CARTO ALEA (Zones inondables) 4.1.6. : IRIP test plugin pour QGIS3

Pascal Breil

▶ **To cite this version:**

Pascal Breil. CARTO ALEA (Zones inondables) 4.1.6. : IRIP test plugin pour QGIS3. [Rapport de recherche] INRAE UR-RiverLy. 2020. hal-03787481

HAL Id: hal-03787481
https://hal.inrae.fr/hal-03787481

Submitted on 25 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.

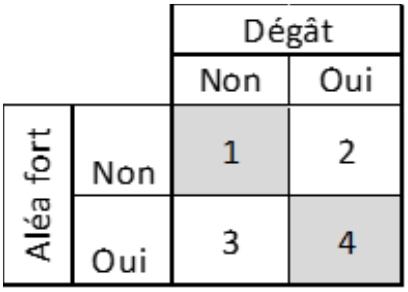
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

PROGRAMME MTES (DGPR / SRNH) - INRAE 2020
Connaissance et prévention des risques naturels et hydrauliques

Ces travaux bénéficient du soutien du Ministère chargé de l'environnement, de l'énergie et de la mer par décision de subvention n°21367400

4.1 : CARTO ALEA (Zones inondables)

4.1.6. : IRIP test plugin pour QGIS3



DECEMBRE 2020

Breil Pascal

INRAe, Unité de recherche RIVERLY
5, rue de la Doua
CS 20244,
69625 Villeurbanne cedex

www.inrae.fr

Préambule

Les conditions sanitaires ont limité les visites de terrain avec les béta-testeurs. Cela a impacté la liste des rendus attendus (cf. fiche action ci-après). Le plugin a été diffusé auprès des utilisateurs prévus à ce stade dans le but à ce stade de bien cerner les problématiques et de réfléchir sur la nature des données proxy disponibles pour « caler » les seuils de sensibilité des modélisations IRIP. Deux articles courts (recueil des résumés étendus) de la visio-conférence « Risque ruissellement : Diagnostic et Solutions » organisée du 30 novembre au 2 décembre par la SHF et l'ANEB sont repris ici. Le premier est repris in-extenso car j'en suis le premier auteur (Breil et al.). Pour le second (Moulin et al.), seuls des extraits sont utilisés pour illustrer l'approche SNCF du risque à partir d'une caractérisation de la vulnérabilité propre à l'infrastructure ferroviaire. En conséquence ce rapport ne peut pas être diffusés au-delà des personnes concernées par cette action. L'application smartphone n'a pu être développée compte tenu du recrutement avorté d'un CDD dans cette action.

.

Titre complet de l'action ou s/ action (*acronyme éventuel*)	**IRIP test plugin pour QGIS3 et application smartphone pour bancarisation des données terrain *IRIP_plugin&apps***
Action n°	**4.1.e**
Responsable Irstea (Unité)	P.BREIL (RIVERLY) coût complet: 44€ demande:21.3€ taux :49%
Responsable SRNH	J. Ph. PENE et J.M. HELMER (BRIL)
Contexte et enjeux	Les déclarations CatNat liées aux inondations par ruissellement intense sont équivalentes en nombre et coût à celles des inondations par débordement de cours d'eau. La cartographie de ces inondations est donc un enjeu important de la Directive Inondation pour la France. Les modèles proposés sont tous confrontés au manque de données d'évaluation des cartographies produites. Il est donc nécessaire de développer des stratégies de recueil des données disponibles et de bancarisation des données à venir pour fournir des cartographies suffisamment validées et support d'aide à la décision.
Objectifs du projet	1-Mettre le plugin Qgis3 du modèle IRIP développé en 2019 à disposition de services opérationnels pour définir les post traitements à développer sous Qgis pour disposer de cartes opérationnelles. 2-Développer une application smartphone sous Android en version beta pour alimenter une base de données incidents liés au ruissellement intense.
Travaux déjà réalisés et travaux prévus	**Rappel des acquis si caractère pluriannuel de l'action :** lancée en 2018, cette action a permis la mise à niveau en langage nouvelle génération (python3) du modèle Irip pour les besoins opérationnels sous la forme d'un plugin Qgis et pour les besoins de la recherche. L'action 2019 a aussi permis l'étude de faisabilité des solutions d'une application smartphone de recueil des données de terrain à l'usage des services opérationnels et des chercheurs. **Travaux prévus :** -Le plugin Qgis du modèle IRIP sera mis au premier trimestre 2020 à disposition de la DDTM11 et la DDTM66, de l'EPTB Fleuve Hérault et de la direction Ingénierie de la SNCF (collaborateur historique de la méthode). Des zones tests seront retenues d'un commun accord. L'objectif est en 2020 la mise en pratique du plugin et l'usage des données d'évaluation qui sont nécessaires au choix des seuils de sensibilité des aléas érosion et accumulation, ainsi que des post-traitements qui seraient requis pour construire des cartes de risques. -L'application smartphone sera développée au 4em trimestre et la liaison avec le site géoportail testée. Les éléments du cahier des charges seront discutés avec les services testeurs du plugin IRIP. L'année 2021 permettra un retour vers les beta testeurs et la mise à disposition élargie de ces deux applications.

