



**HAL**  
open science

# Diagnostic de l'exposition et de la vulnérabilité à l'aléa ruissellement Adaptation aux enjeux du réseau ferroviaire de la région Provence Alpes Côte d'Azur

Loïc Moulin, Lilly-Rose Lagadec, Marie-Anne Moulin, Isabelle Braud, Pascal  
Breil

## ► To cite this version:

Loïc Moulin, Lilly-Rose Lagadec, Marie-Anne Moulin, Isabelle Braud, Pascal Breil. Diagnostic de l'exposition et de la vulnérabilité à l'aléa ruissellement Adaptation aux enjeux du réseau ferroviaire de la région Provence Alpes Côte d'Azur. Colloque SHF - Risque Ruissellement : Diagnostic et Solutions, Nov 2020, Lyon, France. hal-03793276

**HAL Id: hal-03793276**

**<https://hal.inrae.fr/hal-03793276v1>**

Submitted on 30 Sep 2022

**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.

# Diagnostic de l’exposition et de la vulnérabilité à l’aléa ruissellement Adaptation aux enjeux du réseau ferroviaire de la région Provence Alpes Côte d’Azur

Loïc MOULIN<sup>1</sup>, Lilly-Rose LAGADEC<sup>2</sup>

Marie-Anne MOULIN<sup>3</sup>, Isabelle BRAUD<sup>4</sup>, Pascal BREIL<sup>4</sup>

<sup>1</sup> SNCF Réseau – Direction Générale Industrielle et Ingénierie – Département Voie et Abords - 6, avenue François Mitterrand 93574 La Plaine St Denis Cedex, France –loic.moulin@reseau.sncf.fr

<sup>2</sup> SNCF Réseau – Direction Zone Ingénierie Atlantique – Pôle d’ingénierie de Bordeaux – 53bis rue Amédée St-Germain 33000 Bordeaux, France

<sup>3</sup> SNCF Réseau – Direction Territoriale Provence Alpes Côte d’Azur – Pôle Environnement et Développement Durable – Les Docks-Atrium 10.4 – 10 place de la Joliette -13567 Marseille, France

<sup>4</sup> INRAE, RiverLy, 5 Rue de la Doua, CS 20244, 69625, Villeurbanne, France

*L’infrastructure ferroviaire est exposée aux aléas liés au ruissellement sur les territoires qu’elle intercepte, et les enjeux ferroviaires (disponibilité de l’infrastructure, régularité des circulations, sécurité des biens et des personnes) y sont vulnérables. Pour alimenter la gestion du risque à chaque stade de vie du système (construction, exploitation, maintenance), il est nécessaire de connaître l’aléa ruissellement pour pouvoir anticiper ses conséquences potentielles via un zonage opérationnel. Celui-ci doit être adapté au caractère linéaire des enjeux et aux attentes en termes de fonctionnalités système du Gestionnaire d’Infrastructure. Cette étude/diagnostic ruissellement sur l’axe Marseille-Vintimille présente les difficultés que peuvent poser l’exploitation opérationnelle des cartes d’aléa ruissellement et l’évaluation de la vulnérabilité de l’infrastructure. L’article souligne la portée et les limites des résultats d’une analyse préliminaire concernant des aléas aussi divers, incertains et parfois fugaces que ceux générés par le phénomène de ruissellement intense. L’approche exploratoire présentée montre qu’il est possible de prendre en compte le risque ruissellement dans la gestion des actifs de l’infrastructure en ouvrant le champ des variantes méthodologiques.*

*Mots-clefs : infrastructure linéaire, exposition à l’aléa ruissellement, vulnérabilité des enjeux ferroviaires, traitement cartographique opérationnel*

## *Diagnosis upon railway’s exposure of vulnerability to water runoff. Adaptation to French Mediterranean rail network’s stakes.*

*Railways are exposed to hazards provoked by water runoff on the landscapes and what is at stake could be infrastructure availability, punctual running of trains, safety of goods and people. To fuel risk management for the entire lifecycle of system (building, running, maintenance), water runoff must be known as a hazard, to anticipate its potential consequences with a zoning scheme. This one must reflect the linear characteristics of rail infrastructure, and the system functionalities expected by the Infrastructure Manager. This water runoff diagnosis affecting the rail area Marseille-Vintimille shows the challenges with the operational utilisation of runoff hazard mapping and with infrastructure vulnerability assessment. The article highlights reach and limits of preliminary assessment’s results, considering diversity, uncertainty and fugacity of intense water runoff effects. Exploratory approach displayed here demonstrates that it is possible to take in account risks related to water runoff in railway asset management by opening field of methodology variations.*

*Key words : linear infrastructure, exposure to water runoff, vulnerability of railway’s assets, workable map analysis*

### **DROIT D’AUTEUR :**

Le formulaire de transfert de droit d’auteur doit être retourné avec la version finale de votre texte.

## INTRODUCTION

De par son inscription dans les territoires, le système ferroviaire est exposé au ruissellement intense. Face à ces aléas, la vulnérabilité du système est à la fois fonctionnelle et physique.

La vulnérabilité fonctionnelle se traduit par des scénarii dominos, dans lesquels un incident ou un désordre sur un point du linéaire du réseau peut entraîner des perturbations généralisées des circulations, touchant à la disponibilité de l’infrastructure, voire à la sécurité des biens et des personnes.

Les fonctions de l’infrastructure sont assurées par de multiples composantes : la voie et ses supports, les ouvrages en terre et les ouvrages d’art, les installations de traction électrique, les équipements de signalisation, et les réseaux de télécommunication. Chacun de ces domaines a une vulnérabilité physique par rapport au ruissellement.

SNCF Réseau gère l’infrastructure ferroviaire nationale comme un système d’actifs. Derrière la stratégie unifiée de management des risques prenant en compte la vulnérabilité fonctionnelle du système, plusieurs activités, responsables de la gestion de l’Infrastructure tout au long de son cycle de vie, ont besoin d’une meilleure connaissance de l’exposition géographique et de la vulnérabilité physique de l’infrastructure au ruissellement [Lagadec et al., 2018].

Ce(s) diagnostic(s) des risques liés au ruissellement peu(ven)t être d’abord macroscopique(s) autour d’une cartographie de l’aléa et d’une identification de zones (tronçons) exposés et vulnérables, puis induire des analyses de risques plus détaillées autour des différentes conséquences induites par le ruissellement et des enjeux de chaque activité [Chazelle et al., 2014] :

- La conception pour les projets de développement, et parfois pour les travaux de régénération
- La surveillance du patrimoine existant
- La maintenance curative (et dans certains cas consignés, préventive) du patrimoine
- La régulation des circulations et l’exploitation

Les conséquences du ruissellement ne se limitent pas au domaine des ouvrages en terre, et ne s’arrêtent pas aux coulées de boue et inondations à cinétique rapide. Elles incluent aussi les glissements de talus sous l’effet de l’eau accumulée, les inondations au-dessus du champignon du rail conduisant à l’arrêt des circulations, mais aussi des effets moins visibles comme la mise en eau temporaire d’organes électriques ou la souillure du ballast et de la plateforme qui perdent en cohésion et en portance.

