. Il est possible, comme dans ce chapitre, de faire varier certains indicateurs. Ici, les probabilités de détection et taux de fausses alarmes adaptés aux données d'impacts ont été remplacés par le taux de succès, plus pertinent pour évaluer des données cartographiques. Il est possible d'en utiliser d'autres, mais la méthode d'évaluation a l'avantage de fournir une base méthodologique aux comparaisons, avec des indicateurs dont on connaît la variabilité, et qui ont bien été appréhendés grâce aux nombreux tests réalisés dans ce travail. Dans ce chapitre, plusieurs seuils de niveaux IRIP ont été utilisés (de 3 à 5 sur 5). Il reste en effet difficile de déterminer un seuil *a priori* pour l'étude du ruissellement. Néanmoins, il est possible de dire que les niveaux 5 permettent de cartographier les axes d'écoulement concentrés, les niveaux 3 et 4 sont des zones d'écoulements peut être plus diffus ou des zones qui vont s'activer moins souvent, ou pour des épisodes pluvieux plus intenses. Finalement, disposer de nuances de susceptibilité est aussi une force, ceci permet de faire varier le seuil selon les besoins des utilisateurs. Durant l'analyse

toutes les variations sont possibles, puis pour communiquer sur les résultats il est possible de mettre en évidence les zones les plus susceptibles, en affichant par exemple seulement les niveaux 4 et 5.

Il reste néanmoins des différences notables entre les cartes IRIP et les zonages règlementaires du bassin versant de la Lézarde. Tout d'abord, la carte IRIP d'accumulation semble donner plus d'informations notamment sur les versants et les têtes de bassin. Quant à la carte de transfert, seule une petite surface du zonage est retrouvée, et les niveaux 3 montrent davantage d'information en versant. Les hypothèses sont que les cartes d'accumulation et de transfert permettent d'identifier du ruissellement en nappe et de l'érosion diffuse (phénomènes souvent liés) sur les versants et les zones de dépôts en aval des zones d'érosion. Pour aller plus loin dans ces comparaisons et confirmer ces hypothèses des visites sur site et des échanges avec des acteurs locaux semblent nécessaires.

En conclusion, ces comparaisons ont montré la pertinence d'assimiler la carte d'accumulation aux zones d'écoulements concentrés, entre autres, et d'assimiler la carte de transfert à l'aléa érosion par ruissellement. Ceci confirme le concept de base de la méthode IRIP de cartographier le ruissellement avec trois cartes, montrant des processus différents du ruissellement. Ces résultats vont également dans le sens de l'étude de Dehotin et al. (2015) qui ont montré, grâce à l'instrumentation du bassin versant du Mercier (Rhône), que des facteurs différents entre en jeu à différents endroits du bassin pour un même phénomène ruissellement. Parfois, le même facteur entre en jeu mais avec des seuils différents (par exemple pentes fortes pour le transfert et pentes faibles pour l'accumulation). Finalement, la méthode IRIP pourrait être un outil pour contribuer à la réalisation de zonages règlementaires d'aléa et semble apporter d'autres nuances quant aux phénomènes représentés et à leurs niveaux de susceptibilité. Néanmoins, elle reste un outil de diagnostic. Une expertise est requise pour juger de la cohérence des cartes et des comparaisons avec le terrain sont essentielles comme dans toute étude hydrologique. La mise en œuvre de la méthode IRIP dans un contexte opérationnel nécessite davantage de discussions quant aux atouts et limites de son utilisation.

## 1.4. DISCUSSION

### 1.4.1. ATOUTS

La comparaison présentée dans ce chapitre permet d'apporter des éléments de réponse à la question présentée en introduction. Sur quels aspects la méthode IRIP peut-elle apporter des éléments par rapport aux méthodes actuelles pour réaliser des zonages règlementaires ? C'est tout d'abord la simplicité et la robustesse de la méthode IRIP qui est un atout par rapport aux méthodes actuelles. La méthode de construction des cartes IRIP est simple à comprendre et à implémenter. Peu de données sont nécessaires pour réaliser les cartes (topographie, sol et occupation du sol). Ceci permet de disposer rapidement de cartes d'aléa. La méthode IRIP est robuste dans le sens où elle ne requiert pas de calage a priori. Par exemple, des méthodes de classification permettent de déterminer des seuils de pentes et d'indices topographiques en relatif par rapport au bassin versant. Néanmoins, la méthode IRIP est adaptable, des adaptations de son paramétrage sont possibles comme en témoignent les travaux du chapitre précédent. En fonction de la connaissance de la zone et des besoins (analyse, communication), les seuils peuvent varier voire même des indicateurs. Par ailleurs, la résolution également peut s'adapter, elle n'est pas une contrainte. Les cartes peuvent être créées avec les données à disposition. Ceci peut également être un atout en offrant la possibilité de procéder par agrandissement successifs.

Par ailleurs, les cartes IRIP peuvent apporter une précision quant aux différents processus en jeu (écoulement diffus, concentré, érosion, dépôts ou stagnation, etc.), par rapport aux cartographies

actuelles qui se concentrent souvent sur les lieux d'inondation par ruissellement plus en aval. L'intérêt de connaître la localisation des processus dominant est que l'on peut potentiellement adapter les actions selon les zones. En conclusion, la méthode IRIP semble apporter un gain de temps, de flexibilité et de précision sur les différents phénomènes induits par le ruissellement.

#### 1.4.2. LIMITES

Tout d'abord, la méthode IRIP permet de faire des cartes statiques d'aléa, elle ne modélise pas le phénomène. Il n'y a pas de quantification du ruissellement. Il est néanmoins possible d'effectuer des modélisations d'écoulements sur des points particulièrement sensibles préalablement identifiés sur les cartes IRIP ou bien en fonction des enjeux. Par ailleurs, la méthode IRIP ne prend pas en compte la pluie. Bien que ceci puisse être une évolution possible, la variabilité spatiale de la pluie à l'échelle du ruissellement semble encore difficile à prévoir encore avec les technologies actuelles. Cette variabilité pourrait éventuellement être prise en compte sur des zones assez étendues (où les variations climatiques commencent à être identifiables). Bien que la quantification du ruissellement ne soit actuellement pas disponible dans les cartes IRIP, la méthode peut éventuellement être croisée avec d'autres modèles. Les cartes IRIP pourraient permettre d'affiner les paramètres liés au ruissellement en entrée de modèles hydrologiques.

Certaines limites ont pu, par ailleurs, être observées sur la carte de transfert. La comparaison avec la carte issue des modèles STREAM et RUSLE sur le bassin de la Lézarde a montré d'importantes différences. La carte de transfert ne peut pas être aussi performante qu'un modèle d'érosion, qui lui prend en compte bien plus de paramètre, notamment de paramètres de sol. Il faut aussi choisir entre simplicité et nombre de paramètres représentés. Il est néanmoins conseillé de réaliser davantage d'analyses sur la carte IRIP de transfert afin de déterminer quelle part du processus d'érosion hydrique est représentée avec la méthode IRIP.

Une difficulté possible également est d'avoir à gérer les trois cartes IRIP. Ceci peut poser des difficultés d'interprétation et de représentation. Il a été montré, précédemment, la difficulté sur certaines figures de superposer les cartes de transfert et d'accumulation, sans qu'une des cartes ne cache l'autre. Parfois, il est nécessaire de présenter les cartes séparément, mais alors, il peut être difficile de se représenter les processus, notamment ceux qui alternent, par exemple entre érosion et dépôt. Si l'on veut regarder également la carte de production, l'interaction entre les trois processus peut réellement devenir complexe à appréhender. Ceci pose la question de la représentation cartographique du ruissellement en général. Il n'est peut-être simplement pas possible de représenter toutes les composantes de ce phénomène sur une carte. Le ruissellement peut potentiellement se produire en tout point de l'espace et en même temps il reste très éparé et très fugace. La réalisation de zonages réglementaires requiert pourtant de définir les limites spatiales du phénomène. Or, les cartes IRIP sont des cartes pixellisées. Il n'y a pas forcément de continuité entre les niveaux de susceptibilité. Néanmoins, une carte pixellisée est peut-être une représentation plus adaptée pour ce phénomène, qu'une carte vectorielle. En effet, le ruissellement n'est pas forcément continu. Il peut y avoir du ruissellement en un point du bassin, puis l'eau peut s'infiltrer, sans qu'aucun phénomène ne soit visible en aval. Par ailleurs, lorsque l'on cherche à réaliser des cartes de risques, il peut aussi être complexe de définir lequel ou lesquels des aléas induits par le ruissellement il faut considérer (inondation, coulées de boue, érosion, lave torrentielle, etc.). Sur ce sujet de la représentation cartographique du ruissellement, il y a certainement une grande marge de progression. Surtout que le travail sur la sémiologie graphique est fondamental pour véhiculer des messages. Les cartes étant souvent le lien entre les scientifiques et les décideurs, dans le domaine des risques naturels, la rigueur dans la conception de la représentation cartographique est capitale.

Pour finir, les cartes IRIP sont des cartes d'aléa et non des cartes de risque. Ceci paraît évident mais il est important de le rappeler. Pour créer des cartes de risque, l'aléa doit être croisé avec les enjeux et leur vulnérabilité (structurelle, organisationnelle, etc.). Concernant l'application de la méthode IRIP au contexte ferroviaire, il a été nécessaire, pour l'évaluation des cartes IRIP, de proposer une méthode de caractérisation de la vulnérabilité structurelle de la voie ferrée face au ruissellement. Cette méthode peut évidemment être discutée, mais il est nécessaire d'avoir une notion de vulnérabilité pour pouvoir exploiter les cartes IRIP. Pour une application des cartes IRIP à d'autres contextes que le ferroviaire, d'autres enjeux, il est nécessaire de disposer de telles informations, sur la vulnérabilité au ruissellement. La vulnérabilité des enjeux au ruissellement et aux aléas hydrologiques en général nécessite des apports méthodologiques et sont des thématiques actuelles de recherche (Le Bihan, 2016; Versini, 2007). Tant que cette étape de l'analyse des risques ne sera pas aboutie, elle sera un frein à l'utilisation des cartes IRIP.

#### 1.4.3. IRIP COMME UN OUTIL DE GESTION DES RISQUES ?

Les cartes IRIP fournissent de nouvelles informations sur la spatialisation des différents processus du ruissellement. Ce sont de nouvelles informations potentiellement disponibles pour les gestionnaires de bassins, de territoires ou d'infrastructures. Ce sont donc de nouvelles opportunités pour gérer le ruissellement. Connaître la localisation des différents processus peut permettre d'adapter les techniques de gestion en fonction des zones et agir aux endroits stratégiques du bassin versant. Certaines techniques de gestion du ruissellement et de l'érosion par des dispositifs d'hydraulique douce ont montré leur efficacité, néanmoins, il reste toujours difficile de déterminer les endroits les plus adaptés dans le bassin pour implanter ces dispositifs. Les cartes IRIP peuvent aider à identifier les zones où l'effet sera optimisé. On pourra par exemple chercher à favoriser l'infiltration dans les zones à forts potentiels de production, en évitant les sols nus, durant les inter-cultures ou bien en créant des zones de végétation. Les sols nus seront également à éviter dans les zones de transfert fort, des techniques de stabilisation de la végétation pourront être installées, ou encore le travail du sol parallèlement à la pente pourra être évité sur ces zones. Il pourra également être conseillé, sur les zones de dépôt ou de stagnation d'eau (carte accumulation) de réaliser des bandes enherbées pour intercepter les sédiments fins. Dans les axes d'écoulements concentrés, des fascines peuvent aussi être installées afin de piéger les sédiments. La carte d'accumulation peut permettre de choisir de bons emplacements pour un bassin de rétention. Enfin, on cherchera à réduire la vulnérabilité dans ces zones d'accumulation. Ces dispositifs d'hydraulique douce ou ces changements de pratiques culturales sont des actions au quotidien pour les petites périodes de retour. Ces actions doivent être couplées avec les dispositifs classiques de protection, pour les périodes de retour plus élevées, dont le choix de localisation peut aussi être aidé par la méthode IRIP.

Par ailleurs, la localisation des dispositifs hydrauliques de protection doit parfois prendre en compte les contraintes de l'occupation actuelle du sol. Il n'est pas toujours évident par exemple d'intervenir dans des parcelles privées. Des représentations cartographiques adaptées peuvent aussi servir d'outils pédagogiques, afin de mieux appréhender les interactions des différents processus et des différents acteurs dans le bassin versant. Les cartes peuvent aider à visualiser les zones d'actions et les bénéfices en aval. De manière générale, les cartes issues de la méthode IRIP peuvent s'ajouter aux outils existant d'aide à l'aménagement des territoires. Prendre connaissance des différents processus hydrologique dans un bassin versant peut favoriser la gestion du ruissellement intégrée sur l'ensemble du bassin versant, et aller vers un développement plus durable des territoires, tout en sauvegardant les écosystèmes et en prévenant les risques.

## 1.5. CONCLUSION

Bien que la réglementation impose aux collectivités de cartographier les risques naturels auxquels elles sont exposées, l'absence de méthode de référence pour l'aléa ruissellement, rend difficile l'application de cette réglementation et par conséquent la gestion des risques liés au ruissellement. L'objectif de ce chapitre était d'évaluer la contribution de la méthode IRIP à la réalisation de zonages réglementaires pour l'aléa ruissellement. Ainsi, les cartes IRIP ont été comparées aux PPR ruissellement et érosion du bassin versant de la Lézarde. Les comparaisons visuelles et quantitatives ont montré que 90 % des niveaux 5 de la carte accumulation sont localisés au niveau du zonage ruissellement, et près de 100 % des niveaux 4 et 5 en transfert sont localisés au niveau du zonage érosion. Ce qu'il faut retenir est que ces représentations cartographiques sont assez similaires bien que les techniques utilisées soient très différentes. Le zonage ruissellement a été réalisé par expertise terrain et le zonage érosion par modélisation, nécessitant beaucoup de temps et de données, tandis que la méthode IRIP permet d'acquérir rapidement des cartes pertinentes pouvant ensuite servir de base à l'expertise. Les résultats montrent donc que les cartes IRIP peuvent être un bon outil d'aide à la réalisation de zonages réglementaires, à la fois rapide, simple (peu de données d'entrée et facile à appréhender) et robuste (peut être appliqué sur tout type de territoire sans calage *a priori*). Bien que certains points de la méthode puissent être approfondis, tels que la précision des phénomènes représentés par la carte de transfert ou les aspects de sémiologie graphique, il est montré que la méthode IRIP peut aussi contribuer à l'amélioration de la gestion du ruissellement. En effet, disposer des informations sur la répartition spatiale des différents processus (production, transfert, accumulation) peut permettre d'adapter les techniques de mitigation selon les zones, et de les positionner aux endroits stratégiques du bassin et ainsi optimiser leur efficacité. La méthode IRIP peut être un outil d'aide à l'expertise et peut permettre de gérer les risques de façon intégrée au bassin versant, en partenariat avec les autres acteurs du territoire.

## CHAPITRE 2 : CONTRIBUTION DE LA METHODE IRIP AUX RETOURS D'EXPERIENCE POST-EVENEMENTS

### AVANT-PROPOS

Les retours d'expérience sont des enquêtes réalisées à la suite d'évènements dommageables dans le but d'analyser les circonstances, l'origine, les impacts, les dynamiques spatiales et temporelles. Le retour d'expérience est une étape non négligeable du processus de gestion des risques. Il permet de mieux comprendre les facteurs d'aggravation ou d'atténuation des phénomènes et de leurs impacts afin d'en tirer des leçons pour les prochains évènements. Les retours d'expérience post-évènements se focalisent sur plusieurs aspects, hydrologiques, sociaux ou organisationnels. Dans ce travail on se focalise sur l'évènement hydrologique. Dans le contexte ferroviaire, des retours d'expérience sont réalisés, à la suite de désordres liés à des phénomènes hydrologiques. Néanmoins, ces retours d'expérience ne sont pas systématiques ou bien ne prennent pas en compte l'ensemble des éléments. Le premier objectif après un désordre est le retour à la normale des circulations, des agents interviennent pour faire un constat, donner les consignes d'urgence et faire un premier diagnostic. Plus tard, les spécialistes viennent compléter les observations si besoin ou si l'impact a été important. Mais, les petits désordres, ne font pas toujours l'objet d'expertise. De plus, lorsque qu'un épisode pluvieux important provoque de nombreux impacts, il est parfois difficile de tous les étudier dans les détails. Ces retours d'expérience souffrent d'un manque méthodologique. Ce type de tâche, essentiel à la gestion des risques liés au ruissellement gagneraient à disposer d'une méthodologie rapide et complète, pour faciliter le travail des spécialistes et optimiser les actions de prévention.

Dans ce chapitre, des retours d'expérience sur des impacts liés au ruissellement sur les voies ferrées sont utilisés comme source de comparaison pour évaluer les cartes IRIP. Le travail présenté dans ce chapitre a été publié lors de la conférence FLOODrisk, en 2016, à Lyon. Ces travaux, réalisés avec le paramétrage par défaut, ont alimentés les réflexions sur l'amélioration de la méthode IRIP (présentées en partie 2 chapitre 4). Il pourrait être intéressant de tester les résultats avec le paramétrage finalement conseillé. Par ailleurs, bien que ce travail ait pour objectif principal l'évaluation de la pertinence des cartes IRIP par rapport aux observations des expertises terrain, il peut aussi être vu sous un autre angle, celui de la mise en contexte de la méthode IRIP. Ces comparaisons permettent en effet d'illustrer l'utilisation de la méthode IRIP pour effectuer des retours d'expérience. Il est ainsi possible d'identifier les points précis où les cartes IRIP pourraient apporter en méthodologie et en gain de temps. Plusieurs problématiques sont discutées dans ce chapitre. Tout d'abord, en termes d'évaluation, il est étudié la correspondance entre les cartes IRIP et la description des impacts, origines, diagnostics, etc. Ensuite, les comparaisons avec des évènements précis, permettent de vérifier si les cartes IRIP apportent des informations supplémentaires. Enfin, cette étude permettra de proposer des conseils d'utilisation des cartes IRIP pour réaliser des retours d'expérience post-évènement, pour le contexte du ferroviaire mais également pour d'autres contextes.

E3S Web of Conferences 7 10005 (2016)

DOI: 10.1051/e3sconf/20160710005

FLOODrisk 2016 - 3<sup>rd</sup> European Conference on Flood Risk Management

USE OF POST-EVENT SURVEYS OF IMPACTS ON RAILWAYS FOR THE EVALUATION OF THE IRIP METHOD  
FOR SURFACE RUNOFF MAPPING

Lilly-Rose Lagadec<sup>1,2,a</sup>, Pascal Breil<sup>1</sup>, Blandine Chazelle<sup>2</sup>, Isabelle Braud<sup>1</sup> and Loïc Moulin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Irstea, Hydrology-Hydraulics research unit, 5 rue de la Doua, CS 70977, 69626 Villeurbanne cedex, France*

<sup>2</sup>*SNCF Réseau, Engineering and Projects, Lines-Track-Environment department, 6 avenue François Mitterrand, 93574 La-Plaine-Saint-Denis cedex, France*

**Abstract.** IRIP – Indicator of Intense Pluvial Runoff (French Acronym) – is a method to map the susceptibility of territories to surface runoff generation, transfer and accumulation. The method is based on a geomatic combination of landscape factors extracted from topography, land use and soil type. This study is part of the method evaluation process and suggests using information from post-event surveys of surface runoff events to evaluate the agreement between the IRIP maps and the field observations. Surface runoff susceptibility maps are produced at five meters resolution for three impact areas on railways with different infrastructure and environment configurations. First, information categories are extracted from the post-event surveys, and then the IRIP maps are analyzed to see if and how the information categories are retrieved. This study shows that the IRIP maps fit the impact description. The areas susceptible to surface runoff transfer fit the gullies locations and the areas susceptible to surface runoff accumulation fit the sediment deposit traces. The comparison also highlights that the IRIP maps can give further information on the event spatial dynamics. Given the simplicity and the robustness of the mapping method, IRIP can be a tool to perform surface runoff post-event surveys and to improve the surface runoff hazard assessment.

© The Authors, published by EDP Sciences. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

License 4.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1 Introduction

Surface runoff is the part of precipitation that does not infiltrate into the soil and flows at the ground surface out of the permanent river network. The occurrence of surface runoff depends on multiple factors such as, rainfall patterns, soil properties and initial conditions, topography, land use and catchment geomorphology. Depending on these factors, surface runoff can have different characteristics: velocity, rheology, water depth and type of carried materials. In this study, surface runoff includes hazards such as soil erosion, mudslide, floods out of the river network and debris flow. The surface runoff hydrological process and related hazards can be difficult to observe and measure due to the quick and localized occurrence of the phenomena. The transportation network as outdoor infrastructure is impacted by meteorological and is particularly exposed to surface runoff (Chazelle et al., 2014; Pams-Capoccioni et al., 2015). The linear and continuous nature of railways implies that they are likely to intercept natural water flow paths. They can be flooded, cluttered with materials and the structure itself can be swept away by the stream (Amblard et al., 2015; Dehotin et al., 2014b; Pams-Capoccioni et al., 2015; Tennakoon et al., 2012). Thus, impacts on the railways are good indicators of surface runoff occurrence.

In terms of safety aspects and economic consequences, it is essential to reduce intense surface runoff related risks on the railway network. To manage these risks, it is essential to well understand the phenomenon and to know where it is the most susceptible to occur. Several methods allow the mapping of surface runoff, such as STREAM (Cerdan et al., 2002b), SCALES (Le Gouee et al., 2010), RuiCells (Douvinet et al., 2014), EXZECO (Pons et al., 2010a) or Erruisoll (Demarcin et al., 2009b). In this paper, we focus on the IRIP method (Dehotin et al., 2015a, 2015b; Dehotin and Breil, 2011b; Lagadec et al., 2016b) – Indicator of Intense Pluvial Runoff (French Acronym) –. It is a geomatics method which produces maps of the spatial susceptibility of a territory to generate, to

transfer and to accumulate surface runoff. The maps are created using a simple combination of landscape factors derived from topography, soil type and land use maps (see details in section 2.1).

Model evaluation is an important step in model development. Indeed, model outputs can be used by stakeholder for decision making. Wrong decisions can lead to severe consequences in terms of human impact and economic losses. So, it is important to understand the real meaning of model outputs, the assumptions, the range of application, the uncertainties. Concerning surface runoff maps, the evaluation is particularly complex because of the lack of surface runoff observations. Instrumentation and measurements are complex at large scale (Dehotin et al., 2015a; Hudson, 1993). Proxy data are an alternative to evaluate models. Proxy data are not direct measurements of the phenomenon but provide large-scale evidence of the phenomenon occurrence (IPCC, 2003). Proxy data used for model evaluation can be for example, road impacts (Naulin et al., 2013; Versini et al., 2010a, 2010b), post-event surveys [21], [22] or insurance claims (Bourguignon, 2014; Douvinet, 2006a). These studies highlight methodological issues for the comparison of models with proxy data: difficulties to gather and format data and to process qualitative and non-exhaustive data..

The IRIP method has already been evaluated using many types of data. Spatially distributed observations in a small catchment allowed confirming the IRIP method concept of representing different steps of surface runoff (generation, transfer, accumulation) with different maps using different factors (Dehotin et al., 2015a). The IRIP method has been compared with others model outputs such as SHYREG (Arnaud and Dehotin, 2011), CINECAR and EXZECO (Benarina, 2015) showing the complementarity of these models. Other works based on the comparison of the IRIP method with surface runoff coefficient from discharge data (Hasnaoui, 2013; Legros, 2014) highlight the fact that surface runoff phenomenon is too

much complex to be represented with only one runoff coefficient. Large scale comparison has been made with the Gaspar French database of natural disaster claims (Dehotin and Breil, 2011b) showing promising correlation. Statistical comparisons has been made with surface runoff impact locations on the transportation network, such as roads and railways (Dehotin et al., 2015b; Lagadec et al., 2016b; Mellal, 2014) showing good correlation between the high susceptibility levels of the transfer and accumulation maps and the occurrence of surface runoff impacts. These works are part of the IRIP method evaluation process and show encouraging results but further works must be performed to evaluate the ability of the method for specific tasks. Focusing on specific events can allow evaluating the ability of the IRIP method to describe surface runoff events at very small scale, and can help establishing guidelines for the use of the IRIP maps in an operational context.

This study presents an analysis of three surface runoff impacts on the railway. The paper suggests a method to use information from the post-event surveys to evaluate the agreement between the IRIP maps and the impact circumstances. For each case study, six information categories are extracted from the post-event surveys, then, the IRIP maps are produced at a five meters resolution on the impacted area. The maps are analysed to see if the information provided by the survey are retrieved in the maps and how they are transcribed through the spatial information. Finally, interpretation keys of the IRIP maps are given and the contribution of the maps to carry out post-event survey is discussed.

## 2 Materials and methods

### 2.1 The IRIP method

IRIP is a method to produce maps of intense surface runoff susceptibility. The method allows producing three maps reflecting three surface runoff steps: generation, transfer and accumulation. The susceptibility map of surface runoff generation represents the areas the most

susceptible to generate water at ground surface. The susceptibility map of surface runoff transfer represents the areas favourable to set surface water in motion, to accelerate it to make it more powerful. The susceptibility map of surface runoff accumulation represents the areas where surface runoff concentrates (talweg, hollows) or slows down in concave break of slopes and where water level can increase. The IRIP method concept is based on the analysis of different landscape factors that can be more or less favourable to surface runoff, and that the cumulative effects can lead to highly favourable conditions for surface runoff occurrence.

IRIP is a GIS based method. The map creation process is described on Figure 1. Multiple landscape indicators (Table 1, 2 and 3) of surface runoff occurrence susceptibility are derived from four input data: a Digital Elevation Model (DEM), a soil map, a land use map and the surface linear networks. From the DEM, are derived five indicators: the slope, the break of the slope, the topographic index (Beven and Kirkby, 1979), the form factor (Horton, 1932) and the flow accumulation. From the soil map, are derived three indicators: the soil permeability, thickness and erodibility. One indicator is derived from the land use map and another one from the surface linear network. Moreover, the map of surface runoff generation becomes an input indicator after reclassification for the two other maps. Topographical indicators are computed on each pixel relatively to the sub-catchment associated to the pixel. Each indicator can be either favourable or not favourable to surface runoff. At each pixel, 1 is attributed if the indicator is favourable to surface runoff and 0 if it is not favourable (Table 1, 2 and 3). Each of the three maps is created by adding 5 indicators. Therefore, the resulting maps are three susceptibility maps of surface runoff generation, transfer and accumulation, with a 0-to-5 level scale (0 weakly susceptible and 5 highly susceptible).

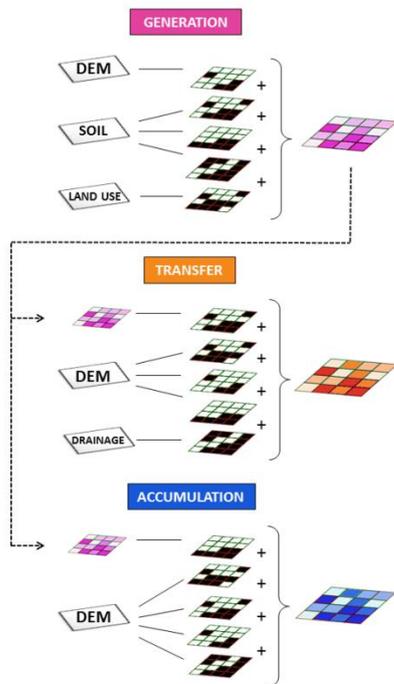
For this study, a five meters DEM is used, provided by the French National Geographical Institute (IGN). For this reason no surface linear network is used for the creation of the transfer map; the fine resolution is supposed to already

detect them. The used soil map is provided by Irstea research institute and the land use map is the Corine Land Cover 2012. A software version, called iRIP© has been developed by SNCF (French National Train Company) for its own purpose and is used for this study.

The IRIP method produces susceptibility maps and is independent of the meteorological hazard. To get a surface runoff hazard map, the IRIP maps must be combined with the rainfall.

Indicators	Values
Soil permeability	0: High permeability
	1: Low permeability
Soil thickness	0: Thick soil
	1: Thin soil
Soil erodibility	0: Low erodibility
	1: High erodibility
Topography	0: Slope < t <sub>1</sub> AND topographic index < t <sub>2</sub>
	1: Slope > t <sub>1</sub> OR topographic index > t <sub>2</sub>
Land use	0: Infiltrative surfaces
	1: Impervious surfaces

**Table 1.** The indicator used to create the IRIP map of surface runoff generation susceptibility and their possible values



**Figure 1.** Scheme of the IRIP method and the combination of input data and of the map of

generation to produce three maps of surface runoff generation, transfer and accumulation susceptibility on a six level scale, from 0 to 5

Indicators	Values
Upstream generation susceptibility	0: Upstream generation susceptibility
	1: No upstream generation susceptibility
Slope	0: Slope < t <sub>1</sub>
	1: Slope > t <sub>1</sub>
Breakslope	0: Concave break of slope
	1: Convex break of slope
Compacity	0: Low form factor
	1: High form factor
Surface linear networks	0: no linear axes
	1: presence of linear axes

**Table 2.** The indicator used to create the IRIP map of surface runoff transfer susceptibility and their possible values

Indicators	Values
Upstream generation susceptibility	0: Upstream generation susceptibility
	1: No upstream generation susceptibility
Slope	0: Slope > t <sub>1</sub>
	1: Slope < t <sub>1</sub>
Breakslope	0: Convex break of slope
	1: Concave break of slope
Topographic index	0: Topographic index < t <sub>2</sub>
	1: Topographic index > t <sub>2</sub>
Flow accumulation	0: Low flow accumulation AND low form factor
	1: High flow accumulation OR high form factor

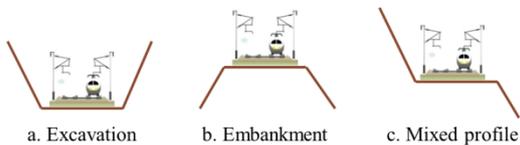
**Table 3.** The indicator used to create the IRIP map of surface runoff accumulation susceptibility and their possible values

From previous studies conducted to assess the relevance of the IRIP maps, several points have been learnt and some hypotheses have been raised. When comparing the IRIP maps with risk regulatory zonings, there are agreements between the IRIP map of accumulation and the dry talweg network and between the IRIP map of transfer and soil erosion risk areas. However, some parts of the IRIP map of accumulation also correspond to soil erosion risk areas. The hypothesis is that the map of accumulation also shows the sediment deposit areas. The comparison between the IRIP maps and the post-event surveys allow discussing this hypothesis.

Moreover, previous studies focused on the IRIP maps of transfer and accumulation. In this study the three maps are considered simultaneously.

## 2.2 Data of surface runoff impact on railways

Because of its linear features and its distribution on all types of territories, the railway network intercepts surface runoff. The railway longitudinal profile is very constrained to keep a steady incline platform. Thus, the railway transversal profile varies regarding the topography. There are three types of railway profile when crossing a hillslope: excavation (Figure 2.a) in rock or loose material, embankment (Figure 2.b) and mixed profile (Figure 2.c), which means excavation on the upstream side and embankment on the downstream side. The railway network being particularly exposed to water-related hazards is equipped with multiple hydraulic structures (aqueducts, nozzles...) and drainage devices (ditches, gutters, downspouts) to protect and to ensure hydraulic transparency (Heyns, 2000)



**Figure 2.** Scheme of the three types of transversal profiles when the railway crosses a hillslope

Despite protective structures, intense surface runoff can impact the railway network. Disorders can be due to unsuitable state of hydraulic devices considering the initial runoff volume for which was dimensioned the structures. As soon as a disorder is detected or for particular rainfall events, organisational measures are taken to slow down or to stop train circulation regarding to the security aspects. Then, a field expertise allows making diagnostic to restore the line with its regular speed as soon as possible. This field expertise leads to post-event surveys. In this study these surveys are used as a source of information on the disorder circumstances to evaluate the relevance of the IRIP maps.

## 2.3 Evaluation method

This study focuses on a railway line in the Gard catchment (2000 km<sup>2</sup>), in the southern part of France. The Gard catchment is chosen due to its known exposition to intense Mediterranean rainfall events and intense surface runoff events which result from its topographical, geological and soil types (Benarina, 2015). The railway network crossing the catchment is about 70 km long. A preliminary analysis of multiple post-event surveys allowed selecting the three case studies which correspond to the three typical cross-profiles of a railway. The preliminary analysis of the surveys allowed identifying a set of six information categories: the meteorological event description, the impact description and location, the infrastructure description, the upstream environment description, the diagnosis about the disorder origins and causes made by the operator and the recommended measures that must be undertaken. These information categories allow analysing the post-event surveys rapidly and efficiently. Moreover, a mark is attributed to the information category in order to qualify its level of accuracy and uncertainty. The mark follows a simple three level scale: low if the information does not appear in the survey, medium if the information is discussed but incomplete or inaccurate; and strong if the information is complete and accurate.

So, the evaluation process focuses first on the post-event survey analysis. For the three examples, the six information categories are extracted and gathered in a table along with the mark. Then, a qualitative description of the event circumstances and the spatial surface runoff dynamic is written to summarize the event, and then a critical analysis is brought on the availability and quality of the post-event survey information.

Secondly, the evaluation process focuses on the IRIP maps analysis. For the three examples, the IRIP maps are produced for the catchment intercepted by the impacted railway section, with a five meter resolution DEM. A qualitative description is made about the catchment morphology and the three IRIP maps of surface

runoff susceptibility. Then, the agreement between The IRIP maps and the survey is analysed. Does the impact description fit the IRIP maps? Which information category is better retrieved in the maps? Can the maps bring further information in the impact understanding? What is the benefit of each map (generation, transfer, accumulation)? From the six categories, impact, environment, diagnosis and recommended measures are analyses. The meteorological event and infrastructure categories are not appropriate to compare with the IRIP maps.

### 3 Results

#### 3.1 First case study: excavation profile

##### 3.1.1 Information extracted from the post-event survey

Categories	Information	Quality
Meteorological event	No information	Low
Impact	No impact on the rails but several shallow landslides from one to ten meters on the upper part of the bank upstream the railway. Few years ago, surface runoff caused the collapse of a retaining wall at the same location and also induced few shallow landslides on several parts of the bank upstream the railway.	Medium
Infrastructure	The railway is in a rock excavation of fifteen meters at the upstream side and five to ten meters at the downstream side. No information on hydraulic structures. On the upstream side the bank has slopes of 3/2 and of 3/1 with a berm in between. Few retaining walls are located in the lower part of the bank. Several construction works have been undertaken and the slope	Strong

	has been consolidated with poles and burlap. The location and the dimension of the structures on the bank are not mentioned.	
Environment	The bank is made of calcareous, sandstones and marls with alluvial terraces in the upper part of the catchment. The catchment bounds are not identified.	Medium
Diagnosis	Intense rainfall saturated the soil. Despite the presence of burlap, the soil flowed down on the steeper slopes. The landslide was stopped by the berm at middle slope. No information on the others landslides.	Medium
Recommended measures	increased monitoring especially during severe weather, rehabilitation of burlap and seeding of the slopes	Strong

**Table 4.** The six pieces of information extracted from the post-event survey for the first case study with their quality marks.

For this example, according to the post-event survey (Table 4), the damages did not impact the railway but have weakened the bank of the railway. Few shallow landslides from one to ten meters were observed. These landslides were stopped by the berm before the railway. Several consolidation works were undertaken on this bank, and the last one was the year of the last impact. This bank clearly suffers from geotechnical instability, but the reported impacts were induced by intense rainfall events. Surface runoff might not be the only cause of this disorder but is involve in the process. This area is nonetheless interesting to study because of the succession of impacts that indicates a local sensitivity.

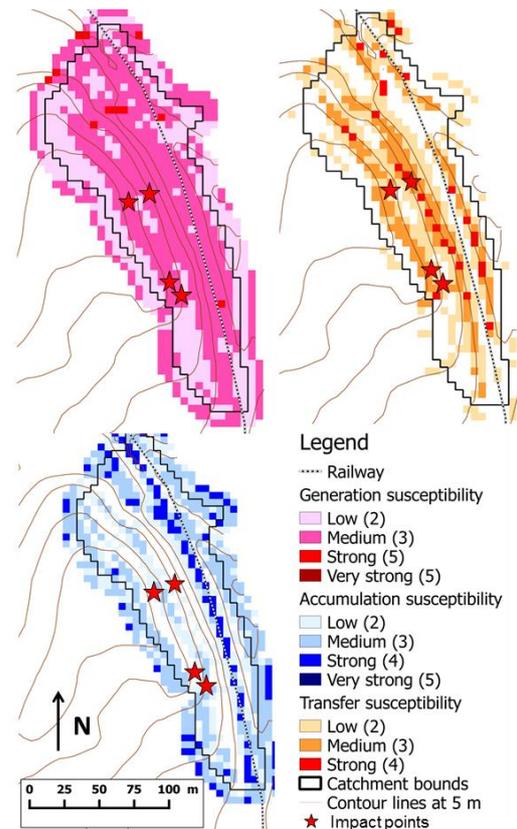
Otherwise, in the survey, there is no information on the different meteorological events associated with the several disorders, and there is a good description of the railway infrastructures but no information about hydraulic devices. Moreover, there is little

information about the role of the environment. The diagnosis is not complete for the different impacts but allows understanding the influence of the surface runoff. The recommended measures are clearly mentioned in the report.

### 3.1.2 IRIP maps description

The study railway section is 270 meters long and includes all the historical impact points. The catchment intercepted by the railway section is about 1.6 ha large with an elevation difference of 25 meters. This catchment is very small and presents steep slopes except on the railway and close to the headwater.

Figure 3 shows the three IRIP maps produced on the catchment. The IRIP map of generation susceptibility shows medium levels (3/5) over the entire area. This is due to favourable slopes, land cover and soil erodibility. The IRIP map of transfer susceptibility also shows strong levels almost over the entire area (3 and 4/4) with pixels 4/4 very close to the railway, which means that all the indicators are favourable to surface runoff transfer. The IRIP map of accumulation susceptibility shows strong levels (4/5) on the railway. This is due to the railway profile which is established in an excavation. One can also see a slight persistence of medium level pixels (3/5) in the middle of the slope.



**Figure 3.** The three IRIP maps of surface runoff susceptibility for the first case study with approximated impact locations.

### 3.1.3 Comparison between the post-event survey and the susceptibility maps

In terms of impact description, the IRIP maps fit with the information in the survey. Indeed, there were on this catchment many shallow landslides on several points and the map of transfer susceptibility shows strong levels on the whole area. One can note an area with less transfer susceptibility, in the middle of the catchment, transversally to the slope and few pixels of higher accumulation susceptibility at the same location. This information marches with location of the berm, that is, the area where the landslides stopped. Moreover, one can note very high susceptibility for surface runoff transfer and accumulation very close to the railway whereas no impact has been reported on the tracks. It could be related to the retaining walls in the lower part of the bank that could protect the railway.