Durée si action pluriannuelle	*Durée*	*Début de l'action*	*Fin de l'action*
	2ans	*Année 2020*	*Année 2021*
Produits et valorisations projetés	**Nature** (publi scient, technique, guide méthodo, outil, formation …)	**Cibles visées**	**Echéancier** (au moins un rapport d'étape par an)
	Guide méthodologiques du plugin Qgis et première version de l'Apps l'application smartphone.	DDTMs, DREALs, EPTBs, Métropoles	1 rapport chaque années

Equipe de travail Irstea (noms, Unités)	P. Breil, I. Braud (RIVERLY)
Partenariats envisagés	Mr Boyer (DDTM11), Mr Leon (DDTM66), Mme Carrere (EPTB fleuve Hérault)
Références ou bibliographie sommaire	Rapport 2019 DGPR/SRNH de cette action
Date de mise à jour de la fiche :	20/11/2019

TABLE DES MATIERES

Table des matières

I. Une analyse des « données proxy » pour l'évaluation des cartographies des aléas liés au ruissellement intense pluvial 6

a. Introduction 6

b. Matériel et Méthode 7

c. Résultats 9

1) Cas des données ponctuelles 9

2) Cas des données linéaires 11

3) Cas des données surfaciques 14

d. Conclusion - Discussion 15

e. Remerciements 16

f. Références 16

II. Diagnostic de l'exposition et de la vulnérabilité à l'aléa ruissellement adapté aux enjeux du réseau ferroviaire de la région PACA 17

g. Enjeux du cas d'étude 17

h. Données et méthodes de détermination de l'aléa et de la vulnérabilité 18

i. Production des cartes IRIP d'aléas transfert et accumulation 19

j. Evaluation de la vulnérabité 19

k. Discussions : Variantes de finalisation de l'analyse préliminaire 21

1) Comment croiser intensité de l'aléa et vulnérabilité ? 21

l. Quel est l'impact de la méthode de découpage en tronçons ? 22

m. Comment traduire de l'information des cartes de ruissellement en valeur d'intensité par tronçons ? 23

n. Conclusion: bilan et perspectives 24

o. Remerciements 25

p. Références 25

I. Une analyse des « données proxy » pour l'évaluation des cartographies des aléas liés au ruissellement intense pluvial

Reproduction in extenso de l'article présenté à la visio-conférence « Risque ruissellement : Diagnostic et Solutions[1] » par

Pascal BREIL [1], Isabelle BRAUD [1], Jérôme PINTA [1], Christine POULARD [1], Loic MOULIN [2], Lilly-Rose LAGADEC [2], Blandine CHAZELLE [2]

[1] INRAE, UR RIVERLY, 5 rue de la Doua 69625, France, nom.prenom@inrae.fr

[2] SNCF, DG Industrielle & Ingénierie, Dép. Voies & Abords / Dir. Zone d'Ingénierie Atlantique, PRI Bordeaux / Ingénierie et projets régionaux -PRI CF EG

Si l'on convient de définir le ruissellement intense comme un ensemble de processus d'érosion, de transport et dépôts qui se réalisent au gré de la topographie, de la pédologie et des usages du sol, il est compliqué d'en avoir une ou des métriques directes pendant un événement. Cela est d'autant moins faisable que les zones de passage du ruissellement intense ne sont pas connues, comme cela peut être le cas pour le débordement d'un cours d'eau, et ne sont à l'évidence pas continus d'amont en aval dans les versants. L'évaluation des modèles de ruissellement intense souffre alors du manque de données d'observation et il est nécessaire de recourir à des informations approchées, post événement, qui sont des résultantes finales de ce qui s'est passé. Le terme de « proxy » est utilisé pour décrire ce type d'information. Nous nous intéressons dans ce travail à décrire plusieurs types de proxy, proposons une manière de les utiliser pour évaluer les cartographies prédictives des processus du ruissellement intense. Les proxy de natures ponctuelle, linéaire et surfacique sont présentés au travers de plusieurs cas d'étude. Les limites de ces données sont discutées et le recours à des informations complémentaires pour mieux évaluer le caractère prédictif des cartographies est abordé.

Mots-clefs : ruissellement intense, proxy, évaluation

Proxy data" analysis for the evaluation of heavy rainfall runoff hazard maps

While intense runoff should be defined as a set of erosion, transport and deposition processes that occur according to topography, soil and land use, it is complicated to have a direct metric or metrics during an event. This is all the more impractical as the areas of intense runoff are not known, as may be the case for river overflow, and are obviously not continuous from upstream to downstream on the slopes. The evaluation of intense runoff patterns then suffers from the lack of observational data and it is necessary to use approximate, post-event information, that is a final result of what has happened. The term "proxy" is used to describe this type of information. We are interested in this work to describe several types of proxies, propose a way to use them to evaluate predictive mapping of intense runoff processes. Proxies of a point, linear and surface nature are presented through several case studies. The limitations of these data are discussed and the use of additional information to better assess the predictive nature of the maps is discussed.