La gestion du risque ruissellement dans le système ferroviaire est donc tributaire de trois aspects :

- Le ruissellement est un phénomène qui peut être la cause – principale ou secondaire – d’une diversité d’aléas référencés (inondations, coulées de boue, glissements,...)
- L’infrastructure ferroviaire est un réseau linéaire, et les enjeux du système peuvent s’aborder au niveau de tronçons linéaires, de nœuds de réseaux, ou de composants essentiels
- Du point de vue des facteurs organisationnels et humains, les activités contribuant au management des risques naturels peuvent avoir des Maîtrises d’Ouvrages, des lignes budgétaires, et par là des objectifs différents.

En gardant comme fil rouge la problématique du large spectre des usages des diagnostics pour la gestion du risque ruissellement, , cette présentation balayera un certain nombre de questions méthodologiques autour d’une analyse de risque macroscopique.

## ENJEUX DU CAS D’ETUDE

Le cas d’étude ici présenté, l’axe ferroviaire Marseille – Vintimille en région Provence Alpes Côte d’Azur permet de mettre en évidence les besoins en diagnostic ruissellement sous forme de cartes d’aléas ruissellement, mais aussi de zonages opérationnels. En effet, l’existence de risques liés au ruissellement intense sur le réseau ferroviaire des départements côtiers de la région est connue à travers le souvenir d’événements exceptionnels : on pourra citer pour les plus récents ceux de janvier 2014 dans le Var, en octobre 2015 dans les Alpes Maritimes, ou en décembre 2019 sur ces deux départements.



Figure 1 : Zone d'étude : réseau ferroviaire régional organisé autour de la ligne structurante Marseille-Vintimille

Les risques liés au ruissellement des eaux pluviales sont pris en compte de façon disparate sur ce territoire à travers :

- Les études hydrauliques menées sur les projets impliquant de nouveaux ouvrages en terre, plateformes et drainages ferroviaires
- Les visites de surveillance et de maintenance des ouvrages en terre et hydrauliques répertoriés
- Les alertes météo déclenchant le ralentissement ou l'arrêt des circulations et les tournées intempéries sur les ouvrages connus pour leur fragilité lors des événements pluviométriques intenses.

Le diagnostic des risques liés au ruissellement présenté ici porte sur tout l'axe Marseille-Vintimille et est à destination de la Maîtrise d'Ouvrage Projet du Projet AZUR+ qui prévoit le déploiement d'une nouvelle génération de signalisation permettant l'amélioration de la performance (régularité, robustesse, sécurité) de l'axe Marseille-Vintimille, l'un des réseaux ferroviaires nationaux les plus chargés après l'Ile-de-France. Il répond à la volonté du Maître d'Ouvrage de s'assurer que le ruissellement intense ne fasse pas porter un risque accru sur les installations de signalisation projetées. Ce cas d'étude a l'avantage de porter sur un enjeu bien spécifique, à savoir les installations de signalisation qui sont sensibles à la mise en eau ou à l'emportement. Il a été proposé d'intégrer le diagnostic ruissellement dans le processus suivant :

- 1) Diagnostic macroscopique de l'exposition à l'aléa ruissellement, avec une analyse préliminaire de l'intensité de l'aléa et de la vulnérabilité d'un enjeu qui reste ici macroscopique : le tronçon, portion du linéaire ferroviaire. Le travail est réalisé à partir des données disponibles dans les bases de données internes et externes et avec un objectif de hiérarchisation des zones par rapport à un risque potentiel.
- 2) Identification des enjeux critiques (dans ce cas, les équipements de signalisation en projet) potentiellement touchés dans les tronçons.
- 3) Analyse détaillée du risque pour les points problématiques identifiés via la concomitance d'un enjeu pointé comme à préserver par la Maîtrise d'Ouvrage (Etape 2) et d'un tronçon évalué comme à risque potentiel dans le diagnostic macroscopique ruissellement (Etape 1). Le diagnostic détaillé implique un travail avec des données plus précises, y compris des études de terrain. A l'issue de celui-ci, la Maîtrise d'Ouvrage, décisionnaire *in fine* sur l'acceptabilité du risque, doit avoir toutes les cartes en main pour valider l'évaluation du risque et des propositions de traitement du risque (évitement de la zone à risque ou mesures de réduction de la vulnérabilité).

Le déroulé du diagnostic se fait en parallèle du déroulé du projet, avec des études Avant-Projet (AvP) pour fixer la fréquence spatiale des installations de signalisation et des études PROjet pour déterminer leur position exacte et la consistance des travaux. Cela explique qu’il ait été fait le choix d’inclure une étape 2 de partage entre le bureau d’ingénierie et la Maîtrise d’Ouvrage entre les étapes 1 et 3 d’expertise et diagnostic des risques liés au ruissellement portés par le bureau d’ingénierie.

Par ailleurs, ce diagnostic ruissellement alimentera à terme la mise à jour du Plan de Continuité d’Activités (PCA) Inondations mis en place par SNCF au niveau de la région PACA. Le PCA couvre toutes les activités de l’Entreprise contribuant à la continuité d’activité. C’est un document opérationnel contenant plusieurs volets : l’identification des éléments vulnérables de l’infrastructure, un outil d’aide à la décision pour la gestion de la crise et la définition des investissements à mettre en œuvre pour réduire le risque. Le diagnostic ruissellement serait alors une contribution à l’analyse de la vulnérabilité fonctionnelle du système, pensé autour d’enjeux critiques.

Cet article porte sur le diagnostic macroscopique (étape 1) en amont de la focalisation de l’évaluation du risque sur des enjeux spécifiques.

## DONNEES ET METHODES DE DETERMINATION DE L’ALEA ET DE LA VULNERABILITE

L’analyse de la méthode est présentée sur la ligne Cannes-Grasse qui a souvent subi des incidents liés à l’eau, notamment dans les vingt dernières années (couvertes par un recensement des incidents dans une base métier « Ouvrages en Terre » OT), notamment lors des intempéries de 2015. Les aléas liés à l’eau observés sur cette ligne sont principalement du type glissements, coulées et inondations, et certaines chutes de blocs rocheux peuvent aussi avoir pour facteur une accumulation d’eau de ruissellement.