About the environment description, the IRIP map of accumulation shows medium susceptibility level of accumulation at the headwater of the catchment, in the middle and on the railway. This could correspond to the alluvial terraces, the berm and the railway excavation.

The diagnosis states that the soil was saturated by water and slipped along the slope. This scenario brings a new hypothesis concerning the IRIP map interpretation. Would the superimposition of high generation and transfer susceptibility be an indication of shallow landslide susceptibility?

Globally, this area shows a strong predisposition for two of the three surface runoff mechanisms on the whole area which fits with the monitoring recommended in the survey and planned bank consolidation and seeding. The accumulation map showing high susceptibility levels, the drainage devices must be regularly monitored and maintained if they exist.

### 3.2 Second case study: the mixed profile

#### 3.2.1 Information extracted from the post-event survey

Categories	Information	Quality
Meteorological event	300 mm in 13 hours at a rain gauge located 6 km away	Medium
Impact	Mudslide that covered the track on about thirty meters and filled the hydraulic structures crossing below the railway. Traces of materials on the track surroundings at few points. Gully erosion on the banks upstream and downstream the railway.	Strong
Infrastructure	The railway is established in a mixed profile at this location. There are three hydraulic structures crossing below the railway, the precise location are mentioned. The railway is equipped with side ditches but no information on the volume neither on the	Medium

	maintenance quality.	
Environment	A country road runs parallel to the railway at about 30 meters upstream. There is vegetation between the road and the railway. Above the road there is a group of buildings and construction works. The land cover is changing and the soil is bare. Drainage systems have changed and some drains reject in the bank between the road and the railway.	Strong
Diagnosis	Even though the rainfall event was intense, the disorders are due to the change in the land cover that creates new impervious surfaces and new water flow paths. The changes in the road drainage systems redirect the surface runoff in the bank upstream the railway.	Strong
Recommended measures	Cleaning of the railway platform, enlargement of the road drainage capacity and creation of a hydraulic barricade at the beginning of the bank toward the railway.	Strong

**Table 5.** The six pieces of information extracted from the post-event survey for the second case study with their quality marks.

For this example, according to the post-event survey (Table 5), the impact is due to an intense rainfall event and to the creation of new impervious surfaces. Moreover, there was creation of new surface runoff flow paths with a modification of the drainage systems that reject water toward the bank, directly upstream the railway. This induced intense gullies and material deposits on the railway and in the aqueducts and gullies again in the bank after downstream the railway.

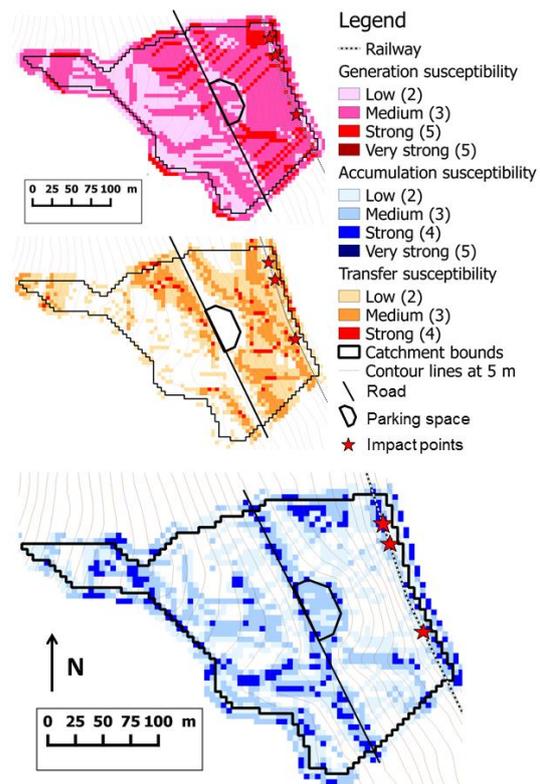
Otherwise, in the survey, the impact is very well described and the environment as well. There is a good description of the infrastructure but a lack of information on the drainage condition and capacity. The diagnosis is accurate

in the spatial dynamic of the event and the recommended measures as well.

### 3.2.2 IRIP maps description

The study railway section is 180 meters long and includes the impact point along with the aqueduct locations. The catchment intercepted by the railway section is about 4.8 ha large with a rounded shape and a elevation difference of 130 meters.

Figure 4 shows the three IRIP maps produced on the catchment. The IRIP map of generation susceptibility shows a high susceptibility for surface runoff generation in all the downstream part of the catchment near the railway with levels 3 and 4/5. This is due to favourable soil thickness and erodibility with favourable slopes and topographic indexes. The IRIP map of transfer susceptibility also shows high levels on the railway track and in the whole downstream part between the railway and the country road. There are high densities of level 2 and 3/4 and some isolated pixels of level 4/4 very close to the railway, which means that all the indicators are favourable to surface runoff transfer. There is also a high susceptibility upstream the road in the northern part where slopes are steeper. The IRIP map of accumulation susceptibility shows high level pixels on the railway track, on the road and on the parking space. The map shows preferential flow paths both sides of the parking space but which do not persist until the railway. One can also see high susceptibility levels upstream the road (3 to 4/5).



**Figure 4.** The three IRIP maps of surface runoff susceptibility for the second case study

### 3.2.3 Comparison between the post-event survey and the susceptibility maps

In terms of impact description, the IRIP maps matches with the information in the survey. Indeed, the transfer map shows strong transfer susceptibility between the road and the railway, which matches with the description of gullies at this location. The strong accumulation susceptibility on the railway matches with the information of material deposits on the railway track.

In terms of environment description, the IRIP maps can identify the road and the parking space by showing higher accumulation susceptibility. Even though the land cover between the road and the railway is not favourable to surface runoff (vegetation), all the others indicators are favourable which makes the railway section exposed to surface runoff, whereas it would not have been obvious from the railway view.

Even though the diagnosis blames the change in the land cover and the drainage facilities in the

occurrence of the damages, the catchment shows high susceptibility to surface runoff for the three maps near the railway. So this area was predisposed to surface runoff. It would be interesting to look for more information on the historic impact in this area. May the aqueduct dimensions have been adequate considering the environment before the change in land use?

Regarding the recommended measures, it is indeed important to enlarge the drainage capacity of the road. Moreover, since the bank between the road and the railway is very susceptible to generate and transfer surface runoff, it would be interesting to perform hydraulic studies in order to assess the possibility of ditches creation along this bank.

**3.3 Third case study: the embankment profile**

*3.3.1 Information extracted from the post-event survey*

Categories	Information	Quality
Meteo- rological event	No information	Low
Impact	Accumulation of water behind the railway embankment. Four water resurgence points on the downstream part of the embankment, with the mentioned location. The water resurgence created gullies on the other side of the embankment. No mud deposit neither land levelling problem.	Strong
Infrastructu re	The embankment is 3 to 5 meters high and surrounded by two mixed profile, no hydraulic structure to cross under the railway at this point	Strong
Environme nt	A talweg transversal to the railway. Calcareous rock except in the talweg bottom where there is a clay layer. The environment description focuses on the railway surroundings. The	Medium

	catchment is plotted on a map but the catchment head is approximated.	
Diagnosis	Accumulation of surface runoff from the talweg but no information on the contributing areas. The lack of hydraulic structure for water crossing is the main cause of water accumulation. The material heterogeneity in the embankment gave preferential ways for water infiltration. No comment on the upstream environment configuration.	Medium
Recommen ded measures	Filling of gullies and increased monitoring especially during severe weather. Ask for hydraulic studies, estimation of the rainfall of the event and research for old hydraulic structure to cross the railway. Check the catchment headwater boundaries where there is a landfill and check their water management.	Strong

**Table 6.** The six pieces of information extracted from the post-event survey for the third case study with their quality marks.

For this example, according to the post-event survey (Table 6), the talweg concentrated surface runoff from upstream without giving hypothesis on the contributing areas. Surface runoff was accumulated behind the railway embankment which did not have any hydraulic structure for water to cross the railway. The water accumulated in the depression pushed toward the embankment and found preferential paths to flow throughout it. Four resurgence points were observed resulting in gullies formation.

Otherwise, in the survey, there is no information on the type of meteorological event and information about the spatial dynamic of surface runoff only focuses on the meeting point with the railway. The catchment is not fully described and its bounds are not clearly defined. There are questions on the inclusion of the landfill in the catchment headwater. On the

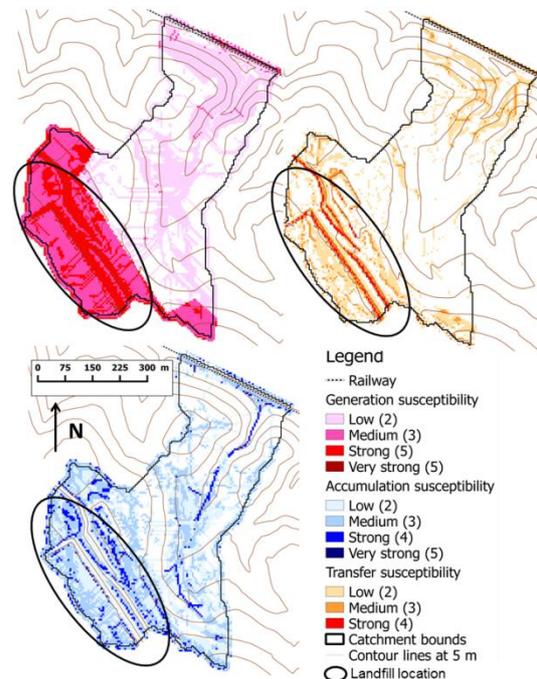
contrary, there are good descriptions of the infrastructure and of the historic impacts of the area. The report shows that the survey focuses on the impacted point and remains in the near environment of the railway.

### 3.3.2 IRIP maps description

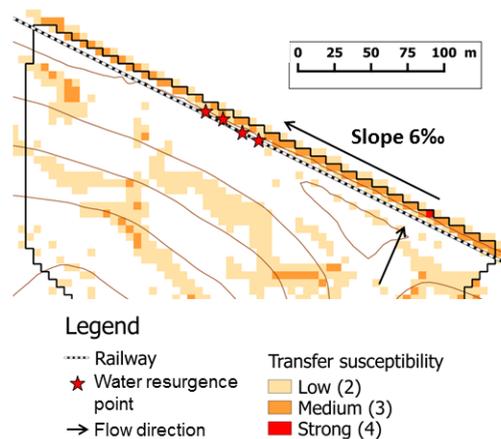
The study railway section is 330 meters long and includes the impact point and the water resurgence points. The catchment intercepted by the railway section is 29 ha large. It has an elongated shape in the downstream part with a talweg well defined, and has a spread out shape in the upstream part with two terraces separated with a drop of fifteen meters. The elevation difference of the catchment is of 45 meters. The catchment drawn with the IRIP method with a five meter resolution DEM is different from the catchment in the survey. The IRIP maps include the landfill in the catchment.

Figure 5 shows the three IRIP maps produced on the catchment. The IRIP map of generation susceptibility shows low susceptibility levels (less than 2) in the downstream part of the catchment and higher levels (3 and 4/5) in the upstream part. This is due to the presence of the landfill, which makes the soil hydraulic properties favourable to surface runoff (thickness and permeability). The levels 4/5 are due to favourable slopes and topographic indexes. On the contrary, the lower part of the catchment has a thick soil with low erodibility and a vegetation type land cover. The IRIP map of transfer susceptibility does not show high susceptibility levels near the railway. There are levels 2 at 3/4 in the talweg side due to the compactness index, the slope and the break in the slope. In the upper part of the catchment there are levels 3 and 4/4 due to the generation map that shows high susceptibility levels in this area. One can also notice susceptibility levels of 3 and 4/4 directly downstream the railway (Figure 6). The IRIP map of accumulation susceptibility shows a well-defined talweg with susceptibility levels of 4/5 because of the favourable slope, break in slope and a post-processing of filling the surrounding pixels lower in elevation). The map also shows high susceptibility levels near the railway (Figure 7). One can notice a high density

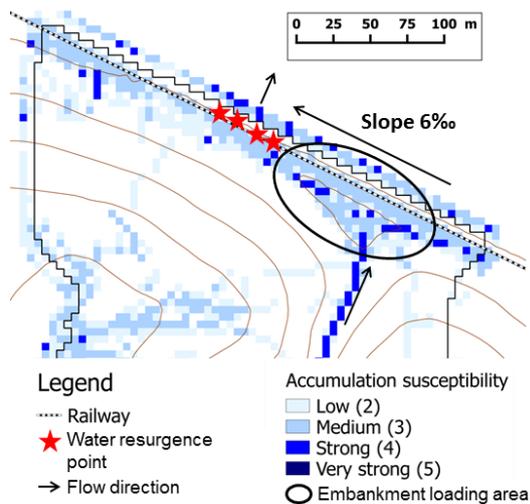
of level 3/5 and many isolated pixels of level 4/5. The upper part of the catchment shows accumulation susceptibility levels of 3 and 4/5.



**Figure 5.** The three IRIP maps of surface runoff susceptibility for the third case study



**Figure 6.** Focus on the IRIP map of surface runoff transfer susceptibility to show the agreement between the impact description and the spatial information of the map



**Figure 7.** Focus on the IRIP map of surface runoff accumulation susceptibility to show the agreement between the impact description and the spatial information of the map

### 3.3.3 Comparison between the post-event survey and the susceptibility maps

About the impact description, the causal interpretation made with the IRIP maps seems to suit. Indeed, the accumulation map shows a strong density of pixels 3/5 and many pixels 4/5 at the meeting point of the talweg and the railway. This can correspond to the filling of the hollow by water and the loading of the railway embankment. Moreover, there are strong susceptibility levels all along the railway, even near the resurgence points, that are not in the talweg axis. The survey also states that there was no mud deposit. When focusing on the transfer map, no high susceptibility levels are observed in the catchment near the railway (pixels 2/4 and few 3/4), except in the upstream part where strong pixels (4/4) are located at 650 meters from the railway. Could the distance have been too long to be able for water to transport material until the railway? Did the accumulation area in between have played a role in the sediment deposit? Moreover, the strong transfer susceptibility directly downstream the railway could correspond to gullies formed after the resurgence points.

Regarding the environment description in the survey which mentioned the talweg, the accumulation map indeed shows a well-defined

talweg. The survey also ask question about the inclusion of the landfill in the catchment and the IRIP shows that it is partially included. It is thus possible that this surface contributed to surface water generation since it represents about 8.5 ha of levels 3 and 4/5 according to the generation map.

Even though the post-event survey provides little information about the surface runoff spatial dynamic and points out the absence of hydraulic structure, the IRIP map allows making some assumptions. For instance, surface runoff could have been generated on or near the landfill area. Surface runoff could have been accumulated in the talweg until the railway, and then accumulated behind the embankment and flow along the railway following the slight slope until crossing the embankment, where topography and materials are more propitious. However, others scenario can be suggested. Subsurface and ground water could have played a role in the filling of the talweg and of the hollow behind the embankment. Nonetheless, the absence of hydraulic structure for crossing the railway suggests that this talweg is dry, most of the time. Another suggestion is that the calcareous rock of this area can have an active water network and some natural resurgence points can be at the origin of the amount of water. This suggestion corresponds with the fact that there was no mud deposit.

Regarding the recommended measures, it could be indeed interesting to assess the contribution of the landfill by analysing the water management and by comparing the historic impacts on the railway with the creation date of the landfill. Moreover, it seems important to analyse the rainfall event in order to assess the part of surface and subsurface water in the filling of the talweg.

### 3.4 Result summary

The comparison between the post-event surveys and the IRIP maps allow evaluating the relevance of the surface runoff susceptibility maps with field observation. Table 8 shows the result summary for the three case studies. Globally, the IRIP maps fit with the field

observation, particularly with the impact description, but in many cases the lack of information exhaustiveness does not allow a complete analysis, for example information about the rainfall event is essential for the diagnosis. Further field expertise is also needed to fully validate the maps on these case studies. The evaluation process must be also pursued for more examples, for different catchment sizes and geographical contexts. However, these comparisons allow discussing about the initial hypothesis and move towards certainties.

Information categories	Agreement with the IRIP maps		
	1 <sup>st</sup> case	2 <sup>nd</sup> case	3 <sup>rd</sup> case
Parameters			
Meteorological event			
Impact	Good	Good	Good
Infrastructure			
Environment	Partial	Good	Good
Diagnosis	Partial	Partial	Partial
Recommended measures	Good	Good	Good

**Table 8.** Result summary of the agreement between the IRIP maps and the pieces of information extracted from the post-event surveys.

#### 4 Discussions and perspectives

The analysis of these three case studies allows making global comments on the post-event survey relevance and shortcomings and on the information and uncertainties brought by the IRIP maps. The comparison between the surveys and the maps also allow giving interpretation keys for the use of the IRIP maps as a tool for making diagnostics.

##### 4.1 Remarks on the post-event surveys

Despite the simplicity of the scale about the information quality, differences in uncertainty and accuracy are noteworthy. The accuracy depends on the event and also on the information categories. First, the information on the meteorological event is almost never mentioned whereas the recommended measures are very precise. This observation is not surprising but reveals the operational point of view of these surveys. The objectives of the post-event survey are more to protect the infrastructure and to

allow train circulation than to understand the rainfall event and the flow of water on the ground. Nevertheless, rainfall information can be obtained a posteriori to enrich the event circumstances analysis. The information quality of the others categories is medium or strong. It reveals that information on impacts, infrastructure and diagnosis is rather well usable to understand the event (two strong and one medium). Nonetheless, the infrastructure description does not inform completely on the configuration of the hydraulic structures and their capacities or on the level of maintenance. The environment configuration description is rather incomplete (two medium and one strong). It often remains at view distance from the railway and does not inform on the contributing areas. However, good quality information is important in all categories. It is essential to detect the origin of the dysfunction and the aggravating factors in order to take the appropriate measures and to prevent further disorder. This strategy leads to a sustainable development of the railway infrastructure in its environment.

##### 4.2 Remarks on the IRIP maps

###### 4.2.1 Map uncertainties

The IRIP maps bring much information on the environment. They give information on the catchment bounds and on the surface runoff spatial sensitivity within the catchment. The maximum level of susceptibility is computed respectively to the study catchment, which means it cannot be compared between catchments as an absolute value. However, in the case of already observed events, it means that surface runoff issues exist despite of an absolute scale. The activation of areas prone to surface runoff will also depends on the rainfall intensity spatial distribution, which is not included at the moment in the method. The interest to keep the maximum susceptibility level relative to the study area is also to keep the most detailed information that IRIP can provide.

The maps also allow making some assumptions about the spatial dynamic of surface

runoff, but the analysis must keep in mind the uncertainties contained in the IRIP maps. Uncertainties can be due to the input data: on the topography quality, the land use map completeness or the soil map accuracy. Moreover, the IRIP maps are raw outputs of the indicator combination. They can be calibrated regarding knowledge on the study area (i.e. slope thresholds, geology influence on soil properties, land cover particularities). The susceptibility levels also can be difficult to interpret in terms of isolated pixels, size of a sensitive area, pixel density, meaning of a medium susceptibility level, distance between high susceptibility levels and the impact area. The interpretation of these pixel configurations can also differ for the three maps and with the resolution.

#### *4.2.2 Relationships between IRIP maps and natural phenomena*

About the relationship between the different IRIP maps and the natural phenomenon, the three cases allow making a link between the transfer susceptibility map and the soil erosion phenomenon. The first and the second cases show erosion and shallow landslide phenomena and both present a transfer map with a lot of strong susceptibility levels near the impact points. The third case is not concerned by an erosion phenomenon and present low transfer susceptibility. About the accumulation map, it can be confirmed with the three cases that it informs not only on the flooded area but also on areas with sediment deposit susceptibility. The first case shows the pixels of levels 3, associated to a berm, could have stopped the shallow landslides and protected the track. The second case shows high accumulation susceptibility on the track which has been covered by material deposits. The third case must be confirmed with further expertise but suggests that the accumulation susceptibility in the middle of the catchment with pixels of level 3 could have stopped the sediment transport from the upstream part of the catchment which presents high levels of transfer susceptibility. About the relationship between the three maps, this study allows suggesting that when at least two maps on three present high susceptibilities, the area is globally more exposed to surface runoff issues.

The first case gather generation and transfer high susceptibility on the whole catchment, the second case gather high susceptibility for the three IRIP maps near the impact points, and the third case gather high accumulation susceptibility and high generation susceptibility but more upstream in the catchment.

#### *4.2.3 The IRIP susceptibility levels*

About the susceptibility levels, this study allows raising few hypotheses. The third case suggests that the transfer susceptibility of level 2 would not be significant since no any trace of soil erosion was observed. Otherwise, transfer susceptibility characterised by a strong density of level 3 with few pixels of level 4 seems to be significant for representing an exposed area (cases 1 and 2). About the accumulation map, few level 3 pixels would be significant to slow down and intercept sediment transport, according to the first and the third cases. Moreover, according the third case, a strong density of level 3 with few level 4 pixels would represent an area exposed to flooding. About the susceptibility levels of transfer and accumulation these case studies show that despite strong transfer susceptibility, accumulation susceptibility of level 3 could be enough to intercept sediment deposit.

#### *4.2.4 The IRIP map of surface runoff generation susceptibility*

About the spatial information of the IRIP map of surface runoff generation susceptibility, the analysis of the third case allows raising the hypothesis of the influence of the area size and distance. Pixels with susceptibility levels of 3 and 4 represent about one third of the total catchment area, and are located about 650 meters away from the railway. According to the amount of accumulated water behind the embankment and that loaded it until passing throughout it, the significant surface favourable to surface runoff generation could have played an important role. This hypothesis must be further developed and more events must be analysed.

### **4.3 IRIP as a tool for post-event surveys**

This study is part of the IRIP method evaluation process. This analysis relies on results from past studies and provides further discussions on assumptions. A fine tuning of IRIP maps is not the objective because the IRIP method aims to be as robust as possible, knowing that input data precision can vary from a place to another. The evaluation challenge is then for IRIP to verify that predicted processes (erosion, deposits, runoff pathways) are confirmed anywhere and despite of the quality of the input data. The presented results show a good agreement with previous observations made in other locations and tend to confirm the robustness of the method. For now, the evaluation of the IRIP maps tends to confirm that the method can be applied successfully in different geological and climatic areas but it still requires more cases of application to confirm its predictability capacity. IRIP provides very simplified view of the surface runoff spatial dynamics, and therefore, will never fully match field reality. However, with more and more tests, the meaning of the maps and the information quality and uncertainty can be qualified and quantified. Tests allow identifying certain tasks in which the IRIP maps can bring valuable information. This study allows showing the contribution of the IRIP maps for performing post-event surveys.

The tasks in which the IRIP maps can contribute is, for example, the work of prior field identification in order to efficiently organize field expertise. This could allow better understanding the environment, that is, the identification of the catchment bounds and of the susceptibility of some areas to surface runoff generation, transfer or accumulation. The post-event survey analysis allowed showing the uncertainties about the environment description whereas impact descriptions and diagnostics are fully described. During field expertise, having such maps could allow better knowing what is important to check in which area (for example, soil erosion traces in high transfer susceptibility areas and sediment deposit or water marks in high accumulation susceptibility areas).

Further analyses must be performed in order to assess the ability of the IRIP method to

identify exposed area along railway lines and prioritize areas for increased monitoring or maintenance. Further tests must be also performed to assess the contribution of the IRIP method in the infrastructure construction and design, for instance to choose hydraulic structure device and location. Moreover, having different surface runoff maps showing different mechanisms could allow adapting risk management technics depending on the area and the dominant process (for instance to encourage soil infiltration in areas with high susceptibility to surface runoff generation, or to avoid obstacles or redirect runoff in areas with high transfer susceptibility). As, the HYDRATE project (Gaume and Borga, 2013) which provides guidelines for post-flood investigation, intense surface runoff event should have a global strategy of observation. From an operational point of view, post-event survey must be homogenized in order to optimized and make effective the management of intense surface runoff related impacts. From a scientific point of view these post-event surveys must constitute an important source of information to learn about the surface runoff phenomenon and to better evaluate models.

## 5 Conclusions

Considering the three typical cross-sections of a railway when crossing hillslopes, the IRIP method has shown to be effective to identify the impact types and locations caused by surface runoff in each of the cross-sections.

To resume the major findings of this paper:

- In the excavation profile (case 1) IRIP indicates susceptibility to erosion in the artificial bank and runoff accumulation on the railway. The first consequence is confirmed while the second is not, maybe in reason of protective structures in the lower part of the bank.

- In the mixed profile (case 2), IRIP also indicates susceptibility to erosion of the upstream and downstream bank with also accumulation on the railway. It is again confirmed by gullies and deposits.

- In the embankment profile (case 3), IRIP indicates susceptibility to accumulation behind the railway embankment which blocks the overland runoff, and erosion on the downstream part of the embankment by overflow or percolation, which is again confirmed.

The physical processes and their causes seems to be obvious but their occurrence is not so predictable without an integrated analysis of the upstream catchment. That is what the IRIP method can bring.

## **6 Acknowledgements**

We thank ANRT (Agence Nationale de la Recherche et de la Technologie) for funding the PhD grant of the first author. We thank Judicaël Dehotin who developed the software implementing the IRIP method, Oumaïma Benarina for her useful reflexions on the transportation network vulnerability in the Gard basin, all the colleagues who contributed to the IRIP method development and evaluation, Olivier Payrastre for fruitfull discussions about this work.

## SYNTHESE

Le travail présenté dans cet article montre une comparaison de la méthode IRIP à une autre source de données, des observations terrain issues d'expertises sur des désordres liés au ruissellement, et sur une autre zone d'étude (la ligne de St-Germain-des-Fossés à Nîmes), que les résultats obtenus dans la partie précédente. De plus, ce travail a permis de mettre en contexte opérationnel la méthode IRIP et de réfléchir à son intégration dans le processus actuel de gestion des risques liés au ruissellement à SNCF Réseau. Le premier objectif de ce travail était d'évaluer la pertinence des cartes IRIP par rapport à des observations post-événement. La partie précédente n'avait pu approfondir cet aspect car peu d'informations étaient généralement disponibles sur les circonstances des impacts. Au vu de la quantité de données exploitée, seules les informations sur le lieu, la date et le type de désordre étaient utilisées. Le second objectif était d'apporter des éléments concrets sur l'utilisation de la méthode IRIP pour réaliser des retours d'expérience post-événements liés au ruissellement. En quoi IRIP peut apporter un gain de temps et de méthodologie ?

Pour répondre à ces deux objectifs, trois impacts ont été étudiés, représentant trois configurations différentes de l'infrastructure (déblai, profil mixte et remblai) et trois types d'aléa différents (glissement, coulée de boue et inondation). La méthode utilisée a été tout d'abord de synthétiser l'ensemble des informations issues des retours d'expérience en six catégories : les informations météorologiques, la description de l'impact, de l'infrastructure, de l'environnement, le diagnostic et enfin les préconisations. Ensuite, la comparaison avec les cartes IRIP a permis de montrer comment ces différentes catégories d'informations peuvent être retrouvées sur les cartes IRIP. Pour cela, les trois cartes IRIP de production, de transfert et d'accumulation sont étudiées (contrairement aux études précédentes où seulement les cartes de transfert et d'accumulation ont été étudiées).

Ce qu'il faut retenir concernant l'évaluation des cartes IRIP, est que la localisation des traces d'érosion correspond avec les zones de transfert fort, de même que les zones d'accumulation ou les zones de submersion correspondent avec les zones d'accumulation forte. Des éléments ont été apportés sur les niveaux de susceptibilité à considérer. L'érosion semble pouvoir se produire à partir de niveaux 3, de même avec l'interception des sédiments transportés sur la carte d'accumulation. Les niveaux 4 de la carte d'accumulation semblent montrer davantage des zones potentiellement inondables par ruissellement. Concernant la carte de production, les trois sites étudiés présentent de forts potentiels de genèse de ruissellement en amont des zones d'impacts (niveaux 3 et 4). Pour aller plus loin, il serait intéressant de vérifier si effectivement la carte de production peut permettre de hiérarchiser les sites susceptibles de recevoir des quantités importantes de ruissellement, ou bien, si les critères liés à la spatialisation de l'intensité pluviométrique et à la surface drainée sont plus déterminants.

Ce qu'il faut retenir concernant les retours d'expérience étudiés, est qu'il a été mis en lumière le manque d'information concernant la description de l'environnement en amont de l'impact, en dehors de l'emprise ferroviaire, ainsi que concernant le phénomène météorologique associé. Pourtant, la connaissance de l'environnement et de la pluie semble essentielle pour bien poser le diagnostic et pour prendre les mesures de prévention adaptées. Il a été montré que la méthode IRIP pourrait aider à approfondir la catégorie description de l'environnement et à confirmer certaines hypothèses de la catégorie description diagnostic. De manière générale, il est conseillé de consolider le cadre méthodologique pour la réalisation des retours d'expérience, afin d'aider les agents pour savoir les informations à récolter sur le terrain, les détails à regarder, etc. L'étude de ce type de document plusieurs années après peut être complexe. Il est important de classer les informations collectées à l'issue de l'expertise.

Finalement, les cartes issues de la méthode IRIP peuvent aider à différentes étapes, avant le retour d'expérience pour préparer la visite terrain, pour anticiper les zones à étudier, pour bien délimiter le bassin versant par exemple et identifier les zones à fort potentiel. La préparation de ce qui peut/doit être observé sur le terrain peut faire gagner du temps durant la visite. Les cartes IRIP peuvent apporter de la méthodologie sur le terrain, durant l'expertise, en montrant les zones à analyser et ce qui peut y être observé, les détails qu'il faut chercher. Par exemple, on peut chercher les traces d'érosion sur les zones de transfert, les traces de dépôts sur les zones d'accumulation, les facteurs aggravant sur les zones de production, etc. Les cartes peuvent être un outil pour favoriser l'expertise hors emprise ferroviaire, au niveau des zones contributives. Enfin, les cartes IRIP peuvent apporter après le terrain un gain de temps pour réaliser le livrable, en fournissant des visuels facilitant la communication entre les experts et le commanditaire. Les cartes peuvent également contribuer à décider des mesures à prendre pour la prévention en indiquant l'origine du désordre et donc les zones sur lesquelles il faut agir. Bien que les actions hors emprise soient parfois complexes à mener, les cartographies peuvent également être un vecteur de communication, un outil pédagogique pour montrer les problématiques et les bénéfices des différents acteurs. De manière générale, améliorer les retours d'expérience, c'est améliorer la gestion des risques, en prenant mieux conscience de l'origine des problématiques et en ciblant mieux les actions.

Pour aller plus loin, sur la comparaison des cartes IRIP avec les observations terrain, il serait intéressant de réellement fournir les cartes aux agents qui vont sur le terrain suite à des désordres. Ainsi il serait possible d'avoir leur retour quant à la pertinence des cartes IRIP, mais également quant à leur contribution par rapport à leurs méthodes actuelles et par rapport à leurs besoin et à leurs contraintes. Plusieurs retours d'expérience, dans le cadre de la recherche, ont par ailleurs été réalisés avec la méthode IRIP, notamment dans les communes de Biot (Alpes Maritimes) en octobre 2015 et de Luchaux (Somme) en juin 2016 (P. Breil et al., 2016), montrant que disposer des cartes IRIP était un réel appui pour s'orienter et identifier les différentes zones contributives.



## CHAPITRE 3 : CONTRIBUTION DE LA METHODE IRIP AUX DIAGNOSTICS DE LIGNE

### AVANT-PROPOS

Les diagnostics de ligne sont des missions commandées à l'ingénierie par les services de maintenance dans le but d'optimiser le plan de gestion d'une ligne, en termes de maintenance ou de surveillance. Le processus de diagnostic de ligne est présenté en détails en partie 1, section 2.4.3.2. Bien que les missions de diagnostics doivent souvent être adaptées aux contextes locaux, ces missions se réalisent généralement en deux phases, l'évaluation des risques et la réduction des risques. La phase de réduction des risques vise à faire des recommandations en termes de travaux ou de stratégies de surveillance. Les recommandations font l'objet de discussion avec le client en fonction de ses contraintes et de ses objectifs. La phase d'évaluation des risques se focalise quant à elle sur la combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité. Lorsqu'il s'agit d'étudier l'aléa ruissellement, cette phase souffre d'un réel manque méthodologique. Les difficultés résident dans la qualification (définition, limites spatiales du phénomène) et la quantification (intensité, techniques de mitigation adaptées) de l'aléa.

Il existe tout d'abord des difficultés à définir l'aléa lui-même, à poser les limites des phénomènes induits par le ruissellement sur l'infrastructure ferroviaire (inondation de plateforme, glissement de talus, pollution du ballast par des fines, etc.). Il y a également des difficultés à déterminer les sections de ligne les plus exposées à l'aléa ruissellement, sous chacune de ses formes. Les méthodes actuelles pour identifier les zones exposées sont la capitalisation des désordres passés et la réalisation d'expertises terrain. Mais le phénomène de ruissellement est complexe, il n'est pas simple à anticiper sur le terrain. Le ruissellement n'est pas seulement influencé par la topographie et il peut se produire éloigné de tout cours d'eau. De plus, tous les désordres ne sont pas forcément enregistrés. Le savoir dont dispose les acteurs locaux sur les zones sensibles peut être perdu ou altéré. Par ailleurs, l'exposition à l'aléa peut évoluer avec le temps. L'occupation des sols autour de la voie ferrée peut changer et modifier les volumes d'apports pour lesquels les ouvrages étaient initialement dimensionnés. Il y a donc un réel besoin de disposer d'un outil pour aider à déterminer et hiérarchiser les zones exposées au ruissellement.

En termes de quantification, la problématique est qu'il existe peu de données de mesures du phénomène. Les nombreux petits bassins versants, sensibles au ruissellement, le long de la voie ferrée, ne sont souvent pas jaugés. Aucune donnée d'intensité ou d'occurrence n'est alors disponible pour quantifier le phénomène et dimensionner les mesures de protection adaptées. Les méthodes actuelles se basent souvent sur la méthode rationnelle dont les paramètres tels que le coefficient de ruissellement s'obtiennent en grande partie par expertise. Par ailleurs, même lorsque les dispositifs hydrauliques sont bien dimensionnés, le ruissellement charrie des sédiments, des boues, voire des obstacles de plus grand volume, qui peuvent combler les dispositifs, réduisant de manière significative leur capacité. Il y a donc un réel besoin de mieux appréhender la dynamique spatiale du ruissellement en amont de la voie ferrée

pour mieux apprécier les coefficients de ruissellement et mieux estimer la potentialité de voir arriver du ruissellement chargé ou non. Connaître la dynamique spatiale du ruissellement est également nécessaire pour bien gérer les problématiques de boue en amont des dispositifs hydrauliques.

Ce chapitre présente la comparaison des cartes IRIP avec les résultats d'un diagnostic de ligne réalisé via de nombreuses expertises terrain et une bonne connaissance de l'aléa ruissellement sur cette zone. Ce chapitre est basé sur l'article intitulé 'A surface runoff mapping method for optimizing risk analysis on railways' soumis au journal Safety Science en juin 2017. Le diagnostic est utilisé d'une part pour évaluer la pertinence des cartes IRIP et d'autre part pour évaluer la contribution de la méthode IRIP à la réalisation de ce type d'expertise. L'objectif est double, estimer la performance des cartes IRIP à retrouver les zones identifiées par le diagnostic comme à risque, et identifier les étapes du processus de diagnostic de ligne où la méthode IRIP peut apporter un gain de temps ou de précision.

Pour parvenir à ces objectifs, le travail présenté dans cet article est divisé en deux parties. Dans un premier temps, les cartes IRIP sont évaluées suivant la méthode d'évaluation proposée en partie 2. La méthode d'évaluation utilisée n'est cependant pas exactement la même. La méthode utilisée dans ce chapitre a nourri les réflexions pour parvenir à la méthode d'évaluation finale proposée. Dans cet article, seulement trois indicateurs de performance sont utilisés : POD, FAR et le Chi-2. Puis, deux conditions de détection d'une zone sensible par les cartes IRIP sont utilisées : à partir d'un pixel supérieur ou égal à 4 dans le tronçon d'étude, et à partir de 10 % de la surface du tronçon d'étude avec des pixels supérieurs ou égaux à 4. Ces deux conditions sont testées car les cartes IRIP sont produites avec une résolution de 5 m. Ceci génère davantage de pixels pour un tronçon, et donc plus de chance d'avoir un pixel fort par tronçon. Pour réduire le nombre de tronçons détectés comme sensibles et mieux prioriser les zones exposées, une condition de détection plus restrictive est testée. Par ailleurs, dans cet article, le paramétrage de la méthode IRIP a été adapté selon les connaissances du phénomène de ruissellement sur cette zone. Les réflexions qui ont mené à cette paramétrisation ont également alimenté les réflexions pour le paramétrage final conseillé en partie 2. Il pourrait être intéressant d'effectuer à nouveau l'analyse avec le paramétrage conseillé, bien que l'objectif de ce chapitre soit moins d'évaluer la performance de la méthode IRIP, que d'illustrer sa mise en application dans le contexte opérationnel, ici pour réaliser des diagnostics de ligne.

A SURFACE RUNOFF MAPPING METHOD FOR OPTIMIZING RISK ANALYSIS ON RAILWAYS

Submitted to Safety Science in June 2017

Lilly-Rose Lagadec<sup>1,2</sup>, Loïc Moulin<sup>1</sup>, Isabelle Braud<sup>2</sup>, Blandine Chazelle<sup>1</sup>, Pascal Breil<sup>2</sup>

1 SNCF Réseau (French Railway Company) ; Engineering & Projects Division; Railways, Tracks & Environment Department, 6 avenue Francois Mitterrand, 93210 La-Plaine-Saint-Denis, France

2 Irstea, Water Department, Hydrology-Hydraulic Research Unit, 5 rue de la Doua, 69100 Villeurbanne, France

Corresponding author: [lilly-rose.lagadec@irstea.fr](mailto:lilly-rose.lagadec@irstea.fr)

Abstract

Railways are critical infrastructures for the transportation of people and goods and network failures must be controlled in order to maintain safety and to limit economic losses. The railway network is exposed to natural hazards and is particularly vulnerable to water-related hazards such as surface runoff. Due to the complexity of the phenomenon, management of risks induced by surface runoff raises technical and scientific issues. An innovative method for surface runoff susceptibility mapping, called IRIP for “Indicator of Intense Pluvial Runoff”, has been created and adapted to the railway context. The objective of the study is to evaluate the mapping method and to provide application advice in the framework of the current risk-analysis process. The mapping method is evaluated by comparison with results of an expert-based risk analysis, using quantitative and qualitative analyses. On the basis of contingency tables, probabilities of detection (POD, sections exposed to surface runoff and detected by IRIP) and false alarm ratios (FAR, sections detected by IRIP whereas they are not exposed) are computed. POD range from 94 to 100% and FAR range from 20 to 26%. Then spatial information provided by the maps is compared with field observations and recommendations for works. It is shown that the mapping method can make a substantial contribution to risk assessment and risk reduction by providing a better understanding of the environment. Thus, the mapping method opens new opportunities to manage surface runoff in partnership with the other territory stakeholders.