Keywords: intense runoff, proxy, evaluation

a. Introduction

Les variables au sol qui favorisent l'expression des aléas liés au ruissellement intense sont bien cernées comme la topographie, la pédologie et l'usage du sol [Cantón *et al.*, 2011]. Cependant les cartographies prédictives bâties sur ces connaissances souffrent d'un manque de données pour les évaluer. En particulier un principe de « continuité liquide amont-aval » propre aux cartographies des débordements

[1] https://www.shf-hydro.org/manifestations/archives-manifestations-1/risque-ruissellement/

de cours d'eau est discutable comme le souligne les concepts de connectivité hydrologique et de surfaces contributives qui sont sources de débat dans l'amélioration de la modélisation hydrologique [Ali et Roy, 2010 ; Sivapalan, 2003]. Cette simplification conduit à négliger les effets induits par des éléments transportés par le ruissellement qui contribuent dans bien des cas, et sous faible tirant d'eau, à une réorientation locale des chemins hydrauliques naturels et artificiels de « temps normal ». Les chemins de « temps exceptionnel » pourraient alors être contraints non par une topographie fine mais supra. Ce qui amène la discussion sur le terrain de la résolution spatiale requise. Une vision simplifiée du processus de ruissellement conduit aussi à décréter de larges surfaces en aléas forts, ce qui perd tout intérêt opérationnel quand on souhaite mettre en place des actions de prévention ou de protection. A titre d'exemple, les dispositions constructives visant à réduire le ruissellement à la source, à le temporiser ou à l'infiltrer selon les possibilités locales, à interdire les constructions dans les axes de transfert naturels et à adapter le niveau du bâti dans les zones d'accumulation, vont dans le bon sens. De telles dispositions ont été intégrées aux PLU des métropoles de Lyon et Nantes mais à partir de cartographies supports plus théoriques que validées et qui, par conséquent, maximisent les surfaces en aléas. On peut se demander si les surfaces traversées et les configurations topographiques rencontrées sont à même, ou pas, de fournir des matériaux, des mises en vitesse et ralentissement propices à l'apparition d'une gamme de désordres ou même capables d'en atténuer les effets par dispersion. Cela peut contribuer à créer des discontinuités spatiales dans la distribution des aléas transfert-érosion et inondation-dépôt lors du parcours dans les versants.

Ces remarques sont des hypothèses à tester à l'aide des désordres observés sur le terrain. Ces désordres, au moins pour une partie, restent visibles les jours et parfois les mois qui suivent un événement pluvieux exceptionnel. On qualifie ces stigmates de « données proxy» des aléas du ruissellement intense. En effet, ils témoignent des conséquences sans être des mesures directes des processus d'érosion et de dépôt. L'usage de ces données limitées doit cependant faire l'objet d'une critique et d'une méthodologie d'utilisation bien décrite; en effet les cartographies prédictives du ruissellement intense, que ces données servent à valider, ont vocation d'aide à la décision. Le bon usage des données proxy conditionne la pertinence des cartographies produites et la bonne localisation la plus en amont possible des aménagements de prévention dans les versants.

Le travail mené depuis 2013 autour de l'évaluation des cartographies produites par le modèle géomatique IRIP [Lagadec et al., 2018] a permis d'évaluer l'intérêt de différentes sources de données proxy. En particulier, selon leur nature, ponctuelle, linéaire ou surfacique, comment peut-on les utiliser?

Cette étude, illustrée par trois jeux de données proxy, présente les hypothèses de travail faite et les résultats obtenus.

Dans ce travail nous définissons :

- Le ruissellement intense comme le résultat de pluies intenses, de période de retour 30 ans, à même d'occasionner au sol des mouvements de matières qui affectent les versants et non seulement les axes d'écoulement dessinés dans la topographie ;
- Les aléas liés au ruissellement intense comme les processus transfert - érosion, de transport et de dépôt - accumulation, dont la survenue est associée à une période de retour 30 ans;
- Dans une moindre mesure, comme aléa, les zones de production du ruissellement où l'érosion hydrique est un premier facteur d'aléa.
- La vulnérabilité comme une métrique des éléments ou activités anthropiques qui sont impactés par le ruissellement intense ;
- Le risque lié au ruissellement intense, comme le croisement d'une métrique de vulnérabilité et d'une métrique de l'aléa [Kelman, 2003]

b. Matériel et Méthode

La cartographie des aléas liés au ruissellement intense est approchée ici par une méthode de score : plus le nombre de facteurs favorables au ruissellement intense est présent dans une maille raster de l'espace d'un bassin versant et plus l'aléa de ruissellement est grand. La méthode IRIP distingue trois étapes dans le ruissellement intense : la production, le transfert et l'accumulation. Les deux dernières sont considérés comme les manifestations physiques du processus de ruissellement qui sont capables de créer des dégâts aux éléments vulnérables. Il est considéré que 3, 4 ou 5 facteurs favorables sur 5 calculés dans chaque