### PRODUCTION DES CARTES D’ALEAS

Pour identifier les zones de susceptibilité au ruissellement, on travaille sur les cartographies issues du modèle IRIP [Indicateur de Ruissellement Pluvial Intense, Dehotin et Breil, 2011] :

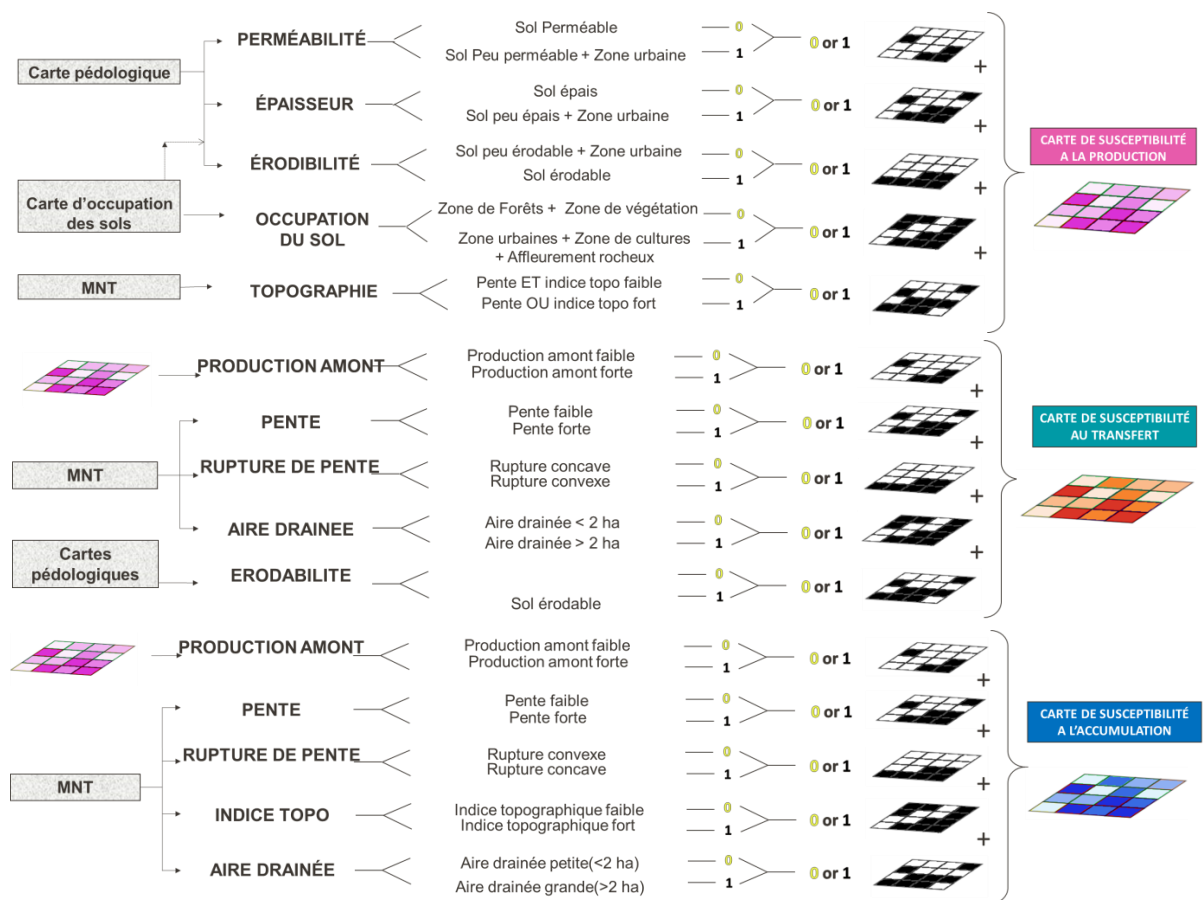


Figure 2 : Paramètres des cartes de susceptibilité au ruissellement IRIP : Production, Transfert, Accumulation

Les cartes de susceptibilité à la production, au transfert et à l'accumulation du ruissellement, issues du modèle IRIP, peuvent être produites à partir de données d'entrée facilement accessibles :

- Un Modèle Numérique de Terrain : ici celui de l'IGN de résolution 25 m
- Des données de cartographie pédologiques : ici la base Infosol de l'INRA,
- Des données d'occupation du sol : ici Corine Land Cover 2012, 1/100000<sup>ème</sup>

Les cartes obtenues ont la même résolution que le MNT : 25 m.

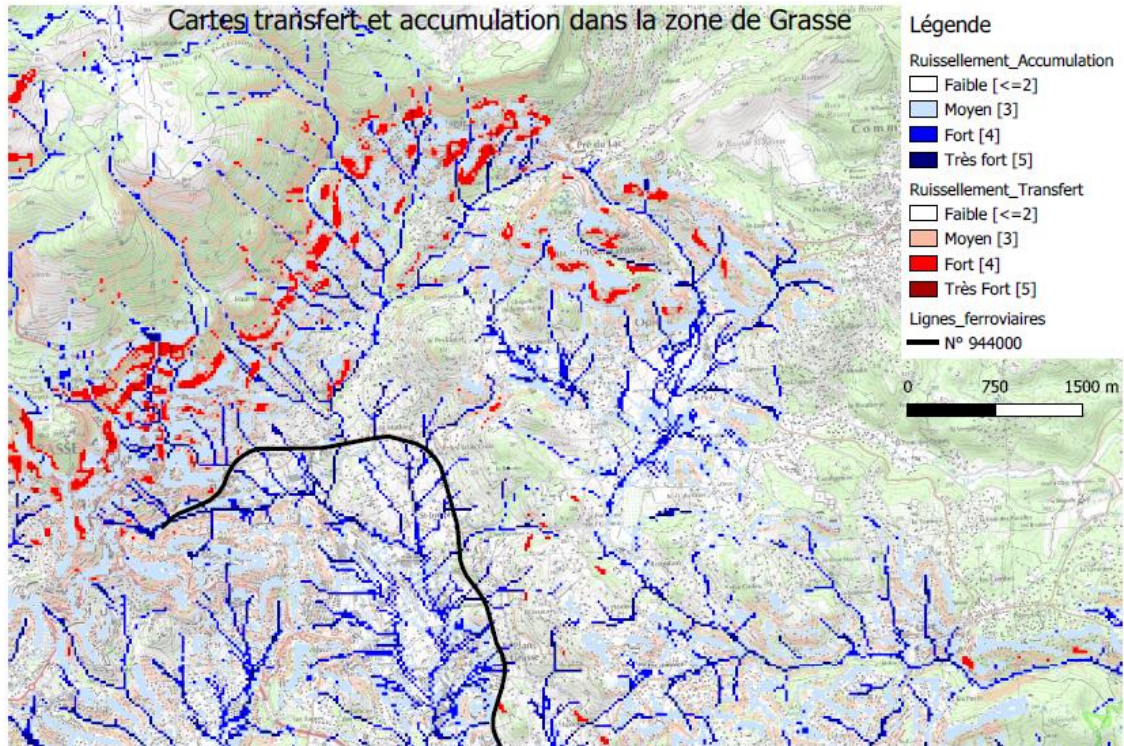


Figure 3 : Extrait des Cartes de Transfert et Accumulation autour de Grasse

Sur la base de la superposition des cartes d'aléas ruissellement avec la ligne ferroviaire, on peut identifier les zones où l'infrastructure est exposée au ruissellement [Dehotin et al, 2015, Lagadec, 2017] :

- Soit via les pixels forts d'accumulation du ruissellement, qui font ressortir des lignes d'écoulement et des étendues d'accumulation. Cela permet d'identifier des zones d'arrivées préférentielles de l'eau de ruissellement ou de charge solide sur l'infrastructure ;
- Soit via des amas de pixels forts de transfert du ruissellement au niveau de talus surplombant la voie ferrée où l'érosion peut générer des coulées de boue et des glissements.