## 1. Introduction

### 1.1. Context

Railways are critical infrastructures for the transportation of people and goods (Maurer et al., 2012). The French railway network operates about 30,000 km of railways and about 15,000 trains run daily for freight and passengers. Railway network failures must be imperatively controlled in order to maintain user and employee safety and to limit economic losses for the company, either direct cost (reconstruction works after an incident, delay compensations) or indirect cost (foregone revenues due to network unavailability, possible brand-image deterioration). Railway infrastructure is composed of multiple interacting elements such as the fixed installations for electric traction, the telecommunication installations, the traffic control installations, the tracks, the civil engineering structures, and the earthworks. Earthworks are built to get a steady longitudinal profile of the tracks and avoid the natural terrain fluctuations. Different transversal profiles can be created: embankments, when the tracks are above compacted material layers; excavations, when the tracks are below the natural terrain; mixed profiles, with an embankment on one side and an excavation on the other, and flat profiles when no particular earthwork is undertaken (Figure 1).

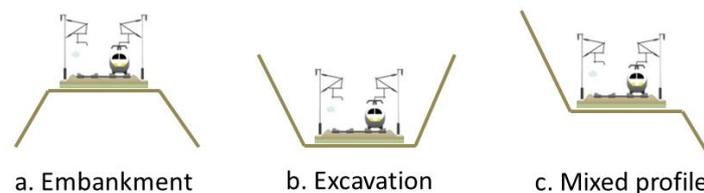


Figure 1: Three types of transversal profiles of the railway infrastructure

Railways are exposed to water-related hazards since they cross natural water-flow paths (Chazelle et al., 2014). Water-related hazards can be classified into different types: fluvial flooding when rivers flow over their banks, coastal flooding when normally dry lands are flooded by sea water, ground water flooding when the ground water table level rises above the natural terrain, and pluvial flooding when rainfall generates floods on hillslopes outside the river network. This study focuses on pluvial flooding. When rainfall intensity exceeds soil infiltration capacity, water can flow over the ground surface (Beven, 2011; Dehotin et al., 2015a) and generate damage. Water surface runoff can reach high velocities and densities by carrying materials. This phenomenon is influenced by multiple factors (Le Bissonnais et al., 2005; Sivapalan et al., 1987): rainfall characteristics (intensity, duration, and frequency), soil surface characteristics such as topography, land use (agricultural and urban areas) and soil physical properties (type, permeability, erodibility, thickness). Once water is generated on the surface, it can flow downstream and generate various hazards such as floods, mudflows, shallow landslides, and erosion.

Railway infrastructure is particularly vulnerable to surface runoff given its characteristics. Electric installations may experience failure when impacted by water. The tracks are composed of ballast

between the rails and the platform, which provide good mechanical properties but which can easily be swept away by water flows (Amblard et al., 2015). Earthworks are also vulnerable to surface runoff depending on their profile, length, slope or construction materials. They may experience erosion, landslides or destruction (Figure 2). In order to protect the infrastructure, railways are equipped with hydraulic structures. Their function is to ensure the natural water flows from upstream to downstream and to manage water generated within the railway right-of-way. Hydraulic structures can be transversal (aqueduct, nozzle, bridge) to make the water cross the railway. They can be longitudinal (ditches, drains, dikes) to pipe water towards an outlet. Retention basins can also be installed to dampen incoming and outgoing water volumes.



Figure 2: Illustration of surface runoff impacts on railways: from left to right, flood, landslide, and breach in the embankment

From an operational point of view, the risks for the railway network are disrupting train circulation and jeopardizing safety. Thus, risks induced by surface runoff are 1/ railway unavailability due to the presence of obstacles (water, materials), 2/ railway unavailability due to the absence of an element or of the whole railway (breach, destruction) and 3/ accelerated degradation of railway elements or railway stability. To manage these risks, actions must be undertaken at every railway life-stage: during new railway or new structure design, during maintenance, during operation by monitoring, during crisis phases, and after a crisis for recovery and feedback. However, surface runoff risk management generates technical issues as well as scientific issues.

### 1.2. Technical issues

Current issues in managing risks induced by surface runoff on railways lie in quantifying and qualifying surface runoff. Quantifying refers to a flow rate estimate at a catchment outlet and qualifying refers to a spatial assessment of areas where surface runoff is susceptible to occur. Flow rates are computed in order to dimension hydraulic structures or to verify they have a sufficient capacity. Surface runoff flow rate can be estimated for a catchment, thanks to historical discharge data, by applying statistical methods on rainfall and runoff data. In nearly all cases, however, catchments intercepted by railways are ungauged. In this case, pseudo-empirical formula can be applied, such as the rational method (Thompson, 2007). The rational method allows computing the flow rate by multiplying the catchment area, the rainfall

intensity, and a surface runoff coefficient. Uncertainties arise, amongst others, with the estimation of the surface runoff coefficient, which varies from 0 (totally permeable) to 1 (totally impervious), and which relies on expert opinion. Pseudo-empirical formulas are difficult to reproduce and not automated. So, they are difficult to apply for long railway sections. Moreover, peak flow rate is not the only representative variable for characterizing surface runoff since it can also carry mud and materials. This can clog hydraulic structures and significantly reduce their capacity. Moreover, the environment surrounding the railway is permanently evolving: land use can change (cultivation, urbanization), it can increase or deflect the incoming water volumes and existing hydraulic structures can become insufficient.

Considering qualification, there are different approaches in the scientific literature for surface runoff mapping. The approaches based on topography analysis only (Pons et al., 2010a) are rather simple but they do not take into account the other parameters that influence surface runoff occurrence and intensity, such as land use or soil types. The approaches based on indicator combinations (Cerdan et al., 2006; Le Gouee et al., 2010) are more complex, but mainly focus on the erosion process and require accurate soil data, which are not available on a large scale. The approaches based on physical modelling (Dabney et al., 2011; Smith et al., 1995) are interesting since they can model the spatial and temporal dynamics at catchment scale, but they also require numerous input and calibration data and are hardly applicable on a large scale. Difficulties lie in the complexity of the surface runoff phenomenon. Surface runoff is generated by rainfall whose location and intensity are still difficult to forecast with current meteorological models. It is influenced by multiple factors and can occur in various forms (flood, erosion, mud). Thus, data from observations and measurements remain scarce, although they are essential to better understand the phenomenon and to calibrate and evaluate models. For these reasons, there is generally no mapping of the surface runoff hazard available on a national scale.

### 1.3. Scientific issues

A method called IRIP (for “Indicator of Intense Pluvial Runoff”, French acronym) for surface runoff susceptibility mapping was developed by Dehotin and Breil (2011) from Irstea (French National Research Institute of Science and Technology for Environment and Agriculture). The IRIP method proposes an innovative approach for considering surface runoff. The method allows the creation of three maps representing three different phases of the surface runoff phenomenon: generation, transfer, and accumulation. The territory understanding is thus simplified by a spatial segmentation of the dominant processes, and the risk management can be optimized by adapting the mitigation techniques depending on the areas. The mapping method has been designed to be simple enough in order to be widely applicable, in particular in an operational context. It requires only three input data: a digital elevation model, a land use map, and a soil map. The IRIP method provides an operational method for surface runoff hazard mapping that can be used by regional organizations for land planning objectives. By sharing these issues in part with the railway infrastructure manager, the IRIP method has been adapted to the railway context in collaboration with SNCF Réseau. The maps created by the IRIP method are intended for

use as a tool for decision-making. However, decisions can generate changes and induce costs in terms of planning or works, or affect safety aspects. Thus, decision-makers must be aware of the map interpretation rules, their range of application, and their uncertainties. For these reasons, the IRIP maps must be evaluated.

The scientific issue lies in the fact that, because of the surface runoff phenomenon complexity, there is no database of surface runoff observation or measurement available on a large scale to evaluate the surface runoff maps. So proxy data must be used for the evaluation. Proxy data are data which are not directly related to the physical phenomenon but which inform on the phenomenon occurrence, for example, data of surface runoff impacts. However, difficulties arise when comparing model outputs with proxy data because of the indirect relationship. Some studies used data of surface runoff impacts to evaluate or calibrate hydrologic models. Naulin et al. (2013) and Versini et al. (2010) used impact data on roads to evaluate and calibrate their flash-flood warning model. Defrance et al. (2014) and Javelle et al. (2014) used impact data to evaluate the performance of their flash-flood warnings. The IRIP method has also been evaluated by comparison with impact data on roads (Lagadec et al., 2016b) and on railways (Dehotin et al., 2015b; Lagadec et al., 2016a). During these evaluation tests, good probabilities of detection were obtained but also high false-alarm ratios because numerous areas were identified as susceptible to surface runoff but no impact has been recorded. For these studies, the major issue lies in characterizing the structural vulnerability of the transportation network, a key component when comparing hazards with effective impacts. For the same hazard intensity, the effective impact can be reduced by a low structural vulnerability or aggravated by a high structural vulnerability of the impacted network section. Use of proxy data also brings further uncertainties due to biases in the data exhaustiveness, representativeness, and location inaccuracy. So evaluation tests must go further in order to fully assess the IRIP method performance.

#### 1.4. Objectives

This study has a double objective. The first one is to evaluate the surface runoff susceptibility maps created with the IRIP method by comparison with the results of an expert-based risk analysis performed on a 20-km stretch of railway. The evaluation focuses both on the performance of the IRIP method to detect railway sections exposed to surface runoff and on the relevance of the spatial information provided by the maps compared to the field reality. For this evaluation, the correlation between the IRIP maps and the results of the risk analysis is analyzed, taking into account the structural vulnerability of the railway infrastructure. The second objective is to provide practical solutions for integrating the IRIP method into the current risk analysis process in order to improve the management of surface runoff-related risks. Results of the IRIP method evaluation allow for identifying specific tasks of the risk analysis process to which the IRIP method can make a direct contribution. Moreover, opportunities to improve risk reduction methods are discussed in the light of the new information brought by the IRIP method. The

IRIP method development benefits from an industry-research partnership that makes it possible to go beyond a simple knowledge-to-application transfer, and enables the co-generation of new knowledge and new concepts for the two parts (Hatchuel et al., 2001; Klasing-Chen et al., 2017). Indeed, using data of the railway infrastructure manager allows evaluating the IRIP method and learning about the surface runoff physical phenomenon. Applying the IRIP method in an operational context makes it possible to identify possible new developments of the method to answer operational needs. Moreover, using an innovative mapping method opens up new possibilities for the management of surface runoff-related risks for the infrastructure manager.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Expert-based risk analysis of the Bréauté to Fécamp railway

The Bréauté to Fécamp railway, located in the Normandy region, is line 359000 of the French railway network. The Bréauté to Fécamp railway is 20 km long. It is a single track line, non-electrified with a maximum speed limit of 80 km/h. The railway connects the city of Bréauté, on the Paris-to-Le Havre railway axis, to the port city of Fécamp. The railway was put into operation in 1856. Regarding the hydrological context, the railway intercepts several catchments with a total area of about 55 km<sup>2</sup>, an altitude ranging from 6 to 146 m ASL (Above Sea Level). The area is composed of large plateaus (south and start of the line) and a narrow valley (north and end of the line) (Figure 3). The catchment soil is mainly composed of silt and clay on the plateaus, with colluvial deposit in the valley and the bedrock is composed of chalk and flint stones. There is no perennial river in the catchment but intermittently, during rainfall, small streams can be activated within the main valleys. The land use is dominated by agriculture with rural households and the small city of Fécamp in the north has about 20,000 inhabitants. Due to its age, its location, and a low traffic level, this railway has been suffering from an advanced level of deterioration. To ensure safety aspects, the railway traffic was slowed, from 80 to 60 km/h, then to 40 km/h, and then was stopped. In the context of an Infrastructure and Transport Regional Plan adopted by the Normandy region in 2009, the Bréauté to Fécamp railway has been identified as a substantial means of transportation for regional development. Since then, several analyses have been undertaken to optimize regeneration works.

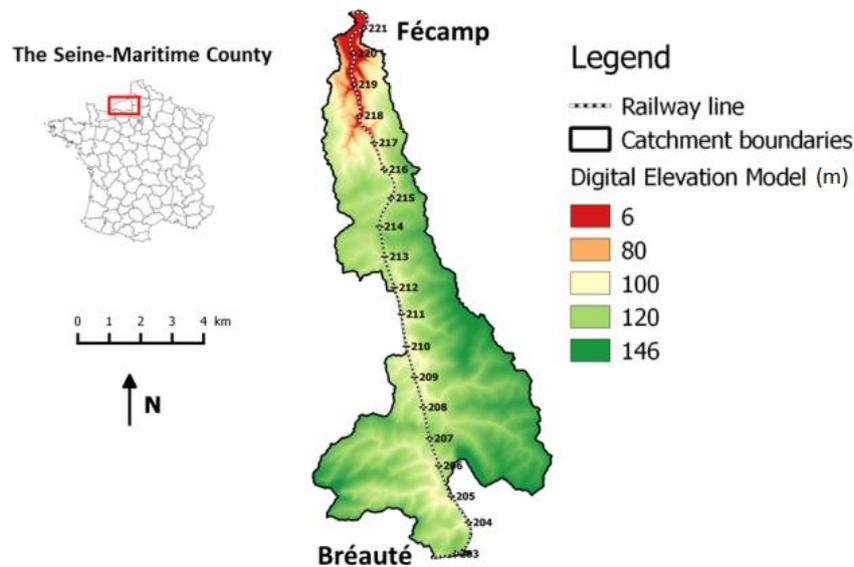


Figure 3: The study area which includes the railway from Bréauté to Fécamp and all the catchments intercepted by the railway

First, a value analysis was ordered by the infrastructure manager, in order to suggest different scenarios to stakeholders. Differences between scenarios lay in the extents of regeneration works and their nature, especially hydraulic works. The strengths and weaknesses of each suggestion were considered in the light of the operation costs and the short-term and long-term residual risks. The works to plan should respect time and budget constraints and should ensure the perennial use of the railway for the coming decades. Then, a risk analysis was carried out. The analysis considered all the infrastructure elements, from the platform, the rails, the ballast, to the earthworks and the hydraulic structures. For this analysis, the whole railway was divided into 61 sections depending on their transversal profile type (embankment, excavation, mixed profile), and each section was studied considering the local infrastructure configuration and its exposure to natural hazards. The result was a risk level from 0 (no risk) to 4 (confirmed risk) attributed for each section and, finally, four railway sections were identified with a risk of stopping train circulation within two years (before the works start) and provisional measures were scheduled before the regeneration works. Then, these analyses formed the basis for a pre-project study aiming at designing drainage structures to be realized or dredged in the context of the regeneration works. With additional field assessment and dimensioning methods, the pre-project study provided localization and technical characteristics for hydraulic structures to be created or regenerated on fourteen sections (including the four previously identified sections). Recommendations for hydraulic works were required by the infrastructure manager to respect certain constraints such as a lack of space for implementing the sufficient drainage structures regarding the estimated flow rates and the mud inflows; time constraints of the work period, which hindered feasibility studies for works outside the railway right-of-way and made it impossible to establish special procedures for water legislation which would have taken too much time;

and budget constraints, which obliged the study to focus only on the drainage structures and not on the hydraulic structure crossing under the railway or other structures such as retention basins. The different analyses performed on the Bréauté-to-Fécamp railway result from different requests with different objectives. However, they are complementary and together provide meaningful information about potential storm runoff coming from the surrounding environment, and a fair source of comparison for the IRIP maps.

## 2.2. The IRIP method

### 2.2.1. Description

The IRIP method is described briefly here, but further information can be found in the literature (Dehotin and Breil, 2011b; Lagadec et al., 2016b). The IRIP method combines indicators from geographic information layers and produces three maps representing three processes of storm runoff (Figure 4, Table 1): generation, representing areas with low infiltration capacity and which are susceptible to generate water at ground surface; transfer, representing areas where surface water can move downward, accelerate, and erode soils; and accumulation, representing areas where surface runoff can concentrate following topography, where it can slow down and generate floods out of rivers and deposits. Each map is created by combining five indicators. Each indicator is classified into two categories: favorable, where 1 is attributed to the pixel, or not favorable, where 0 is attributed. This yields 5 binary maps. The maps are added to create a susceptibility map with 6 levels, from 0 (not susceptible) to 5 (very susceptible). For each of the three susceptibility maps, the 5 indicators are different. The generation map is created thanks to three indicators derived from a soil map, one indicator derived from a land use map, and one derived from the topography. The latter is a combination of the slope and the topographic index (Beven and Kirkby, 1979): 1 if both are favorable, 0 if one is not favorable. The generation map is then considered as an input indicator for the two others maps of transfer and accumulation in order to represent the necessity for the surface water to be generated before being transferred and/or accumulated. Maps of transfer and accumulation are created mainly by associating indicators based on topography, but with opposed favorability conditions, in order to represent the opposed movement of acceleration and slowdown. For example, the slope indicator is favorable for transfer in the case of steep slopes, and for accumulation in the case of low slopes. The break of slope indicator is favorable for transfer in the case of convex break of slopes and for accumulation in the case of concave break of slopes. Topographic indicators are computed for each pixel relatively to the upstream sub-catchment in order to follow the hydrological logic from upstream to downstream. The resolution of the susceptibility maps retains the resolution of the Digital Elevation Model (rasterized topography map) used as input data. To determine the favorability thresholds for topographic indicators, a classification method is used (Rubin, 1967), in order to compute a relative threshold depending on the study area. Thus, the method can be applied on various territories without a priori local knowledge.

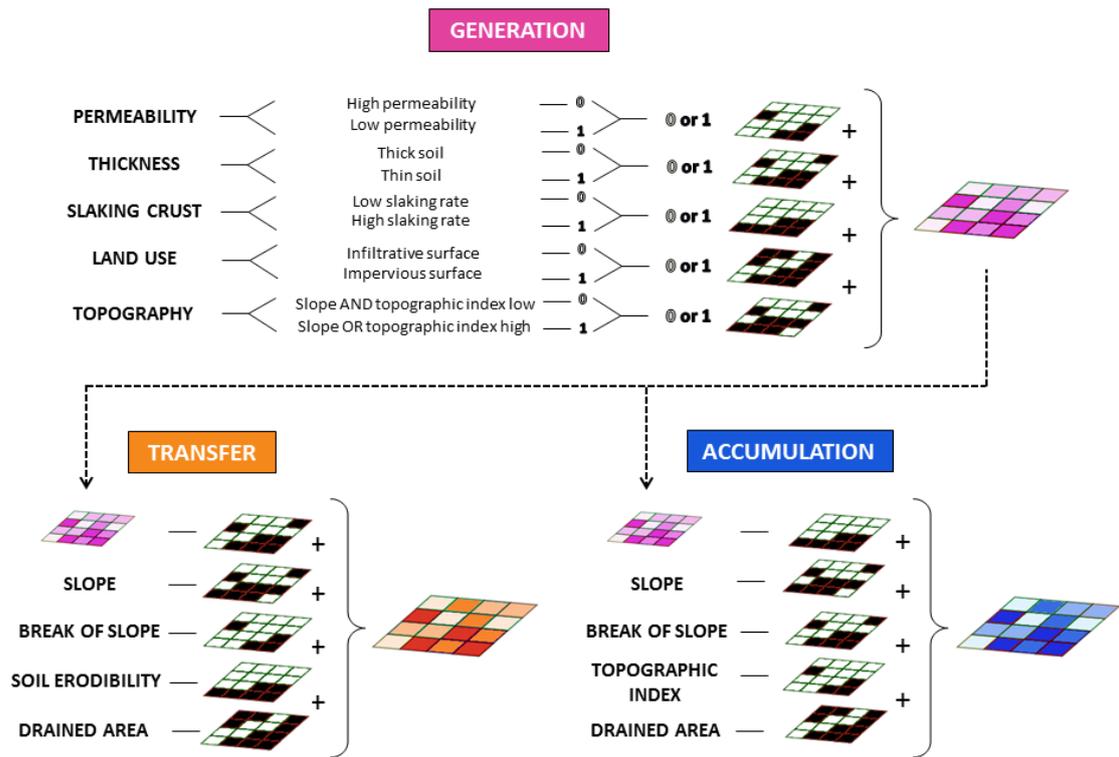


Figure 4: The indicator combination scheme of the IRIP method

Table 1: List of the indicators used in the IRIP method along with their conditions of favorability to surface runoff

IRIP maps	Indicators	Conditional values
Generation	Soil permeability	0: Saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ) $\geq 1e-6$ m/s
		1: $K_s < 1e-6$ m/s
	Soil thickness	0: Thickness $\geq 50$ cm
		1: Thickness $< 50$ cm
	Soil crustability	0: Crustability $< 3$ (Cerdan et al., 2006)
		1: Crustability $\geq 3$
	Topography	0: Slope $\leq 0.5\%$ AND topographic index $\leq$ (mean + standard deviation)
		1: Slope $> 0.5\%$ OR topographic index $>$ (mean + standard deviation)
	Land use	0: Pastures, grasslands, and forests
		1: Urban areas and agricultural lands
Transfer	Upstream generation susceptibility	0: Modal value of the upstream sub-catchment $< 3/5$
		1: Modal value of the upstream sub-catchment $\geq 3/5$
	Slope	0: Slope $\leq 5\%$
		1: Slope $> 5\%$
	Break of slope	0: Concave break of slope
		1: Convex break of slope
Drained area	0: Drained area $\leq$ (mean + standard deviation)	
	1: Drained area $>$ (mean + standard deviation)	
Soil erodibility	0: Erodibility $< 3$	
	1: Erodibility $\geq 3$	
Accumulation	Upstream generation susceptibility	0: Modal value of the upstream sub-catchment $< 3/5$
		1: Modal value of the upstream sub-catchment $\geq 3/5$
	Slope	0: Slope $> 5\%$
		1: Slope $\leq 5\%$
	Break of slope	0: Convex break of slope
		1: Concave break of slope
	Topographic index	0: Topographic index $\leq$ (mean + standard deviation)
		1: Topographic index $>$ (mean + standard deviation)
Drained area	0: Drained area $\leq$ (mean + standard deviation)	
	1: Drained area $>$ (mean + standard deviation)	

### 2.2.2. Input data and parameterization for the study

Input data used for the study area are: a 5m resolution Lidar DEM from IGN (French National Geographic Institute<sup>16</sup>), the European Soil Database at 500 meters resolution created from the LUCAS database (Ballabio et al., 2016), and the regional land use map<sup>17</sup> at a scale of 1/5000 in rural areas and 1/2000 in urban areas. Because high resolution input data were available and previous works had been conducted in the Seine-Maritime County with the IRIP method (Lagadec et al., 2016b), a specific parameterization of

<sup>16</sup> IGN Website : <http://professionnels.ign.fr/>

<sup>17</sup> Website to download the regional land use map and further information about its creation: <http://mos.hautenormandie.fr/>

the method was proposed for this study. Two indicators were adapted along with some favorability thresholds, which are the condition for a pixel to be set at 1 or 0. Concerning the indicators, because of a strong disposition of the soil to slaking crust in this region (Cerdan et al., 2002a), a slaking indicator was used in the generation map, instead of the erodibility indicator. The erodibility indicator was used in the transfer map to highlight the erosion mechanism, which is important in this territory. The erodibility indicator replaces the ground linear axes in the transfer map. The ground linear axis indicator is used in the case of coarse resolution DEM, in order to represent the effect of interception and redirection of surface runoff by roads, agricultural drainage or even railways (1 for presence of a linear axis, otherwise 0). For this study, the use of a Lidar DEM allows the detection of this kind of ground axes, so their effects of interception and redirection are directly taken into account within the topographic indicators.

Concerning the favorability thresholds, they are summarized in Table 1. A soil is considered as having low infiltration capacity for saturated hydraulic conductivity lower than  $10^{-6}$  m/s. A soil is considered as thin, and thus with a low storage capacity, for a thickness lower than 50 cm. The thresholds for soil slaking ability and erodibility are set at 3 with respect to the pedo-transfer rules (Cerdan et al., 2006). These thresholds are set by default in the IRIP method and are based on a literature review in the pedology field (Dehotin and Breil, 2011b, 2011a). For this study, the thresholds that are adjusted for the study area are those for the slope, the topographic index, and the drained area indicators. The threshold of 5% was chosen thanks to discussions with local actors (SMBV Pointe de Caux<sup>18</sup>), who generally observe intense surface runoff on about 5% slopes. A threshold of 0.5% is chosen for the generation map, because below 0.5% the area is considered flat and surface runoff can infiltrate into the soil. The thresholds of topographic index and drained areas are set at the mean plus the standard deviation of the range of values over the study area, instead of using the classification method. The classification method provides good results for coarser resolution DEM, but for this study using a very high resolution DEM modifies the range of values, and the threshold must be more restrictive to display less information and to simplify the interpretation of the maps. Note that the hydraulic structures are not taken into account in the IRIP method, in particular those under the railway that do not appear in the DTM.

### 2.3. Comparison method of the IRIP maps and the risk analysis

The objective of the comparison is to evaluate the performance of the IRIP method to retrieve railway sections exposed to surface runoff. Two types of comparisons are performed: a quantitative comparison over the whole line, using statistical methods; and a qualitative comparison on three railway sections to assess the relevance of the spatial information over the catchment.

#### 2.3.1. Quantitative comparison

---

<sup>18</sup> SMBV Pointe de Caux: Mixed association of the Pointe de Caux Region

In this part, the questions we want to address are: are the highest susceptibility levels of the IRIP maps located on the railway sections selected for regeneration works? In addition, over the whole line, what is the level of correlation and non-correlation between IRIP and the risk analysis? To answer these questions, the railway was divided into 3 types of transversal profile (embankment, excavation, and mixed profile) following the division performed during the risk analysis. For each profile type, the following information was retrieved: its length (in meters), the presence of an aperture under the railway (bridge or hydraulic structure), and whether or not the section was selected for works. Concerning the IRIP information, the following information was computed for each profile type: the number of pixels greater than or equal to 4/5 for the maps of transfer and accumulation that are located within a buffer area of 5 meters both sides of the railway. This 10-meter width of analysis was chosen in order to take into account the track, which is a single track, the sidetracks, and a part of the earthworks. As it is difficult to state from which level of exposure a railway is susceptible to suffer damage, two hypotheses were tested to consider a railway section detected by IRIP as exposed to surface runoff or not: condition no. 1, at least 1 pixel of the transfer or the accumulation map greater than or equal to 4/5 located within the 10-m buffer area; and condition no. 2, at least 10% of the linear of the railway section is covered by pixels transfer or accumulation greater than or equal to 4/5. This ratio was computed by the sum of the pixel numbers of accumulation and transfer, multiplied by 5 (the length of a pixel), divided by the section linear, and multiplied by 100 to get a percentage. This allowed having a rather permissive condition (the first), and a more binding condition (the second).

To analyze the performance of the IRIP method, contingency tables were created and verification indicators were computed. A contingency table is a matrix that represents the interrelation between two variables (Hogan and Mason, 2012; Stanski et al., 1989). For this study, contingency tables were computed between the number of sections that are detected by IRIP or not (lines) and the number of sections that are selected for works or not (columns) (Table 2). The true positives (T+) are sections which are detected by IRIP and selected for regeneration works. The false positives (F+) are sections which are detected by IRIP but not selected for works. The false negatives (F-) are sections which are not detected by IRIP but are selected for works. And the true negatives (T-) are sections which are not detected by IRIP and not selected for works. Table 3 presents the indicators used for evaluating the IRIP method performance. The probability of detection (POD) and the false alarm ratio (FAR) are computed from the contingency tables. The best score is for a greatest POD combined with a lowest FAR. In addition to this, Chi-2 tests are performed for each contingency table in order to assess the statistical significance of the contingency tables. A Chi-2 test allows the assessment of the statistical dependence between the IRIP results and the risk analysis by comparing the headcount of the contingency table to a random headcount. For example, according to the tabulated Chi-2 values, if the computed Chi-2 is above 6.63, it means that the headcount distribution has less than 1% chance to be due to pure luck. Finally, the false negatives and the false positives were explained through a brief assessment of the vulnerability.

Table 2: The theoretical contingency table representing the interrelation between the number of sections detected by IRIP and the number of sections selected for work

		Selected for work	
		Yes	No
Detected by IRIP	Yes	T+	F+
	No	F-	T-

Table 3: Summary of the indicators used to evaluate the IRIP method performance along with their equation and interpretation.

Indicators	Equations	Interpretation
POD	$\frac{(T+)}{(T+) + (F-)}$	Range: 0 – 1 Best score: 1
FAR	$\frac{(F+)}{(F+) + (T+)}$	Range: 0 – 1 Best score: 0
Chi-2	$\sum \frac{(O - E)^2}{E}$ O = Observed headcounts E = Expected headcounts	For 1 degree of freedom: P(X <sub>2</sub> >6.63)=0.01 P(X <sub>2</sub> >7.88)=0.005 P(X <sub>2</sub> >10.83)=0.001

### 2.3.2. Qualitative comparison

For this analysis, the question we want to answer is: do the field observations and the recommendations fit with the spatial information of the IRIP maps of transfer and accumulation? On which map and in which forms is the information from the field retrieved? The relevancy of the IRIP maps is assessed in terms of location of the preferential water flow paths, of areas susceptible to surface water accumulation and susceptible to erosion, and in terms of IRIP susceptibility levels. Schemes from the pre-project study are used to perform the comparisons. For each section selected for works, the schemes represent the recommended measures along with the field observations. The comparison is visual and qualitative because it displays the two maps, IRIP and the diagnosis, of the same area side by side. Photos from the field allow supporting identification of matching areas. Although all sections analyzed in the risk diagnosis were compared to IRIP maps, this paper presents four sections. Two of them illustrate mainly the contribution of the accumulation susceptibility map and the other two illustrate mainly the contribution of the transfer susceptibility map. Finally, some patterns of storm runoff spatial dynamics and railway infrastructure configuration can be identified from this comparison as being a configuration at risk. So interpretation guidelines of the IRIP maps are provided in order to support future risk analysis.

## 3. Results

## 3.1. Quantitative comparison

Table 4: List of the 61 railway sections along with their type of transversal profile, their length, whether or not they have been selected for drainage regeneration works, the number of pixels with susceptibility levels greater than or equal to 4/5 in transfer and in accumulation, the ratio of the number of pixel and the length, whether or not the section has been detected by IRIP according to 2 conditions and whether or not there is an aperture under the railway.

No.	Type	Linear (m)	Selected for works	$\Sigma$ Acc 4&5	$\Sigma$ Trans 4&5	Ratio IRIP/linear (%)	Detected by IRIP Condition 1	Detected by IRIP Condition 2	Aperture under the railway
1	Emb	230	no	0	0	0	no	no	no
2	Emb	225	no	3	8	24	yes	yes	yes
3	Exc	1020	yes	70	0	34	yes	yes	no
4	Emb	30	no	1	0	17	yes	yes	yes
5	Exc	290	no	22	0	38	yes	yes	no
6	Emb	520	no	0	0	0	no	no	no
7	Exc	340	yes	29	0	43	yes	yes	no
8	Emb	470	no	0	0	0	no	no	no
9	Exc	1010	yes	129	0	64	yes	yes	no
10	Emb	520	no	1	1	2	yes	no	yes
11	Exc	1250	yes	91	1	37	yes	yes	no
12	Emb	650	no	2	2	3	yes	no	yes
13	Exc	200	no	0	0	0	no	no	no
14	Emb	250	no	1	2	6	yes	no	yes
15	Exc	100	no	0	0	0	no	no	no
16	Emb	50	no	2	0	20	yes	yes	yes
17	Exc	440	no	24	0	27	yes	yes	no
18	Emb	250	no	0	2	4	yes	no	yes
19	Exc	250	no	5	0	10	yes	yes	no
20	Emb	460	no	0	1	1	yes	no	yes
21	Exc	300	no	11	0	18	yes	yes	no
22	Emb	200	no	1	1	5	yes	no	yes
23	Exc	500	yes	28	0	28	yes	yes	no
24	Emb	570	no	0	0	0	no	no	no
25	Exc	500	no	25	0	25	yes	yes	no
26	Emb	150	no	0	0	0	no	no	no
27	Exc	300	no	4	0	7	yes	no	no
28	Emb	330	no	2	2	6	yes	no	yes
29	Exc	1200	yes	130	0	54	yes	yes	no
30	Emb	200	yes	32	2	85	yes	yes	no
31	Exc	200	yes	26	1	68	yes	yes	no
32	Emb	150	no	0	0	0	no	no	no
33	Exc	550	yes	54	24	71	yes	yes	no
34	Emb	100	no	1	1	10	yes	yes	yes
35	Exc	830	yes	46	0	28	yes	yes	no
36	MP	330	yes	3	38	62	yes	yes	no
37	Emb	120	no	2	1	13	yes	yes	yes
38	MP	260	no	0	0	0	no	no	no
39	Emb	110	no	0	0	0	no	no	no
40	Exc	410	yes	1	17	22	yes	yes	no

41	Emb	150	no	0	0	0	no	no	no
42	Exc	160	no	28	23	159	yes	yes	yes
43	Emb	110	no	1	2	14	yes	yes	yes
44	Exc	250	yes	0	4	8	yes	no	no
45	Emb	270	no	0	5	9	yes	no	no
46	MP	230	no	0	14	30	yes	yes	no
47	Emb	100	no	2	2	20	yes	yes	yes
48	MP	80	no	0	0	0	no	no	no
49	Emb	110	no	2	1	14	yes	yes	yes
50	Exc	190	yes	0	1	3	yes	no	no
51	Emb	70	no	2	1	21	yes	yes	yes
52	Exc	200	no	0	3	8	yes	no	no
53	Emb	150	no	2	2	13	yes	yes	yes
54	MP	100	no	0	0	0	no	no	no
55	Emb	90	no	2	0	11	yes	yes	yes
56	Exc	400	yes	24	0	30	yes	yes	no
57	Emb	60	yes	1	2	25	yes	yes	yes
58	Exc	1100	yes	16	21	17	yes	yes	no
59	Emb	150	no	0	0	0	no	no	no
60	Exc	320	no	1	0	2	yes	no	no
61	Emb	130	no	11	0	42	yes	yes	no

For this comparison, the railway is divided into 61 sections which represent the different profile types: embankment, excavation, and mixed profile. Sections range from 30 to 1250 m, with a mean length of about 350 m. Table 4 presents the information for each section related to the risk analysis and related to the IRIP maps. The number of sections per type of correlation (T+, F+, F- and T-) is counted from this table. They are summarized in Table 5. The first column of Table 5 presents the correlations between the column “detected by IRIP condition 1” and the column “selected for works” of Table 4. The second column presents the correlations between “detected by IRIP condition 2” and “selected for works”. Then POD, FAR, and Chi-2 are computed for each column. For condition no. 1, the less binding, a score of 100% of POD is obtained, which means that all the sections detected by the IRIP method are indeed selected for drainage works. This POD is promising but must be analyzed with the associated FAR, which is here 65%. This means that 65% of all the sections detected by IRIP are not selected for works. Considering condition no. 2, which means a ratio IRIP/linear greater than or equal to 10, POD remains rather high at 88%, but FAR decreases to 56%. For both conditions, the Chi-2 test states that these headcounts are significant with probabilities of being due to chance of 1% and 0.01% respectively. To continue analyzing the IRIP method performance, the FAR percentages, which are sections with a false positive correlation, are further investigated.

Table 5: Number of sections among the 61 for each type of correlation along with the POD, FAR, and Chi2, for the 2 conditions for a section being detected by the IRIP method and considering the infrastructure configuration or not.

	Without considering railway configuration		Considering railway configuration	
	Condition no. 1	Condition no. 2	Condition no. 1	Condition no. 2
T+	17	15	35	33
F+	30	19	12	8
F-	0	2	0	2
T-	14	25	14	18
POD	1	0.88	1	0.94
FAR	0.65	0.56	0.26	0.2
Chi-2	7.02	10.09	24.46	27.31

Among all the 61 railway sections, not only sections selected for works are exposed to surface runoff. Indeed, there were important constraints during the risk analysis in terms of budget and time. So the risk analysis only focused on drainage regeneration works. However, the other hydraulic structures such as hydraulic structures crossing under the railway or retention basins were not considered for works. Certain sections in Table 4 are exposed to surface runoff according to the IRIP method, but their transversal profile is an embankment equipped with an aperture under the railway (for example, sections no. 2, 12 or 28). For these sections, it can be considered that risks related to surface runoff are managed through the aperture and that these sections are not vulnerable. Moreover, it can be considered that if there is an aperture under the railway, this is due to the necessity to allow surface runoff to flow down, and that the exposure to surface runoff is effective. Sections with this type of configuration, embankment and aperture, can thus be converted from false positive to true positive. New correlations are computed and are presented in the two last columns of Table 5 along with their POD, FAR, and Chi-2. The result is a decrease of the FAR, from 65 to 26% for condition no. 1, and from 56 to 20% for condition no. 2. It is also interesting to notice a very high POD of 94% for condition no. 2, which is the most binding one. The Chi-2 tests state that these results are statistically very significant (24.46 and 27.31). Explanations for the false negatives and the remaining false positive are provided below.

### 3.1.1. False negatives and false positives analysis

First, we will focus on false negatives, which are sections no. 44 and 50 (Figure 5). Section no. 44 is a deep excavation up to 15 meters high with woody vegetation. This earthwork is considered to be fragile and is subject to particular attention since an important landslide occurred on the left side. During a field visit, water stagnation was observed on the tracks, and the current draining ditches were clogged by mud. These explanations actually fit with the IRIP map. Transfer susceptibility levels of 4/5 are located all over the left side of the excavation, where the landslide occurred, and accumulation susceptibility levels of 3/5

are located on the tracks where water stagnation was observed. The other example, section no. 50, is an excavation up to 3 meters high and with an upstream surrounding of wood and grassland. This section was selected because a few shallow landslides have occurred on the left side. The risk analysis state that the landslides could have been influenced by rabbit holes. This can indeed aggravate consequences when surface runoff occurs but also can induce landslide by itself. It has been decided to create open ditches to help evacuate water. This earthwork has a transfer susceptibility level of 4/5 computed by the IRIP method. These examples show that, in some cases, high susceptibility levels of transfer must be taken into account not only when they are directly located on the tracks but also when they are on the earthwork sides. Moreover, in the case of section no. 44, accumulation susceptibility levels of 3 could also be considered for water stagnation issues. These two cases fit globally with the IRIP maps, but do not satisfy any of the two conditions stated for a railway section being considered as exposed to surface runoff according to the IRIP method. These cases illustrate how the IRIP pixel configuration along with their susceptibility levels could indicate an exposition to different types of surface runoff impacts (landslide, water stagnation, mudflow, flood...). For example, the quantity of stagnant water could be verified in the field to propose an eventual relationship with the IRIP susceptibility levels. Further tests should be performed to go further with this suggestion.