étape suffit à caractériser un aléa fort. L'entité spatiale de base est la « maille » raster qui permet de discrétiser l'espace du bassin versant. Dans les exemples traités, une maille carrée de 25m par 25m a été retenue, qui est celle du modèle numérique de terrain utilisé dans chaque cas d'étude.
L'évaluation des cartographies est basée ici sur l'hypothèse qu'un dégât géolocalisé est détecté si la zone d'intérêt qui contient le dégât comporte une indication d'un ou plusieurs aléas forts en ruissellement. Afin d'intégrer tous les cas de figure qui se présentent dans l'espace rastérisé d'un bassin versant, il est utilisé une table de contingence (**Tab.1**).
Dans l'hypothèse où le modèle de prédiction serait exact, et que toutes les données de dégâts possibles soient répertoriées au travers d'une infinité d'événements pluvieux, la totalité des mailles du bassin versant seraient réparties dans les cases « 1 » et « 4 « de la table.
La case « 1 » prédit que toutes les mailles raster avec un aléa faible, en transfert et en accumulation, n'ont jamais été le lieu de dégâts.
La case « 4 » prédit que toutes les mailles raster avec un aléa fort, en transfert et (ou) en accumulation, ont été au moins une fois le lieu de dégâts.
Tableau 1 : Structure de la table de contingence appliquée à l'évaluation des cartographies du ruissellement intense.

		Dégât	
		Non	Oui
Aléa fort	Non	1	2
	Oui	3	4

Dans la pratique, les conditions d'exhaustivité des données de dégât et d'infinité d'événement ne sont pas remplies. Il peut y avoir au mieux plusieurs événements responsables des dégâts répertoriés au sol sans que l'ensemble du bassin versant n'ait été concerné ou que les dégâts n'aient été tous répertoriés. Par conséquent, les cases « 2 » et « 3 » ne sont pas à effectifs nuls.
La case « 2 » indique la présence de dégâts non prévus par le modèle. Elle donne une mesure de la non adéquation du modèle à la réalité de terrain.
La case « 3 » indique un aléa fort sans présence de dégât. Il peut y avoir trois raisons à cela : (I) le modèle n'est pas en adéquation avec la réalité de terrain ; (II) le dégât n'est pas répertorié, en particulier car hors enjeux assurantiel ; (III) il n'a pas plu ou pas suffisamment à cet endroit du bassin versant pendant l'événement ou les événements.
La case « 3 » est le plus délicate à interpréter. La raison (II) peut être en partie précisée à l'aide des données de la télédétection qui devraient permettre une cartographie quasi exhaustive des dégâts dans l'avenir (cf. Breil et al., Poster 46). La raison (III) peut aussi être précisée via l'usage des données de lame d'eau radar pour savoir où il a « suffisamment plu » durant un événement dans certaines zones d'un bassin versant. Il est aussi possible de réduire l'espace d'étude aux seules zones où il a suffisamment plu.
La méthode d'évaluation des cartographies des aléas de ruissellement intense est basée sur l'hypothèse nulle qu'il n'y a pas de lien spatial entre aléas forts ou faibles et zones avec ou sans dégâts. L'espace étant représenté par un maillage carré, dit « raster », le test d'hypothèse porte sur les effectifs des mailles comptabilisées dans chacune des cases de la table de contingence. Pour réaliser le test il est construit une autre table de même dimensions mais dont les effectifs sont répartis pour représenter l'indépendance entre les aléas et les dégâts. Elle peut être qualifié de matrice du hasard. Cette autre table est obtenue par les produits des effectifs marginaux de la table de contingence. Cela revient à appliquer le principe que la probabilité de deux événement indépendants se produisent (ici en un même lieu) est égale au produit des probabilités de chaque événement. La métrique de distance utilisée entre les deux tables est celle du Khi-2 dont la distribution de probabilité est connue. Une faible probabilité du Khi-2 correspond à des écarts relatifs importants entre les deux tables, ce qui signifie que la table de contingence observée s'écarte de l'indépendance entre valeurs des aléas et absence ou présence de dégâts. Si c'est le cas il faut vérifier que les cases « 1 » et « 4 », qui attestent de la capacité de prédiction du modèle, présentent des effectifs supérieurs à ceux du hasard (et inférieurs pour les cases « 2 » et « 3 »). Les écarts relatifs entre

la table de contingence et la table d'indépendance (dans cet ordre) sont les sous-métriques du Khi-2. Le bon comportement du modèle est indiqué par des valeurs positives dans les cases « 1 » et « 4 » (respectivement négatives dans les cases « 2 » et « 3 »).
Pour comptabiliser les effectifs des différentes cases de la table de contingence il est fait appel au traitement « statistique de zone » sous QGIS ©. Par défaut ce traitement calcule le nombre de mailles situées à l'intérieur d'une zone (polygone), le cumul des valeurs de ces mailles dans la zone et la moyenne des valeurs de ces mailles dans la zone. La partition entre aléas forts (valeur 1) et faible (valeur 0) d'une carte IRIP est réalisée via la calculatrice raster de QGIS © en imposant une condition de valeur seuil. Cette carte binaire est ensuite traitée par « statistique de zone » pour évaluer dans les polygones qui délimitent les zones avec dégâts, mais aussi les zones sans dégâts, le nombre de mailles, la somme des valeurs des mailles, qui représente alors le nombre de maille avec aléas forts, et la moyenne qui est alors le pourcentage d'aléas forts dans la zone de calcul. La construction de la matrice de contingence implique de considérer les zones avec dégâts et les zones sans dégâts. La notion de zone est un élément important de la démarche d'évaluation du caractère prédictif des cartographies. Ainsi, quelle emprise considérer autour d'une zone de dégât pour prendre en compte les sources d'aléas forts adjacents? Quels sont les critères pour définir les zones de non dégâts ?