## EVALUATION DE LA VULNERABILITE

La vulnérabilité est l'incapacité d'un enjeu à résister à l'aléa. L'infrastructure ferroviaire peut faire transiter les eaux de ruissellement sans dommages grâce à son réseau hydraulique constitué de :

- La configuration géométrique OT (« Ouvrages en Terre ») de l'infrastructure par rapport à son environnement (et notamment les bassins versants) : selon qu'il s'agit d'une surélévation par rapport au terrain naturel (remblai) ou d'un creusement par rapport au terrain naturel (déblai)
- Le patrimoine « ouvrages hydrauliques » (dispositifs de drainage, ouvrages de continuité et de traversée), mais aussi les pistes, comme éléments collecteurs et évacuateurs des eaux de ruissellement vers un exutoire. Le choix des « ouvrages hydrauliques » mis en place doit être adapté à la configuration géométrique globale

Dans une approche macroscopique, la vulnérabilité sera donc caractérisée par :

- La configuration OT (Figure 4) classée en 4 catégories :
  - Déblai : l’eau ruisselante peut y être piégée et s’écouler longitudinalement jusqu’à un exutoire. La longueur du déblai est un critère qui tend à augmenter sa vulnérabilité.
  - Profil mixte (déblai d’un côté, remblai de l’autre) : les eaux captées peuvent transiter longitudinalement mais aussi transversalement selon les conditions de transparence hydraulique
  - Remblai : l’eau ruisselante atteint le pied de talus bien avant les autres enjeux ferroviaires : la vigilance doit surtout porter sur la transparence hydraulique, pour éviter que ces ouvrages en terre constituent une barrière pour les écoulements. Cet effet « verrou hydraulique » est plutôt observé sur des courts remblais qui stockent peu de volume avant surverse
  - Profil rasant : cette catégorie distingue les remblais ou profils mixtes de faible hauteur, zones quasi-planes, où l’accumulation d’eau pourra plus facilement se traduire par une inondation (avec tous les désordres qui peuvent y être associés)

La longueur de l’ouvrage en terre est donc un paramètre qui n’a pas la même influence selon la configuration [Lagadec, 2017].

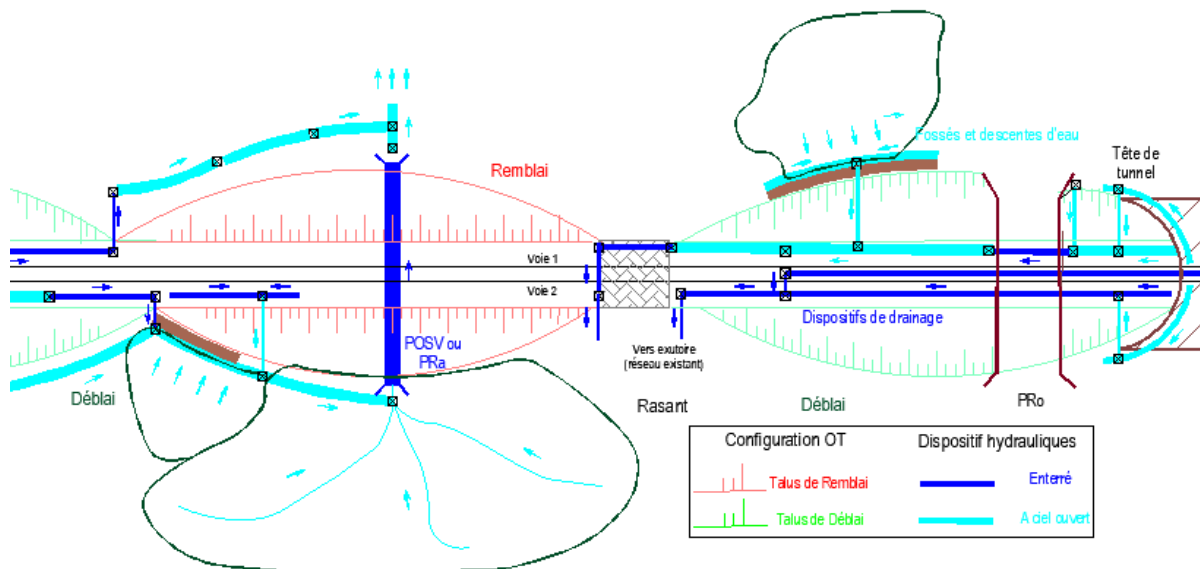


Figure 4 : Configurations de l’infrastructure et éléments de sensibilité aux écoulements extérieurs

- Les singularités macroscopiques : à défaut de connaître le détail des ouvrages hydrauliques et notamment les réductions de section du réseau, on identifie des zones de transition géométriques se traduisant souvent par des ruptures de continuité de l’écoulement, qui augmentent la vulnérabilité :
  - Ponts-Routes (PRo) : pistes et dispositifs hydrauliques voient souvent leur section réduite par la culée ou les piles du pont
  - Passages à Niveau (PN) : le passage planchéié et la chaussée peuvent réduire la continuité des dispositifs hydrauliques et cela peut créer un nœud de convergence des écoulements longitudinaux de la route avec ceux de la voie ferrée
  - Têtes de tunnel : une zone de transition d’ouvrages favorable à la discontinuité des dispositifs et à la convergence de plusieurs écoulements
- Les ouvrages contribuant à la transparence hydraulique : ici, dans la classification des ouvrages d’art recensés sur l’infrastructure, on ne prendra en compte que les Ponts-Rails (PRa). En général, il s’agit d’ouvrages d’ouverture supérieure au mètre, plus capables de faire passer un débit important d’eau. Leur absence peut donc augmenter la vulnérabilité. Les Petits Ouvrages sous Voies (POSV) également recensés dans la base de données ouvrages d’art, ne seront pas pris en compte, compte tenu de l’hétérogénéité de leur capacité à faire transiter les débits d’apport en cas d’événements extrêmes, comme le montre l’expérience (Lagadec, 2017, Lagadec et al., 2020).

Ces différents paramètres contribuent à fixer les niveaux de vulnérabilité selon l’arbre proposé en Figure 5.