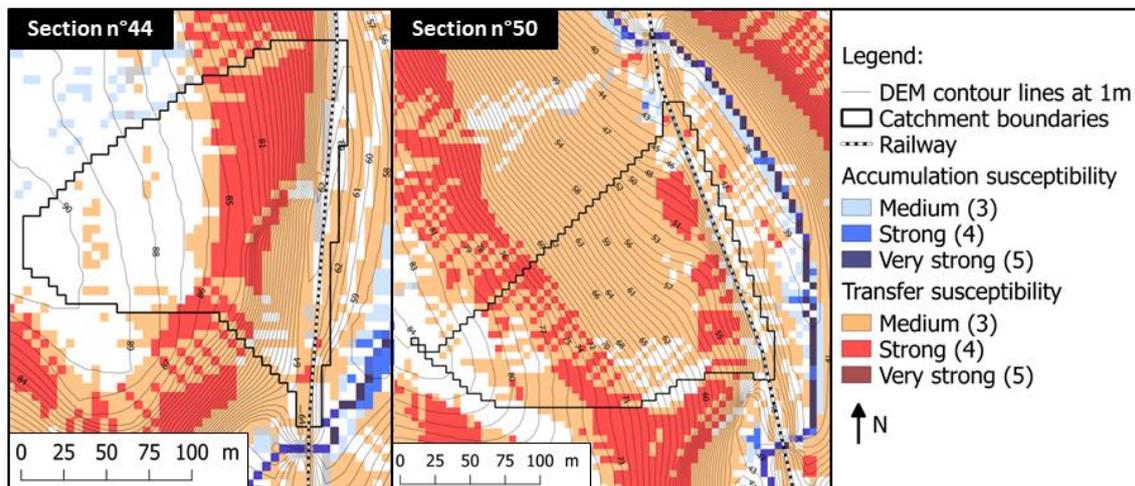


Figure 5: The two false negatives correlations, where the conditions to consider a railway section as exposed to surface runoff, according to IRIP, are not satisfied but where regeneration works have been recommended.

False positives represent 12 sections with condition no. 1 and 8 sections with condition no. 2. These false positives mean that the IRIP method detects an exposure of the railway to surface runoff but that no regeneration works were undertaken. Among the 8 remaining false positives with condition no. 2, two of these sections (no. 17 and 61) are train stations and they present low vulnerability according to the risk analysis. They have large areas able to store eventual water stagnation and are protected by large

ditches. Sections no. 5, 19, and 21 actually present very small catchment areas, of 8700, 5400 and 4900 m<sup>2</sup> respectively, and according to the risk analysis railway tracksides would be large enough to store and evacuate the quantity of water that could be generated by these small catchments. Section no. 42 presents a very high degree of exposure to surface runoff according to the IRIP method, but it has not been considered for works. This section has actually already been subject to particular modifications because of flooding problems. These modifications were undertaken in partnership with local regional organizations and the section has been equipped with a large aperture under the railway and a retention basin. So it can be considered that the section is effectively exposed to surface runoff but that it is sufficiently protected and thus less vulnerable. Section no. 25 was considered as less susceptible to landslide during the first risk analysis, with observed traces of past shallow landslides maybe due to rabbit holes, but this section was been retained for further analysis during the pre-project study and thus was not selected for regeneration works. Finally, section no. 46 presents high susceptibility levels of surface runoff transfer according to IRIP but the risk analysis does not mention particular exposure to surface runoff. It would be interesting to get more details thanks to a deeper field analysis.

This quantitative comparison between the IRIP maps and the risk analysis makes it possible to show the global performance of the IRIP method to detect railway sections exposed to surface runoff. Results are promising but show there is a need to focus on specific sections to better understand the meaning of IRIP detection (or not) in view of local configuration, and to improve the correlation between runoff hazard assessment and selection by experts of sections at risk. The analysis must be pursued with a qualitative comparison at the catchment scale in order to better assess the contribution of the IRIP maps to understanding the environment surrounding the railway.

3.2. Qualitative comparison

3.2.1. Section no. 9

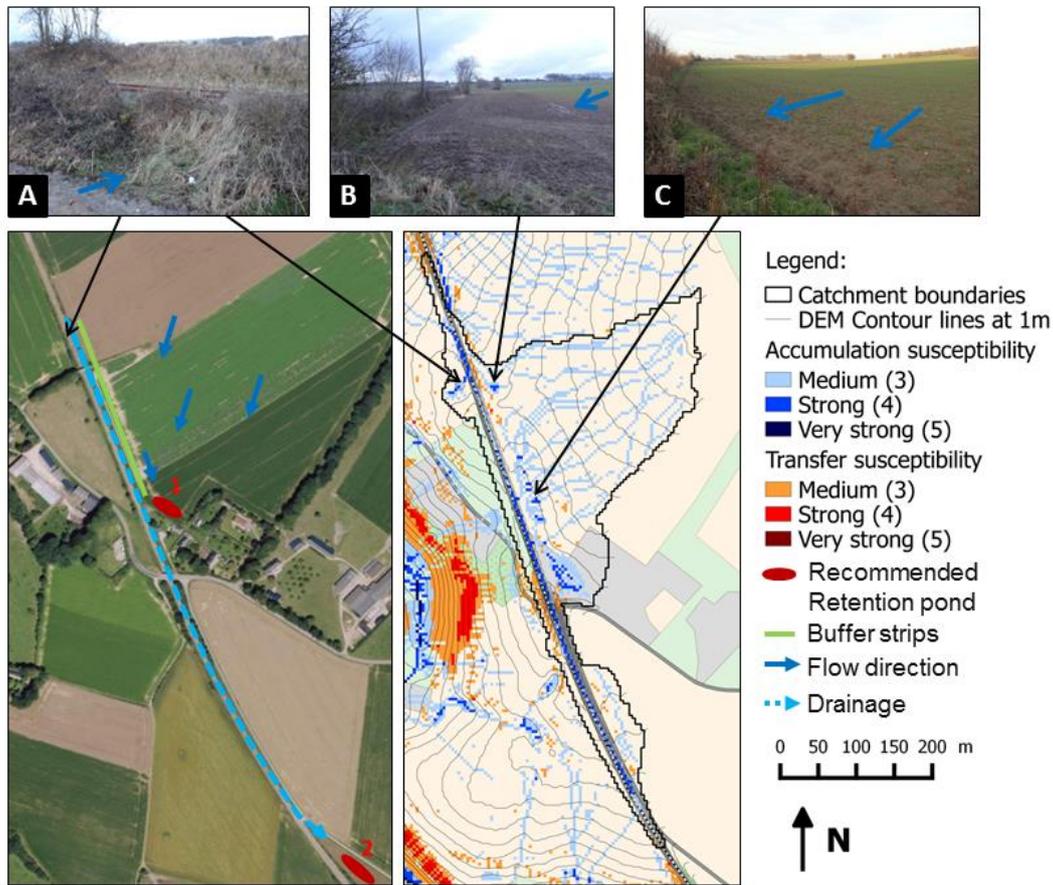


Figure 6: Comparison of the IRIP susceptibility maps of surface runoff transfer of accumulation with the analysis of the pre-project study for section no. 9.

Figure 6 presents a 940 linear meter-long railway section, established in an excavation. The map on the left-hand side shows the measures recommended by the pre-project study. The dashed blue line represents the section which needs work, the dark blue arrows represents the directions of the preferential surface runoff paths observed in the field. The green line represents the location for the installation of a buffer strip, made with grass or hedges, to slow down surface runoff and to stop mud accumulating on the tracks. The two red spots show two solutions for installing a retention pond. The first location should retain surface runoff before reaching the tracks. The second location should receive surface runoff after having been drained along the track sides in order to avoid problems downstream. The map on the right-hand side shows the three highest levels of storm runoff transfer and accumulation susceptibility. The black line represents the catchment boundaries, that is, the area from which the railway section can potentially receive water from precipitation. First, the IRIP map shows a high susceptibility to storm runoff accumulation on the tracks, with the dark blue pixels, which is consistent

with the choice of the section selected for works. High accumulation susceptibility can also be retrieved at the edge of the excavation which is consistent with the recommendation of installing a buffer strip and with the photos from the field, which show signs of moisture and mud deposits (photos B and C). One can also see a wider area of storm runoff accumulation at the location of the first solution for the retention pond, which let us state that it could be a better solution for protecting infrastructure than no. 2, which was designed for improving the situation downstream of the railway. The directions of the preferential paths for surface water identified on the field are retrieved on the IRIP maps with levels of accumulation of 3 and with far more details. Moreover, in the northern part of the section, on the left-hand side of the railway, a very small catchment is detected (photo A) with a high susceptibility to storm runoff accumulation. This susceptibility is confirmed by the photo A and by the aerial photography which show mud deposits. At this point, the railway is established in a small embankment and is not equipped with any hydraulic system which makes the railway vulnerable to storm runoff. This point can be considered as at risk although the catchment is so small that significant water inflow is unlikely. Finally, the IRIP maps agree with the assessment results and provide more information in the environment upstream of the railway.

3.2.2. Section no. 33

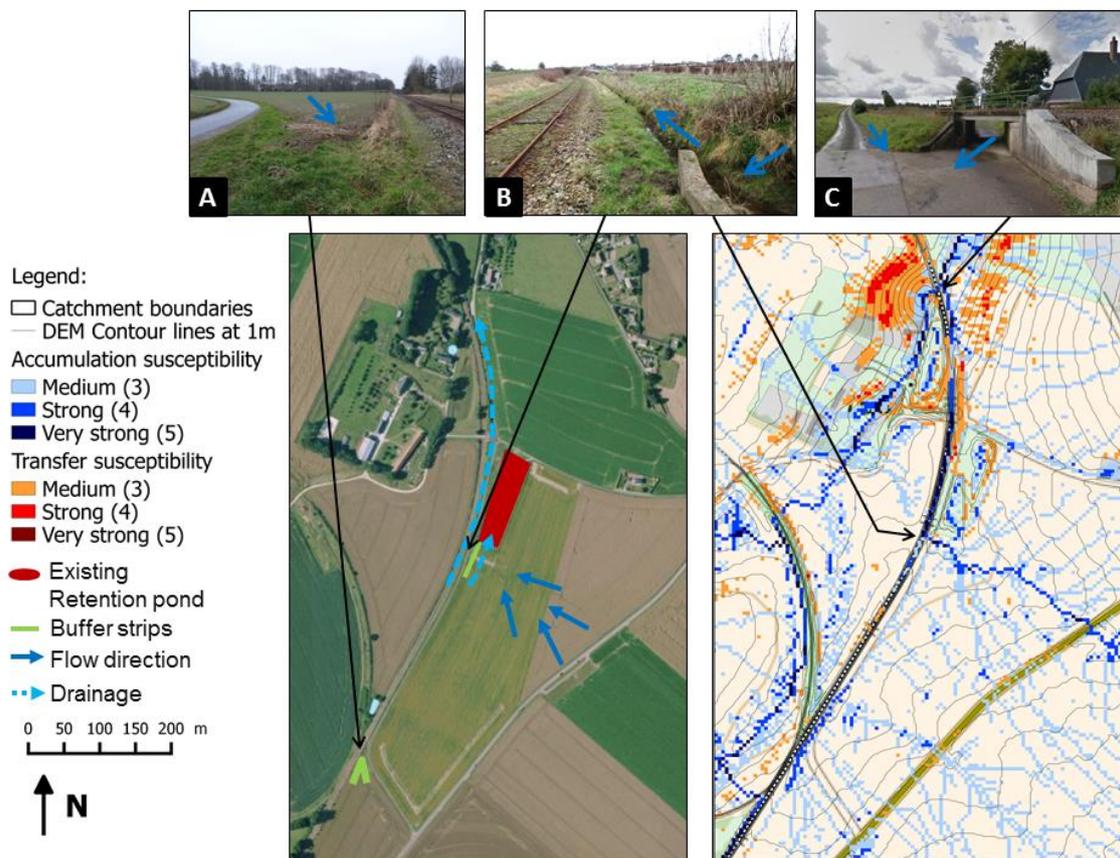


Figure 7: Comparison of the IRIP susceptibility maps of surface runoff transfer of accumulation with the analysis of the pre-project study for section no. 33.

Figure 7 presents another railway section of about 800 linear meters. The section is established at ground level in the southern part, in an excavation in the middle part, and on an embankment in the northern part. On the left-hand side map, two recommendations for installing buffer strips are indicated with the green lines and the red square indicates an already existing retention pond. On the right-hand side map, a main path of storm runoff arriving on the railway from the right hand side is detected by the IRIP map of accumulation susceptibility with levels of 4 and 5, a part is flowing in the retention pond and another part is flowing in the drainage system along the railway (photo B) which is consistent with the flow direction observed on the field and the selected section for regeneration works. Regarding the significant size of the catchment intercepted by the railway (about 1.2 km<sup>2</sup>, too large to be displayed but computed on the map), the drainage system capacity might not be sufficient considering the potential storm runoff inflow. The regeneration works only consider drainage works explaining why no solution for installing a hydraulic structure crossing the railway has been proposed. However, building a crossing structure at the intersection with the main surface runoff path could be interesting. According to the IRIP maps, the natural surface runoff path is not to be intercepted by the railway and redirected toward the northern direction, but is to continue on the other side of the railway and to connect with the important water flow path downstream, indicated with high accumulation susceptibility levels. The question can be asked whether the railway infrastructure manager is responsible for the management of the entire volume of surface runoff coming from the upstream catchment or if it is responsible only for ensuring its natural flow from upstream to downstream. Here, a risk of drainage ditches overflowing can be expected. Such an incident could generate floods on tracks, erosion of the railway platform and erosion of the embankment at the exit of the longitudinal drainage, near the higher levels of storm runoff transfer (photo C). At another location, on the southern part of the section, an important surface water flow path is detected by the IRIP map: it corresponds to the recommendation for a buffer strip (photo A) but no particular flow direction has been indicated. Particular attention should be paid at this location which is exposed to surface runoff inflows. The IRIP maps reveal the storm runoff spatial organization in the surroundings of the railway. Such information can considerably support hydraulic experts in designing solutions to protect the railway from storm water inflows.

3.2.3. Section no. 35

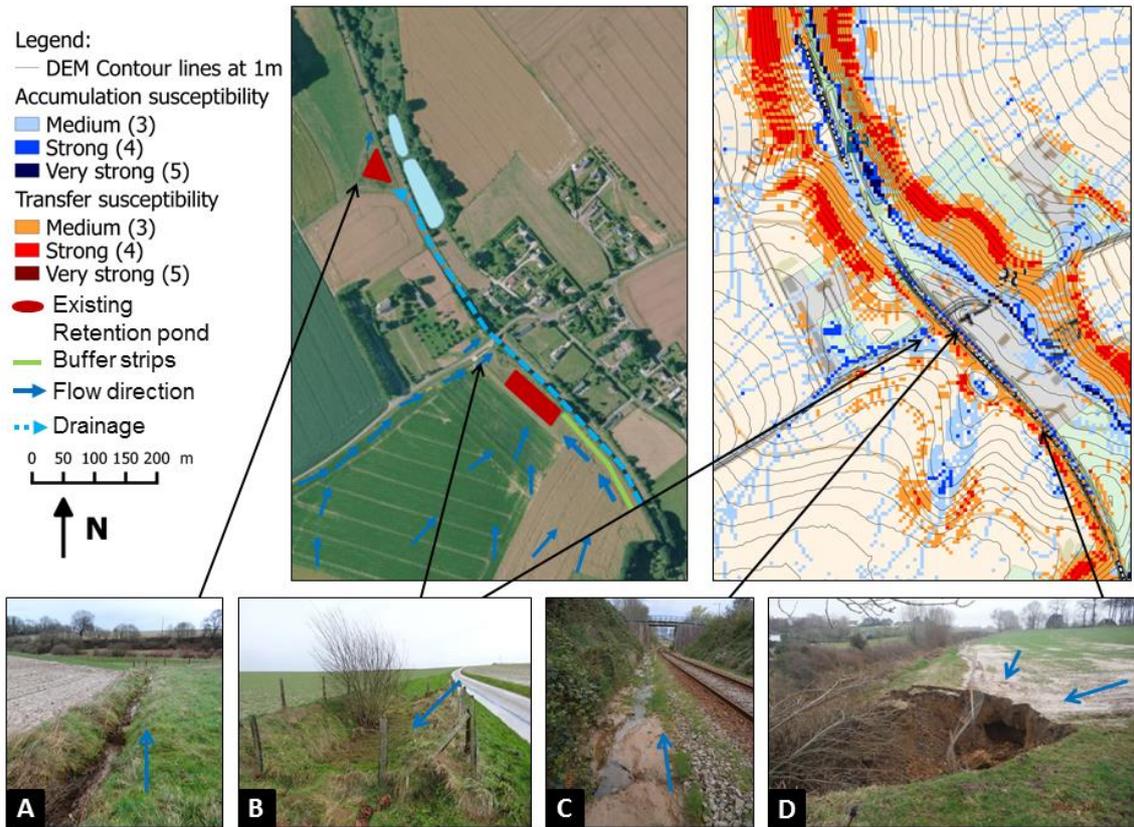


Figure 8: Comparison of the IRIP susceptibility maps of surface runoff transfer of accumulation with the analysis of the pre-project study for section no. 35.

Figure 8 represents the third railway section. It is 1150 linear meters long and is established in an excavation. The catchment intercepted by this section is located in the left-hand side, with several storm runoff flow paths arriving perpendicularly to the railway. The important flow path, on the right-hand side, flows northward laterally to the railway but downstream. Anyway, the small town on the aerial photography and the downstream cities are frequently impacted by pluvial flooding. That is why two large retention ponds (light blue patches) can be seen on the northern part – they have been built by the agglomeration. Concerning the railway, the IRIP map presents strong accumulation susceptibility levels all along the section, meaning a high risk of track flooding (illustrated on photo C). Within the catchment, the flow directions indicated on the IRIP map agree with those observed in the field. Two already existing retention ponds belonging to the railway company protect the railway from storm runoff inflows. A small retention area has been set up to limit water coming from the road (photo B). However, on photo D, there were no protective structures and a landslide of the excavation occurred. This incident was due to a water stagnation area at the edge of the embankment (mud deposits can be seen on the photo), which weakened the embankment, and a storm runoff inflow (small flow path upstream) on an area susceptible

to runoff acceleration (orange and red pixels), which generated a landslide on the embankment slope. The deposit of materials on the tracks is a major risk of collision for a train, leading to a derailment risk. This location is recommended for installing a buffer strip which reflects this particular sensitivity. Along this section, this is the only location where the IRIP map indicates alternating patterns of high susceptibility to accumulation and transfer in the direct surrounding of the railway and where there is no protection. The other areas with high transfer susceptibility are farther away from the railway, or not directly linked with an important flow path. Finally, on this Figure, a great deal of information is provided by the IRIP map, and an assessment of the local railway configuration is essential to identify locations at risk.

### 3.3. IRIP maps interpretation guidelines

The comparison between the risk analysis and the IRIP maps shows a good agreement of areas exposed to surface runoff and areas with recommended works inside and outside the railway right-of-way. This allows the extrapolation of some patterns of surface runoff spatial connectivity with the railway infrastructure. Here are four examples of configurations of hazards and vulnerability which lead to considering a section as being at risk. First, high accumulation levels located on rail tracks could mean a risk of flooding if the railway is established in an excavation. Secondly, high accumulation levels at the ridge of an excavation are a sign for potential surface water stagnation and could generate a risk of a landslide of the excavation slope by material saturation of water. Thirdly, high transfer susceptibility levels on the slope of an excavation could indicate a risk of landslide if the transfer area is related to a surface water flow path indicated in the accumulation map. Fourth, a surface water preferential path crossing a railway embankment transversally is a risk for embankment backfilling and destruction, so at those locations experts must ensure that an aperture exists within the embankment (for example a rail bridge as illustrated in Figure 7, photo C).

### 3.4. Summary and limits of the comparison

This study presents two degrees of evaluation of the IRIP method: a statistical analysis and a spatial analysis. The spatial analysis shows the agreement between the IRIP spatial information and the field observations. The statistical analysis shows that the IRIP method is an efficient tool to detect railway sections exposed to surface runoff for relatively long linear distances. For the quantitative analysis, two conditions have been tested for considering a section as exposed to surface runoff or not, one permissive condition and one more binding. Moreover, we attempted to take the structural vulnerability of the railway into account, considering that embankments with apertures under the railway are configurations with low vulnerability. Considering that apertures are indicators of surface runoff occurrence, these configurations are changed from false positives to true positives. Finally, it makes POD varying from 94 to 100% and FAR from 20 to 26%, along with extremely significant Chi-2. However, we must recall some

hypotheses that were made for this study and which must be taken into account in the interpretation of the results.

For this study, certain indicators and thresholds were adapted regarding the IRIP default parameterization, such as erodibility, slaking crust ability or the thresholds of slopes and topographic indexes. These changes are justified by a good knowledge of the local environment behavior acquired during past studies and discussions with local actors. However, the past evaluations of the IRIP method and the hypotheses which have been derived from it, such as transfer linked to erosion or the susceptibility levels to take into consideration for anticipating impacts, could be not applicable anymore or not applicable in the same way. So additional tests must be performed to confirm the choices made for this study, or to find another parameterization which could better fit the comparison data, or else to analyze a possible change for other hydrological contexts. Concerning the repeatability of the results, input data are critical points. Indeed, good quality and high resolution data are important, but not available for all territories. Among the three input data required for the IRIP method, deciding which one is the most important in terms of quality depends on the objective of the study. For example, for territory planning or certain technical implementations regarding mitigation, the generation map will be relevant in order to know the poor infiltration capacity areas. Thus, quality of soil and land use data would be the most important. In the objective impact analysis, the maps of transfer and accumulation would be the most relevant, so quality of the topographical data is the most important. Indeed, three indicators out of five are computed from topography for the map of transfer and four out of five for the map of accumulation. Figure 9 provides elements for discussing the required resolution of the topography. It shows two IRIP maps of the same part of the study area created with a 30-meter resolution DEM (left) and with a 5-meter resolution DEM (right). The map with the 30-meter resolution shows the mains surface runoff preferential paths (blue), which are the main talwegs along with transfer areas (orange), which are located mainly on the steepest talweg sides. The map with the 5-meter resolution is the one used for the current study and shows so many details that it is difficult to distinguish them at this scale. Further details can be observed on the hillslopes with the accumulation map, and information about surface runoff transfer susceptibility is more localized. Finally, the spatial information of the two maps overlaps globally, but provides different types of information that should be used regarding the objective of the analysis. For example, an IRIP map with a high resolution can be used for a risk analysis, and a coarser resolution IRIP map could be used for very long linears (above about 100 km of railway) with very large catchments, or to have a global understanding of the environment behavior. In general terms, the input data resolution should not be larger than the resolution of the physical phenomenon.

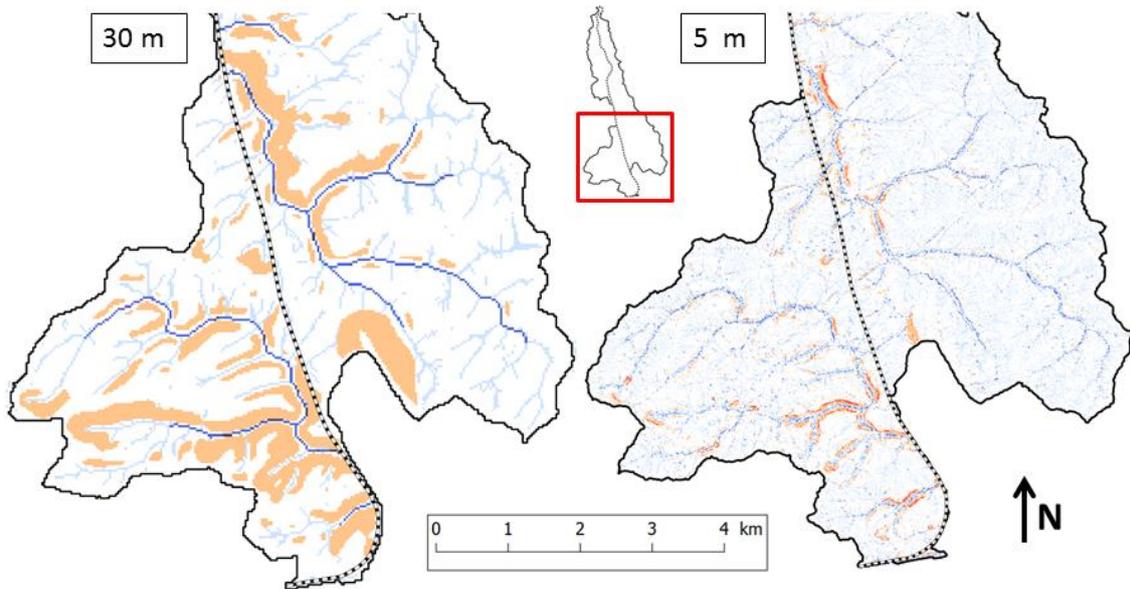


Figure 9: Surface runoff susceptibility maps created with the IRIP method on the same area using two different resolutions of digital elevation model: 30 meters (left) and 5 meters (right). Although the two maps overlap globally, different information can be obtained using different input data.

This study demonstrates the satisfying performance and the relevance of the IRIP method to perform risk analysis. The IRIP maps can make a substantial contribution to identifying railway sections exposed to surface runoff and to better understanding the surrounding environment of the railway.

#### 4. Discussion

The previous part presents interesting results about the correspondence between the surface runoff maps created with the IRIP method and the results of the risk analysis, both with the quantitative and the qualitative comparison. The IRIP method can thus contribute to performing risk analysis. Here, we discuss how the IRIP method can practically contribute to the current method for risk analysis. Firstly, the current risk analysis process is described, then steps are identified where the IRIP method can directly contribute and where the information brought by the IRIP method is an opportunity to enhance the current method.

##### 4.1. The current risk analysis process

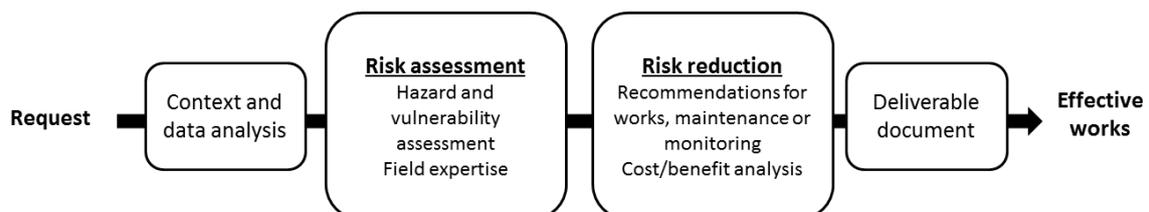


Figure 10: General scheme of the risk analysis process of risks induced by surface runoff on the railway infrastructure

Risk analyses are performed on railway sections or on railway network parts and aim at optimizing the maintenance strategy in terms of works, maintenance, and monitoring regarding specific risks. Figure 10 presents the general risk analysis process. It starts with a risk analysis request from the infrastructure manager to the engineering services. Experts then collect and gather all information about the study area. Information can be contextual about the current request, the stakeholders, and the final objectives. It can be about the infrastructure configuration and its elements, and it can be about past studies or past disorders on the study area, within the railway right-of-way and within the surrounding environment. Then it follows two main steps, the risk assessment and the risk reduction. The risk assessment step aims at assessing the hazard to which the railway is exposed, its intensity, and its probability of occurrence. It also aims at assessing the infrastructure structural vulnerability, in order to define railway sections at risk. Field assessments and discussions with local actors help the experts with the hazard and vulnerability assessment. Risk ranking can be made along the study area in order to prioritize sections at risk. Then the risk reduction step aims at making recommendations in terms of works, maintenance, and monitoring, providing technical solutions and also hierarchizing actions. For this step, compromises are found between costs, efficiency, and feasibility. Discussions with the infrastructure manager also allow analyzing the risk acceptability and the conditions of this acceptability. Finally, a deliverable document is provided to the infrastructure manager and effective works can start. This process remains general and each risk analysis has specific objectives and constraints that must be taken into account for each step of the process. Examples of contributions of the IRIP method are suggested for each step.

#### 4.2. Contribution to context and data analysis

At the start of a risk analysis, experts must dedicate time to gathering data about the study area. Implicitly, a wealth of knowledge is provided by local actors and company employees that are used to working on the study area and that know areas susceptible to specific risks. Difficulties lie in the fact that soft knowledge remains subjective and that can be lost or modified with long periods of time. Knowledge can also be lost when employees move or retire. Concerning more conventional data, archive data are generally difficult to use (Saint-Marc et al., 2016). Storage locations can be difficult to access, storage conditions are often not perennial, and the information is difficult to extract regarding the quantity of documents. Using numerical databases can also be difficult due to the large number of available databases, which have different operational objectives and which focus on different elements of the infrastructure. Regarding the quantity of data, information is often difficult to process. So information about a study area can be difficult to gather and especially when analyzing the surface runoff hazard, since there is no hazard mapping available on the railway network scale. For this step, the IRIP method can provide a reference map of surface runoff susceptibility along railways. The IRIP maps can be used as the basis when starting an assessment, to better assess the behavior of the environment surrounding the railway. Moreover, the IRIP method uses GIS (Geographical Information System) software, so the IRIP maps can be combined with all other information available on the study area (railway infrastructure,

impact locations, surrounding structures) and information can be displayed on the same map. Although additional assessment is needed to interpret the data, gathering the data in a single visual tool can facilitate its processing (Saint-Marc et al., 2014). Further dialog between experts and project sponsors would also be useful in this step. Once the area characteristics have been analyzed, the needs can be detailed and objectives can be refined.

#### 4.3. Contribution to risk assessment

This study shows that the surface runoff susceptibility maps created with the IRIP method can bring valuable information for hazard assessment. The IRIP method can bring direct contribution in terms of accuracy and time saving. The IRIP method brings accuracy on the qualification of surface runoff-related risks. Indeed, the three maps of generation, transfer, and accumulation bring information on the forms that surface runoff can get. Erosion or landslide can be expected for high transfer susceptibility areas. Floods or mud deposits can be expected for high accumulation susceptibility areas. Further assessment about the vulnerability of the railway infrastructure makes it possible to anticipate particular types of impact. More generally, the IRIP method is an additional tool to support decision-making. Experts can rely on the maps to confirm their analysis or to explain it. Moreover, the IRIP method can save time for the field assessment. The maps can help with the preparation of the field works and by supporting field observations. Indeed, the IRIP maps can help deciding which sites to visit by prioritizing the sites with the highest susceptibility levels. Moreover, the IRIP maps are a simple combination of landscape factors, so they help the expert to interpret landscape features such as the catchment boundaries, the surface water preferential path, areas with low infiltration capacities, etc. Moreover, the three maps of storm runoff generation, transfer, and accumulation can orient the expert on the field by knowing what is expected to be seen and where. For example, areas susceptible to storm runoff transfer will present erosion traces and areas susceptible to storm runoff accumulation will present humidity, water stagnation or sediment mud deposits. More and more, experts have access to digital tools during their field assessments, so they can carry tools with GIS software which collate all the information about the study area. A potential evolution of the IRIP method could be the automatic detection of accumulation and transfer patterns near particular railway configurations, as identified in the map interpretation guidelines.

#### 4.4. Contribution to risk reduction

Recommendations of solutions in terms of works, maintenance or monitoring can sometimes require creativity in order to optimize the effects, minimize costs, and provide sustainable solutions. In some cases, for surface runoff issues, standard hydraulic structures and drainage systems are not sufficient, since surface runoff not only carries water but also mud and debris that can clog structures and significantly reduce their capacity. Moreover, in some areas, surface runoff impacts are rather new because they are induced by changes in the upstream environment (i.e. urbanization, forest turning into cultivated land). In some cases, there is no space available for adapting the railway with new structures. It

is also worth considering who is responsible for the management of this new influx of pluvial water. These cases illustrate the fact that it is sometimes necessary to manage water issues outside the railway right-of-way, at the origin of the problem. These are not usual methods because it is complex to communicate with the other stakeholders. They can have the same surface runoff issues but not the same constraints and it can be difficult to work outside the railway right-of-way from a legal point of view. The current processes will have to evolve in this direction. The IRIP maps provide information about the spatial catchment characteristics and thus surface runoff mitigation techniques can be adapted depending on the area. For high generation susceptibility areas, it is important to help water infiltration, with retention ponds, for example, so generated surface water does not flow downstream and impact possibilities are reduced. For areas with high transfer susceptibility, it can be suggested to plant vegetation in order to stabilize earth and limit soil loss. For areas with high accumulation susceptibility, it can be suggested to implement wetlands (Fressignac et al., 2016) and to minimize vulnerability.

Moreover, the IRIP maps, being visual tools, can facilitate the communication between the project stakeholders. When convincing others about the importance of a recommendation, presenting model outputs which support this analysis and the conclusions can be helpful. There is a need for educational tools to support discussions with local actors and with project sponsors who are often not accustomed to implementing alternative techniques outside the railway right-of-way. The expert must be able to explain the behavior of the catchment and the contribution of the different areas to prove the necessity of implementing such solutions for managing storm runoff-related risks.

## 5. Conclusion

This study presents interesting results when comparing the surface runoff maps created with the IRIP method and the result of a risk analysis. The quantitative comparison shows high probabilities of detection along with low false alarm ratios. The qualitative comparison shows good correspondence between the IRIP maps and the field observations. This indicates a good performance and high level of reliability of the IRIP method to detect railway sections exposed to surface runoff. These results suggest that the IRIP method could help performing risk analysis. The discussion part shows that the IRIP method can make a direct contribution to numerous tasks in the risk analysis process and suggests some examples for applications. Moreover, having a better understanding of the surface runoff hazard opens up new opportunities to push forward the risk reduction method, particularly by managing surface runoff issues at the origins of the problems, outside the railway right-of-way. Integrating the IRIP method into the current process and more generally, integrating a new tool into current working processes can be challenging. However, the innovation part, between the research and the development process, is essential for achieving a real improvement, which in our case would be a sustainable development of the railway network in its environment.

### Acknowledgments

We would like to thank Loïc Raigondeau, SNCF hydraulic specialist and Bréauté-Fécamp diagnosis supervisor, for his support throughout this work and his valuable advice. We would also like to thank other contributors to the Bréauté-Fécamp risk analysis, especially Yoni Poitevin and Ahlem Hasnaoui. More generally speaking, we thank all the IRIP project contributors, especially Judicaël Dehotin, a key proponent of the development of the IRIP method. Finally, we thank ANRT (Agence Nationale de la Recherche et de la Technologie) for its partial funding of this work.

## SYNTHESE

Cet article présente la comparaison des cartes IRIP aux résultats d'un diagnostic de ligne réalisé par expertise terrain. Cette comparaison permet tout d'abord d'obtenir de nouveaux chiffres quant à la performance de la méthode IRIP avec un autre jeu de données et sur une autre zone d'étude. De plus, cette comparaison permet de mieux appréhender la réelle contribution de la méthode IRIP pour la gestion du ruissellement dans le contexte ferroviaire, et d'identifier les étapes du processus de diagnostic où la méthode IRIP peut être utile.

Côté évaluation de la méthode IRIP, des comparaisons quantitatives et qualitatives ont été réalisées. Dans un premier temps, la correspondance entre les zones sélectionnées par le diagnostic pour des travaux de régénération du drainage et les zones sensibles au ruissellement d'après la méthode IRIP est étudiée. Des tableaux de contingence sont réalisés et des indicateurs de performance sont calculés. Cette comparaison quantitative montre que, en considérant les ouvrages de traversée sous voie, entre 94 et 100% des zones de travaux sont bien identifiées par les cartes IRIP, avec des taux de fausses alarmes entre 20 et 26%. L'étude des faux positifs (fausses alertes) montre que le diagnostic avait, lui aussi, bien identifié ces zones comme exposées, mais ces zones avaient été considérées comme peu vulnérables, au vu des dispositifs hydrauliques en place. Les faux positifs sont donc justifiés grâce au diagnostic. Les comparaisons qualitatives, quant à elles, sont des analyses détaillées des cartes IRIP (de résolution 5 m) sur certains tronçons où des recommandations de travaux ont été faites. Ces comparaisons montrent que les observations terrains sont retrouvées sur les cartes IRIP. La méthode IRIP permet même de bien différencier les zones de dépôts et les zones d'érosion. Les cartes IRIP semblent apporter de l'information supplémentaire, difficile à identifier sur le terrain, telle que les chemins naturels d'écoulement si la voie ferrée n'interceptait pas les écoulements. Ces comparaisons sont encourageantes et confirment la pertinence des cartes IRIP bien que ces tests devraient être effectués avec le nouveau paramétrage conseillé dans le but d'obtenir des chiffres de référence en termes de performance.

Pour évaluer la contribution de la méthode IRIP aux diagnostics de ligne, le processus actuel est décomposé, depuis la requête du commanditaire, jusqu'au livrable, en passant par les étapes d'analyse du contexte et des données et les étapes d'évaluation et de réduction des risques. Il est identifié certaines tâches du processus pour lesquelles la méthode IRIP peut apporter une contribution directe. Par exemple, en début d'expertise dans la collecte des données sur le bassin, les cartes IRIP apportent une vision objective du comportement du bassin et peuvent être une bonne base pour plus de recherches sur la zone. Pour la phase d'évaluation du risque, les cartes IRIP peuvent permettre d'identifier les zones exposées comme cela a été montré en partie 2. Pour cette phase, disposer des cartes peut réellement être un gain de temps, les cartes sont des outils pour préparer et accompagner le travail de terrain et pour confirmer les observations et ressentis des experts. Enfin, pour la phase de réduction des risques, la méthode IRIP offre une nouvelle information qui n'était pas disponible avant, ce qui permet de faire évoluer les méthodes actuelles. Disposer de la dynamique spatiale du ruissellement et des zones de différents processus dominants (production, transfert et/ou accumulation) permet davantage aux experts de suggérer des actions hors emprise ferroviaire. Dans le cas du ruissellement, agir en dehors de l'emprise, sur les zones de genèse, et de façon adaptée aux différents processus, est le seul moyen pour diminuer les apports de boue dans les dispositifs hydrauliques. La méthode IRIP pourrait donc être un outil pour proposer davantage de solutions à la gestion du ruissellement sur les voies ferrées.