c. Résultats

1) Cas des données ponctuelles

Il s'agit ici pour l'essentiel des déclarations individuelles réalisées par les propriétaires dans le cadre des catastrophes naturelles. Elles s'avèrent précieuses du fait qu'elles comportent une description, par le déclarant, des circonstances locales qui ont causé les dégâts. Les mentions de date et heure ainsi que des photos juste post événement sont jointes à la déclaration. Ces données sont transmises à la mairie qui synthétise l'information au niveau communal en nombre, type de bâtiments impactés et code de dégâts subis, avant de les transmettre, dans cette forme résumée, à la Préfecture pour instruction et indemnisation complémentaire par la Caisse Centrale de Réassurance.

L'exemple traité ici est celui des déclarations individuelles fournies par la Grand Chalon (71) dans le cadre de son étude sur les aménagements de prévention des effets du ruissellement intense. Le Grand Chalon a subi en mai puis juin 2016 de forts orages qui ont généré des inondations et en particulier des coulées de boue dans les zones urbanisées situées à proximité des coteaux agricoles. Nous disposons des adresses des déclarants, des circonstances qui ont généré les dégâts déclarés, leur nature et l'heure de survenue. Afin de n'étudier que les phénomènes liés au ruissellement intense et non au débordement d'un cours d'eau ou d'un talweg, l'analyse des circonstances et la localisation des dégâts ont été considérées. Cela permet de réduire le nombre de données ponctuelles de 88 à 56. Un deuxième filtre peut être appliqué qui consiste à exclure tous les dégâts compris dans l'Enveloppe Approchée d'inondations Potentielles des Cours d'Eau (EAIP-CE)[2]. Cette enveloppe a été réalisée au niveau national par le Cerema dans le cadre de la Directive Inondation. L'enveloppe intègre les limites les plus externes des inondations connues ou des modèles pour des crues de référence quand l'information existe. Pour les petits cours d'eau, la méthode Execo du Cerema fournit une valeur approchée sur la base de la topographie et d'une hauteur d'eau forfaitaire dans les talwegs (1m en moyenne). Dans notre cas d'étude Cette enveloppe intègre 36 points de dégâts déclarés, et donc 20 sont hors de cette enveloppe. On peut ici faire remarquer que le ruissellement intense peut tout à fait impacter des éléments vulnérables de cette zone EAIP avant que le débordement ne prenne la suite. On retrouve ainsi dans les déclarations des personnes sinistrées le fait d'avoir été inondé « par le haut » puis « par le bas » où le cours d'eau peut exister. Le phénomène de « vague ou d'arrivée soudaine » est aussi évoqué dans certains témoignages. Ce qui est en adéquation avec la formation et la rupture d'embâcles ou encore d'obstacles (muret) à l'écoulement de versant. L'évaluation des cartographies qui nous intéresse ici ne peut donc exclure les données intra EAIP mais nécessite d'être distinguée.

Prise en compte d'une zone tampon

[2] https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/enveloppes-approchees-dinondations-potentielles-des-cours-deau-de-auvergne-rhone-alpes/

La **figure 1** illustre quelques données ponctuelles. Il est à noter que les points qui correspondent à des adresses sont localisés « au centre » des habitations.

Certains points ne relèvent pas de déclarations privées comme le point en bord de route qui dans le détail est situé hors limite de parcelle privée. C'est un dégât déclaré par les services techniques de la Mairie du lieu.

Afin de considérer le caractère ponctuel de l'information, le biais de géolocalisation qui est ici le centre de la maison pour l'adresse associée, et le fait que les dégâts sont la conséquence d'un environnement à aléas forts de ruissellement qui peut impacter légèrement en aval, un tampon circulaire de rayon 25m autour du point « adresse » est réalisé.

C'est dans ce tampon qu'est comptabilisée la présence d'un ou plusieurs aléas forts. La **figure 1** illustre la position des aléas calculés ici à partir d'un modèle numérique de terrain à maille de 25m (source IGN). Nous trouvons ainsi 8 tampons sur 9 qui touchent ou contiennent au moins un aléa fort de ruissellement intense. Une autre approche consiste à considérer que les impacts peuvent se trouver n'importe où dans la parcelle d'un propriétaire qui a déclaré un dégât. C'est alors la limite de la parcelle qui correspond à l'adresse qui sert de zone tampon. Dans cette hypothèse, les trois dégâts ponctuels situés les plus au Nord ne sont pas validés par la cartographie des aléas.