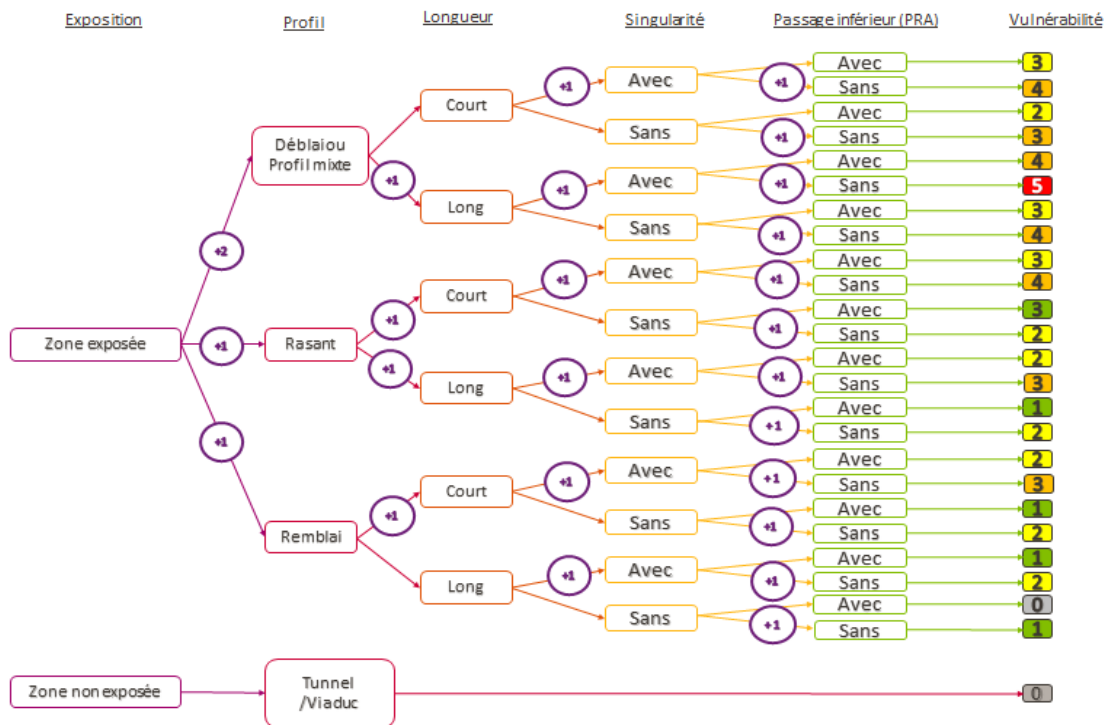


Figure 5 : Arbre de vulnérabilité

## FINALISATION DE L'ANALYSE PRELIMINAIRE : VARIANTES METHODOLOGIQUES

### COMMENT CROISER INTENSITE DE L'ALEA ET VULNERABILITE ?

La gravité d'un risque est abordée comme le produit de la vulnérabilité de l'enjeu avec l'intensité de l'aléa, défini comme la capacité de l'environnement avoisinant à générer l'événement redouté (aléa lié au ruissellement). La concrétisation du produit mathématique Vulnérabilité (V) x Intensité (I) par une matrice ne pose pas de problèmes, avec un curseur qui peut être ajusté en analyse de risque préliminaire (Figure 6).

V \ I	0	1	2	3	4 ou +
0		G4	G4	G3	G2
1		G4	G3	G2	G1
2		G3	G2	G1	G1

Figure 6 Proposition de matrice de croisement Vulnérabilité/Intensité, avec 4 niveaux de gravité : par la suite, dans une approche binaire on pourra considérer G1 et G2 comme potentiellement à risque

Cette gravité classée dans l'ordre décroissant du potentiel d'impact attendu (de G1 à G4) est qualifiée de « risque potentiel » car :

- Elle est issue du produit d'une évaluation macroscopique (donc grossière) de l'intensité et de la vulnérabilité
- Il faut qu'elle soit associée à une probabilité pour qu'elle se concrétise en risque. Le produit de la probabilité et la gravité est le risque. Pour le phénomène de ruissellement, on va associer la probabilité à celle de l'élément déclenchant, qui est la pluie. La susceptibilité au ruissellement ne se concrétisera par du ruissellement intense qu'en cas de pluie forte.

La difficulté réside surtout dans le croisement spatial. On dispose dans le projet SIG :

- D'une évaluation macroscopique de la vulnérabilité par tronçon
- De cartes d'aléa (susceptibilité au ruissellement) avec des pixels de valeurs qualitatives différentes qui permettent de mettre en évidence des points ou zones plus exposées au ruissellement

Pour croiser ces données de nature et de forme différentes, deux approches peuvent être retenues :

- Recenser tous les points ou zones potentiellement exposées au ruissellement, et étudier ce que cela peut générer au niveau du point d'arrivée d'eau, mais aussi de tout le système hydraulique jusqu'à



l’exutoire. Le travail à l’échelle de cet ensemble peut s’appuyer sur le découpage en tronçons vulnérables, mais nécessite souvent des données plus précises de géométrie du réseau hydraulique, pour identifier tous les points du système impacté. Cette approche pourra être utilisée par la suite lors de visite terrain organisées sur les zones où des enjeux auront été identifiés par la maîtrise d’ouvrage.

- Evaluer par tronçons l’intensité de l’aléa pour la croiser avec la vulnérabilité et aboutir à une gravité macroscopique. Beaucoup de variantes de combinaisons sont possibles. A défaut d’être exhaustif, les paragraphes suivants s’attacheront à faire ressortir des familles méthodologiques de découpage et d’attribution de l’intensité aux tronçons.

### QUEL EST L’IMPACT DE LA METHODE DE DECOUPAGE EN TRONCONS?

En dehors des ouvrages en terre qui font l’objet d’une surveillance spécifique, il n’existe pas de base de données vérifiée du découpage de la ligne en configuration OT. La délimitation des tronçons sur toute la ligne peut se faire par deux grands types de méthodes :

- Une méthode automatique : ici, une automatisation du découpage en ouvrages en terre a été réalisée sur la base des points topographiques du MNT 1 m (*Découpage 1*). Cependant, le calcul repose sur des a priori sur la représentativité des profils en travers pour un tronçon, et sur la position relative des points correspondants à l’axe de la voie et ceux correspondants aux abords. Le résultat obtenu pour un tronçon peut donc être sensible à certains artefacts du MNT (par exemple le nettoyage incomplet des pixels de végétation ou un décalage de géolocalisation avec l’axe de la voie ferrée).
- Une méthode visuelle, basée sur la confiance à l’œil de l’opérateur humain pour détecter les transitions déblai/remblai. Ici, le *Découpage 2* a été fait en exploitant une application interne SNCF qui permet de visualiser les lignes ferroviaires par des photos prises depuis les trains. Cette méthode n’est toutefois pas univoque et dépend de l’attention et la sensibilité de l’expert.