En conclusion, ce travail peut être un exemple pour utiliser les cartes IRIP lors d'un diagnostic de ligne. Dans le cadre de prochaines utilisations, il sera intéressant de suivre les utilisateurs dans leurs démarches, pour les conseiller par exemple en termes d'interprétation des cartes ou en termes de recommandations concernant les dispositifs d'hydraulique douce. Mais il sera également intéressant d'avoir leurs retours

quant à l'apport effectif des informations cartographiques par rapports à leurs méthodes actuelles et quant à la pertinence par rapport à la réalité terrain. Ceci viendrait compléter les hypothèses émises lors de cette comparaison et permettrait de continuer le développement des cartes IRIP pour des besoins très spécifiques du contexte ferroviaire.



## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Après avoir évalué la performance de la méthode IRIP en partie 2, la partie 3 s'attache à répondre aux problématiques de l'usage de la méthode IRIP. Les réflexions autour de l'usage de la méthode IRIP ont pris une place importante dans la thèse et les outils utilisés pour les mener à bien sont décrits dans les travaux de Klasing-Chen et al. (2017). Ces travaux ont permis de se poser les bonnes questions quant aux réels objectifs de la thèse, ainsi que d'inscrire la thèse dans des problématiques plus générales de la recherche (par exemple, le développement d'une stratégie de modélisation et d'instrumentation pour mieux comprendre le ruissellement dans l'espace) et de l'opérationnel (par exemple, un écosystème ferroviaire résistant à l'eau). Cette étape entre recherche et développement que l'on appelle innovation est essentielle pour transformer une nouveauté en un outil apportant réellement une amélioration (Hatchuel et Weil, 2002). Elle est néanmoins complexe car nécessite de tenir compte de toutes les composantes d'un projet de recherche, qu'elles soient techniques ou organisationnelles. Ceci nécessite d'avoir une bonne vision des interactions des différentes parties prenantes et de prendre du recul sur le processus actuel pour proposer des solutions d'optimisation. Cette troisième partie permet donc de proposer des éléments pour favoriser l'intégration de la méthode IRIP dans le processus actuel de gestion des risques.

L'objectif de cette troisième partie était d'évaluer la contribution de la méthode IRIP à différentes tâches de la gestion des risques liés au ruissellement dans le contexte ferroviaire mais aussi dans d'autres contextes. Les processus de gestion ont été décomposés afin d'identifier les points précis où la méthode IRIP peut apporter de la valeur en termes de gain de temps ou de précision.

Pour répondre à cet objectif, la méthode IRIP a été mise en contexte, en étant comparée à divers travaux de la thématique des risques liés au ruissellement. Tout d'abord, la contribution de la méthode IRIP est testée pour réaliser des cartes d'aléa pour les zonages règlementaires des plans de prévention des risques. La carte IRIP d'accumulation est comparée au zonage inondation par ruissellement, et la carte de transfert est comparée au zonage érosion, sur le bassin versant du Havre. Ensuite, la contribution de la méthode IRIP est testée en tant qu'outil pour réaliser des retours d'expériences sur le terrain. Pour cela, les cartes IRIP sont comparées aux rapports d'expertise post-incidents sur plusieurs sites de la ligne Saint-Germain-Des-Fossés à Nîmes. Enfin, la méthode IRIP est comparée aux résultats d'un diagnostic de risque sur la ligne de Bréauté à Fécamp. Les comparaisons visuelles et quantitatives et l'étude du processus de diagnostic ont permis de montrer que la méthode IRIP peut être un outil d'aide à l'expertise pour réaliser des diagnostics de ligne.

Ce qu'il faut retenir, pour la comparaison avec les zonages règlementaires, est que les cartes IRIP sont très similaires aux zonages mais qu'elles ont été réalisées très rapidement, sans calage et avec peu de données d'entrée. Ceci montre que la méthode IRIP peut être un bon outil pour répondre à ce type de besoin, notamment en début d'expertise pour identifier les zones sur lesquelles l'analyse doit se focaliser. Concernant la comparaison avec les rapports d'expertise post-incidents, il est montré que les cartes IRIP

peuvent faciliter l'analyse des origines et circonstances des désordres. La méthode IRIP peut également apporter en méthodologie en identifiant les zones importantes à visiter dans le bassin en dehors de l'emprise ferroviaire. Cette étude montre l'apport de la méthode IRIP aux retours d'expériences dans le contexte ferroviaire mais ces conclusions peuvent être généralisées aux retours d'expériences sur le terrain post-épisode de ruissellement intense. Enfin, la comparaison des cartes IRIP avec le diagnostic de ligne montre que les cartes IRIP retrouvent bien les zones sélectionnées pour des travaux de régénération du drainage. Les cartes IRIP donnent également davantage de précision sur la dynamique spatiale des écoulements dans le bassin versant qui pourrait compléter les expertises terrain.

En conclusion, la méthode IRIP peut être un bon outil d'aide à l'expertise. Son avantage est d'être rapide, robuste et qu'elle nécessite peu de données d'entrée. Ces trois études ont montré que la méthode IRIP peut apporter un gain de temps en amont des expertises pour préparer les visites terrain et pour identifier les zones à analyser en priorité. Un gain de temps et de précision peut également être obtenu durant le terrain en indiquant les zones à investiguer et en anticipant les traces du ruissellement pouvant être observées sur ces zones. Les cartes avec des données topographiques de haute résolution montrent une dynamique spatiale très précise qui peut également compléter les analyses. Par ailleurs, à la suite des expertises, les cartes IRIP sont des supports visuels pour communiquer les résultats et pour convaincre de la nécessité de certaines mesures à prendre. La méthode IRIP peut donc apporter une contribution directe pour différentes tâches de la gestion des risques liés au ruissellement. De plus, par les informations qu'elle prodigue, les cartes IRIP sont aussi une opportunité pour faire évoluer les méthodes actuelles de gestion. En effet, disposer d'informations concernant la localisation des différents processus dominant (production, transfert, accumulation), permet d'adapter les techniques de gestion en fonction des zones et de mettre en place des actions aux endroits stratégiques du bassin versant. Les cartes IRIP apportent des éléments pour aller vers une gestion du ruissellement intégrée au bassin versant. Les cartes IRIP sont également des outils pédagogiques pour favoriser le dialogue entre des acteurs du territoire. Les cartes permettent d'illustrer les interactions qu'ont les différentes parties prenantes sur le ruissellement, et illustrer les effets potentiellement bénéfiques de certaines mesures ou de certains aménagements. Tendre vers une gestion intégrée du bassin versant favorise le développement durable des territoires, mais dans un contexte ferroviaire, c'est aussi une nécessité, au vu de la difficulté des dispositifs hydrauliques classiques à gérer les sédiments et les boues charriées par le ruissellement.

Pour la suite, concernant la mise en application de la méthode IRIP, il pourrait être intéressant d'échanger davantage avec les acteurs de la gestion des risques liés à l'eau, et particulièrement avec les acteurs locaux. Que ce soit dans le contexte ferroviaire (ingénieurs, agents de maintenance ou d'exploitation) ou dans les autres contextes (syndicats de bassin, élus, administrations territoriales ou agriculteurs) les résultats obtenus et les usages proposés doivent être discutés avec les différentes parties prenantes. Echanger avec les acteurs permettrait, d'une part, de confirmer la pertinence des cartes IRIP pour répondre à différents besoins, et d'autre part, d'ouvrir à d'autres usages et d'effectuer les adaptations en conséquence. De manière plus générale, le développement de la méthode IRIP requiert une adaptation de l'outil aux besoins opérationnels. Par exemple, il serait possible de développer des modules pour certaines tâches, accompagnés de guides d'application et d'interprétation, ou encore, de mettre les cartes de ruissellement directement à disposition par le biais d'une application web. Ce média pourrait également rassembler les autres données et outils utiles à la gestion du ruissellement. En plus de l'adaptation technique, le développement de la méthode IRIP requiert la construction d'une communauté d'utilisateurs, de conseillers, de producteurs de cartes, afin d'échanger sur les difficultés et les bonnes pratiques. Pour la suite, ce qui semble à présent nécessaire, est finalement de mettre la méthode IRIP réellement dans les mains d'utilisateurs et d'échanger avec eux sur des problématiques concrètes de ruissellement.

## CONCLUSION GENERALE

Le ruissellement pluvial peut engendrer des phénomènes violents tels que des coulées de boue, des inondations, des glissements, ou encore de l'érosion. Ces aléas induits par le ruissellement peuvent impacter la sécurité des personnes, causer des dommages économiques sur les infrastructures et avoir des conséquences néfastes sur l'environnement. Malgré les risques pour la société, le ruissellement pluvial intense est encore peu étudié en regard d'autres aléas hydrologiques tels que les inondations par débordement de cours d'eau. Il n'existe pas pour l'heure de cartographie de référence des aléas induits par le ruissellement à l'échelle nationale. Ceci peut s'expliquer car le ruissellement est un phénomène complexe qui dépend de la pluviométrie, mais aussi de nombreux autres facteurs, tels que la topographie et les propriétés du sol, ces facteurs évoluant également dans le temps avec l'usage des sols. De plus, le ruissellement peut être très fugace, rapide et localisé, ce qui rend son observation complexe. Il n'existe d'ailleurs toujours pas de consensus sur les limites physiques du phénomène de ruissellement dans la communauté scientifique. Mais, la réglementation autour des risques naturels évolue, dans un contexte d'urbanisation croissante et de changement climatique, et des besoins émergent pour disposer d'outils d'aide à la gestion des risques liés à l'eau.

Cette thèse se focalise en particulier sur les impacts du ruissellement sur l'infrastructure ferroviaire. En effet, les voies ferrées, en tant qu'éléments linéaires et continus du territoire, sont particulièrement exposées aux écoulements de surface. Elles interceptent les écoulements de nombreux petits bassins versants non instrumentés, ce qui rend la gestion complexe à l'échelle du réseau. De plus, l'évolution de l'environnement proche de la voie ferrée nécessite une surveillance de chaque instant. Le ruissellement se caractérise sur l'infrastructure ferroviaire par une dégradation précoce des dispositifs hydrauliques ou par la destruction d'éléments de l'infrastructure tels que l'assise des voies ou les remblais ferroviaire. Des désordres sur l'infrastructure peuvent engager la sécurité des personnels et des voyageurs, et causer des pertes économiques pour le gestionnaire d'infrastructure, ainsi que pour les autres enjeux du territoire en interactions avec le système ferroviaire.

C'est dans ce contexte que la méthode IRIP « Indicateur de Ruissellement Intense Pluvial » est créée à Irstea, puis développée par SNCF, sous la forme du logiciel iRIP©. L'objectif principal de la thèse était d'évaluer la méthode IRIP. La thèse se focalise sur la méthode IRIP car elle est l'objet commun aux parties prenantes de la thèse, mais la problématique de l'évaluation est valable pour les autres modèles de ruissellement. En effet, la difficulté réside dans le manque de données relatives au ruissellement. Evaluer les modèles nécessite donc de passer par des données approchées, c'est-à-dire des données qui sont des indices du ruissellement et non des mesures directes du phénomène. A partir de là, se posent des questions méthodologiques pour collecter les données puis pour les comparer, sachant qu'elles peuvent être différentes dans le fond (biais, non-exhaustivité) et dans la forme (IRIP données raster, impacts données vectorielles qualitatives). Néanmoins, l'évaluation est un enjeu majeur, puisque les sorties de modèles peuvent amener à prendre des décisions. Dans le cadre d'aléas naturels, les décisions peuvent

remettre en cause la sécurité ou engendrer des coûts. Il est donc essentiel de prendre la mesure de la fiabilité et de la valeur des sorties des modèles. Par ailleurs, pouvoir évaluer les modèles c'est aussi pouvoir tester de nouveaux développements et être en mesure de juger de la valeur des modifications apportées. D'autre part, les réflexions sur l'usage sont une étape importante pour le développement d'outils à visée opérationnelle. Ceci une tâche complexe puisque nécessitant de prendre du recul sur les besoins et les contraintes, mais nécessaire pour bien cerner les objectifs des différents acteurs de la gestion des risques.

Ainsi, la thèse avait trois objectifs : proposer une méthode d'évaluation de la méthode IRIP, proposer des pistes d'amélioration et réfléchir à son utilisation concrète dans un contexte opérationnel. Pour répondre à ces objectifs, un état des connaissances autour du ruissellement est d'abord présenté. Ces recherches ont permis d'affiner la définition du phénomène de ruissellement, en considérant les phases de genèse et d'écoulement. La définition proposée dans le cadre de la thèse inclue les phénomènes induits, à savoir, l'érosion, les écoulements chargés, les laves torrentielles, les coulées de boue, les glissements superficiels par saturation hydrique et les dépôts. Par ailleurs, un état des connaissances sur la gestion du ruissellement dans le contexte ferroviaire a permis de mettre en avant les difficultés à caractériser et à gérer les impacts du ruissellement sur la voie ferrée. La gestion des risques liés à l'eau est un processus complexe qui intervient à toutes les étapes de la vie d'une ligne, de la conception, à l'exploitation, en passant par la maintenance. Il est montré un manque méthodologique globale pour la gestion des risques liés à l'eau. De plus, les dispositifs hydrauliques classiques montrent leurs limites pour gérer les écoulements chargés qui viennent combler les ouvrages. Peu d'alternatives existent aujourd'hui à cause de la difficulté à faire des expertises hors emprise ferroviaire.

Pour évaluer la méthode IRIP, un long travail de collecte et de traitement de données sur les impacts et sur l'infrastructure a été nécessaire afin de constituer les bases de données de référence. Ensuite la méthode d'évaluation a été élaborée et consiste en la réalisation de tableaux de contingence et le calcul de six indicateurs de performance. Il a été montré que le choix de la mise en forme des données peut considérablement influencer le résultat de l'évaluation. Afin de procéder de façon objective, de nombreux prétraitements ont été testés, et les mises en forme retenues ont pu être justifiées. Ensuite, pour être en mesure d'évaluer les cartes IRIP, une caractérisation de la vulnérabilité de la voie ferrée au ruissellement a été proposée, basée sur l'expertise ferroviaire et sur l'analyse des données d'impacts et d'infrastructure. Une échelle de vulnérabilité sur 5 niveaux est proposée, considérant les éléments structurels. Les actions de protection et de résilience sont prises en compte dans un second temps, pour justifier les tronçons détectés comme sensibles mais où aucun impact n'a été reporté. Finalement, la mise en œuvre de cette méthode d'évaluation a permis de donner une estimation de la performance de la méthode IRIP à identifier les zones exposées, à savoir : une probabilité de détection proche de 1, un taux de fausses alarmes de 0,3, des scores de précision et de biais également proche de 1 (respectivement, 0,8 et 1,3) et une dépendance statistiquement significative entre les tronçons impactés ou faisant l'objet d'actions de mitigation ou de résilience et les tronçons détectés sensibles par IRIP (Chi-2 de 54 et coefficient Phi de 0,5).

Suite à l'évaluation de la méthode IRIP dans sa paramétrisation par défaut, des propositions d'amélioration ont pu être proposées et évaluées. Trois indicateurs du ruissellement en particulier ont été modifiés. Une méthode de calcul plus pertinente des ruptures de pentes a été proposée. L'utilisation d'un indicateur d'érodabilité est préconisée pour construire la carte de transfert. Enfin, plusieurs seuils d'aire drainée ont été testés, montrant que des impacts du ruissellement sont enregistrés pour de très petites aires drainées, de l'ordre de l'hectare. Pour aller plus loin dans l'évaluation et le développement de la méthode IRIP, il serait intéressant de mettre en œuvre des campagnes de mesures du ruissellement. Disposer de plus de données relatives au phénomène, pourrait permettre de réaliser une évaluation plus

spatialisée, sur l'ensemble du bassin versant et pas seulement autour de la voie ferrée. Les indicateurs de performance utilisés dans la méthode d'évaluation trouvent néanmoins leurs limites lorsqu'il s'agit d'évaluer l'information spatiale. La collecte de données plus spatialisées nécessite donc de proposer des indicateurs de performance plus globaux. D'autre part, pour confirmer les résultats de la thèse, il semble nécessaire d'appliquer la méthode d'évaluation à une autre ligne, située dans un contexte climatique et géomorphologique différent. Des données historiques d'impacts ont été également collectées pour le tronçon de Bayonne à Hendaye (30 km, Aquitaine) mais, les données n'ont pas pu être traitées dans le cadre de la thèse. Les données restent néanmoins disponibles pour de prochains tests, où il sera intéressant de tester la méthode d'évaluation ainsi que les améliorations proposées.

Une partie de la thèse a également été consacrée à l'usage de la méthode IRIP pour des applications particulières de la gestion des risques, dans le contexte ferroviaire et dans d'autres contextes. Pour le contexte ferroviaire, il a été montré que la méthode IRIP peut être un outil d'aide à l'expertise pour réaliser des diagnostics de ligne, d'une part, en contribuant directement à l'identification des sections de ligne exposées, et d'autre part, en permettant de faire évoluer les méthodes actuelles. Par la cartographie de trois étapes du ruissellement que permet la méthode IRIP, les actions de mitigation peuvent être ciblées directement sur les zones problématiques. Les techniques peuvent être adaptées selon les processus, des pièges à sédiments peuvent être implantés au niveau des zones de transfert, des bassins de rétention au niveau des zones d'accumulation, les pratiques culturales peuvent être adaptées sur les zones de production, etc. Les cartes offrent des nouvelles informations pour aller vers une gestion hors de l'emprise ferroviaire, en partenariat avec les autres acteurs du territoire. De plus, en termes d'usage, il est montré que les cartes IRIP peuvent contribuer à la réalisation de retours d'expérience post-événements, dans le contexte ferroviaire mais aussi pour tout épisode de ruissellement intense. Les cartes permettent d'identifier les zones du bassin à investiguer en priorité, et permet d'anticiper ce qui peut y être observé. Enfin, dans un contexte plus réglementaire, la méthode IRIP peut être une bonne base à l'expertise pour la réalisation de zonages réglementaires de l'aléa ruissellement (inondation par ruissellement et érosion hydrique). Ainsi, par ces différentes applications, sur différentes zones, la méthode IRIP a montré sa robustesse et sa pertinence en tant qu'outil d'aide à l'expertise.

Pour aller plus loin sur l'usage concret des cartes IRIP, la nécessité d'échanger avec des opérationnels paraît à présent évidente. Mettre la méthode IRIP dans les mains d'agents du ferroviaire ou d'experts locaux permettrait d'obtenir des retours concrets en termes de pertinence, mais aussi en termes de praticité par rapport aux besoins et contraintes. Il serait notamment intéressant de tester concrètement l'apport des cartes IRIP pour la mise en place de techniques d'hydraulique douce. D'autre part, pour améliorer la gestion des risques liés au ruissellement, il paraît essentiel de quantifier l'impact réel du ruissellement sur la société, et dans le cadre de la thèse, de quantifier l'impact du ruissellement sur le système ferroviaire. L'impact du ruissellement est en effet encore peu connu, ce qui rend difficile l'investissement dans des actions de gestion des risques. Il faudrait pouvoir convaincre de l'utilité de certaines actions, en mesurant les bénéfices à plus ou moins long terme. Finalement, les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse contribuent à l'amélioration de la connaissance du ruissellement et à l'amélioration de la gestion des risques et des ressources. Cette thèse participe, de façon générale, à fournir des méthodes pour le développement durable des territoires en équilibre avec les aléas naturels.



## BIBLIOGRAPHIE

- Amblard, J., Capoccioni, C.P., Nivon, D., Mellal, L., De Cesare, G., Ghilardi, T., Jafarnejad, M., Battisacco, E., 2015. Analysis of Ballast Transport in the Event of Overflowing of the Drainage System on High Speed Lines. *International Journal of Railway Technology* 4, 19–43.
- AREAS, n.d. Association de recherche sur le Ruissellement, l'Érosion et l'Aménagement du Sol [WWW Document]. AREAS. URL <http://www.areas-asso.fr/> (accessed 4.6.17).
- Arnaud, P., Dehotin, J., 2011. Surface runoff hazard estimation methods - Comparison of the SHYREG and the IRIP methods. Rapport IRSTEA Aix-en-Provence et IRSTEA Lyon.
- Aubert, Y., Arnaud, P., Ribstein, P., Fine, J.-A., 2014. La méthode SHYREG débit—application sur 1605 bassins versants en France métropolitaine. *Hydrological Sciences Journal* 59, 993–1005.
- Auzet, A.V., Boiffin, J., Papy, F., Ludwig, B., Maucorps, J., 1993. Rill erosion as a function of the characteristics of cultivated catchments in the north of France. *Catena* 20, 41–62. doi:10.1016/0341-8162(93)90028-N
- Baccaini, B., Sémécurbe, F., 2009. La croissance périurbaine depuis 45 ans Extension et densification (No. 1240), Insee Première. Insee, Pôle Analyse Territoriale.
- Bajracharya, R.M., Lal, R., 1999. Land use effects on soil crusting and hydraulic response of surface crusts on a tropical Alfisol. *Hydrological Processes* 13, 59–72. doi:10.1002/(SICI)1099-1085(199901)13:1<59::AID-HYP675>3.0.CO;2-1
- Ballabio, C., Panagos, P., Monatanarella, L., 2016. Mapping topsoil physical properties at European scale using the LUCAS database. *Geoderma* 261, 110–123. doi:10.1016/j.geoderma.2015.07.006
- Beasley, D.B., Huggins, L.F., Monke, ampEJ, 1980. ANSWERS: A model for watershed planning. *Transactions of the ASAE* 23, 938–0944.
- Benarina, O., 2015. Modélisation des inondations par ruissellement intense pour la prévision et la prévention des coupures de routes et de voies ferrées. Mémoire de master. IRSTEA Lyon.
- Bendjoudi, H., Hubert, P., 2002. The Gravelius compactness coefficient: critical analysis of a shape index for drainage basins. *Hydrological Sciences Journal* 47, 921–930. doi:10.1080/02626660209493000
- Benmamar, S., Poulard, C., Breil, P., Leblois, E., Faure, J.-B., Paquier, A., 2016. Flood hazard mitigation by actions in the hillslopes: does the context change the assessment of efficiency?, in: *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences, p. 13013.
- Beven, K., Germann, P., 1982. Macropores and Water-Flow in Soils. *Water Resources Research* 18, 1311–1325. doi:10.1029/WR018i005p01311
- Beven, K.J., 2011. *Rainfall-runoff modelling: the primer*. John Wiley & Sons.
- Beven, K.J., Kirkby, M.J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Journal* 24, 43–69. doi:10.1080/02626667909491834
- Bocher, E., 2005. Impacts des activités humaines sur le parcours des écoulements de surface dans un bassin versant bocager: essai de modélisation spatiale. Thèse de doctorat. Université Rennes 2.
- Boissier, L., 2013. La mortalité liée aux crues torrentielles dans le Sud de la France: une approche de la vulnérabilité humaine face à l'inondation. Thèse de doctorat. Université Paul Valéry-Montpellier III.
- Bonnet, S., 2012. Cartographie des zones potentielles de production ou d'accumulation du ruissellement de surface en région cévenole. Mémoire de master. IRSTEA Lyon.

- Bonnet-Carrier, S., Poulard, C., Breil, P., 2013. Cartographie de l'aléa ruissellement - Inventaire des éléments de validation (Rapport d'expertise/d'étude). IRSTEA Lyon UR HHLy France.
- Boudou, M., Lang, M., Vinet, F., Coeur, D., 2016. Lessons from analysing mortality from six major flood events in France (1930-2010), in: 3rd European Conference on Flood Risk Management (FLOODrisk 2016). p. 8–p.
- Bourguignon, D., 2014. Événements et territoires-le coût des inondations en France: analyses spatio-temporelles des dommages assurés. Thèse de doctorat. Université Paul Valéry-Montpellier III.
- Braud, I., Ayrat, P.-A., Bouvier, C., Branger, F., Delrieu, G., Le Coz, J., Nord, G., Vandervaere, J.-P., Anquetin, S., Adamovic, M., others, 2014. Multi-scale hydrometeorological observation and modelling for flash-flood understanding. *Hydrology and Earth System Sciences* 18, 3733–3761.
- Breil, P., Bonnet-Carrier, S., Gonzalez-Sosa, E., Lagadec, L.-R., 2016. Expertise de l'inondation par ruissellement intense suite à l'orage du 07/06/2016 sur la commune de Lucheux (80) (Rapport d'expertise/d'étude). IRSTEA, Lyon.
- Breil, Pascal, Lagadec, L.-R., González-Sosa, E., 2016. Inondation pluviale et développement périurbain. Novatech 28 juin - 1<sup>er</sup> juillet 2016. Lyon.
- Brelot, E., Chapgier, J., Breil, P., Valla, E., Le Nouveau, N., Arcos, M., Padet, J., Bacot, L., Valin, K., Sibeud, E., Lipeme Kouyi, G., Alzate, L., Martinet, A., Morin-Batut, C., Pasquier, V., Giol, S., Pierlot, D., Senechal, C., 2009. Guide pour la prise en compte des eaux pluviales dans les documents de planification et d'urbanisme. Graie - MEDDE.
- Brooks, R.H., Corey, A.T., 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Papers Colorado State University*.
- Calianno, M., Ruin, I., Gourley, J.J., 2013. Supplementing flash flood reports with impact classifications. *Journal of Hydrology* 477, 1–16.
- Caseri, A., Ramos, M.-H., Javelle, P., Leblois, E., 2016. A space-time geostatistical approach for ensemble rainfall nowcasting, in: E3S Web of Conferences. EDP Sciences, p. 18001.
- CEPRI, 2015. Gérer les inondations par ruissellement pluvial - Guide de sensibilisation. Edité par le CEPRI. Octobre 2014.
- Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Souchère, V., King, C., Antoni, V., Surdyk, N., Dubus, I., Arrouays, D., Desprats, J.-F., 2006. Guide méthodologique pour un zonage départementale de l'érosion des sols Rapport n°3 : Synthèse et recommandations générales (No. BRGM-RP-55104-FR). BRGM - INRA.
- Cerdan, O., Souchère, V., Lecomte, V., Couturier, A., Le Bissonnais, Y., 2002a. Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model: Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management. *Catena* 46, 189–205. doi:10.1016/S0341-8162(01)00166-7
- Cerdan, O., Souchère, V., Lecomte, V., Couturier, A., Le Bissonnais, Y., 2002b. Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model: sealing and transfer by runoff and erosion related to agricultural management. *Catena* 46, 189–205.
- Chazelle, B., Lambert, L., Capoccioni, C.P., 2014. Railway vulnerability in case of extremes floods. Knowledge and risk management. *La Houille Blanche* 48–54. doi:10.1051/lhb/2014016
- Christensen, F.M., Andersen, O., Duijm, N.J., Harremoës, P., 2003. Risk terminology—a platform for common understanding and better communication. *Journal of Hazardous Materials* 103, 181–203. doi:10.1016/S0304-3894(03)00039-6
- Committee on Foundations of risk analysis, 2015. Society for Risk Analysis Glossary 2015.
- Courrier Picard, 2016. PICARDIE Orages, inondations et coulées de boue dans la Somme et l'Oise [WWW Document]. Le Courrier Picard. URL <http://www.courrier-picard.fr/region/picardie-orages-inondations-et-coulees-de-boue-dans-la-ia0b0n792080> (accessed 3.24.17).
- Coussot, P., 1998. Rhéologie et environnement. Séminaire de rhéologie 129.
- Coussot, P., Meunier, M., 1996. Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews* 40, 209–227. doi:10.1016/0012-8252(95)00065-8
- Cramér, H., 2016. *Mathematical Methods of Statistics (PMS-9)*, Volume 9. Princeton university press.
- Cros-Cayot, S., 1996. Distribution spatiale des transferts de surface à l'échelle du versant. Contexte armoricain. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes.
- Cudennec, C., 2000. Description mathématique de l'organisation du réseau hydrographique et modélisation hydrologique. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes.

- Gaillard, D., Delahaye, L., Langlois, P., 2006. Modélisation du ruissellement érosif par automate cellulaire. Intérêts d'une approche déterministe du risque. CNRS. *Analyses et modèles*, May 2006, La Baule, France. 6 p. <hal-00532930>
- Dabney, S.M., Yoder, D.C., Vieira, D.A.N., Bingner, R.L., 2011. Enhancing RUSLE to include runoff-driven phenomena. *Hydrological Processes* 25, 1373–1390. doi:10.1002/hyp.7897
- Dasgupta, P., 2003. Sediment gravity flow—the conceptual problems. *Earth-Science Reviews* 62, 265–281. doi:10.1016/S0012-8252(02)00160-5
- Dautrebande, S., Degre, A., Dagnelies, J., 2007. La jonction thalweg-cours d'eau: pour une gestion dès l'amont, poster de conférence "La gestion physique des cours d'eau: Bilan d'une décennie d'ingénierie écologique", Octobre 2007, Namur, Belgique.
- De Bejarry, S., Redon, A., 2017. Mise en place d'une méthodologie de recherche en archives – projets d'avenir et irip-rail (Rapport de mission, confidentiel). SNCF Réseau Ingénierie et Projets.
- De Lavenne, A., 2010. Risque d'inondation par ruissellement: instrumentation terrain et analyse géomatique (mémoire de master). Génie de l'Environnement Agrocampus Ouest, Rennes, IRSTEA Lyon.
- Debionne, S., Ruin, I., Shabou, S., Lutoff, C., Creutin, J.-D., 2016. Assessment of commuters' daily exposure to flash flooding over the roads of the Gard region, France. *Journal of Hydrology* 541, 636–648.
- Defrance, D., 2014. Adaptation et évaluation d'un système d'anticipation de crues éclair sur des bassins de montagne non-jaugés. Thèse de doctorat. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI. <NNT : 2014PA066059>. <tel-00997563>.
- Defrance, D., Javelle, P., Organde, D., Ecrepont, S., Andréassian, V., Arnaud, P., 2014. Using damage reports to assess different versions of a hydrological early warning system. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 11, 4365–4401.
- Dehotin, J., Breil, P., 2011a. Projet IRIP : Rapport bibliographique. Cartographie de l'aléa inondation par ruissellement (Rapport Irstea). Irstea Unité de recherche Hydrologie-Hydraulique.
- Dehotin, J., Breil, P., 2011b. Projet IRIP : Rapport technique. Cartographie de l'aléa inondation par ruissellement (Rapport Irstea). Irstea Unité de recherche Hydrologie-Hydraulique.
- Dehotin, J., Breil, P., Braud, I., de Lavenne, A., Lagouy, M., Sarrazin, B., 2015a. Detecting surface runoff location in a small catchment using distributed and simple observation method. *Journal of Hydrology* 525, 113–129. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.02.051
- Dehotin, J., Chazelle, B., Lambert, L., Breil, P., Braud, I., Pams Capoccioni, C., Amblard, J., Mellal, L., 2014. Diagnostic de l'impact du ruissellement sur la plateforme ferroviaire avec la méthode IRIP. Symposium International GEORAIL 11, Marne la Vallée, FRA.
- Dehotin, J., Chazelle, B., Laverne, G., Hasnaoui, A., Lambert, L., Breil, P., Braud, I., 2015b. Mise en œuvre de la méthode de cartographie du ruissellement IRIP pour l'analyse des risques liés aux écoulements sur l'infrastructure ferroviaire. *La Houille Blanche* 56–64. doi:10.1051/lhb/20150069
- Delahaye, D., 2002. Apport de l'analyse spatiale en géomorphologie: Modélisation et approche multiscalaire des risques. Thèse de doctorat. Université de Rouen.
- Delahaye, D., Guermond, Y., Langlois, P., 2002. Spatial interaction in the run-off process. *Cybergeo : European Journal of Geography*. doi:10.4000/cybergeo.3795
- Demarcin, P., Smoos, A., Dautrebande, S., Mokadem, A.I., Degre, A., 2009a. Projet ERRUISSOL ou la cartographie des zones à risque de ruissellement et d'érosion en Région wallonne (Belgique). Actes des 10èmes Journées d'étude des sols.
- Demarcin, P., Smoos, A., Dautrebande, S., Mokadem, A.I., Degre, A., 2009b. Projet ERRUISSOL ou la cartographie des zones à risque de ruissellement et d'érosion en Région wallonne (Belgique). 10èmes Journées d'étude des sols, Strasbourg FRA.
- Direction Départementale des Territoires et de la Mer de Seine-Maritime, 2012. Zonage réglementaire de l'érosion des sols.
- Direction Départementale de Seine-Maritime, 2013a. Plan de Prévention du Risque Inondation - Rapport de présentation.
- Direction Départementale de Seine-Maritime, 2013b. Plan de Prévention du Risque Inondation - Règles d'application.
- DeRoo, A.P.J., Offermans, R.J.E., Cremers, N., 1996. LISEM: A single-event, physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins .2. Sensitivity analysis, validation and application.

- Hydrological Processes 10, 1119–1126. doi:10.1002/(SICI)1099-1085(199608)10:8<1119::AID-HYP416>3.0.CO;2-V
- Didier, C., Salmon, R., 2010. Un modèle de calcul des hauteurs prévisibles de remontée de fontis à l'aplomb d'exploitations souterraines peu profondes. *Revue française de Géotechnique* 21–36.
- Directive Inondation, 2007. Directive Européenne sur les Inondations.
- Douvinet, J., 2010. Le traitement des inondations en catastrophe naturelle: un système à adapter. *Risques-Les cahiers de l'assurance* 83, 104–112.
- Douvinet, J., 2008. Les bassins versants sensibles aux « crues rapides » dans le Bassin Parisien – Analyse de la structure et de la dynamique de systèmes spatiaux complexes. Thèse de doctorat. Université de Caen/Basse-Normandie.
- Douvinet, J., 2006a. Intérêts et limites des données « CatNat » pour un inventaire des inondations. L'exemple des « crues rapides » liées à de violents orages (Bassin parisien, Nord de la France). *Noréis. Environnement, aménagement, société* 17–30. doi:10.4000/noréis.1733
- Douvinet, J., 2006b. Intérêts et limites des données « CatNat » pour un inventaire des inondations. L'exemple des « crues rapides » liées à de violents orages (Bassin Parisien, Nord de la France). *Noréis. Environnement, aménagement, société* 17–30.
- Douvinet, J., Delahaye, D., Langlois, P., 2013. Measuring surface flow concentrations using a cellular automaton metric: a new way of detecting potential impacts of flash floods in sedimentary context. *Geomorphologie-Relief Processus Environnement* 27–46.
- Douvinet, J., Delahaye, D., Langlois, P., 2008. Modélisation de la dynamique potentielle d'un bassin versant et mesure de son efficacité structurelle. *Cybergeo : European Journal of Geography*. doi:10.4000/cybergeo.16103
- Douvinet, J., Planchon, O., Cantat, O., Delahaye, D., Cador, J.-M., 2009. Variabilité spatio-temporelle et dynamique des pluies de forte intensité à l'origine des « crues rapides » dans le Bassin Parisien (France). *Climatologie* 6, 47–72.
- Douvinet, J., Vinet, F., 2012. La carte des arrêtés “CatNat” pour les inondations: limites et améliorations possibles. *Mappemonde* 107, 17–30.
- Douvinet, J., Wiel, M.J.V.D., Delahaye, D., Cossart, E., 2014. A flash flood hazard assessment in dry valleys (northern France) by cellular automata modelling. *Nat Hazards* 75, 2905–2929. doi:10.1007/s11069-014-1470-3
- DREAL, Agence de l'eau, 2015. Une nouvelle gestion des rivières arrive à l'heure de la Gemapi.
- DREAL Rhone-Alpes, 2013. Enveloppes Approchées d'Inondations Potentielles des cours d'eau de Rhône-Alpes [WWW Document]. Passerelle Inspire. URL <http://inspire.data.gouv.fr/> (accessed 4.5.17).
- Dubreuil, P., 1966. Les caractéristiques physiques et morphologiques des bassins versants: leur détermination avec une précision acceptable. Paris : ORSTOM, 26 p. multigr.
- Duchauffour, P., 2004. Introduction à la science du sol - Sol, végétation environnement, 6e édition. ed, Sciences Sup. Dunod.
- European Commission, 2016. Requirements of the EU Flood Directive [WWW Document]. URL [http://ec.europa.eu/environment/water/flood\\_risk/implement.htm](http://ec.europa.eu/environment/water/flood_risk/implement.htm) (accessed 4.5.17).
- Evrard, O., 2008. Muddy floods in the Belgian loess belt: Problems and solutions. Thèse de doctorat. Université catholique de Louvain.
- Forgey, E., 1965. Cluster analysis of multivariate data: Efficiency vs. interpretability of classification. *Biometrics* 21, 768–769.
- Fort, M., Bétard, F., Arnaud-Fassetta, G., 2015. Géomorphologie dynamique et environnement. Armand Colin.
- Freiria, S., Tavares, A.O., Juliao, R.P., 2015. The Multiscale Importance of Road Segments in a Network Disruption Scenario: A Risk-Based Approach. *Risk Anal.* 35, 484–500. doi:10.1111/risa.12280
- Fressignac, C., Breil, P., Matillon, Y., Nullans, A., Chazelle, B., Sarrazin, B., Vallod, D., 2016. Assurer la maîtrise du ruissellement grâce aux zones humides au voisinage des infrastructures de transport dans une perspective de conservation de la biodiversité. *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*.
- Galevski, M., 1955. La corrélation entre les pluies torrentielles et l'intensité de l'érosion (D'après les observations faites dans un périmètre torrentielle). ENEF, Ecole nationale des eaux et forêts, Nancy (FRA). <http://hdl.handle.net/2042/33567>