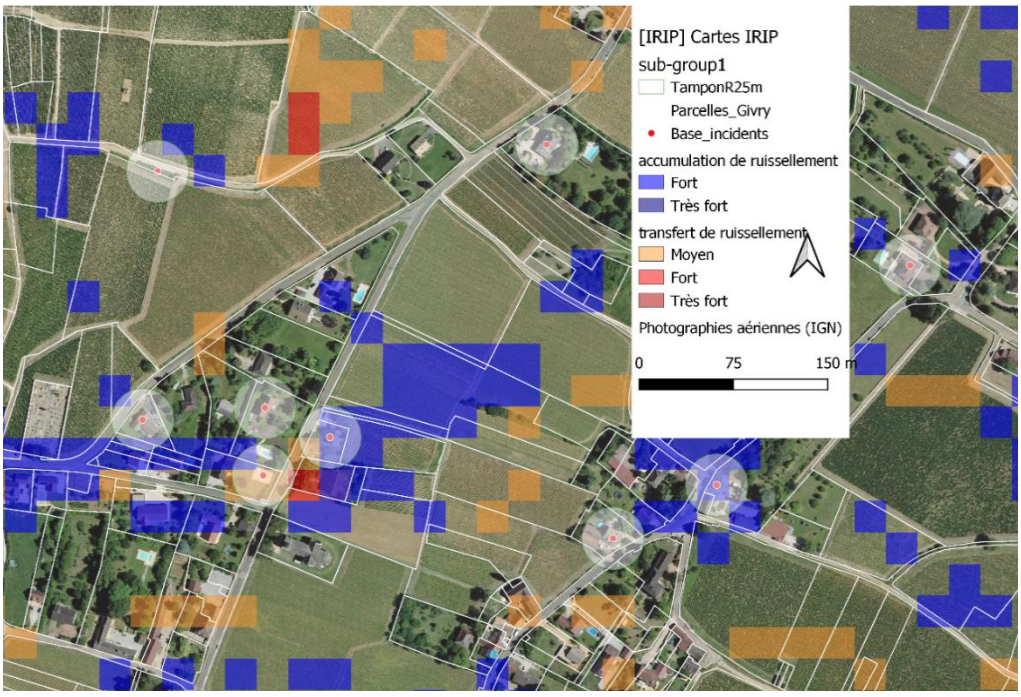


Figure 1 : Visualisation de points incidents avec leurs tampons circulaires de 25m, du parcellaire cadastral, et des aléas forts en Transfert (>=3) et Accumulation (>=4). (Fond satellite IGN ©)

Le point Nord-Ouest reste un cas particulier car il s'agit d'une emprise hors parcelle privée et qui constitue à l'évidence un terre-plein ou une zone de stockage. La question posée est de savoir si la proximité de mailles à aléas forts suffit à expliquer les dégâts. On peut discuter de la distance mais sous condition que l'aléa soit situé en amont ou au même niveau topographique. La résolution en verticale du modèle numérique de terrain doit alors être testée.

Les points visualisés dans la **figure 1** sont hors zone de l'EAIP-CE, ce qui signifie qu'ils ne sont *a priori* pas liés à un débordement de talweg ou de cours d'eau. Une statistique réalisée sur plusieurs sous bassins versants connexes du Grand Chalon (71) avec la méthode du tampon de 25m donne le **tableau 2**. Les calculs sont réalisés aussi dans et hors de l'EAIP-CE pour évaluer la différence.

Tableau 2 : Quelques valeurs caractéristiques de l'évaluation des cartes de ruissellement à l'aide de proxy

	Hors EAIP-CE	Dans EAIP-CE	Total BV
Nombre dégâts ruiss. Intense	20	36	56
Taux détection	85%	83%	82%
% surface en aléa fort IRIP	15%	23%	16%
Efficacité de détection	5.54	3.68	5.06

On note ici que le pourcentage de maille avec aléas forts est plus important dans l'EAIP-CE, ce qui fait sens car les aléas forts en accumulation tendent à se retrouver par construction du modèle dans les talwegs et en proximité des ruptures de pente convexes formées par les berges. Les taux de détections sont évalués en considérant qu'il faut au moins 1 maille en aléa fort sur 12 (qui sont interceptées par le tampon de 25m) pour valider la détection d'un dégât. Dans le cas d'étude, la moyenne de mailles à forts aléas dans les tampons est de 48%. Un rapport d'efficacité de la détection peut aussi être calculé : il correspond au rapport du taux de détection à celui du pourcentage de surface en aléas forts. Cela revêt un caractère opérationnel qui consiste à minimiser la surface où développer des mesures de prévention tout en ayant maximisé le taux de détection qui rend compte de la capacité prédictive de la cartographie des aléas liés au ruissellement intense. La dernière ligne du **tableau 2** montre ainsi que le modèle IRIP est plus performant hors de l'EAIP.

La construction de la matrice de contingence est réalisée en comptabilisant le nombre de mailles en aléas forts (et non forts) qui sont situées dans les tampons des dégâts et hors des tampons. La matrice de contingence et la matrice du hasard associée sont présentées dans le **tableau 3**. La matrice des écarts relatifs, qui sert au calcul du KHI-2, a été ajoutée pour l'interprétation du test du KHI-2. Cela permet de voir quelles sont les cases les plus porteuse de la différence à une distribution spatiale indépendante (ou au hasard) des dégâts par rapport à celle des aléas forts.