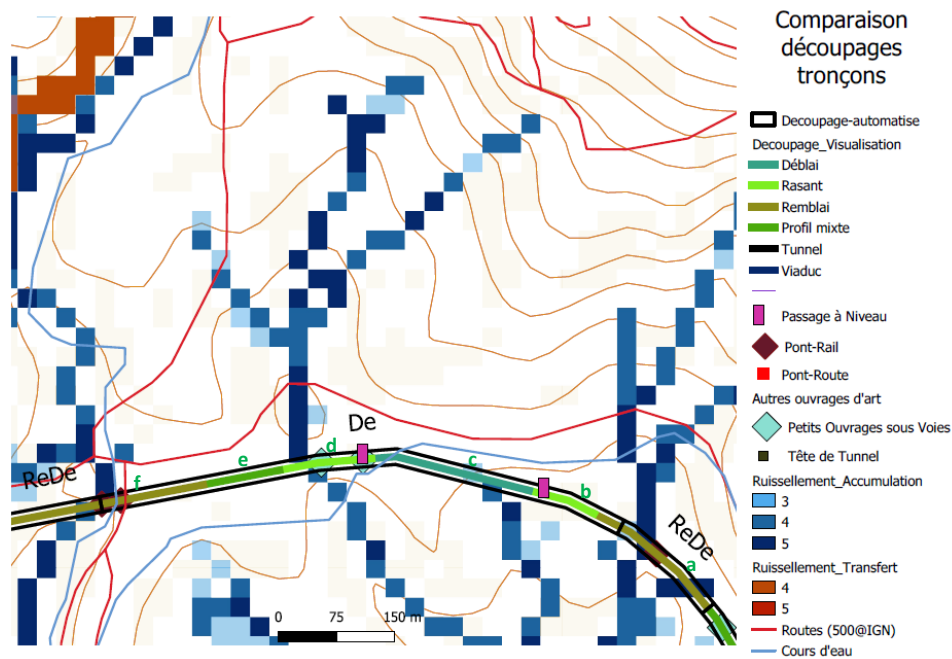


Figure 7 : Illustration de deux découpages différents des tronçons OT

Les deux approches génèrent des découpages qui diffèrent dans les détails, non sans conséquences. On peut ici illustrer ces distinctions par une statistique globale : les 16 km de la ligne Cannes-Grasse sont découpés en 48 tronçons avec le découpage automatisé (*Découpage 1*), et en 97 tronçons avec un découpage fait pas à pas par la visualisation des photos de la ligne (*Découpage 2*), ou par un cas illustratif ci-dessus (Figure 7) :

- L’approche automatisée identifie un tronçon de 500 m environ considéré comme en déblai et entouré de deux profils mixtes. En visualisant les images de la ligne, on se rend compte que ces tronçons encadrants sont plutôt des remblais (tronçons a et f) que des profils mixtes, ce qui fait varier le calcul de la vulnérabilité.
- En outre le remblai qui suit le tronçon d’intérêt, commence avant dans l’approche visuelle par rapport au résultat de l’approche automatisée, ce qui fait que les PRA et les zones d’écoulement mises en évidence par les cartes de ruissellement ne sont pas dans le déblai, mais bien dans une zone

où ils peuvent passer sous une infrastructure surélevée. Le tronçon en déblai lui-même, est en fait constitué d’une succession de déblais, de profils rasants, et de profils mixtes de transition.

- La zone principale d’arrivées d’eau d’après les cartes de ruissellement se trouve dans un profil rasant avec un passage à niveau (tronçon d). Ce court profil en rasant ressortira à part dans l’analyse avec ce découpage, alors que le découpage automatisé conduira à attribuer une note de gravité commune aux 500 mètres considérés en déblai.

Les détails apportés par la méthode de vérification visuelle apportent en précision mais leur qualité et pertinence est pour l’instant tributaire de l’effort que peut consacrer un opérateur à balayer les images de pleine voie. L’impact possible du choix du découpage sur les conclusions de l’analyse macroscopique de risque notamment le nombre et le pourcentage de tronçons mais aussi sur le nombre de kilomètres qui peuvent être retenus pour une analyse détaillée, seront évoqués plus bas en discussions.

### COMMENT TRADUIRE L’INFORMATION DES CARTES DE RUISSLEMENT EN VALEUR D’INTENSITE PAR TRONÇON ?

L’intensité de l’aléa est évaluée selon l’analyse des pixels des cartes de susceptibilité au transfert et à l’accumulation du ruissellement au niveau du tronçon. Le passage d’une analyse visuelle à une analyse automatisée inclut la réalisation d’une zone tampon autour du tronçon, l’attribution à chaque pixel de cette zone de la valeur maximale des deux cartes : accumulation (A) et transfert (T), et l’extraction de la distribution statistique des valeurs de pixels (A U T) dans la zone tampon [Lagadec, 2017]. Pour attribuer ensuite une valeur d’intensité d’aléa au tronçon, il faut choisir les informations statistiques prises en compte : focalisation sur les seuls pixels forts et très forts (4 et 5) ou prise en compte aussi des pixels moyens (3), seuil absolu basé sur le nombre de pixels, ou seuil relatif basé sur la proportion de pixels. A titre d’exemple, on présentera deux choix de calcul de l’intensité :

- *Méthode statistique 1* : attribution d’une Intensité 2, dès qu’il y a un pixel 5 dans la zone tampon, et d’une Intensité 1 dès qu’il y a deux pixels 4 ou 5 dans la zone tampon. Cette méthode est assez proche de la méthode binaire (détection du tronçon si 1 pixel fort ou très fort selon sa vulnérabilité) retenue pour l’évaluation du modèle IRIP [Lagadec, 2017])
- *Méthode statistique 2* : attribution d’une Intensité 2, dès qu’il y a 15% de pixels 4 ou 5 dans la zone tampon, et d’une Intensité 1, dès qu’il y a 25% de pixels 3, 4 ou 5 dans la zone tampon.

Les trois exemples ci-dessous (Figure 8) illustrent visuellement la capacité de chacune des méthodes à attribuer des intensités à trois déblais ayant subi des glissements.

Dans le cas 1, la densité de pixels forts et très forts est suffisamment importante pour qu’une Intensité 2 soit attribuée au tronçon quelle que soit la méthode statistique utilisée. On notera qu’il s’agit d’un déblai ayant un historique de plusieurs glissements superficiels.

Dans le cas 2, le déblai, qui a connu un glissement, intercepte une arrivée d’eau bien nette, mais qui ne représente que 2 pixels forts et très forts. Il se voit donc attribuer une Intensité 1 avec la *Méthode statistique 1*, mais une Intensité 0 avec la *Méthode statistique 2* (faute d’une grande proportion de pixels au moins moyens dans la zone tampon)

Dans le cas 3, le déblai, qui a connu un glissement, est à l’écart de pixels forts d’accumulation d’eau, et au niveau de la zone d’incident, ne ressortent que quelques pixels moyens en transfert, qui représentent toutefois visuellement un amas. Il se voit attribuer une Intensité 0 avec la *Méthode statistique 1*, mais une Intensité 1 avec la *Méthode statistique 2*.