- Gaume, E., Borga, M., 2013. Etat des connaissances récentes acquises sur les crues éclair en Europe: bilan du projet de recherches européen HYDRATE (2006-2010). *La Houille Blanche - Revue Internationale De L'Eau* 24–30. doi:10.1051/lhb/2013012
- GDAL library in Python, n.d. GDAL 2.1.3 : Python Package Index [WWW Document]. Python.org. URL <https://pypi.python.org/pypi/GDAL> (accessed 4.13.17).
- Gérin, S., 2011. Une démarche évaluative des Plans de Prévention des Risques dans le contexte de l'assurance des catastrophes naturelles: Contribution au changement de l'action publique de prévention. Thèse de doctorat. Université Paris-Diderot-Paris VII.
- GIS SOL, n.d. Gis Sol : Partageons la connaissance des sols [WWW Document]. URL <https://www.gissol.fr/> (accessed 3.23.17).
- Gobat, J.-M., Aragno, M., Matthey, W., 2013. Le sol vivant - Bases de pédologie - Biologie des sols, 3e édition. ed, Sciences et ingénierie de l'environnement. Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Gomez, C., Le Bissonais, Y., Annabi, M., Bahri, H., Raclot, D., 2013. Laboratory Vis-NIR spectroscopy as an alternative method for estimating the soil aggregate stability indexes of Mediterranean soils. *Geoderma* 209, 86–97. doi:10.1016/j.geoderma.2013.06.002
- Gonzva, M., Barroca, B., Gautier, P.E., Diab, Y., 2015. A modelling of disruptions cascade effect within a rail transport system facing a flood hazard, in: 48th ESReDA Seminar on Critical Infrastructures Preparedness: Status of Data for Resilience Modelling, Simulation and Analysis.
- Gourley, J.J., Erlingis, J.M., Smith, T.M., Ortega, K.L., Hong, Y., 2010. Remote collection and analysis of witness reports on flash floods. *Journal of hydrology* 394, 53–62.
- GRAIE, n.d. GRAIE - présentation de l'association [WWW Document]. Groupe de Recherche Rhône-Alpes sur les Infrastructures et l'Eau. URL <http://www.graie.org/graie/index.htm> (accessed 4.12.17).
- GRASS Development Team, 2016. Documentation GRASS GIS fonction r.param.scale, GRASS GIS 7.2.3svn Reference Manual.
- Gravelius, H., 1914. Grundriss der gesamten Gewässerkunde: in vier Bänden. 1. Flusskunde, Compendium of Hydrology, vol. 1: Rivers. Göschen, Berlin, Germany.
- Hagen-Zanker, A., 2006. Map comparison methods that simultaneously address overlap and structure. *Journal of Geographical Systems* 8, 165–185. doi:10.1007/s10109-006-0024-y
- Hagen-Zanker, A., Martens, P., 2008. Map Comparison Methods for Comprehensive Assessment of Geosimulation Models, in: Gervasi, O., Murgante, B., Laganà, A., Taniar, D., Mun, Y., Gavrilova, M.L. (Eds.), *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2008*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 194–209.
- Hasnaoui, A., 2013. Utilisation de la méthode IRIP pour l'estimation des débits des bassins versants non jaugés (Mémoire de fin d'études, confidentiel). Université Pierre et Marie Curie et SNCF Projets Systèmes Ingénierie.
- Hatchuel, A., Le Masson, P., Weil, B., 2001. From R&D to RID: Design strategies and the management of innovation fields, in: 8th International Product Development Management Conference. pp. 415–430.
- Hatchuel, A., Weil, B., 2002. De la R&D à la RID ou comment organiser l'innovation répétée. *Industrie et technologies* 138–139.
- Hauchard, E., 2002. Risk Prevention Plan for floods and surface runoff. Methodology for defining the surface runoff hazard: Hydrogeomorphological approach, Departmental Equipment Directorate 76.
- Hauchard, E., Delahaye, D., Freiré-Diaz, S., 2002. Fractal organization of the soil occupation: consequences on the runoff and gully erosion in arable cropping areas. *Géomorphologie: relief, processus, environnement* 8, 181–196.
- Hauchard, E., Laignel, B., 2008. Morphotectonic evolution of the north-western margin of the Paris Basin. *Zeitschrift für Geomorphologie* 52, 463–488. doi:10.1127/0372-8854/2008/0052-0463
- Hewlett, J.D., Hibbert, A.R., 1967. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. *Forest hydrology* 275–290.
- Heyns, F.J., 2000. Railway track drainage design techniques. Doctoral Dissertations Available from Proquest 1–354. AAI9978506.
- Hjerdt, K.N., McDonnell, J.J., Seibert, J., Rodhe, A., 2004. A new topographic index to quantify downslope controls on local drainage. *Water Resources Research* 40, W05602. doi:10.1029/2004WR003130

- Hogan, R.J., Mason, I.B., 2012. Deterministic forecasts of binary events. *Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*, Second Edition 31–59. doi:10.1002/9781119960003.ch3
- Horn, B.K., 1981. Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of the IEEE* 69, 14–47.
- Horton, R.E., 1945. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological society of America bulletin* 56, 275–370.
- Horton, R.E., 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions, American Geophysical Union* 14, 446–460. doi:10.1029/TR014i001p00446
- Horton, R.E., 1932. Drainage-basin characteristics. *Transactions, American Geophysical Union* 13, 350. doi:10.1029/TR013i001p00350
- Hudson, N., 1995. *Soil Conservation*, Third Edition, Norman Hudson. 1995. Iowa State University Press, Ames, IA. 392 pages. ISBN: 0-8138-2372-2.
- Hudson, N., 1993. Field measurement of soil erosion and runoff. Num 68. 193 p. Food & Agriculture Org. ISBN: 9251034060, 9789251034064
- IPCC, 2014. IPCC fifth assessment report. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Geneva.
- IPCC, 2003. IPCC Third Assessment Report - Climate Change 2001: 2.3.2.1 Palaeoclimate proxy indicators.
- Jaillet, C., Poulard, C., Breil, P., 2012. A5 - Méthodes de cartographie du ruissellement (au sens de la Directive Inondation) - Synthèse des méthodes de cartographie des inondations par ruissellement en France (Convention "prévention des inondations"). Irstea rapport. Lyon.
- Javelle, P., Demargne, J., Defrance, D., Pansu, J., Arnaud, P., 2014. Evaluating flash-flood warnings at ungauged locations using post-event surveys: a case study with the AIGA warning system. *Hydrological Sciences Journal* 59, 1390–1402. doi:10.1080/02626667.2014.923970
- Julien, P.Y., Leon, C., 2000. Mud floods, mudflows and debris flows. Classification, rheology and structural design. *Jornadas de Investigación JIFI*.
- Kelman, I., 2015. Climate change and the Sendai framework for disaster risk reduction. *International Journal of Disaster Risk Science* 6, 117–127.
- Khuat Duy, B., 2011. Modélisation spatialement distribuée et physiquement basée d'écoulements hydrologiques et hydrodynamiques pour l'aide à la gestion d'ouvrages hydrauliques. Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique.
- Klasing-Chen, M., Le Masson, P., Weil, B., Laousse, D., Akin, P., Lagadec, L.-R., 2017. How can we create mutually beneficial industry-university collaborations? Identifying a gap in collaborations design. Presented at the 21st International Conference on Engineering Design, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- La Documentation française, 1999. Plans de prévention des risques naturels : Risques d'inondation.
- Lacas, J.G., Voltz, M., Gouy, V., Carluer, N., Gril, J.J., 2005. Using grassed strips to limit pesticide transfer to surface water: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 25, 253–266. doi:10.1051/agro:2005001
- Lagadec, L.-R., Breil, P., Chazelle, B., Braud, I., Moulin, L., 2016a. Use of post-event survey of impacts on railways for the evaluation of the IRIP method for surface runoff susceptibility mapping. Presented at the FloodRisk conference, Lyon, France.
- Lagadec, L.-R., Moulin, L., Braud, I., Chazelle, B., Breil, P., Submitted in 2017. A surface runoff mapping method for optimizing risk analysis on railways. *Safety Sciences*.
- Lagadec, L.-R., Patrice, P., Chazelle, B., Braud, I., Dehotin, J., Hauchard, E., Breil, P., 2016b. Description and evaluation of an intense surface runoff susceptibility mapping method. *Journal of Hydrology*. doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.05.049
- Lal, R., 2001. Soil degradation by erosion. *Land degradation & development* 12, 519–539.
- Landemaine, V., 2017. Erosion des sols et transferts sédimentaires sur les bassins versants de l'Ouest du Bassin de Paris : analyse, quantification et modélisation à l'échelle pluriannuelle. Thèse de doctorat. Université de Rouen.
- Langlois, P., Delahaye, D., 2002. RuiCells, automate cellulaire pour la simulation du ruissellement de surface. *Revue internationale de géomatique* 12, 461–487.
- Laverne, G., 2013. Application et validation d'un outil de cartographie des zones de ruissellement dans le contexte ferroviaire : identification des sites soumis aux inondations par ruissellement (Mémoire de fin d'études, confidentiel). SNCF Projets Systèmes Ingénierie.

- Le Bihan, G., 2016. Modèles hydrologiques régionaux pour la prévision distribuée des crues rapides: vers une estimation des impacts et des dommages potentiels. Thèse de doctorat. Université Bretagne Loire.
- Le Bissonnais, Y., Cerdan, O., Lecomte, V., Benkhadra, H., Souchere, V., Martin, P., 2005. Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. *Catena* 62, 111–124. doi:10.1016/j.catena.2005.05.001
- Le Bissonnais, Y., Montier, C., Jamagne, M., Daroussin, J., King, D., 2002. Mapping erosion risk for cultivated soil in France. *Catena* 46, 207–220. doi:10.1016/S0341-8162(01)00167-9
- Le Bissonnais, Yves, Thorette, J., Bardet, C., Daroussin, J., 2002. L'érosion hydrique des sols en France. Rapport INRA et IFEN. 108 p.
- Le Gouée, P., Delahaye, D., Bermond, M., Marie, M., Douvinet, J., Viel, V., 2010. SCALES: a large-scale assessment model of soil erosion hazard in Basse-Normandie (northern-western France). *Earth Surface Processes and Landforms* 35, 887–901. doi: 10.1002/esp.1942.
- Le Gouee, P., Delahaye, D., Bermond, M., Marie, M., Douvinet, J., Viel, V., 2010. SCALES: a large-scale assessment model of soil erosion hazard in Basse-Normandie (northern-western France). *Earth Surface Processes and Landforms* 35, 887–901. doi:10.1002/esp.1942
- Leblois, E., Creutin, J.-D., 2013. Space-time simulation of intermittent rainfall with prescribed advection field: Adaptation of the turning band method. *Water Resources Research* 49, 3375–3387. doi: 10.1002/wrcr.20190.
- Lee, T.C.K., Zwiers, F.W., Tsao, M., 2008. Evaluation of proxy-based millennial reconstruction methods. *Climate Dynamics* 31, 263–281. doi:10.1007/s00382-007-0351-9
- Legros, J., 2014. Étude de l'information apportée par une méthode de cartographie des zones à ruissellement intense dans la modélisation des débits liés à ce type d'inondation. Mémoire de master. Irstea Lyon Unité de recherche Hydrologie - Hydraulique.
- LENE loi portant engagement national pour l'environnement, 2010. LENE loi portant engagement national pour l'environnement, NOR : DEVX0822225L.
- Leone, F., Vinet, F., 2006. La vulnérabilité, un concept fondamental au coeur des méthodes d'évaluation des risques naturels. La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. *Analyses géographiques—Géorisques* 9–25.
- Ludwig, B., 2000. Les déterminants agricoles du ruissellement et de l'érosion-De la parcelle au bassin versant. *Ingénieries-EAT. IRSTEA édition 2000*, p. 37 - p. 47. <hal-00464068>
- Magne, L., 2010. Histoire sémantique du risque et de ses corrélats: suivre le fil d'Ariane étymologique et historique d'un mot clé du management contemporain. Presented at the Journées d'histoire de la comptabilité et du management, France. doi:<halshs-00465954>
- Marty, F., Thevenet, G., 2006. Méthodologie de cartographie de l'aléa ruissellement et coulées boueuses. Utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG) comme aide à la décision. JNGG2006: Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingenieur, Lyon, France, 27-29 juin 2006.
- Maurer, H., Rudzikaite, L., Kiel, J., Partzsch, I., Pelikan, V., Sedlacek, N., Mitsakis, E., Stamos, I., Papanikolaou, A., Celano, M., 2012. Weather Extremes: Assessment of Impacts on Transport Systems and Hazards for European Regions. Weather project synthesis report. doi:<hal-00803668>
- Mazagol, P.-O., Martin, R., Porteret, J., Thyriot, C., Etlicher, B., 2008. Pré-détermination de zones humides sur le bassin Loire-Bretagne, in: SIG 2008: Conférence Francophones ESRI.
- Mellal, L., 2014. Application de la méthode de cartographie du ruissellement IRIP (Indicateur du Ruissellement Intense pluvial) sur la ligne à grande vitesse Paris-Lyon (Mémoire de fin d'études, confidentiel). Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et SNCF Projets Systèmes Ingénierie.
- Meunier, M., 1991. *Éléments d'hydraulique torrentielle*. 278 p. Anthony : Edition Cemagref 1991. ISBN : 2853622630.
- Middleton, G.V., Hampton, M.A., 1973. Sediment gravity flows: mechanics of flow and deposition: in Middleton, GV, and AH Bouma (eds.), *Turbidites and deep sea sedimentation: Soc. Economic Paleontologists and*.
- Ministère de l'Agriculture, 1980. Synthèse Nationale sur les crues des petits bassins versants. Fascicule 1 : éléments de pluviométrie ; fascicule 2 : la méthode SOCOSE ; fascicule 3 : la méthode CRUPEDIX ; fascicule 4 : caractéristiques averses-crues.

- Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, 1999. Plans de prévention des risques naturels (PPR): risques d'inondation: guide méthodologique. La Documentation française, France.
- Montgomery, D.R., 2007. Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104, 13268–13272.
- Montoroi, J.-P., 2012. Rôle des sols sur la genèse des inondations, in: *Publications Du Symposium Européen Sur Les Problèmes Actuels de La Protection Contre Les Inondations de Mars 2012*.
- Musy, A., 2005. Cours d'hydrologie générale de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne [WWW Document]. URL <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre5/main.html> (accessed 1.7.15).
- Naulin, J.-P., Payraastre, O., Gaume, E., 2013. Spatially distributed flood forecasting in flash flood prone areas: Application to road network supervision in Southern France. *Journal of Hydrology* 486, 88–99. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.01.044
- Nearing, M. A., Foster, G. R., Lane, L. J., & Finkner, S. C. (1989). A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology. *Transactions of the ASAE*, 32(5), 1587-1593.
- Nicolas, M., 2010. Étude expérimentale et numérique du ruissellement de surface: effets des variations d'intensité de la pluie. Application à une parcelle de vigne en Cévennes-Vivarais. Thèse de doctorat. Université Joseph-Fourier-Grenoble I.
- Noisette, E., 2015. Les risques liés à l'eau et le système ferroviaire, Appui à une production de synthèse et de communication sur les risques liés à l'eau et le système ferroviaire et réflexion dans un contexte organisationnel en évolution. Mémoire de master, confidentiel . SNCF Réseau et INPG ENSE3, Paris, France.
- Observatoire des risques naturels, n.d. Le Risque inondation - Observatoire des Risques Naturels en Languedoc Roussillon [WWW Document]. URL <http://www.laregion-risquesnaturels.fr/212-risques-en-lr.htm> (accessed 4.5.17).
- Office québécois de la langue française (OQLF), ministère des Services gouvernementaux québécois (MSG), 2013. Vocabulaire de la gestion du risque [WWW Document]. URL [http://www.oqlf.gouv.qc.ca/ressources/bibliotheque/dictionnaires/terminologie\\_risque/index.html](http://www.oqlf.gouv.qc.ca/ressources/bibliotheque/dictionnaires/terminologie_risque/index.html) (accessed 4.11.17).
- Onda, Y., Komatsu, Y., Tsujimura, M., Fujihara, J., 2001. The role of subsurface runoff through bedrock on storm flow generation. *Hydrological Processes* 15, 1693–1706. doi:10.1002/hyp.234
- Onda, Y., Tsujimura, M., Fujihara, J., Ito, J., 2006. Runoff generation mechanisms in high-relief mountainous watersheds with different underlying geology. *Journal of Hydrology* 331, 659–673. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.06.009
- ONEMA, 2014. La politique publique de l'eau en France. Vidéo d'information. <https://vimeo.com/44235171>
- Ortega, K.L., Smith, T.M., Manross, K.L., Kolodziej, A.G., Scharfenberg, K.A., Witt, A., Gourley, J.J., 2009. The severe hazards analysis and verification experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society* 90, 1519–1530.
- Padilla, A., Pulido-Bosch, A., Mangin, A., 1994. Relative Importance of Baseflow and Quickflow from Hydrographs of Karst Spring. *Ground Water* 32, 267–277. doi:10.1111/j.1745-6584.1994.tb00641.x
- Pams-Capoccioni, C., Nivon, D., Amblard, J., De cesare, G., Ghilardi, T., 2015. Risk analysis for railway traffic of overflowing of the drainage system on High Speed Lines. *La Houille Blanche* 39–45. doi:10.1051/lhb/20150044
- Parlement européen, Conseil européen, 2000. Directive 2000/60/CE pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.
- Patrice, P., 2015. Application de la méthode IRIP sur le bassin versant de la Lézarde. Rapport Irstea. IRSTEA Lyon Unité de recherche Hydrologie Hydraulique.
- PCRaster documentation, n.d. pccalc and Python operations — PCRaster 4.0.3 documentation [WWW Document]. URL <http://pccraster.geo.uu.nl/pccraster/4.1.0/doc/manual/operations.html> (accessed 4.13.17).
- PCRaster Python extension, 2010. Python Extension. PCRaster.

- Pesce, S., Martin-Laurent, F., Rouard, N., Robin, A., Montuelle, B., 2010. Evidence for adaptation of riverine sediment microbial communities to diuron mineralization: incidence of runoff and soil erosion. *J. Soils Sediments* 10, 698–707. doi:10.1007/s11368-010-0202-x
- Philip, J.R., 1998. Infiltration into crusted soils. *Water Resources Research* 34, 1919–1927. doi:10.1029/98WR01207
- Pidwirny, M., 2006. *The Hydrological Cycle, Fundamentals of Physical Geography*, 2nd Edition. ed.
- Pierson, T.C., Costa, J.E., 1987. A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. *Reviews in Engineering Geology* 7, 1–12. doi:10.1130/REG7-p1
- Pimentel, D., 2006. Soil erosion: a food and environmental threat. *Environment, development and sustainability* 8, 119–137.
- Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., others, 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science* 267, 1117.
- Piney, S., 2009. Etude bibliographique de trois méthodologies appliquées au risque érosion: synthèse et perspective en vue d'une cartographie départementale du risque de ruissellement. Rapport. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- Pollet, N., Mihailovitch, F., Terpereau, J.M., Narcy, A., 2014. Management des risques naturels intégré au système ferroviaire. 19<sup>ème</sup> congrès de Maitrise des Risques et Sureté de Fonctionnement. Dijon 21-23 octobre 2014.
- Pons, F., Delgado, J.-L., Guero, P., Berthier, E., 2010a. EXZECO: a gis and dem based method for pre-determination of flood risk related to direct runoff and flash floods. Presented at the 9th International Conference on Hydroinformatics, Tianjin, CHINA.
- Pons, F., Delgado, J.L., Guero, P., Berthier, E., Kerloc'h, B., Piney, S., Felts, D., 2010b. Une contribution à l'évaluation de l'aléa inondation par ruissellement et crues soudaines, in: Actes Du Colloque SimHydro 2010. pp. 2–4.
- Poulard, C., Breil, P., 2012. A5 - Méthodes de cartographie des inondations par ruissellement - Bibliographie européenne et perspectives (dont Directive Inondation) Apports potentiels d'IRIP (Convention "prévention des inondations"). Rapport. Irstea.
- PRIM, 2010. Les Plans de Prévention des Risques Naturels (PPRN) [WWW Document]. URL <http://www.risquesmajeurs.fr/les-plans-de-prevention-des-risques-naturels-ppr> (accessed 4.5.17).
- Python, n.d. Welcome to Python.org [WWW Document]. Python.org. URL <https://www.python.org/> (accessed 4.13.17).
- Rakotomalala, R., 2011. Etude des dépendances - Variables qualitatives Tableau de contingence et mesures d'association (No. version 2.0). Support de cours. Université Lumière Lyon 2.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling, in: *Watershed Management in the Eighties*: ASCE, pp. 293–299.
- Réménieras, G., 1980. *L'hydrologie de l'ingénieur*. 413 p. Laboratoire national d'hydraulique, Chatou Publications
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C., others, 1997. *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. US Government Printing Office Washington, DC.
- Renn, O., Klinke, A., 2004. Systemic risks: a new challenge for risk management. *EMBO reports* 5, S41–S46.
- Reulier, R., Delahaye, D., Viel, V., Preux, T., 2015. L'érosion des sols sévit aussi dans le bocage! *Faune Sauvage*, 2015, p. 43-47. <hal-01485837>
- Rey, F., Ballais, J.-L., Marre, A., Rovéra, G., 2004. Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. *Comptes Rendus Geoscience* 336, 991–998. doi:10.1016/j.crte.2004.03.012
- Riaza, A., García-Meléndez, E., Suárez, M., Müller, A., Pascual, L., 2004. Estimation of Doline Collapse Hazard With DAIS 7915 Hyperspectral Data, in: *Proceedings First Mediterranean Conference on Earth Observation-Remote Sensing (MeCEO)*, Belgrad (Serbia). pp. 349–355.
- Richet, J.-B., Ouvry, J.-F., Saunier, M., 2016. The role of vegetative barriers such as fascines and dense shrub hedges in catchment management to reduce runoff and erosion effects: Experimental evidence of efficiency, and conditions of use. *Ecological Engineering*.
- Roche, M., 1963. *Hydrologie de surface*. Gauthier-Villars, Paris.

- Rubin, J., 1967. Optimal classification into groups: An approach for solving the taxonomy problem. *Journal of Theoretical Biology* 15, 103–144. doi:10.1016/0022-5193(67)90046-X
- SAGA GIS, n.d. SAGA - System for Automated Geoscientific Analyses [WWW Document]. URL <http://www.saga-gis.org/en/index.html> (accessed 4.13.17).
- SAGA GIS documentation, n.d. Full Module Index / SAGA-GIS Module Library Documentation (v2.2.3) [WWW Document]. URL [http://www.saga-gis.org/saga\\_tool\\_doc/2.2.3/a2z.html](http://www.saga-gis.org/saga_tool_doc/2.2.3/a2z.html) (accessed 4.13.17).
- Saint-Marc, C., 2017. Formalisation et géovisualisation d'évènements historiques issus de risques naturels pour la compréhension des dynamiques spatiales : Application aux inondations ayant touché le système ferroviaire français. Thèse de doctorat. Université Grenoble-Alpes.
- Saint-Marc, C., Capoccioni, C.P., Anne, R., Chenier, D., 2016. L'étude des inondations historiques majeures et leurs impacts. *Revue Generale des Chemins de Fer* 263.
- Saint-Marc, C., Chenier, D., Coeur, D., Capoccioni, C.P., Davoine, P.-A., Villanova-Oliver, M., 2014. Apprendre du passé pour optimiser la prévention et la gestion des inondations sur le ferroviaire, in: *Symposium International GEORAIL 2014*.
- Saint-Martin, C., Fouchier, C., Javelle, P., Douvinet, J., Vinet, F., 2016. Assessing the exposure to floods to estimate the risk of flood-related damage in French Mediterranean basins, in: *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences, p. 04013.
- Sarrazin, B., 2012. MNT et observations multilocales du réseau hydrographique d'un petit bassin versant rural dans une perspective d'aide à la modélisation hydrologique spatialisée. Thèse de doctorat. Université de Grenoble.
- Sauret, B., 1987. Coulées boueuses. Laves torrentielles. *Bull. Liars. Lalm. P.* et 151.
- Schmocker-Fackel, P., Naef, F., Scherrer, S., 2007. Identifying runoff processes on the plot and catchment scale. *Hydrology and Earth System Sciences* 11, 891–906. doi:10.5194/hess-11-891-2007
- Schumm, S.A., 1956. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological Society of America Bulletin* 67, 597–646. doi:10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2
- SETRA, 2006. Guide technique pour l'assainissement routier du Service d'Etudes Techniques de Routes et Autoroutes.
- Shabou, S., 2016. Extrêmes hydre-météorologiques & Exposition sur les routes Contribution à MobRISK: Modèle de simulation de l'exposition des mobilités quotidiennes aux crues rapide. Thèse de doctorat. Université Grenoble Alpes.
- Sivapalan, M., Beven, K., Wood, E.F., 1987. On hydrologic similarity: 2. A scaled model of storm runoff production. *Water Resources Research* 23, 2266–2278.
- SMBV Caux Seine, n.d. SMBVCS - L'hydraulique douce [WWW Document]. URL <http://www.sbvcauxseine.fr/index.php/l-hydraulique-douce> (accessed 4.6.17).
- SMBV de la Pointe de Caux, n.d. Techniques d'hydraulique douce - SMBV Pointe de Caux - Syndicat Mixte des Bassins Versants [WWW Document]. URL [http://www.smbv-pointedecaux.fr/web/techniques\\_d\\_hydraulique\\_douce.html](http://www.smbv-pointedecaux.fr/web/techniques_d_hydraulique_douce.html) (accessed 4.6.17).
- Smith, R.E., Goodrich, D.C., Woolhiser, D.A., Unkrich, C.L., 1995. KINEROS-A kinematic runoff and erosion model. *Computer models of watershed hydrology*. 20, 627–668.
- Stanski, H.R., Wilson, L.J., Burrows, W.R., 1989. Survey of common verification methods in meteorology. *World Meteorological Organization Geneva*.
- Tennakoon, N., Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., Nimbalkar, S., Neville, T., 2012. The Role of Ballast-Fouling Characteristics on the Drainage Capacity of Rail Substructure. *Geotechnical Testing Journal* 35, 104107. doi:10.1520/GTJ104107
- Tetzlaff, D., McDonnell, J.J., Uhlenbrook, S., McGuire, K.J., Bogaart, P.W., Naef, F., Baird, A.J., Dunn, S.M., Soulsby, C., 2008. Conceptualizing catchment processes: simply too complex? *Hydrological Processes* 22, 1727–1730. doi:10.1002/hyp.7069
- The european floods directive, 2007. EUR-Lex - 32007L0060 - EN - EUR-Lex [WWW Document]. URL <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32007L0060> (accessed 1.19.17).
- Thompson, D.B., 2007. The rational method. *RO Anderson Engineering*.
- Thompson, J., Cassidy, R., Doody, D.G., Flynn, R., 2014. Assessing suspended sediment dynamics in relation to ecological thresholds and sampling strategies in two Irish headwater catchments. *Sci. Total Environ.* 468, 345–357. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.08.069

- Thywissen, K., 2006. Components of risk: a comparative glossary. UNU- EHS.
- Trinh, V.N., 2011. Comportement hydromécanique de matériaux constitutifs de plateformes ferroviaires anciennes. Thèse de doctorat. Université Paris-Est.
- UNDHA, 1992. Internationally agreed glossary of basic terms related to disaster management. UN DHA (United Nations Department of Humanitarian Affairs), Geneva.
- UNISDR, n.d. History - UNISDR [WWW Document]. URL <http://www.unisdr.org/who-we-are/history> (accessed 4.5.17).
- USDA, 2000a. Changes in Average Annual Soil Erosion by Water on Cropland and CRP Land, 1992 – 1997. Natural Resources Conservation Service, USDA.
- USDA, 2000b. Changes in Average Annual Soil Erosion by Wind on Cropland and CRP Land, 1992 – 1997. Natural Resources Conservation Service, USDA.
- Versini, P.A., 2007. Surveillance du risque hydrologique diffus le long des itinéraires routiers. Thèse de doctorat. Ecole des Ponts ParisTech.
- Versini, P.-A., Gaume, E., Andrieu, H., 2010a. Assessment of the susceptibility of roads to flooding based on geographical information - test in a flash flood prone area (the Gard region, France). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10, 793–803. doi:/10/793/2010/
- Versini, P.-A., Gaume, E., Andrieu, H., 2010b. Application of a distributed hydrological model to the design of a road inundation warning system for flash flood prone areas. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10, 805–817. doi:/10/805/2010/
- Vinet, F., 2007. Approche institutionnelle et contraintes locales de la gestion du risque Recherches sur le risque inondation en Languedoc-Roussillon. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches. Université Paul Valéry-Montpellier III.
- Vinet, F., Boissier, L., Saint-Martin, C., 2016. Flashflood-related mortality in southern France: first results from a new database. *E3S Web Conf.* 7, 06001. doi:10.1051/e3sconf/20160706001
- Weiler, M., Naef, F., 2003. Simulating surface and subsurface initiation of macropore flow. *Journal of Hydrology* 273, 139–154. doi:10.1016/S0022-1694(02)00361-X
- White, E.L., Aron, G., White, W.B., 1986. The influence of urbanization of sinkhole development in central Pennsylvania. *Environmental Geology and Water Sciences* 8, 91–97. <https://doi.org/10.1007/BF02525562>
- Wikipedia, 2017. Ligne de Paris-Saint-Lazare au Havre. Wikipedia l'encyclopédie libre.
- Wischmeier, W.H., Mannering, J.V., 1969. Relation of Soil Properties to its Erodibility. *Soil Science Society of America Journal* 33, 131. doi:10.2136/sssaj1969.03615995003300010035x
- Woolhiser, D.A., Smith, R.E., Goodrich, D.C., 1990. KINEROS: a kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- WWRP/WGNE Joint Working Group on Forecast Verification Research, 2015. Description of methods for forecast verification [WWW Document]. URL <http://www.cawcr.gov.au/projects/verification/> (accessed 6.14.17).
- Zhang, J.X., Chang, K.-T., Wu, J.Q., 2008. Effects of DEM resolution and source on soil erosion modelling: a case study using the WEPP model. *International Journal of Geographical Information Science* 22, 925–942. doi:10.1080/13658810701776817



## TABLE DES FIGURES

FIGURE I-1: MODELE CONCEPTUEL DU CYCLE DE L'EAU (SOURCE: AGENCE DE L'EAU SEINE-NORMANDIE).	7
FIGURE I-2: LES TROIS GRANDS TYPES D'ECOULEMENT DE SURFACE, DE SUBSURFACE ET SOUTERRAIN (SOURCE : MUSY, 2005).....	8
FIGURE I-3: SCHEMA D'UN BASSIN VERSANT ET D'UN SOUS-BASSIN VERSANT (SOURCE: COMMUNAUTE DE COMMUNES DU PAYS D'ANCENIS).....	9
FIGURE I-4: SCHEMA DE BASSINS VERSANTS TOPOGRAPHIQUES ET DE BASSINS VERSANTS REELS TENANT COMPTE DES ECOULEMENTS SOUTERRAINS (SOURCE : CEPRI, 2015) .....	9
FIGURE I-5: ILLUSTRATION D'UN ENSEMBLE DE BASSINS VERSANTS INTERCEPTE PAR UN LINEAIRE .....	9
FIGURE I-6: REPRESENTATION DES DEUX PROCESSUS DE GENESE DU RUISSELLEMENT (SOURCE: MUSY, 2005).....	10
FIGURE I-7: DETECTION THEORIQUE PAR MESURE <i>IN SITU</i> DES DEUX PROCESSUS DE GENESE DU RUISSELLEMENT, HORTONIEN (A) ET SUR SURFACE SATUREE (B) (SOURCE : DEHOTIN ET AL., 2015) .....	11
FIGURE I-8: PHOTOS D'EROSION PAR RUISSELLEMENT, A GAUCHE EN SEINE-MARITIME (SOURCE : SYNDICAT MIXTE DU PAYS PLATEAU DE CAUX MARITIME), A DROITE AU CANADA DANS LA REGION DU NOUVEAU-BRUNSWICK (SOURCE: AAC AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA).....	12
FIGURE I-9: CLASSIFICATION DES ECOULEMENTS CHARGES, LA LIGNE ROUGE MONTRE LES ECOULEMENTS CONSIDERES COMME INDUITS PAR LE RUISSELLEMENT (SOURCE : ADAPTE DE FORT ET AL., 2015 ET MEUNIER, 1991) .....	12
FIGURE I-10: PHOTOS DE DIFFERENTS TYPES D'ECOULEMENTS INDUITS PAR LE RUISSELLEMENT. A, ECOULEMENT HYPERCONCENTRE, PEROU, MARS 2017 (SOURCE: DAVID SIM, XANIA NEWS); B, LAVE TORRENTIELLE, VALAIS, SUISSE, JUILLET 2016 (SOURCE: DAVE PETLEY, YOUTUBE); C, COULEE DE BOUE, SAVOIE, SEPTEMBRE 2008 (SOURCE : SEBASTIEN GOMINET, IRMA) ; D, GLISSEMENT, ISERE, JUIN 2002 (SOURCE : SEBASTIEN GOMINET, IRMA) .....	13
FIGURE I-11: DEPOTS DE BOUE ; A GAUCHE, EN BELGIQUE (SOURCE : EVRARD, 2008) ; A DROITE, A VALDAMPIERRE (OISE) EN 2014 (SOURCE: FRANCE 3 PICARDIE / JEAN-LOUIS CROCI).....	14
FIGURE I-12: PHOTO D'UN EFFONDREMENT EN SEINE-MARITIME EN 2001 (SOURCE: CETE NC).....	15
FIGURE I-13: HYDROGRAMMES A L'EXUTOIRE DE DEUX BASSINS VERSANTS DE FORMES DIFFERENTES, LE BASSIN DE FORME CONCENTRIQUE A UN DEBIT MAXIMUM PLUS IMPORTANT ET UN TEMPS DE CONCENTRATION PLUS COURT. (SOURCE : MUSY, 2005) .....	16
FIGURE I-14: RECENSEMENT DE 63 INDICES MORPHOMETRIQUES PAR DOUVINET ET AL. (2008) DANS LEUR REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	17
FIGURE I-15: TRIANGLE DES TEXTURES, REPRESENTATION GRAPHIQUE DES DIFFERENTES TEXTURES DE SOLS SELON LEUR TENEUR EN SABLE, LIMON ET ARGILE.....	18
FIGURE I-16: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA STRUCTURE D'UN SOL COMPOSE DE DIFFERENTS TYPES DE SOLS APPELES AUSSI HORIZONS .....	18
FIGURE I-17: FORMATION D'UNE CROUTE DE BATTANCE PAR L'IMPACT DES GOUTTES DE PLUIE (DE A VERS C) (SOURCE: Y. LE BISSONNAIS).....	19

FIGURE I-18: PHOTOS AERIENNES OU LE SENS DU TRAVAIL DU SOL PEUT INFLUENCER LA DIRECTION DES ECOULEMENTS, A GAUCHE, LES ECOULEMENTS ONT ETE INFLUENCES, A DROITE, LES ECOULEMENTS ONT SUIVI LE CHEMIN DE PLUS GRANDE PENTE (SOURCE : DELAHAYE, 2002).....	20
FIGURE I-19 : PHOTOS D'INTER-RANGS DESHERBES OU ON PEUT OBSERVER DE L'EROSION ET DES LAISSES DE CRUE AUTOUR DES PIEDS DE VIGNES. (OCTOBRE 2014, HERAULT) .....	20
FIGURE I-20: CARACTERISATION DES DOMMAGES PAR NATURE D'ALEA (SOURCE : BOURGUIGNON, 2014) .....	22
FIGURE I-21: COUT DES DOMMAGES INDUITS PAR DES INONDATIONS BOUEUSES POUR 9 MUNICIPALITES BELGES (SOURCE : EVRARD, 2008) .....	23
FIGURE I-22: ESTIMATION DES COUTS DES DOMMAGES SUR LES RESEAUX FERRES PAR TYPE D'ALEA ET PAR TYPE DE COUTS (MOYENNE SUR LES RESEAUX FERRES EUROPEENS), EXTRAIT DU PROJET WEATHER (MAURER ET AL, 2012) .....	24
FIGURE I-23 : CHRONOLOGIE DES DIFFERENTES LOIS FRANCAISES ET EUROPEENNES POUR LA GESTION DES RESSOURCES EN EAU .....	25
FIGURE I-24: CHRONOLOGIE DES DIFFERENTES LOIS FRANCAISES ET EUROPEENNES POUR LA GESTION DES RISQUES LIES A L'EAU .....	26
FIGURE I-25: VISION SYSTEMIQUE DES RISQUES (SOURCE: ADAPTE DE MAURER ET AL., 2012) .....	30
FIGURE I-26: CARTE DES 23 REGIONS QUI SE REPARTISSENT LES TRAVAUX D'INGENIERIE SUR LE RESEAU FERRE NATIONAL (RFN) .....	32
FIGURE I-27: LES ELEMENTS CONSTITUTIFS DE L'INFRASTRUCTURE FERROVIAIRE (EXTRAIT DE NOISETTE, 2015).....	33
FIGURE I-28: REMBLAI SCHEMA ET PHOTO .....	33
FIGURE I-29: DEBLAI SCHEMA ET PHOTO .....	34
FIGURE I-30: SCHEMA D'UN PROFIL EN LONG D'UNE LIGNE INDIQUANT LES OUVRAGES EN TERRE ENVELOPPE (OTE) .....	34
FIGURE I-31: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA CONSTITUTION DE LA VOIE FERREE (SOURCE: SIDURON, 2014).....	35
FIGURE I-32: SCHEMA DU RESEAU HYDRAULIQUE .....	35
FIGURE I-33: EXEMPLES D'OUVRAGES HYDRAULIQUES DE TRAVERSEE (DE GAUCHE A DROITE: AQUEDUC, BUSE, DALOT) .....	36
FIGURE I-34: PHOTO D'UN FOSSE REVETU PLACE EN CRETE DE DEBLAI POUR INTERCEPTER LES ECOULEMENTS. L'EAU PLUVIALE EST ENSUITE ACHEMINEE VERS UN EXUTOIRE VIA UNE DECENTE D'EAU OU LA PROCHAINE JONCTION AVEC UN REMBLAI. ....	36
FIGURE I-35: EXEMPLES DE DISPOSITIFS DE DRAINAGE (DE GAUCHE A DROITE: DESCENTE D'EAU GRAND DEBIT, FOSSE BETON PREFABRIQUE A BARBACANE, FOSSE REVETUE A CIEL OUVERT) .....	37
FIGURE I-36: SCHEMA D'UN BASSIN DE RETENTION AVEC SYSTEME DE SURVERSE .....	37
FIGURE I-37: PHOTO D'UNE BANDE ENHERBEE QUI PERMET LE DEPOT DES BOUES DE RUISSELLEMENT (SOURCE : FICHE SYNTHESE DE L'AREAS N°13).....	38
FIGURE I-38: FASCINE PLACEE EN TRANSVERSALE PAR RAPPORT AUX ECOULEMENTS (SOURCE : FICHE SYNTHESE DE L'AREAS N°12) .....	38
FIGURE I-39: LES FOSSES ET TALUS REDIRIGENT LES ECOULEMENTS EN LES RALENTISSANT ET EN FAVORISANT L'INFILTRATION (SOURCE : FICHE SYNTHESE DE L'AREAS N°15).....	38
FIGURE I-40: PHOTO D'UNE MARE TAMPON AVEC UN OUVRAGE DE FUITE (SOURCE : FICHE SYNTHESE DE L'AREAS N°16).....	38
FIGURE I-41: SCHEMA DES DIFFERENTS TYPES DE DESORDRES DANS LES CONFIGURATIONS EN DEBLAI...	40
FIGURE I-42: INONDATION DE LA VOIE PAR DES EAUX DE RUISSELLEMENT.....	40
FIGURE I-43: DEPOTS DE BOUE APRES LE PASSAGE D'EAUX DE RUISSELLEMENT.....	40
FIGURE I-44: DEPOTS DE MATERIAUX EN VOIE .....	40