Tableau 3 : matrice réalisée, matrice du hasard, matrice écarts relatifs

		Dégât	
		Non	Oui
Aléa fort	Non	221112	89
	Oui	42755	88

		Dégât	
		Non	Oui
Aléa fort	Non	221053	148.28
	Oui	42814	28.719

		Dégât	
		Non	Oui
Aléa fort	Non	0.0003	-0.40
	Oui	-0.0014	2.06

Le test du KHI-2 donne une probabilité d'indépendance très faible (<< 0.001) entre présence ou absence de dégât et présence ou absence d'aléas forts. La matrice des écarts montre que la case « 4 » qui indique la détection d'un dégât est celle qui s'écarte le plus de l'indépendance puisque que le nombre de mailles est multiplié par 2. La contribution de la case « 1 » est très faible ainsi que pour la case « 3 ». La case « 2 » qui atteste de la non détection d'un dégât contribue sensiblement à la valeur du KHI-2, mais dans une proportion bien moindre en affichant ici – 40% du nombre de maille attendues en cas d'indépendance entre l'absence d'aléas forts et la présence d'un dégât. Le nombre de mailles sans dégâts est 1500 fois supérieur à celui des mailles avec dégâts.

2) Cas des données linéaires

Les dégâts issus du ruissellement intense concernent souvent les réseaux de transports, qu'ils soient ferrés ou routiers. Cela tient au fait qu'ils coupent bien souvent les versants. Les contraintes de pente ne sont pas les mêmes pour les voies ferrées et les routes, ce qui occasionne des déblais et remblais plus importants pour le fer. Ce cas est traité en détail [Braud *et al.*, 2020] et nous n'aborderons ici que le cas des routes départementales, moins bien protégées contre le ruissellement que les autoroutes, mais dont le linéaire est de loin le plus important.

Le type de proxy associé aux données linéaires, voies ferrées et routes, est souvent un tronçon défini par la notion de points kilométriques. Ainsi le dégât n'est pas localisé en X et Y mais situé quelque part dans un linéaire. Un autre élément d'intérêt est la configuration de la voie de circulation : est-elle en

remblai, déblai, profil mixte ou profil plat ? cela joue à l'évidence sur l'exposition aux aléas de ruissellement intense (communication 55, Moulin *et al*). Ces informations conditionnent la manière d'évaluer les cartographies.

On peut d'emblée se demander s'il ne faut pas considérer uniquement que les versants situés à l'amont proche des routes ou voies ferrées. En fait l'expérience montre que des processus d'érosion régressive se manifestent sur les talus ou accotements aval, ce qui conduit à l'effondrement partiel des chaussées par exemple. Ce processus est associé aux aléas forts de transfert et il convient donc de considérer les deux cotés d'une voie d'une circulation dans l'évaluation des cartographies des aléas de ruissellement intense. De même, la mise en pression de la couche de forme via les fossés, souvent amont, ou encore par les conduites d'assainissement provoque aussi le décollement du bitume et le départ des matériaux supports de la chaussée. L'aléa accumulation est donc aussi facteur de dégâts potentiels.

Des données de coupures de routes entre 2010 et 2018 nous ont été fournies sous la forme de fichiers tableurs par la DDTM66 qui couvre le territoire des Pyrénées Orientales.

La première étape était d'identifier les fermetures de route imputables au ruissellement et non à une inondation par débordement. En effet la confusion est parfois aisée mais il est important de différencier les deux situations. Pour cela il a été considéré les fermetures de route où le type d'impact qui était décrit était supposé provenir d'un ruissellement intense (éboulement, coulée de boue, atterrissement…). Ensuite il a été regardé les cas d'inondation où la route ne se situait pas à proximité d'un cours d'eau ou d'un talweg ou dans ce cas si la différence d'altitude avec le talweg permettait d'écarter le débordement comme cause de la coupure. Difficile cependant d'écarter l'effet de sape d'une berge par un talweg en crue. Enfin l'utilisation des données streetview© a permis dans certains cas de déterminer le type d'impact même si sans photographie ou visite terrain il est difficile d'en avoir une idée très claire. Il est ressorti de ce traitement de donnée 48 tronçons de route, de longueur cumulée égale à 404 km, ayant été impactées par du ruissellement entre 2010 et 2018 sur le département des Pyrénées Orientales. Le reste du réseau représente 3401 km de route, soit presque 10 fois plus.

Méthode pour évaluer le caractère prédictif des cartes IRIP pour des routes

Il est établi une zone tampon de 25 m de part et d'autre du centre de la route. La proportion en aléas forts IRIP (Transfert >=3 ou Accumulation >=4) est comptabilisée par le nombre de mailles raster qui répondent à ce critère et sont comprises dans la zone tampon. Les valeurs de 30% et 35% sont respectivement obtenues pour les routes non coupées et coupées. La différence peut paraitre faible. En fait les tronçons de route fermées encadrent d'une manière générale une ou plusieurs coupures de route. Ces tronçons sont délimités au niveau des nœuds routiers où des itinéraires alternatifs sont proposés. Parfois les tronçons sont délimités de manière à conserver l'accès aux dernières habitations non concernées par la coupure. De fait, les tronçons coupés peuvent contenir beaucoup de zones non forcément exposées aux aléas forts. L'évaluation du niveau d'aléas ne peut donc se concevoir globalement à l'échelle d'un tronçon fermé à la circulation.