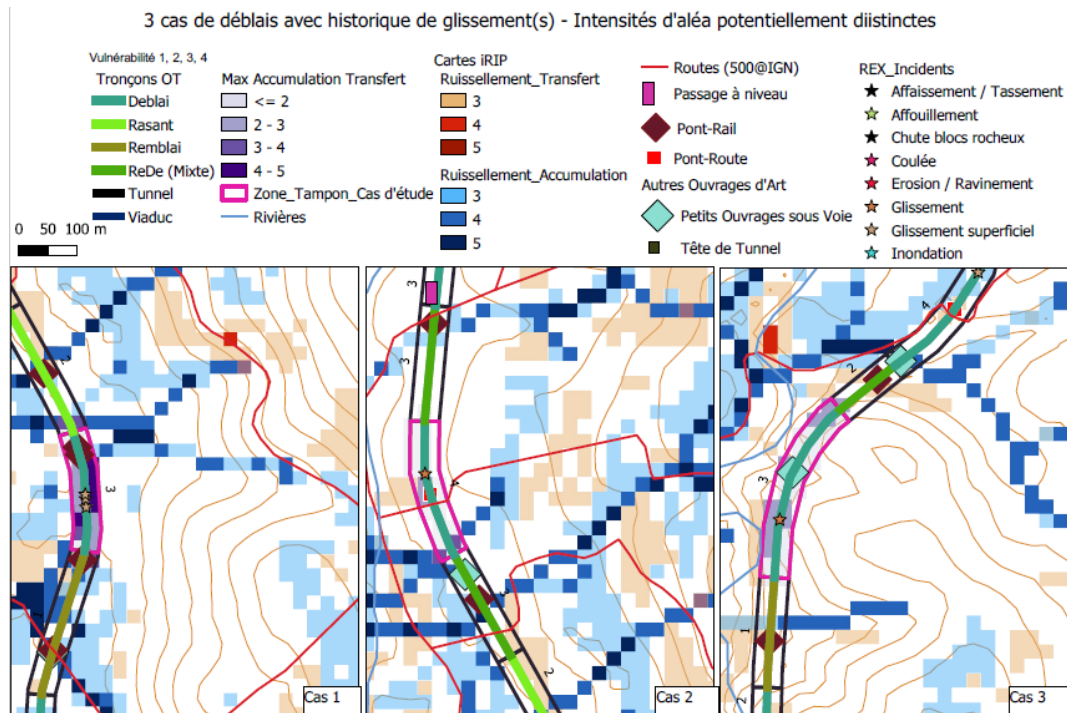


Figure 8 : Cas de déblais avec glissement(s) dont l’exposition à l’aléa ruissellement prend des formes différentes

### DISCUSSIONS : LA PERTINENCE DES RESULTATS DE L’ANALYSE PRELIMINAIRE

Une fois l’intensité et la vulnérabilité croisées, les résultats de l’analyse préliminaire se présentent sous la forme de l’attribution de niveaux de gravité potentielle (classée de G1 à G4) à chacun des tronçons. La pertinence des résultats peut être analysée selon deux prismes.

On peut comparer les zones considérées comme à risque potentiel avec les données d’incidents, qui sont une *proxy-data* d’un risque avéré [Braud et al., 2020]. On s’appuie alors sur des tableaux de contingence, et on calcule des probabilités de détection (POD) et taux de fausses alarmes (FAR) (Figure 9)

Table de contingence			Exemple : Découpage 1, Méthode Statistique 2		
Potentiel risque	Gravités Retenues	Gravités Ecartées	Potentiel risque	G1-G2	G3-G4
Incident(s) recensé(s)	V+	F-	Incident(s) recensé(s)	7	0
Pas d’incident recensé	F+	V-	Pas d’incident recensé	29	12

Figure 9 : Rappel de la méthode d’évaluation par table de contingence

Ainsi, on constate des taux de fausses alarmes assez similaires (~0,8) quelle que soit la méthode de découpage ou la méthode statistique utilisée (Figure 9 et Figure 10). Du point de vue des probabilités de détection, c’est seulement avec le *Découpage 2* que la *Méthode Statistique 1* (Intensité attribuée en fonction du nombre de pixels forts ou très forts) n’arrive pas à détecter 3 zones à incidents recensés (dont le cas 3 de la Figure 8), bien détectés avec la *Méthode Statistique 2* (Intensité attribuée en fonction de la proportion de pixels). Mais les résultats dépendent de la combinaison de différents curseurs : ici, on ne regarde que les tronçons auxquels sont attribués la gravité G1 et G2, mais, en ne retenant que les tronçons à G1, tous les tronçons à incidents ne seraient pas dépistés avec la *Méthode Statistique 2*, sans que cela n’affecte la probabilité de détection avec la *Méthode Statistique 1*.

Découpage 1, Méthode Statistique 1				Découpage 1, Méthode Statistique 2			
Potentiel risque	G1-G2	G3-G4		Potentiel risque	G1-G2	G3-G4	
Incident(s) recensé(s)	7	0	POD = 1	Incident(s) recensé(s)	7	0	POD = 1
Pas d’incident recensé	27	14	FAR ~0,8	Pas d’incident recensé	29	12	FAR ~0,8

Découpage 1, Méthode Statistique 2				Découpage 2, Méthode Statistique 2			
Potentiel risque	G1-G2	G3-G4		Potentiel risque	G1-G2	G3-G4	
Incident(s) recensé(s)	5	3	POD = 0,63	Incident(s) recensé(s)	8	0	POD = 1
Pas d’incident recensé	27	62	FAR ~0,84	Pas d’incident recensé	38	51	FAR ~0,83

Figure 10 : Comparaison des tables de contingences obtenues avec la *méthode statistique 1* (Intensité attribuée en fonction du nombre de pixels forts ou très forts) et la *méthode statistique 2* (Intensité attribuée en fonction de la proportion de pixels)

Il est toutefois nécessaire de prendre du recul par rapport à la *proxy-data* « tronçons avec incidents ». On constate que toutes les méthodes parviennent à faire ressortir les tronçons *récidivistes* avec plusieurs occurrences d’incidents. Les zones d’incidents qui se voient attribuer un niveau de gravité plus bas correspondent à des incidents uniques de type glissements (dont le lien avec le ruissellement peut ne pas être direct) observés lors du même événement d’octobre 2015, où la pluviométrie a atteint des valeurs exceptionnelles (quantile horaire plus que centennal) sur la partie Sud de la ligne Cannes-Grasse. En outre, il faut être prudent avec le taux de fausses alarmes semblant élevé. La base d’incidents disponibles ne couvrant qu’une vingtaine d’années, certaines zones potentiellement à risques peuvent ne pas avoir subi d’incidents en l’absence, sur la période considérée d’une pluviométrie exceptionnelle liée à des orages localisés.

On peut aussi juger de l’efficacité de la méthode du diagnostic de risque macroscopique à sa sélectivité : arrive-t-on à écarter suffisamment de zones ou de kilomètres sur le linéaire étudié afin de pouvoir mieux concentrer l’effort des étapes suivantes du processus d’évaluation des risques. Sans surprise, le *Découpage 1*, moins fin, conserve les trois quarts du linéaire de la ligne (Figure 11). Le *Découpage 2* est plus sélectif, et encore plus quand on se concentre sur les pixels forts ou très forts (*Méthode Statistique 1*) avec moins de la moitié des tronçons retenus.