FIGURE I-45: EMPORTEMENT LONGITUDINAL DE BALLAST PAR CIRCULATION D'EAU AU NIVEAU DE LA PISTE OU DU FOSSE .....	40
FIGURE I-46: EMPORTEMENT TRANSVERSAL DE BALLAST .....	41
FIGURE I-47: GLISSEMENT DE TALUS PAR STAGNATION D'EAU EN CRETE.....	41
FIGURE I-48: SCHEMA DES DIFFERENTS TYPES DE DESORDRES DANS LES CONFIGURATIONS EN REMBLAI	41
FIGURE I-49: COMPLEMENT D'UN OUVRAGE HYDRAULIQUE DE TRAVERSEE .....	42
FIGURE I-50: EMPORTEMENT D'UN REMBLAI FERROVIAIRE.....	42
FIGURE I-51: EROSION DU REMBLAI AVAL PAR PERCOLATION DANS LE CORPS DU REMBLAI .....	42
FIGURE I-52: AFFOUILLEMENT DU PIED DE REMBLAI.....	42
FIGURE I-53: SCHEMA DES DIFFERENTS TYPES DE DESORDRES AUX NIVEAUX DES JONCTIONS DEBLAI-REMBLAI .....	43
FIGURE I-54: TRANSITION REMBLAI DEBLAI AVEC UN DISPOSITIF HYDRAULIQUE.....	43
FIGURE I-55: LE PROCESSUS DE GESTION DES RISQUES LIES A L'EAU SUR L'INFRASTRUCTURE FERROVIAIRE FAIT INTERVENIR TOUTES LES ETAPES DE LA VIE D'UNE LIGNE ET REQUIERT UNE APPROCHE MULTI-METIER.....	44
FIGURE I-56: FORMULES DE CALCUL DE DEBITS UTILISES A SNCF SELON LES CRITERES DE SURFACE DE BASSIN VERSANT (BV) ET DE REGION (ADAPTE DU GUIDE DU SETRA, 2006).....	46
FIGURE I-57: LES LAISSES DE CRUE ENTRE LES DEUX VOIES NE SERONT PAS FORCEMENT RAPPORTEES PAR LES AGENTS DE TOURNEES PUISQUE NE PRESENTANT PAS DE DANGER DIRECT POUR LES CIRCULATIONS MAIS SONT TEMOINS D'UN PASSAGE D'EAU SUR LA VOIE FERREE ET DONC D'UNE SITUATION DANGEUREUSE A UN CERTAIN MOMENT (DEPARTEMENT HERAULT, 2014).....	48
FIGURE I-58: PROCESSUS D'UN DIAGNOSTIC DE LIGNE (SOURCE: ADAPTE DE LAGADEC ET AL., SOUMIS EN 2017 A SAFETY SCIENCE) .....	49
FIGURE I-59: DIFFERENTES FAÇONS DE DECOUPER LA LIGNE EN TRONÇONS D'ETUDES: LE DECOUPAGE SELON LES OUVRAGES EN TERRE, SELON LE RESEAU HYDRAULIQUE OU SELON LES LIMITES TOPOGRAPHIQUES (SOURCE: DIAGNOSTIC DE LIGNE BAYONNE-IRUN). .....	50
FIGURE I-60: PRINCIPE DE L'ANALYSE NOEUD PAPILLON (SOURCE: POLLET ET AL., 2014).....	51
FIGURE I-61: RAYONS D'ARCHIVES AU CENTRE NATIONAL DES ARCHIVES HISTORIQUES DU MANS .....	52
FIGURE I-62: PLAN DE PREVENTION DES RISQUES RUISSELLEMENT DE LA COMMUNE ASSIGNY (CHER) EFFECTUE PAR LE BUREAU D'ETUDE ALP'GEORISQUES PAR APPROCHE NATURALISTE (SOURCE: ADAPTEE DE LA CARTE DES ALEAS DE LA COMMUNE D'ASSIGNY) .....	58
FIGURE I-63: ILLUSTRATION D'EXZEKO, (A) UN PROFIL EN TRAVERS AVEC UNE ITERATION A +2M ET LA DETECTION DE DIFFERENTS POINTS BAS, (B) ET (C) DEUX CARTES FINALES D'EXZEKO, POUR 1 ET 1000 ITERATIONS SUR LA ZONE D'AIX-EN-PROVENCE, (D) LA LEGENDE DES CARTES (SOURCE: PONS ET AL., 2010A) .....	59
FIGURE I-64: EXTRAIT DE L'ARBRE DE DECISION POUR L'OCCUPATION DES SOLS DE TYPE 'TERRE AGRICOLE' (SOURCE: LE BISSONNAIS ET AL., 2001).....	60
FIGURE I-65: CARTE D'ALEA EROSION INTEGREE PAR PETITES REGIONS AGRICOLES POUR LA SAISON AUTOMNE (SOURCE: LE BISSONNAIS ET AL., 2001) .....	61
FIGURE I-66: PRINCIPE DE CONSTRUCTION DU MAILLAGE ET SORTIES DU MODELE RUCCELLS (SOURCE : DOUVINET ET AL., 2014).....	62
FIGURE I-67: ILLUSTRATION D'UNE CARTE D'ALEA RUISSELLEMENT SUR 5 PETITS BASSINS VERSANTS ET COMPARAISON AVEC DES TRACES DE RUISSELLEMENT OBSERVEES (SOURCE: GAILLARD, 2006).....	63
FIGURE I-68: MODELE CONCEPTUEL DU RUISSELLEMENT EN TROIS PROCESSUS: LA PRODUCTION, LE TRANSFERT ET L'ACCUMULATION .....	65
FIGURE I-69: SCHEMA DE CREATION DE LA CARTE DE SUSCEPTIBILITE A LA PRODUCTION, EN GRIS LES DONNEES D'ENTREE, EN COULEUR LA CARTE DE SORTIE.....	66

FIGURE I-70: SCHEMA DE CREATION DE LA CARTE DE SUSCEPTIBILITE AU TRANSFERT, EN GRIS LES DONNEES D'ENTREE (CSP DEVIENT UNE DONNEES D'ENTREE), EN COULEUR LA CARTE DE SORTIE .....	66
FIGURE I-71: SCHEMA DE CREATION DE LA CARTE DE SUSCEPTIBILITE A L'ACCUMULATION, EN GRIS LES DONNEES D'ENTREE (CSP DEVIENT UNE DONNEES D'ENTREE), EN COULEUR LA CARTE DE SORTIE .....	67
FIGURE I-72: ILLUSTRATION DE L'ALGORITHME PERMETTANT DE CREER LE PLAN DE DRAINAGE A PARTIR D'UN MNT (EXTRAIT DE PCRASTER DOCUMENTATION).....	69
FIGURE I-73: CHOIX DE LA VALEUR MODALE PARMIS UN ECHANTILLON DISCRET.....	70
FIGURE I-74: ILLUSTRATION DU CALCUL DES RUPTURES DE PENTE DANS LE LOGICIEL IRIP (ADAPTE DE MAZAGOL ET AL., 2008) .....	71
FIGURE I-75: EVOLUTION DE L'HUMIDITE DU SOL DURANT UN EPISODE PLUVIEUX POUR DIFFERENTS SITES DE MESURES (SOURCE: DEHOTIN ET AL., 2015).....	76
FIGURE I-76: CARTE DES DIFFERENCES ENTRE LA CARTE IRIP DE SUSCEPTIBILITE A LA PRODUCTION ET LA CARTE DE SENSIBILITE POTENTIELLE DES MILIEUX ISSUE DE SCALES SUR LE BASSIN VERSANT DU MERCIER (SOUS-BASSIN DE L'YZERON) (SOURCE: DE LAVENNE, 2010) .....	77
FIGURE I-77: COMPARAISONS VISUELLE ET STATISTIQUE ENTRE LES BASSINS DE RETENTION ET LA CARTE IRIP DE PRODUCTION SUR LE BASSIN VERSANT DE L'AZERGUES (SOURCE: BONNET-CARRIER ET AL., 2013) .....	78
FIGURE I-78: COMPARAISON ENTRE LE NOMBRE D'ARRETES CATNAT PAR COMMUNE ET LE TAUX DE SURFACES SENSIBLES AU RUISSELLEMENT D'APRES IRIP, SUR LE BASSIN DE LA LOIRE AMONT, EN CONSIDERANT TOUTE LA ZONE D'ETUDE (SANS VULNERABILITE) ET EN CONSIDERANT SEULEMENT LES ZONES URBAINES (AVEC VULNERABILITE) (SOURCE: DEHOTIN ET BREIL, 2011B).....	79
FIGURE I-79: EVALUATION DES CARTES ISSUES DU MODELE RUICELLS PAR COMPARAISON VISUELLE DE LA LOCALISATION D'IMPACTS POST-EVENEMENT ET AUX ZONES FORTEMENT EXPOSEES D'APRES LE RUICELLS (SOURCE: ADAPTE DE DOUVINET ET AL., 2013) .....	81
FIGURE I-80: L'EVALUATION D'UN MODELE DE PREVISIONS DE CRUES RAPIDES PAR COMPARAISON AVEC DES DONNEES D'IMPACTS VIA DES STATISTIQUES DE CONTINGENCE ET DES COMPARAISONS VISUELLES (SOURCE: CALIANNI ET AL., 2013).....	82
FIGURE I-81: EVALUATION DES RESULTATS D'UN MODELE DE PREVISION D'IMPACT PAR CALCUL DE PROBABILITES DE REUSSITE ET PAR REALISATION DE CARTES DES DIFFERENCES RELATIVES (SOURCE: LE BIHAN, 2016) .....	83
FIGURE II-1: CARTE DU TRONÇON ROUEN - LE HAVRE. SOURCE: JULES JANIN VERS 1845, GUIDE DU VOYAGEUR DE PARIS A LA MER PAR ROUEN ET LE HAVRE, PARIS, ERNEST BOURDIN EDITEUR (SD) .....	90
FIGURE II-2: PRESENTATION DU TRONÇON D'ETUDE ET DE SON BASSIN VERSANT SITUÉE DANS LE DEPARTEMENT DE LA SEINE-MARITIME ; LE BASSIN VERSANT D'ETUDE INTERCEPTE LES RIVIERES DE L'AUSTREBERTHE ET DU CAILLY.....	91
FIGURE II-3: PHOTOS DE ROUTES EN CAVEES IMPACTEES LORS D'UN EPISODE DE RUISSELLEMENT INTENSE SUR LE BASSIN VERSANT DE LA LEZARDE EN OCTOBRE 2013 (SOURCE : SYNDICAT MIXTE DE BASSIN VERSANT - SMBV - POINTE DE CAUX) .....	92
FIGURE II-4 : CARTE DES PROFONDEURS DE SOLS EN FRANCE METROPOLITAINE ; EXTRAIT DU SITE DU GIS SOL (GIS SOL, N.D.) .....	94
FIGURE II-5: REGLES DE PEDOTRANSFERT PERMETTANT DE CONVERTIR LES DONNEES TEXTURALES EN CLASSES D'ERODABILITE PAR PROJECTION DANS LES TRIANGLES DE TEXTURE REDECOURTES EN 5 CLASSES DE SENSIBILITE DE 1 (TRES FAIBLE) A 5 (TRES FORTE) (SOURCE : CERDAN ET AL., 2006 ET INRA/IFEN) .....	95
FIGURE II-6 : INFORMATIONS STATISTIQUES (M = MOYENNE, $\Sigma$ = ECART-TYPE) SUR LES DEUX CLASSES DE PENTES ET D'INDICES TOPOGRAPHIQUES .....	96
FIGURE II-7 : CARTE DE SUSCEPTIBILITE A LA PRODUCTION DE RUISSELLEMENT .....	96
FIGURE II-8 : INDICATEUR DE PERMEABILITE (AUTOMATIQUEMENT FAVORABLE SUR LES ZONES URBAINES) .....	97

FIGURE II-9 : INDICATEUR D'ÉPAISSEUR (AUTOMATIQUEMENT FAVORABLE SUR LES ZONES URBAINES) ..	97
FIGURE II-10 : INDICATEUR D'ÉRODABILITÉ (AUTOMATIQUEMENT DÉFAVORABLE SUR LES ZONES URBAINES) .....	97
FIGURE II-11 : INDICATEUR D'OCCUPATION DU SOL .....	97
FIGURE II-12 : INDICATEUR DE RELIEF (PENTE FORTE OU INDICE TOPOGRAPHIQUE FORT) .....	98
FIGURE II-13 : CARTE DE SUSCEPTIBILITÉ AU TRANSFERT DU RUISSELLEMENT .....	98
FIGURE II-14 : INDICATEUR DE LA PRODUCTION AMONT (VALABLE POUR LES CARTES DE TRANSFERT ET D'ACCUMULATION) .....	98
FIGURE II-15 : INDICATEURS DES RUPTURES DE PENTES CONVEXES .....	99
FIGURE II-16 : INDICATEUR DES AXES LINÉAIRES AU SOL .....	99
FIGURE II-17 : INDICATEUR DES PENTES FORTES .....	99
FIGURE II-18 : INDICATEUR DE COMPACTITÉ .....	99
FIGURE II-19 : CARTE DE SUSCEPTIBILITÉ À L'ACCUMULATION DU RUISSELLEMENT .....	100
FIGURE II-20 : INDICATEUR DE L'INDICE TOPOGRAPHIQUE .....	100
FIGURE II-21 : INDICATEUR DES PENTES FAIBLES .....	100
FIGURE II-22 : INDICATEUR DES RUPTURES DE PENTES CONCAVES .....	101
FIGURE II-23 : INDICATEUR DE COMPACTITÉ ET D'AIRE DRAINÉE (OPÉRATEUR OU) .....	101
FIGURE II-24 : LA CRÉATION DE LA BASE DE DONNÉES D'IMPACTS SE FAIT EN DEUX ÉTAPES, LA COLLECTE, RÉALISÉE PAR UNE ARCHIVISTE, ET LE TRAITEMENT, RÉALISÉ DANS LE CADRE DE LA THÈSE .....	102
FIGURE II-25 : LES QUATRE LIEUX D'ARCHIVES À VISITER POUR CAPITALISER LES DONNÉES HISTORIQUES SUR LA LIGNE PARIS - LE HAVRE .....	103
FIGURE II-26 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE RELATION N:N ENTRE DEUX TABLES .....	104
FIGURE II-27 : ILLUSTRATION DES TABLES « DOCUMENTS » ET « ÉVÉNEMENTS », LEUR ARCHITECTURE ET LEUR SYSTÈME DE REMPLISSAGE, LA TABLE « ÉVÉNEMENTS » SE REMPLIT AUTOMATIQUEMENT AVEC LE REMPLISSAGE DE LA TABLE « DOCUMENTS » .....	105
FIGURE II-28 : REPRODUCTION D'UN DOCUMENT DE 1935, DÉCRIVANT AVEC PRÉCISION L'ORIGINE DU DÉSORDRE ET LES POINTS KILOMÉTRIQUES IMPACTÉS .....	107
FIGURE II-29 : REPRODUCTION D'UN DOCUMENT DE 1966, ABORDANT UN PROBLÈME D'EAU STAGNANTE, MAIS NE DONANT PAS ASSEZ D'INDICATIONS SUR L'ORIGINE ET LA LOCALISATION POUR EXPLOITER L'INFORMATION .....	107
FIGURE II-30 : RÉPARTITION DES IMPACTS SELON LE NIVEAU D'INCERTITUDE DE L'INFORMATION .....	108
FIGURE II-31 : COUCHE D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE DES 62 IMPACTS LIÉS AU RUISSELLEMENT SUR LE TRONÇON D'ÉTUDE .....	108
FIGURE II-32 : FRÉQUENCES D'APPARITION DES DIFFÉRENTS NIVEAUX IRIP SUR TOUT LE BASSIN D'ÉTUDE, POUR LES CARTES D'ACCUMULATION, DE TRANSFERT ET POUR LA CARTE DU MAXIMUM D'ACCUMULATION ET TRANSFERT (A U T) .....	117
FIGURE II-33 : ILLUSTRATION DU CRITÈRE DE RECOUPEMENT DES ZONES TAMPON DE 25 M POUR CONSIDÉRER UN PIXEL COMME "ISOLE" .....	117
FIGURE II-34 : ILLUSTRATION DE DEUX ZONES OU LA ZONE TAMPON DE 25 M COUVRE L'ENSEMBLE DE L'EMPRISE FERROVIAIRE (A) ET OU LA ZONE TAMPON DE 25 M EST TROP PETITE PAR RAPPORT À L'EMPRISE FERROVIAIRE (B) .....	118
FIGURE II-35 : ILLUSTRATION DE LA MÉTHODE DE COMPTAGE DES TYPES DE CORRELATIONS EN MESURANT LES SURFACES DE RECOUPEMENT DES PIXELS IRIP ET DES ZONES IMPACTÉES DANS L'EMPRISE FERROVIAIRE .....	119
FIGURE II-36 : COMPARAISON VISUELLE DES RÉSULTATS POUR LES TESTS NUMÉROS 2, 5, 11 ET 16 .....	122
FIGURE II-37 : ILLUSTRATION D'UNE MÊME ZONE POUR DEUX TESTS DIFFÉRENTS OU LE SEUL CHOIX DE PRÉTRAITEMENT QUI CHANGE EST LA PRISE EN COMPTE (TEST N°2) OU NON (TEST N°1) D'UNE ZONE TAMPON AUTOUR DES PIXELS IRIP. ....	126

FIGURE II-38: LE RUISSELLEMENT EST ARRIVE EN UN POINT DE LA VOIE FERREE MAIS A PROVOQUE UN IMPACT ETENDU CAR LA CONFIGURATION DE L'INFRASTRUCTURE A MODIFIE LES ECOULEMENTS. ....	127
FIGURE II-39: EXTRAIT D'UN SCAN DE PLAN DE LIGNE, SCHEMA DE LA VOIE SELON SON AXE LONGITUDINAL .....	134
FIGURE II-40: CAPTURE D'ECRAN DE LA VIDEO DE LA LIGNE DE PARIS-SAINT-LAZARE A LE HAVRE DEPUIS LA CABINE DE CONDUITE.....	135
FIGURE II-41: CAPTUDE D'ECRAN DU SITE DE GEOPORTAIL© OU L'ON PEUT DISTINGUER LE TYPE DE PROFIL EN TRAVERS ET D'AUTRES ELEMENTS DE L'INFRASTRUCTURE TELS QUE LES PASSAGES SOUS VOIE .....	135
FIGURE II-42 : ILLUSTRATION SUR UNE ZONE REDUITE DES COUCHES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUES CREEES (FOND DE CARTE IGN AU 25000 <sup>EME</sup> ) .....	137
FIGURE II-43: ARBRE DE VULNERABILITE AVEC QUATRE FACTEURS, L'EXPOSITION, LE PROFIL DE L'OUVRAGE, SA LONGUEUR ET LA PRESENCE OU NON D'UNE SINGULARITE .....	143
FIGURE II-44 : NOMBRE D'OUVRAGES EN TERRE PAR NIVEAU DE VULNERABILITE .....	143
FIGURE II-45: MATRICES DES METHODES A ET B DE COMBINAISON ALEA-VULNERABILITE AVEC DES CONDITIONS DIFFERENTES POUR CONSIDERER UNE ZONE COMME A RISQUE (CASES ROUGES) .....	145
FIGURE II-46: SCHEMA DE LA VISION SYSTEMIQUE DU RISQUE COMPLETE AVEC LES ELEMENTS DE LA COMPARAISON ASSIMILES A DIFFERENTS TERMES DE L'EQUATION DU RISQUE .....	146
FIGURE II-47 : ILLUSTRATION DE DEUX TRONÇONS FAUX NEGATIFS QUI EVOLUENT EN VRAIS POSITIFS AVEC LA PRISE EN COMPTE DE LA VULNERABILITE .....	150
FIGURE II-48 : ILLUSTRATION DE TRONÇONS FAUX POSITIFS QUI EVOLUENT EN VRAIS POSITIFS APRES PRISE EN COMPTE DES OUVRAGES HYDRAULIQUES DE TRAVERSEE .....	151
FIGURE II-49 : ILUSTRATION D'UN TRONÇON FAUX POSITIF QUI EVOLUE EN VRAI POSITIF APRES PRISE EN COMPTE DES ZONES DE TOURNEES INTEMPERIES.....	152
FIGURE II-50 : ILLUSTRATION DE LA PRISE EN COMPTE DES ZONES DE TOURNEES INTEMPERIES POUR L'EVALUATION DE LA METHODE IRIP .....	153
FIGURE II-51 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 135, FAUX NEGATIF DU FAIT QUE L'IMPACT NE SOIT PAS LIE AU RUISSELLEMENT.....	155
FIGURE II-52 : PHOTOS DE LA ZONE IMPACTEE AU MOMENT DES TRAVAUX.....	155
FIGURE II-53 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 65 NON EXPOSE DIRECTEMENT MAIS IMPACTE A CAUSE DE LA CONFIGURATION DE L'INFRASTRUCTURE .....	156
FIGURE II-54 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 151 .....	157
FIGURE II-55 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 184 QUI A ETE IMPACTE PAR DU RUISSELLEMENT A CAUSE DE LA CONFIGURATION LOCALE DE L'INFRASTRUCTURE MAIS QUI N'EST A PRIORI PAS EXPOSE AU RUISSELLEMENT.....	158
FIGURE II-56 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 15 QUI A ETE IMPACTE PAR UNE COULEE DE BOUE MAIS QUI N'A PAS BIEN ETE IDENTIFIE PAR LES CARTES IRIP .....	159
FIGURE II-57 : DECOMPOSITION DE LA CARTE IRIP DE TRANSFERT EN INDICATEURS BINAIRES SUR LA ZONE DU TRONÇON 15.....	160
FIGURE II-58 : CARTES IRIP DE TRANSFERT ET D'ACCUMULATIN SUR LE BASSIN VERSANT RELATIF AU TRONCON 120 .....	161
FIGURE II-59 : LES CINQ INDICATEURS BINAIRES DE LA CARTE IRIP D'ACCUMULATION SUR LA MEME ZONE DU TRONÇON 120.....	162
FIGURE II-60 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 187 QUI A SUBIT UN GLISSEMENT MAIS DONT LES CARTES IRIP NE SEMBLENT PAS PERTINENTES .....	163
FIGURE II-61 : DECOMPOSITION EN INDICATEURS BINAIRES DE LA CARTE IRIP DE TRANSFERT SUR LE TRONÇON 187 .....	164

FIGURE II-62 : INDICATEUR DES RUPTURES DE PENTES CONCAVES, SUR UNE ZONE PLANE, INFLUENCE PAR LA QUALITE DU MNT (ZONE DU TRONÇON 120).....	171
FIGURE II-63 : INDICATEUR DES RUPTURES DE PENTES CONVEXES, SUR UNE ZONE DE RELIEF, OU LES RUPTURES IMPORTANTES SONT DETECTES (ZONE DU TRONÇON 15).....	172
FIGURE II-64 : COMPARAISON DES CARTES DE RUPTURES DE PENTES OBTENUES AVEC LES DEUX METHODES DE CALCUL SUR LE MNT D'UNE RESOLUTION DE 25 M.....	173
FIGURE II-65 : COMPARAISON DES CARTES DE RUPTURES DE PENTES OBTENUES AVEC DEUX METHODES DE CALCUL DIFFERENTES SUR LE MNT DU SRTM D'UNE RESOLUTION DE 30 M.....	174
FIGURE II-66 : COMPARAISON DETAILLEE SUR UNE PETITE ZONE DES DEUX METHODES DE CALCUL .....	174
FIGURE II-67 : HISTOGRAMME DES VALEURS DE COURBURES DE PENTES AVEC LA METHODE DU LOGICIEL GRASS GIS SUR L'ENSEMBLE DE LA ZONE D'ETUDE.....	176
FIGURE II-68 : CARTES DES RUPTURES DE PENTES CALCULEES AVEC GRASS GIS AVANT ET APRES LA SUPPRESSION DES ARTEFACTS .....	176
FIGURE II-69 : COMPARAISON DES CARTES IRIP DE TRANSFERT AVEC LA METHODE IRIP PAR DEFAT ET AVEC LA METHODE DE CALCUL DES RUPTURES DE PENTE DE GRASS GIS ET APRES SUPPRESSION DES ARTEFACTS.....	177
FIGURE II-70 : COMPARAISON DES CARTES IRIP D'ACCUMULATION AVEC LA METHODE IRIP PAR DEFAT ET AVEC LA METHODE DE CALCUL DES RUPTURES DE PENTE DE GRASS GIS POUR LAQUELLE LES ARTEFACTS ONT ETE SUPPRIMES .....	177
FIGURE II-71 : ILLUSTRATION DES TRONÇONS 65 ET 69 SUR LES CARTES IRIP PAR DEFAT ET SUR LES CARTES IRIP MODIFIEES AU NIVEAU DE L'INDICATEUR DES RUPTURES DE PENTES .....	180
FIGURE II-72 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 15 AVANT ET APRES MODIFICATION DES CARTES IRIP OU DES DEFATS SUR LA CARTE DE TRANSFERT SEMBLENT ETRE A L'ORIGINE DE LA MAUVAISE CORRELATION AVEC L'IMPACT .....	181
FIGURE II-73 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 120 OU LA CARTE ACCUMULATION PARAIT PLUS LISIBLE APRES LA MODIFICATION DE L'INDICATEUR DES RUPTURES DE PENTE MAIS NECESSITE ENCORE DES AMELIORATIONS.....	182
FIGURE II-74 : REGLES DE PEDOTRANSFERT PERMETTANT DE CONVERTIR LES DONNEES TEXTURALES EN CLASSES DE BATTANCE ET D'ERODABILITE PAR PROJECTION DANS LES TRIANGLES DE TEXTURE REDECOURPES EN 5 CLASSES DE SENSIBILITE DE 1 (TRES FAIBLE) A 5 (TRES FORTE) (SOURCE : CERDAN ET AL., 2006 ET INRA/IFEN) .....	185
FIGURE II-75 : CARTE DE L'INDICATEUR BINAIRE D'ERODABILITE UTILISE DANS LA CARTE DE TRANSFERT .....	185
FIGURE II-76 : CARTE DE L'INDICATEUR BINAIRE DE BATTANCE UTILISE DANS LA CARTE ACCUMULATION .....	186
FIGURE II-77 : CARTE IRIP DE PRODUCTION AVANT ET APRES REMPLACEMENT DE L'INDICATEUR D'ERODABILITE PAR L'INDICATEUR DE BATTANCE .....	186
FIGURE II-78 : CARTE IRIP DE TRANSFERT REALISE AVEC LES PARAMETRISATION PAR DEFAT, AVEC RUPTURES DE PENTES MODIFIEES ET AVEC RUPTURES DE PENTES ET AXES LINEAIRES MODIFIES .....	187
FIGURE II-79 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 15 QUI EST A PRESENT BIEN DETECTE COMME A RISQUE GRACE A L'INDICATEUR D'ERODABILITE QUI PERMET D'OBTENIR DES NIVEAUX 4 EN TRANSFERT SUR CETTE ZONE .....	189
FIGURE II-80 : ILLUSTRATION DES TRONÇONS 183 ET 184 QUI NE SONT PAS BIEN DETECTES AVEC LES DEUX PARAMETRAGES PROPOSES, LA MAUVAISE CORRELATION SEMBLE LIEE A LA CARTE D'ACCUMULATION QUI NE FAIT PAS BIEN RESSORTIR LES AXES DE RUISSELLEMENT CONCENTRES .....	190
FIGURE II-81 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 120 SUR LEQUEL LES CARTES IRIP NE SEMBLANT PAS PERTINENTE, L'INDICATEUR DE COMPACITE (A DROITE) SEMBLE JOUER UN ROLE DANS CETTE INCOHERENCE .....	191

FIGURE II-82 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 125 QUI SEMBLE BIEN DETECTE A TORT GRACE A LA PRISE EN COMPTE DE L'ERODABILITE ALORS QUE L'IMPACT SEMBLE LIE A UN TYPE DE RUISSELLEMENT QUI POURRAIT ETRE DAVANTAGE DETECTE PAR LA CARTE ACCUMULATION .....	192
FIGURE II-83 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 10 QUI ETAIT DETECTE A TORT GRACE A UNE ROUTE, SA NOUVELLE CORRELATION DE TYPE FAUX NEGATIF SEMBLE A PRESENT LIEE A DES DEFAUTS DE LA CARTE ACCUMULATION .....	193
FIGURE II-84 : ILLUSTRATION DE L'INDICE DE HORTON QUI N'EST SUPERIEUR A 1 QUE POUR DES AIRES DRAINEES DE LA TAILLE DE TROIS PIXELS .....	194
FIGURE II-85 : DISTRIBUTION DES VALEURS D'AIRES DRAINEES SUR LA ZONE D'ETUDE .....	195
FIGURE II-86 : CARTES DE L'INDICATEUR BINAIRE D'AIRES DRAINEES POUR LES SEPT SEUILS A TESTER .....	196
FIGURE II-87 : CARTES IRIP DE TRANSFERT CREEES POUR SEPT SEUILS D'AIRES DRAINEES .....	197
FIGURE II-88 : CARTES IRIP D'ACCUMULATION CREEES POUR SEPT SEUILS D'AIRES DRAINEES .....	197
FIGURE II-89 : CARTE IRIP DE TRANSFERT POSITIONNEE SUR LA CARTE D'ACCUMULATION MONTRANT QUE LES CARTES NE SONT PAS REDONDANTES .....	198
FIGURE II-90 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 78 AVEC DES SEUILS D'AIRES DRAINEES DIFFERENTS, L'IMPACT EST IDENTIFIE AVEC LE SEUIL DE 10 HA ET NON IDENTIFIE AVEC LE SEUIL DE 50 HA .....	200
FIGURE II-91 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 183 AVEC DES SEUILS D'AIRES DRAINEES DIFFERENTS, L'IMPACT EST IDENTIFIE AVEC LE SEUIL DE 10 HA ET NON IDENTIFIE AVEC LE SEUIL DE 50 HA .....	200
FIGURE II-92 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 65 DETECTE EN VRAI POSITIF POUR UN SEUIL $\leq 1$ HA MAIS SEULEMENT GRACE A UN PIXEL FORT CE QUI NE PERMET PAS DE CONCLURE QUANT AU CHOIX DE SEUIL POUR CARTOGRAPHIER LE RUISSELLEMENT .....	201
FIGURE II-93 : ILLUSTRATION DU TRONÇON 120 AVANT ET APRES PRISE EN COMPTE DE L'AIRES DRAINEE QUI AMELIORE NETTEMENT LES CARTES IRIP .....	202
FIGURE II-94 : CARTES IRIP DE TRANSFERT REALISEES AVEC UN MNT 250 M, POUR DEUX PARAMETRAGES DIFFERENTS .....	208
FIGURE II-95 : CARTES IRIP DE TRANSFERT REALISEES AVEC UN MNT 75 M, POUR DEUX PARAMETRAGES DIFFERENTS .....	208
FIGURE II-96 : CARTES IRIP DE TRANSFERT REALISEES AVEC UN MNT 30 M, POUR DEUX PARAMETRAGES DIFFERENTS .....	208
FIGURE II-97 : CARTES IRIP DE TRANSFERT REALISEES AVEC UN MNT 25 M, POUR DEUX PARAMETRAGES DIFFERENTS .....	209
FIGURE II-98 : CARTES IRIP DE TRANSFERT REALISEES AVEC UN MNT 5 M, POUR DEUX PARAMETRAGES DIFFERENTS .....	209
FIGURE II-99 : CARTES IRIP D'ACCUMULATION REALISEES AVEC UN MNT 250 M, POUR DEUX PARAMETRAGES DIFFERENTS .....	210
FIGURE II-100 : CARTES IRIP D'ACCUMULATION REALISEES AVEC UN MNT 75 M, POUR DEUX PARAMETRAGES DIFFERENTS .....	210
FIGURE II-101 : CARTES IRIP D'ACCUMULATION REALISEES AVEC UN MNT 30 M, POUR DEUX PARAMETRAGES DIFFERENTS .....	210
FIGURE II-102 : CARTES IRIP D'ACCUMULATION REALISEES AVEC UN MNT 25 M, POUR DEUX PARAMETRAGES DIFFERENTS .....	211
FIGURE II-103 : CARTES IRIP D'ACCUMULATION REALISEES AVEC UN MNT 5 M, POUR DEUX PARAMETRAGES DIFFERENTS .....	211
FIGURE II-104 : COMPARAISON SUR LE TRONÇON 125 DES CARTES IRIP AU 5 M ET AU 25 M POUR MONTRER LA PERSISTANCE SPATILE DE L'INFORMATION ET LE POTENTIEL DES DONNEES HAUTE RESOLUTION .....	213
FIGURE II-105 : AGRANDISSEMENT DE LA ZONE N°6 DU TRONÇON 125 POUR ILLUSTRER L'IDENTIFICATION D'UN PHENOMENE D'EROSION DIFFUSE .....	213

FIGURE II-106 : COMPARAISON SUR LES TRONÇONS 177 ET 178 DES CARTES IRIP AU 5 M ET AU 25 M POUR MONTRER LA PERSISTANCE SPATILE DE L'INFORMATION ET LE POTENTIEL DES DONNEES HAUTE RESOLUTION .....	215
FIGURE II-107 : AGRANDISSEMENT DE LA ZONE N°5 DU TRONÇON 177 POUR ILLUSTRER L'IDENTIFICATION D'UN PHENOMENE DE GLISSEMENT .....	215
FIGURE III-1 : PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DE LA LEZARDE (LAGADEC ET AL., 2016B) .....	227
FIGURE III-2 : ZONAGE DU PPR RUISSELLEMENT .....	227
FIGURE III-3 : ZONAGE DU DECRET EROSION .....	228
FIGURE III-4 : COMPARAISON VISUELLE DU ZONAGE RUISSELLEMENT ET DE LA CARTE IRIP D'ACCUMULATION .....	232
FIGURE III-5 : COMPARAISON VISUELLE DU ZONAGE EROSION ET DE LA CARTE IRIP DE TRANSFERT .....	234



## TABLE DES TABLEAUX

TABLEAU I-1: DEFINITION DE L'INONDATION POUR LA DIRECTIVE EUROPEENNE INONDATION ET LA LOI PORTANT ENGAGEMENT NATIONAL POUR L'ENVIRONNEMENT (SOURCE: CEPRI, 2015) .....	27
TABLEAU I-2: DEFINITION DES TERMES DU DOMAINE DES RISQUES AVEC EXEMPLES APPLIQUES AU CONTEXTE DE LA THESE.....	29
TABLEAU I-3 : LISTE DES INDICATEURS, DE LEURS SEUILS, UTILISES POUR CREER LES CARTES IRIP AVEC LE LOGICILE IRIP .....	68
TABLEAU II-1: TEMPS DE TRAVAIL POUR LE RECHERCHE DE DONNEES EN ARCHIVES POUR CHAQUE LIEU .....	103
TABLEAU II-2 : PRESENTATION DES INFORMATIONS A RELEVER DANS LES DOCUMENTS D'INTERET ET A REMPLIR DANS LA TABLE « DOCUMENTS » .....	104
TABLEAU II-3 : PRESENTATION DES INFORMATIONS A RELEVER DANS LES DOCUMENTS D'INTERET ET A REMPLIR DANS LA TABLE « EVENEMENTS » (OTE SIGNIFIE OUVRAGE EN TERRE ENVELOPPE).....	104
TABLEAU II-4: EXEMPLE D'UNE FICHE SYNTHESE REALISEE POUR UN OUVRAGE EN TERRE ENVELOPPE (DONNEES FICTIVES).....	106
TABLEAU II-5: LONGUEUR DES IMPACTS LIES AU RUISSELLEMENT (EN M) .....	108
TABLEAU II-6 : CALCUL DE LA PROBABILITE DE NE PAS VOIR UN EPISODE DE RUISSELLEMENT EN UN SIECLE POUR PLUSIEURS PERIODE DE RETOUR.....	111
TABLEAU II-7: TABLEAU DE CONTINGENCE THEORIQUE ENTRE LES CARTES IRIP ET LES IMPACTS LIES AU RUISSELLEMENT.....	112
TABLEAU II-8: NOTATION DES EFFECTIFS DANS UN TABLEAU DE CONTINGENCE .....	113
TABLEAU II-9: CALCUL DES EFFECTIFS THEORIQUES DANS UN TABLEAU DE CONTINGENCE.....	114
TABLEAU II-10: VALEURS CRITIQUES DE LA DISTRIBUTION DU CHI-2 A 1 DEGRE DE LIBERTE .....	114
TABLEAU II-11: SYNTHESE DES INDICATEURS DE PERFORMANCE CHOISIS POUR L'EVALUATION DE LA METHODE IRIP .....	115
TABLEAU II-12: LISTE DES CHOIX POSSIBLES POUR LA MISE EN FORME DES DONNEES A COMPARER (LES CHOIX RAYES N'ONT PAS ETE TESTES).....	116
TABLEAU II-13: SYNTHESE DES SEIZE TESTS A EFFECTUER POUR LA COMPARAISON DES CARTES IRIP ET DES DONNEES D'IMPACTS .....	120
TABLEAU II-14: PRESENTATION DU DECOMPTE DES SURFACES POUR LES 4 TYPES DE CORRELATION ET POUR LES 16 TESTS DE COMPARAISON.....	121
TABLEAU II-15: PRESENTATION DES VALEURS DE SIX INDICATEURS DE PERFORMANCE POUR LES 16 TESTS DE COMPARAISON.....	121
TABLEAU II-16 : RAPPEL DES SIX INDICATEURS DE PERFORMANCE POUR LES TESTS NUMEROS 2, 5, 11 ET 16.....	122
TABLEAU II-17: MOYENNE DES INDICATEURS DE PERFORMANCE SELON LE CHOIX DES NIVEAUX IRIP CONSIDERES .....	124

TABLEAU II-18 : INDICATEURS DE PERFORMANCE POUR DIFFERENTS NIVEAUX IRIP MINIMUM ET POUR LES MEMES PARAMETRAGES DE TEST.....	124
TABLEAU II-19: MOYENNE DES INDICATEURS DE PERFORMANCE SELON LE CHOIX DE CONSERVATION DES PIXELS ISOLES.....	125
TABLEAU II-20: MOYENNE DES INDICATEURS DE PERFORMANCE SELON LA TAILLE DE LA ZONE TAMPON AUTOUR DE LE VOIE FERREE ET DES IMPACTS .....	125
TABLEAU II-21: MOYENNE DES INDICATEURS DE PERFORMANCE SELON LA TAILLE DE LA ZONE TAMPON AUTOUR DES PIXELS IRIP FORTS .....	125
TABLEAU II-22 : SYNTHESE DES SOURCES D'INFORMATIONS EXPLOITEES PAR ORDRE DE PRIORITE POUR LA CREATION DE CHAQUE COUCHE D'INFORMATION .....	136
TABLEAU II-23: SYNTHESE DES DONNEES SUR L'INFRASTRUCTURE SUR LE TRONÇON D'ETUDE .....	137
TABLEAU II-24: NOMBRE D'IMPACTS PAR TYPE DE PROFIL ET RATIO SELON LA LONGUEUR CUMULEE DE CHAQUE PROFIL.....	139
TABLEAU II-25: LONGUEURS CARACTERISTIQUES SELON LE TYPE DE PROFIL.....	140
TABLEAU II-26: NOMBRE D'IMPACTS SELON LA LONGUEUR DE L'OUVRAGE EN TERRE ET RATIO SELON LA LONGUEUR CUMULEE DU PROFIL .....	140
TABLEAU II-27: NOMBRE D'IMPACTS SELON LA PRESENCE D'UNE SINGULARITE ET RATIO SELON LA LONGUEUR CUMULEE .....	141
TABLEAU II-28 : NOMBRE D'IMPACTS SELON LA PRESENCE D'UN OUVRAGE HYDRAULIQUE DE TRAVERSEE ET RATIO SELON LA LONGUEUR CUMULEE .....	141
TABLEAU II-29 : SYNTHESE DES SEPT TESTS A EFFECTUER POUR LA COMPARAISON DES CARTES IRIP ET DES DONNEES D'IMPACT EN PRENANT EN COMPTE LA VULNERABILITE DE L'INFRASTRUCTURE .....	147
TABLEAU II-30 : SYNTHESE DU NOMBRE DE TRONÇONS PAR TYPE DE CORRELATION POUR CHAQUE TEST .....	148
TABLEAU II-31 : SYNTHESE DES SIX INDICATEURS POUR CHAQUE TEST DE COMPARAISON .....	148
TABLEAU II-32 : LISTE DES TRONÇONS FAUX NEGATIFS SELON LA METHODE DE PRISE EN COMPTE DE LA VULNERABILITE.....	154
TABLEAU II-33 : RESULTATS A RETENIR POUR L'EVALUATION DE LA METHODE IRIP EN TERMES DE COMPTAGE DES CORRELATIONS .....	167
TABLEAU II-34: RESULTATS A RETENIR DE L'EVALUATION DE LA METHODE IRIP EN TERMES D'INDICATEURS DE PERFORMANCE .....	167
TABLEAU II-35 : SYNTHESE DU PARAMETRAGE DE LA METHODE IRIP PAR DEFAULT AVEC LES INDICATEURS ET LES SEUILS UTILISES .....	170
TABLEAU II-36 : NOMBRES DE TRONÇONS POUR CHAQUE TYPE DE CORRELATION POUR LES CARTES DES RUPTURES DE PENTES REALISEES AVEC LES LOGICIELS IRIP© ET GRASS GIS SANS LES ARTEFACTS .....	178
TABLEAU II-37 : RESULTAT DES SIX INDICATEURS POUR LES CARTES DE RUPTURES DE PENTES REALISEES AVEC LES LOGICIELS IRIP© ET GRASS GIS SANS LES ARTEFACTS .....	178
TABLEAU II-38 : LISTE DES TRONÇONS FAUX NEGATIFS OBTENUS POUR LES CARTES IRIP PAR DEFAULT ET POUR LES CARTES IRIP MODIFIEES .....	179
TABLEAU II-39 : NOMBRES DE TRONÇONS POUR CHAQUE TYPE DE CORRELATION POUR TROIS PARAMETRAGES DIFFERENTS.....	188
TABLEAU II-40 : RESULTAT DES SIX INDICATEURS DE PERFORMANCE POUR TROIS PARAMETRAGES DIFFERENTS .....	188
TABLEAU II-41 : LISTE DES TRONÇONS FAUX NEGATIFS SELON LE PARAMETRAGE IRIP UTILISE .....	188
TABLEAU II-42 : LES SEPT SEUILS D'AIRES DRAINEES A TESTER EN REMPLACEMENT DE L'INDICE DE COMPACITE .....	195

TABLEAU II-43 : RESULTATS DU NOMBRE DE TRONÇONS PAR TYPE DE CORRELATION OBTENUS AVEC METHODE B DE COMBINAISON ALEA-VULNERABILITE ET EN PRENANT EN COMPTE LA VULNERABILITE ET LES ACTIONS DE MITIGATION .....	198
TABLEAU II-44 : RESULTATS DES SIX INDICATEURS DE PERFORMANCE OBTENUS AVEC METHODE B DE COMBINAISON ALEA-VULNERABILITE ET EN PRENANT EN COMPTE LA VULNERABILITE ET LES ACTIONS DE MITIGATION.....	199
TABLEAU II-45 : LISTE DES TRONÇONS FAUX NEGATIFS SELON LE SEUIL D'AIRE DRAINEE ET POUR LA REFERENCE QUI EST LE PARAMETRAGE AVEC LES INDICATEURS DE RUPTURES DE PENTES MODIFIEES ET D'ERODABILITE .....	199
TABLEAU II-46 : SYNTHESE DU PARAMETRAGE FINAL CONSEILLE, AVEC EN ROUGE LES MODIFICATIONS PAR RAPPORT AU PARAMETRAGE PAR DEFAUT .....	203
TABLEAU II-47 : POIDS RELATIFS DE CHAQUE DONNEES D'ENTREE POUR LA CONSTRUCTION DES CARTES IRIP, DANS LEUR VERSION PAR DEFAUT ET MODIFIEE (T+A SIGNIFIE COMBINAISON DES CARTES TRANSFERT ET ACCUMULATION). .....	204
TABLEAU II-48 : SYNTHESE DES CARACTERISTIQUES DES CINQ MNT UTILISE POUR LA COMPARAISON ...	206
TABLEAU III-1 : PARAMETRAGE DE LA METHODE IRIP ET DONNEES D'ENTREE (ZU SIGNIFIE ZONES URBAINES) .....	229
TABLEAU III-2 : TABLEAU DE CONTINGENCE THEORIQUE ENTRE LES ZONAGES REGLEMENTAIRES ET LES CARTES IRIP.....	229
TABLEAU III-3 : LES TROIS INDICATEURS DE PERFORMANCE UTILISES POUR COMPARER LES ZONAGES ET LES CARTES IRIP .....	230
TABLEAU III-4 : RESULTAT DE LA COMPARAISON QUANTITATIVE ENTRE LE ZONAGE REGLEMENTAIRE SUR LE RUISSELLEMENT ET LA CARTE IRIP D'ACCUMULATION.....	231
TABLEAU III-5 : RESULTAT DE LA COMPARAISON QUANTITATIVE ENTRE LE ZONAGE REGLEMENTAIRE SUR L'EROSION ET LA CARTE IRIP DE TRANSFERT.....	233



## ANNEXES

ANNEXE A : SUITE DES RESULTATS STATISTIQUES DE L'EVALUATION D'IRIP AVANT ET APRES MODIFICATION DE L'INDICATEUR DES RUPTURES DE PENTES

Suite des résultats de la section 3.2.3.2, chapitre 3, partie 2

RESULTATS DU NOMBRE DE TRONÇONS PAR TYPE DE CORRELATION OBTENUS AVEC METHODE B DE COMBINAISON ALEA-VULNERABILITE ET EN PRENANT EN COMPTE LA VULNERABILITE

Paramétrages	V+	F+	V-	F-
Par défaut	54	79	44	5
Ruptures de pentes modifiées	50	68	55	9

RESULTATS DES SIX INDICATEURS DE PERFORMANCE OBTENUS AVEC METHODE B DE COMBINAISON ALEA-VULNERABILITE ET EN PRENANT EN COMPTE LA VULNERABILITE

Paramétrages	POD	FAR	Précision	Biais	X <sup>2</sup>	Φ
Par défaut	0,9	0,6	0,5	2,3	15	0,3
Ruptures de pentes modifiées	0,8	0,6	0,6	2,0	15	0,3

RESULTATS DU NOMBRE DE TRONÇONS PAR TYPE DE CORRELATION OBTENUS AVEC METHODE B DE COMBINAISON ALEA-VULNERABILITE ET EN PRENANT EN COMPTE LA VULNERABILITE, LES ACTIONS DE MITIGATION ET LES ACTIONS DE RESILIENCE

Paramétrages	V+	F+	V-	F-
Par défaut	95	38	44	5
Ruptures de pentes modifiées	86	32	55	9

RESULTATS DES SIX INDICATEURS DE PERFORMANCE OBTENUS AVEC METHODE B DE COMBINAISON ALEA-VULNERABILITE ET EN PRENANT EN COMPTE LA VULNERABILITE, LES ACTIONS DE MITIGATION ET LES ACTIONS DE RESILIENCE

Paramétrages	POD	FAR	Précision	Biais	X <sup>2</sup>	Φ
Par défaut	1,0	0,3	0,8	1,3	54	0,5
Ruptures de pentes modifiées	0,9	0,3	0,8	1,2	58	0,6

ANNEXE B : CARTES DES TRONÇONS 53, 183, 184 ET 187 AVANT ET APRES MODIFICATION DE L'INDICATEUR DES RUPTURES DE PENTES

Suite des résultats de la section 3.2.4.2, chapitre 3, partie 2

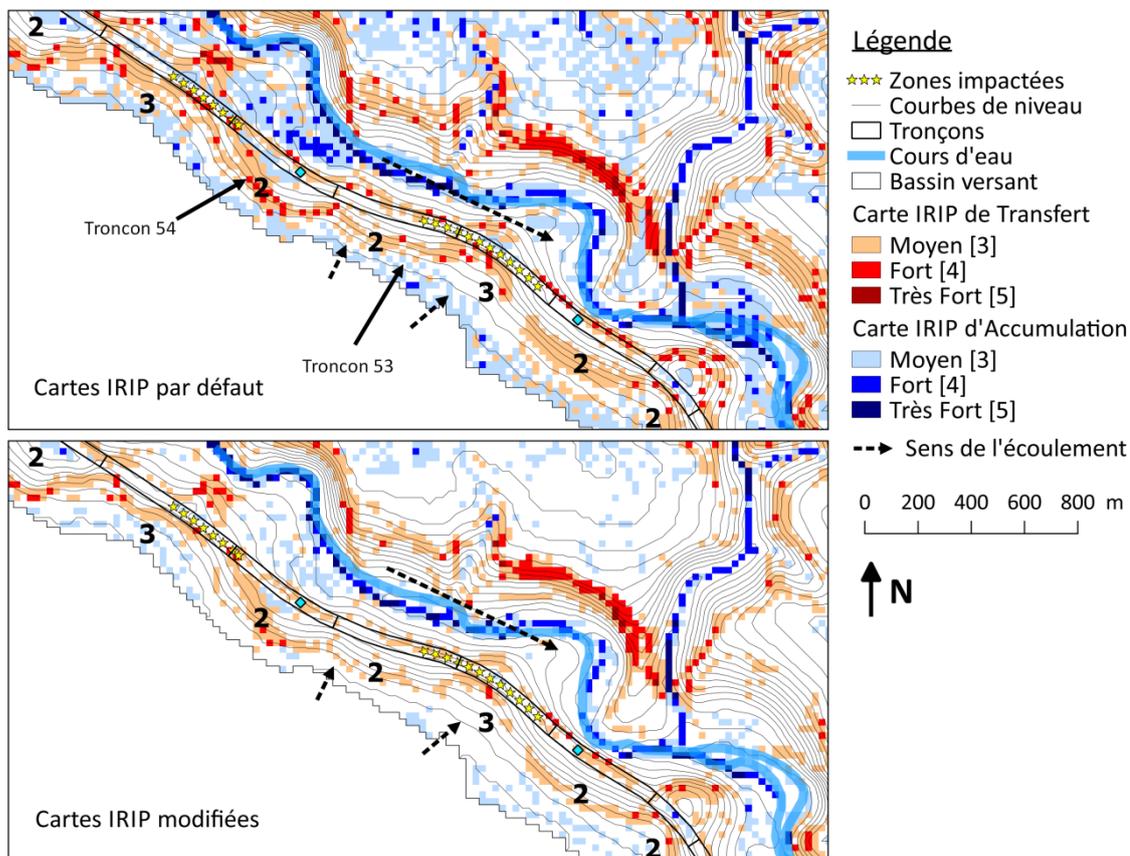


ILLUSTRATION DU TRONÇON 53 QUI DEVIENT FAUX NEGATIF APRES MODIFICATION DE L'INDICATEUR DES RUPTURES DE PENTES, LA CARTE IRIP DE TRANSFERT AU RUISSELLEMENT SEMBLE PROBLEMATIQUE

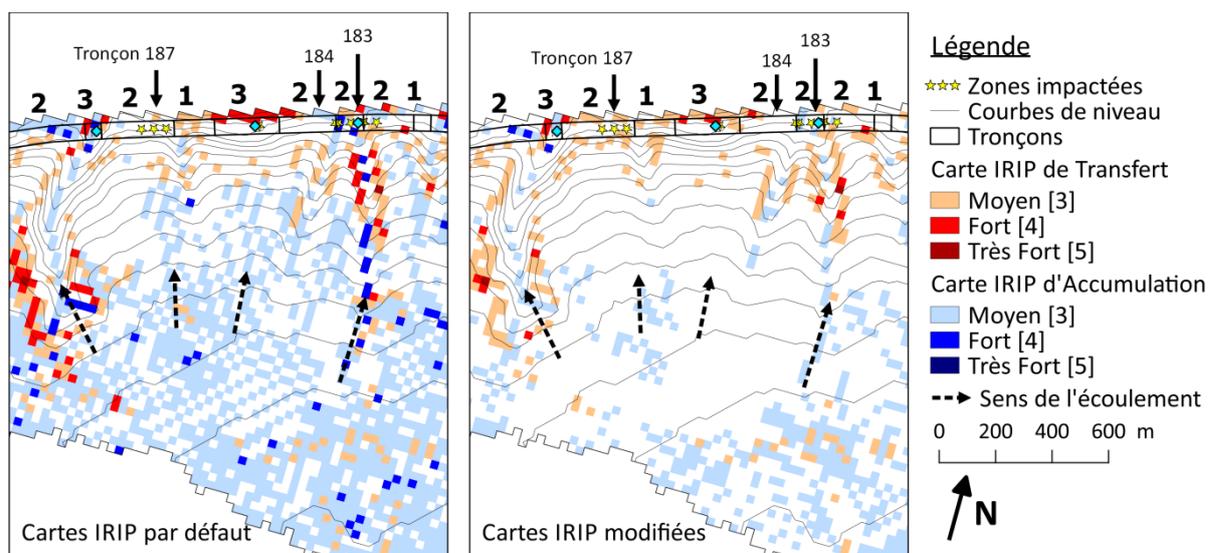


ILLUSTRATION DES TRONÇONS 183, 184 ET 187 SITUÉS SUR DES ZONES VRAISEMBLABLEMENT PROPICES AU TRANSFERT MAIS NON DÉTECTÉS PAR LES CARTES IRIP

## ANNEXE C : CARTE DU TRONÇON 125 AVANT ET APRES MODIFICATION DE L'INDICATEUR DES RUPTURES DE PENTE

Suite des résultats de la section 3.2.4.3, chapitre 3, partie 2

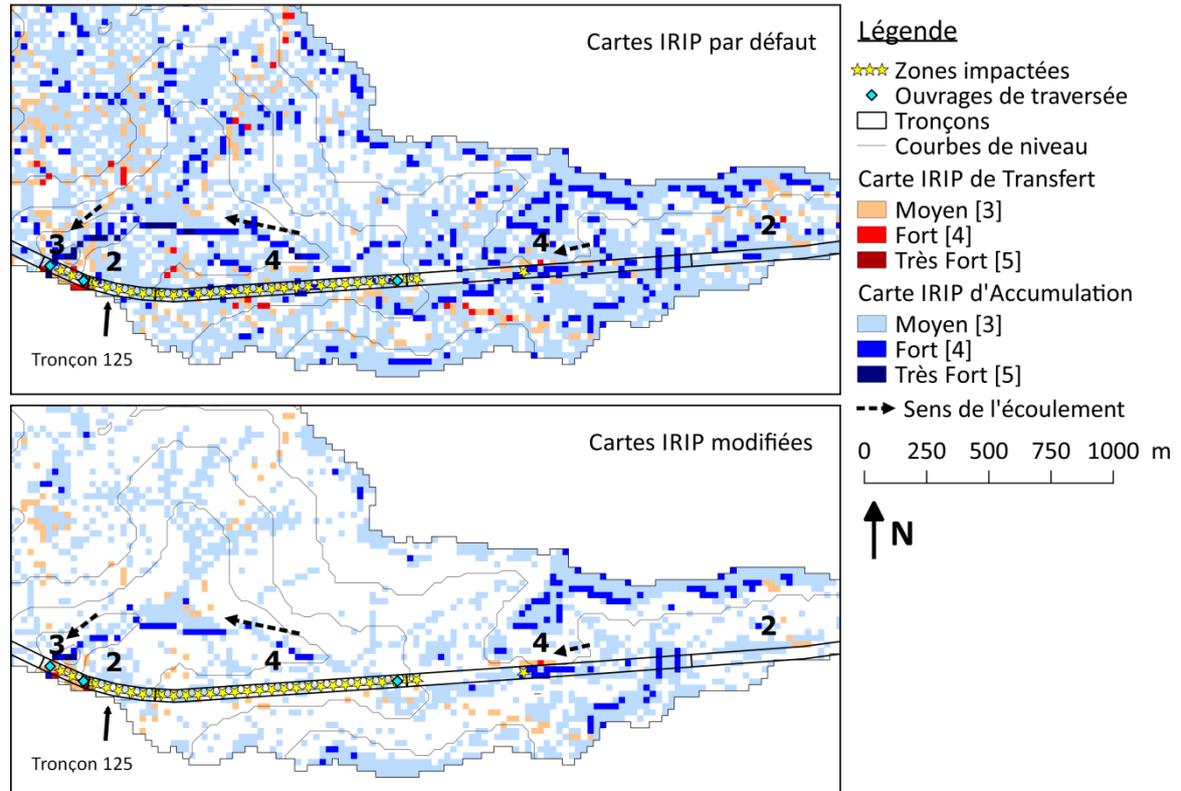


ILLUSTRATION DU TRONÇON 125 DONT LA MAUVAISE CORRELATION SEMBLE DUE A DES DEFANTS DE LA CARTE ACCUMULATION

ANNEXE D : SUITE DES RESULTATS STATISTIQUES DE L'EVALUATION D'IRIP AVANT ET APRES REMPLACEMENT DE L'INDICATEUR DES AXES LINEAIRES PAR L'INDICATEUR D'ERODABILITE

Suite des résultats de la section 3.3.3.2, chapitre 3, partie 2

**NOMBRES DE TRONÇONS POUR CHAQUE TYPE DE CORRELATION OBTENUS AVEC METHODE B DE COMBINAISON ALEA-VULNERABILITE ET EN PRENANT EN COMPTE LA VULNERABILITE ET POUR TROIS PARAMETRAGES DIFFERENTS**

Paramétrages	V+	F+	V-	F-
Par défaut	54	79	44	5
Ruptures de pentes modifiées	50	68	55	9
Ruptures de pentes modifiées et Axes linéaires remplacés par érodabilité	53	77	46	6

**RESULTAT DES SIX INDICATEURS DE PERFORMANCE OBTENUS AVEC METHODE B DE COMBINAISON ALEA-VULNERABILITE ET EN PRENANT EN COMPTE LA VULNERABILITE ET POUR TROIS PARAMETRAGES DIFFERENTS**

Paramétrages	POD	FAR	Précision	Biais	X <sup>2</sup>	Φ
Par défaut	0,9	0,6	0,5	2,3	15	0,3
Ruptures de pentes modifiées	0,8	0,6	0,6	2,0	15	0,3
Ruptures de pentes modifiées et Axes linéaires remplacés par érodabilité	0,9	0,6	0,5	2,2	14	0,3

**NOMBRES DE TRONÇONS POUR CHAQUE TYPE DE CORRELATION OBTENUS AVEC METHODE B DE COMBINAISON ALEA-VULNERABILITE ET EN PRENANT EN COMPTE LA VULNERABILITE, LES ACTIONS DE MITIGATION ET LES ACTIONS DE RESILIENCE ET POUR TROIS PARAMETRAGES DIFFERENTS**

Paramétrages	V+	F+	V-	F-
Par défaut	95	38	44	5
Ruptures de pentes modifiées	86	32	55	9
Ruptures de pentes modifiées et Axes linéaires remplacés par érodabilité	90	40	46	6

**RESULTAT DES SIX INDICATEURS DE PERFORMANCE OBTENUS AVEC METHODE B DE COMBINAISON ALEA-VULNERABILITE ET EN PRENANT EN COMPTE LA VULNERABILITE, LES ACTIONS DE MITIGATION ET LES ACTIONS DE RESILIENCE ET POUR TROIS PARAMETRAGES DIFFERENTS**

Paramétrages	POD	FAR	Précision	Biais	X <sup>2</sup>	Φ
Par défaut	1,0	0,3	0,8	1,3	54	0,5
Ruptures de pentes modifiées	0,9	0,3	0,8	1,2	58	0,6
Ruptures de pentes modifiées et Axes linéaires remplacés par érodabilité	0,9	0,3	0,7	1,4	50	0,5

ANNEXE E : CARTES DES TRONÇONS 53 ET 187 AVANT ET APRES PRISE EN COMPTE DE L'INDICATEUR D'ERODABILITE DANS LA CARTE DE TRANSFERT

Suite des résultats de la section 3.3.4.1, chapitre 3, partie 2

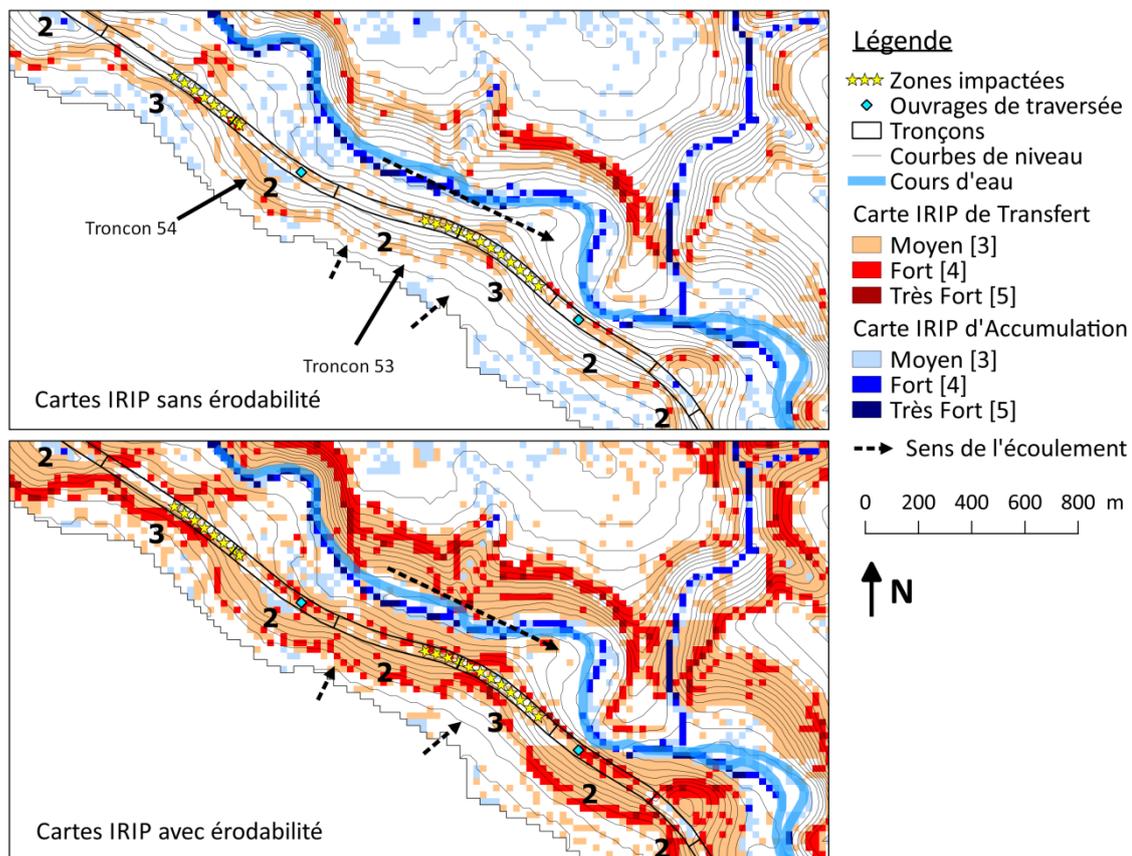
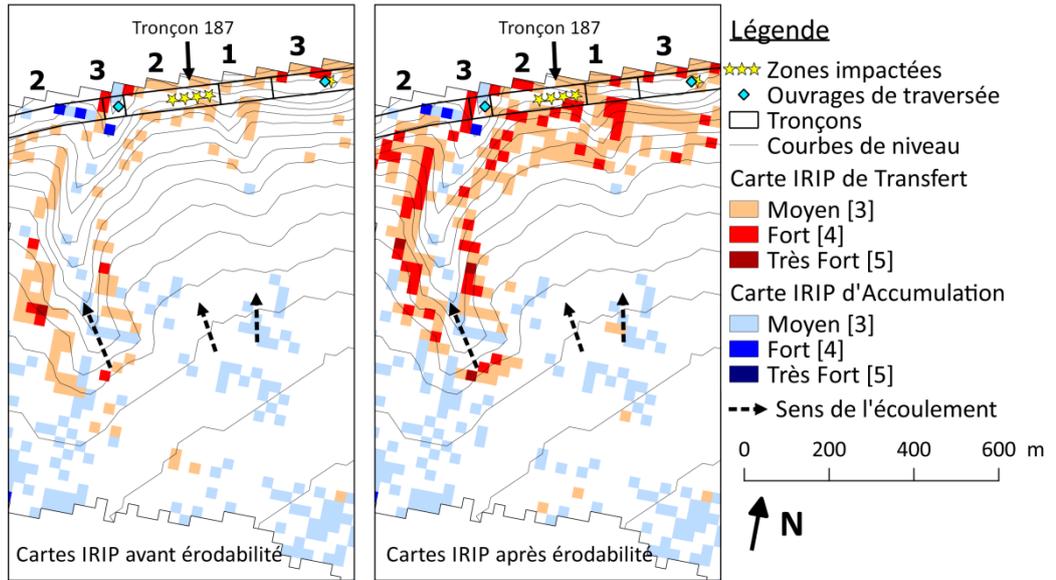


ILLUSTRATION DU TRONÇON 53 AVANT ET APRES PRISE EN COMPTE DE L'INDICATEUR D'ERODABILITE DANS LA CARTE DE TRANSFERT (LA CARTE ACCUMULATION NE CHANGE PAS)



**ILLUSTRATION DU TRONÇON 187 AVANT ET APRES PRISE EN COMPTE DE L'INDICATEUR D'ERODABILITE DANS LE CARTE DE TRANSFERT (LA CARTE ACCUMULATION NE CHANGE PAS)**

ANNEXE F : CARTES DES TRONÇONS 65 ET 69 TOUJOURS PAS BIEN DETECTES APRES PRISE EN COMPTE DE L'INDICATEUR D'ERODABILITE

Suite des résultats de la section 3.3.4.3, chapitre 3, partie 2

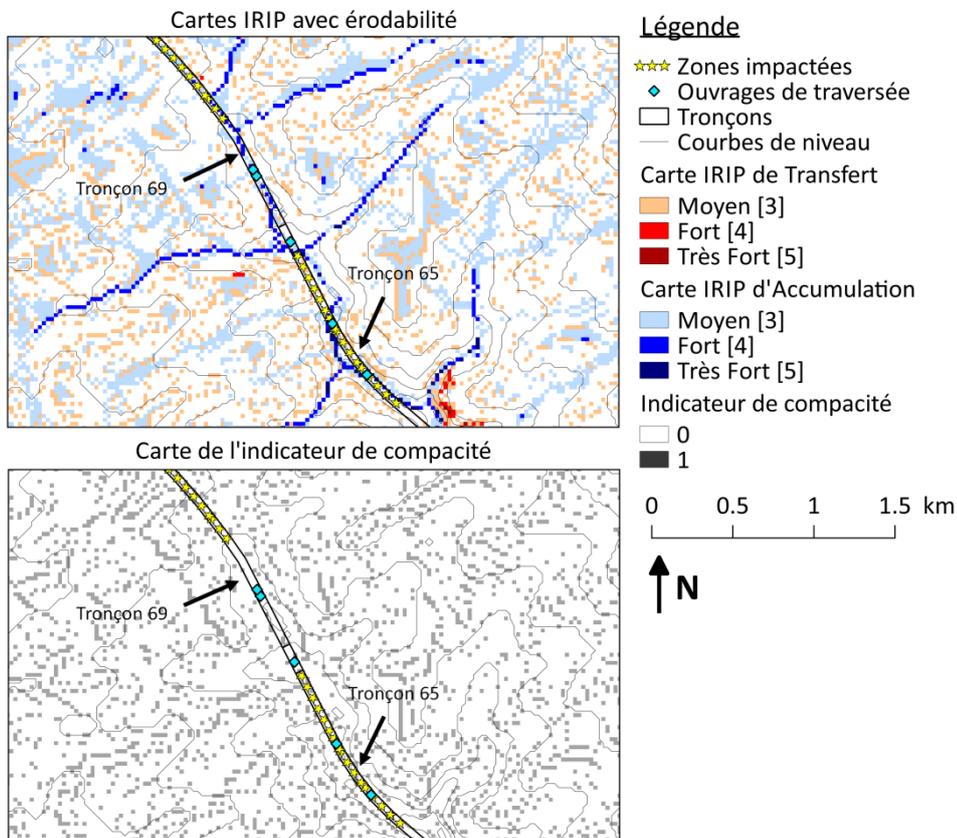


ILLUSTRATION DES TRONÇONS 65 ET 69 OU LES CARTES IRIP APRES PRISE EN COMPTE DE L'ERODABILITE OU LES ZONES IMPACTEES NE SONT TOUJOURS PAS DETECTER AU SENS DE LA METHODE D'EVALUATION, LA CAUSE POURRAIT ETRE LIE A L'INDICATEUR DE COMPACTITE QU'INE SEMBLE PAS PERTINENT

ANNEXE G : CARTES DE L'INDICE DE HORTON SUR LE MNT SRTM DE RESOLUTION 30 M

Suite des résultats de la section 3.4.1, chapitre 3, partie 2

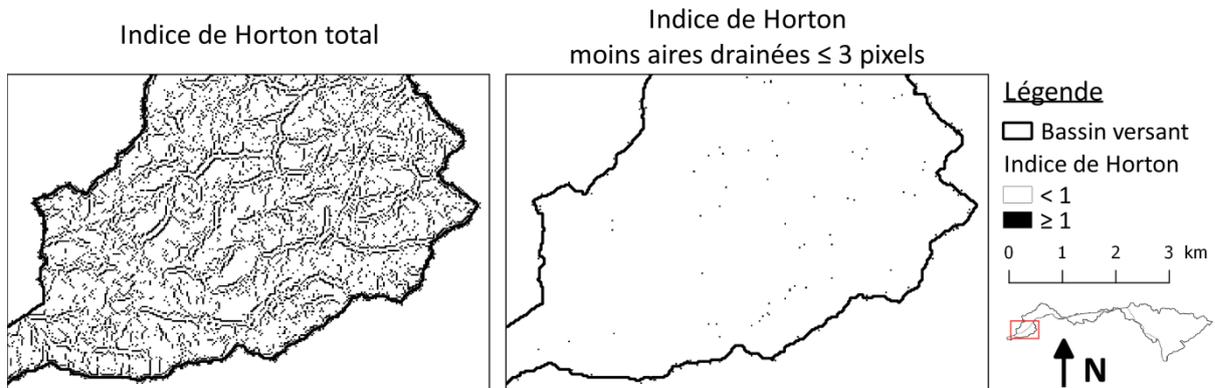


ILLUSTRATION SUR LE MNT DE RESOLUTION 30 M DE L'INDICE DE HORTON QUI N'EST SUPERIEUR A 1 QUE POUR DE TRES PETITES AIRES DRAINEES ENTRE UN ET TROIS PIXELS

ANNEXE H : SUITE DES RESULTATS STATISTIQUES DE L'EVALUATION D'IRIP POUR DIFFERENTS SEUILS D'AIRES DRAINEES

Suite des résultats de la section 3.4.3.2, chapitre 3, partie 2

RESULTATS DU NOMBRE DE TRONÇONS PAR TYPE DE CORRELATION OBTENUS AVEC METHODE B DE COMBINAISON ALEA-VULNERABILITE ET EN PRENANT EN COMPTE LA VULNERABILITE

Seuils aires drainées (Ha)	V+	F+	V-	F-
<b>Référence</b>	<b>53</b>	<b>77</b>	<b>46</b>	<b>6</b>
0,5	56	84	39	3
1	56	82	41	3
2,5	55	77	46	4
5	55	75	48	4
10	55	74	49	4
50	53	69	54	6
100	53	66	57	6

RESULTATS DES SIX INDICATEURS DE PERFORMANCE OBTENUS AVEC METHODE B DE COMBINAISON ALEA-VULNERABILITE ET EN PRENANT EN COMPTE LA VULNERABILITE

Seuils aires drainées (Ha)	POD	FAR	Précision	Biais	X <sup>2</sup>	Φ
<b>Référence</b>	<b>0,9</b>	<b>0,6</b>	<b>0,5</b>	<b>2,2</b>	<b>14</b>	<b>0,3</b>
0,5	0,9	0,6	0,5	2,4	16	0,3
1	0,9	0,6	0,5	2,3	17	0,3
2,5	0,9	0,6	0,6	2,2	19	0,3
5	0,9	0,6	0,6	2,2	20	0,3
10	0,9	0,6	0,6	2,2	21	0,3
50	0,9	0,6	0,6	2,1	21	0,3
100	0,9	0,6	0,6	2,0	23	0,4

RESULTATS DU NOMBRE DE TRONÇONS PAR TYPE DE CORRELATION OBTENUS AVEC METHODE B DE COMBINAISON ALEA-VULNERABILITE ET EN PRENANT EN COMPTE LA VULNERABILITE, LES ACTIONS DE MITIGATION ET LES ACTIONS DE RESILIENCE

Seuils aires drainées (Ha)	V+	F+	V-	F-
<b>Référence</b>	<b>90</b>	<b>40</b>	<b>46</b>	<b>6</b>
0,5	96	44	39	3
1	96	42	41	3
2,5	95	37	46	4
5	95	35	48	4
10	94	35	49	4
50	89	33	54	6
100	86	33	57	6

**RESULTATS DES SIX INDICATEURS DE PERFORMANCE OBTENUS AVEC METHODE B DE COMBINAISON ALEA-VULNERABILITE ET EN PRENANT EN COMPTE LA VULNERABILITE, LES ACTIONS DE MITIGATION ET LES ACTIONS DE RESILIENCE**

Seuils aires drainées (Ha)	POD	FAR	Précision	Biais	X <sup>2</sup>	Φ
<b>Référence</b>	<b>0,9</b>	<b>0,3</b>	<b>0,7</b>	<b>1,4</b>	<b>50</b>	<b>0,5</b>
0,5	1,0	0,3	0,7	1,4	49	0,5
1	1,0	0,3	0,8	1,4	53	0,5
2,5	1,0	0,3	0,8	1,3	60	0,6
5	1,0	0,3	0,8	1,3	64	0,6
10	1,0	0,3	0,8	1,3	64	0,6
50	0,9	0,3	0,8	1,3	64	0,6
100	0,9	0,3	0,8	1,3	65	0,6

ANNEXE I : CARTE DU TRONÇON 69 AVANT ET APRES UTILISATION DE L'INDICATEUR D'AIRE DRAINEE

Suite des résultats de la section 3.4.4.3, chapitre 3, partie 2

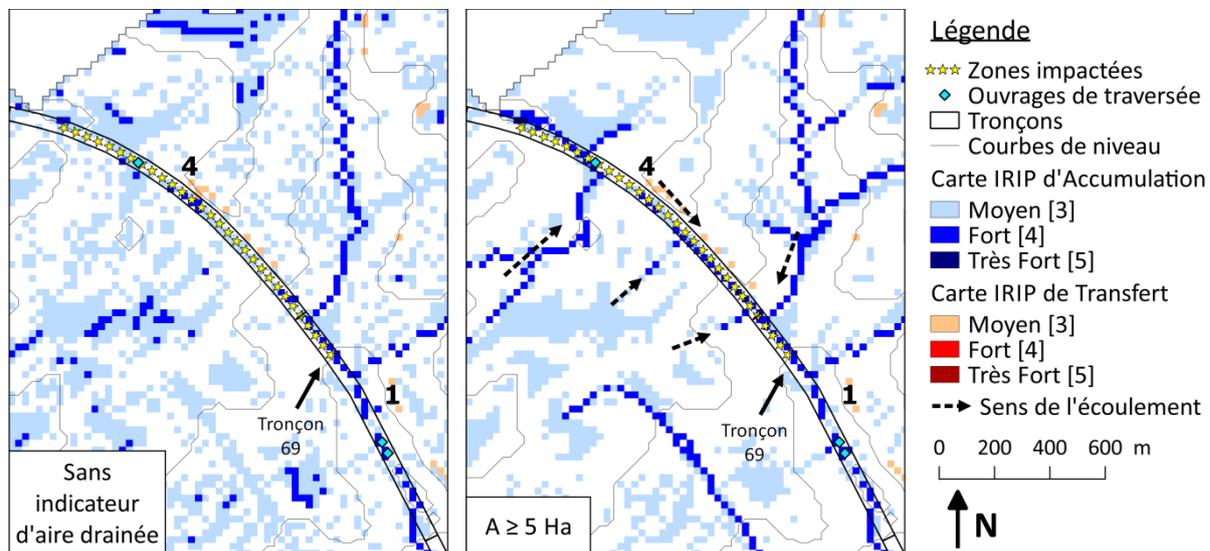


ILLUSTRATION DU TRONÇON 69 QUI N'EST PAS DETECTE COMME A RISQUE A CAUSE DE SON NIVEAU 1 DE VULNERABILITE MAIS LES CARTES IRIP MONTRE BIEN LA DYNAMIQUE SPATIALE DU DESORDRE