Méthode	Nombre de tronçons retenus (G1-G2)	Linéaire cumulé retenu (G1-G2)
Découpage 1, Méthode Statistique 1	34/48	14 km /16 km
Découpage 1, Méthode Statistique 2	36/48	13 km /16 km
Découpage 2, Méthode Statistique 1	32/97	7 km/16 km
Découpage 2, Méthode Statistique 2	46/97	9 km/16 km

Figure 11 : Bilan des tronçons qui pourraient être retenus à l’issue du diagnostic macroscopique pour une analyse plus détaillée

La prudence doit rester de mise avec des approches d’analyse de risque reposant sur un quota a priori de nombre de zones à risques. Le ruissellement pouvant se produire sur tout le territoire, il n’est pas anormal qu’une grosse proportion du linéaire puisse avoir un potentiel de risque (au moins à l’échelle macroscopique). Néanmoins, dans un processus de management de risque opérationnel, il pourra être apprécié par la Maîtrise d’Ouvrage d’avoir ce type d’indicateur, pour montrer qu’il peut appuyer ses décisions sur une hiérarchisation marquée des zones à risques proposées par le bureau d’études.

## CONCLUSION : BILAN ET PERSPECTIVES

Les résultats préliminaires du diagnostic ruissellement présentés ici soulignent le caractère encore exploratoire de la démarche, qui ne se limite pas aux choix – déjà bien éprouvés à l’occasion d’autres études - des cartographies de l’aléa et d’arbres de vulnérabilité macroscopique de l’infrastructure ferroviaire. Le niveau de confiance accordé aux résultats du diagnostic ruissellement dépend beaucoup de la manière dont le bureau d’ingénierie et la Maîtrise d’Ouvrage co-construisent le processus d’évaluation du risque :

- Il semble incontournable de réaliser l’analyse de risque en deux étapes : l’une, préliminaire, macroscopique, basée sur des outils et méthodes de dépistages des zones à risque, l’autre, plus détaillée, incluant l’approche terrain. Mais les questions se posent sur l’articulation entre ces deux étapes, et l’implication de la Maîtrise d’Ouvrage sur les jalons de passage de l’une à l’autre.
- Pour les analyses de risque préliminaires sur une infrastructure linéaire, le choix de travailler sur des tronçons, dans l’optique de couvrir toute la ligne, ce qui a été fait ici, prête à discussions : pertinence

du découpage retenu, traduction géostatistique à l’échelle d’un tronçon ferroviaire de l’interprétation visuelle des cartes d’aléas. Avec des outils de bureau qui gagnent en performance (visualisation des voies ferrées et des routes à hauteur d’habitable, efforts actuellement déployés à SNCF Réseau sur la connaissance du patrimoine, y compris hydraulique), il peut être envisagé de gonfler l’analyse préliminaire en travaillant directement sur des systèmes hydrauliques, basés non plus seulement sur l’analyse de la configuration OT mais aussi sur l’analyse des sens d’écoulements dans le réseau hydraulique

- Pour les analyses plus détaillées, on pourra continuer à faire appel à l’expertise locale, aux calculs d’ingénierie et à la modélisation physique fine [Astee, 2017]

Pour conclure, ce travail (en cours) montre pourquoi et comment exploiter les cartes d’aléa ruissellement dans le cadre d’un diagnostic de risque naturel sur des lignes ferroviaires. Il permet un retour d’expérience qui s’inscrit dans un processus d’amélioration continu des procédures opérationnelles, s’appuyant sur des outils et des briques méthodologiques en perfectionnement. L’apport de l’étude réside dans l’analyse technique proposée, et dans les perspectives opérationnelles offertes en mettant en évidence des zones qui étaient jusqu’alors dans l’« angle mort » du management du risque, mais qui pourraient être affectées par le ruissellement. L’objectif est de fournir une information nouvelle et exploitable aux Maîtrises d’Ouvrage travaillant sur de grands linéaires, que cela soit pour contribuer à l’analyse des risques sur un projet de développement de système de signalisation ou pour alimenter la mise à jour de Plan de Continuité d’Activité Inondations. Multiplier la mise en pratique des différents outils, méthodes, et résultats de diagnostic ruissellement permettra de progresser dans la prévention de ce risque via les retours d’expérience sur les résultats obtenus et surtout sur la fertilité des échanges avec le gestionnaire d’infrastructure.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier Malory Flipo, coordinateur du risque inondation à l’Infrapôle pour son partage de connaissances sur les portions de lignes interceptées par les Territoire à Risques d’Inondations (TRI) côtiers de la région Provence-Alpes-Côte d’Azur. Les remerciements vont également à Alain Ducreau, Directeur Technique du projet Azur+ qui, par son partage des enjeux du projet et ses questionnements de non-hydraulicien a aidé de façon décisive à cadrer la commande de diagnostic hydraulique.

Une mention spéciale également à Blandine Chazelle qui a initié à SNCF Réseau le processus d’amélioration continue des méthodes de diagnostic des risques liés à l’eau et la prise en compte du ruissellement dans le management du risque ferroviaire, dont ce travail est héritier.

## REFERENCES

- Astee (Association Scientifique et Technique pour l’Eau et L’Environnement) (2017) – *Mémento Technique – Conception et dimensionnement des dispositifs de gestion des eaux pluviales et de collecte des eaux usées*.
- Braud I., Lagadec L.R., Moulin L., Chazelle B., Breil P. (2020) - *A method to use proxy data of runoff-related impacts for the evaluation of a model mapping intense storm runoff hazard : application to the railway context* Natural Hazards and Earth System Sciences. doi :10.519/nhess-20-947-2020
- Chazelle B., Lambert L., Capoccioni C.P. (2014) - *Railway vulnerability in case of extreme floods. Knowledge and risk management*. La Houille Blanche 48-54. doi :10.1051/lhb/2014016
- Dehotin J., Breil P. (2011) - *Technical report of the IRIP project : mapping the flooding by runoff*. IRSTEA Hydrology-Hydraulic Research Unit, <https://hal.inrae.fr/hal-02595951>
- Dehotin J., Chazelle B., Laverne G., Hasnaoui A., Lambert L., Breil P., Braud I. (2015) - *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
- Lagadec L.R. (2017) - *Evaluation et développement de la méthode IRIP de cartographie du ruissellement. Application au contexte ferroviaire*. Université Grenoble-Alpes. Thèse de Doctorat.
- Lagadec L.R., Moulin L., Braud I., Chazelle B., Breil P. (2018) - *A surface runoff mapping method for optimizing risk assessment on railways*. Safety Science. doi : 10.1016/j.ssci.2018.05.014

Lagadec L.R., Moulin L., Braud I., Chazelle B., Breil P. (2020) - *Constitution et analyse d’une base de données historique d’incidents liés au ruissellement sur les voies ferrées*, Colloque Ruissellement SHF