Une solution est de segmenter le réseau routier de manière régulière afin d'identifier si des sous portions sont plus exposées aux aléas. Cette méthode a été appliquée en considérant une segmentation de 100m pour les routes coupées et non coupées. Les résultats sont reportés dans les tables de contingence du **tableau 4**, selon la même logique que pour le **tableau 3**. Le test du Khi-2 est là aussi très significatif et indique une liaison statistique entre les aléas forts et les tronçons des routes coupées.

La matrice des écarts relatifs montre à nouveau les contributions positives des cases 1 et 4 qui confirment le caractère prédictif du modèle IRIP dans ce cas d'étude.

Tableau 3 : matrice réalisée, matrice du hasard, matrice écarts relatifs

		Dégât				Dégât				Dégât	
		Non	Oui			Non	Oui			Non	Oui
Aléa fort	Non	181802	15992	Aléa fort	Non	180680	17114	Aléa fort	Non	0.006	-0.066
	Oui	76349	8461		Oui	77471	7338		Oui	-0.014	0.153

Une autre méthode consiste à calculer le nombre de segments qui dépassent un certain pourcentage en aléas forts. La **figure 2** résume cette information pour une gamme de pourcentage allant de 0.1 à 0.9. Plus le pourcentage est élevé et plus la quantité d'aléas forts dans le segment est importante. Il est notable que les tronçons de routes coupées sont constituées de plus de segments avec un pourcentage d'aléas forts élevé que ne les sont les segments des routes non coupées. Le rapport de ces proportions illustre bien cette dichotomie qui est difficile à déceler sur un fond cartographique. Le rapport de proportions ne fait qu'évoluer 1 à 2.25 pour la gamme des seuils de pourcentage testés. Le seuil de 70% de mailles en aléas forts correspond à 14% des segments dans les tronçons de route coupés contre 8% pour les tronçons de route non coupés. Dans le cas des routes, la possibilité de restreindre l'espace d'évaluation à la zone tampon permet de réduire considérablement le nombre de mailles dans la table de contingence. Le rapport entre le nombre de maille sans dégâts et avec dégâts est de 10.

Une visualisation cartographique de ce résultat est fournie dans la **figure 3**. Les mailles jaunes représentent les mailles du raster à 25m qui répondent aux critères des aléas forts. Les routes coupées sont marquées en rouge quand le % d'aléas forts (en jaune) est supérieur à 50% dans le segment de route de 100m dans lequel il est calculé ici, sinon en rose. Même principe pour les routes non coupées mais en bleu et bleu clair.

La question de la contiguïté des segments en aléas forts a aussi été regardé. On peut effectivement se demander si les coupures de routes sont liées à des concentrations d'aléas forts sur plusieurs centaines de mètres. Le nombre de segments contiguës avec plus de 50% de forts aléas varie de 2 à 9 pour les routes coupées et de 2 à 15 pour les routes non coupées. Les différences de fréquences relatives de ces nombres de contiguïté entre routes coupées et non coupées sont faibles, comprises entre – 3.8% et 5.4%, sans aspect tendancielles. Ce n'est donc pas une caractéristique de différenciation dans ce cas d'étude.

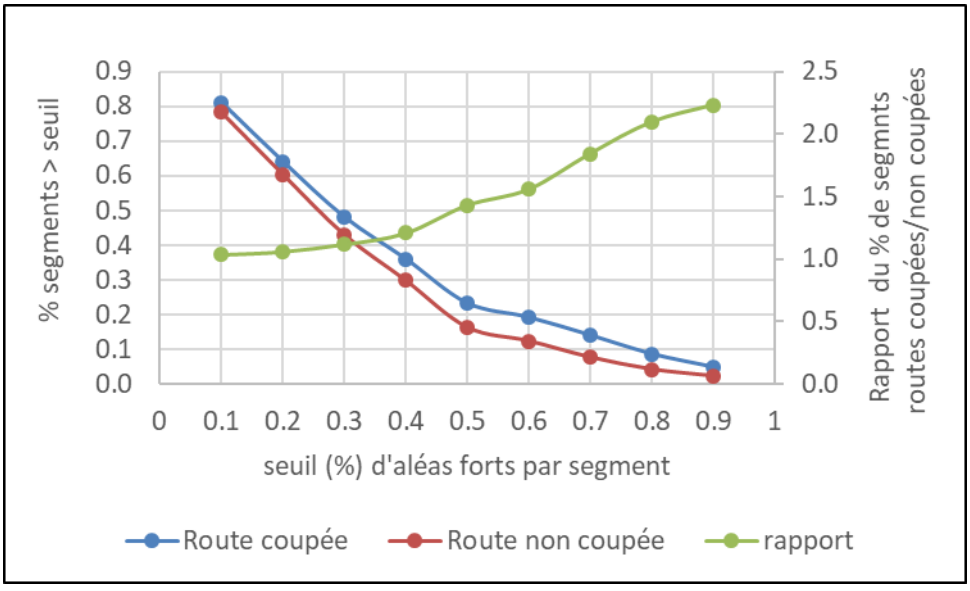


Figure 2 : Evolution comparée du pourcentage de segments en aléas forts et rapport du pourcentage entre routes coupées et non coupées.

Ce résultat illustre bien le fait que des statistiques globales ne sont ici pas adaptées pour évaluer la pertinence de cartographie prédictive du ruissellement intense.

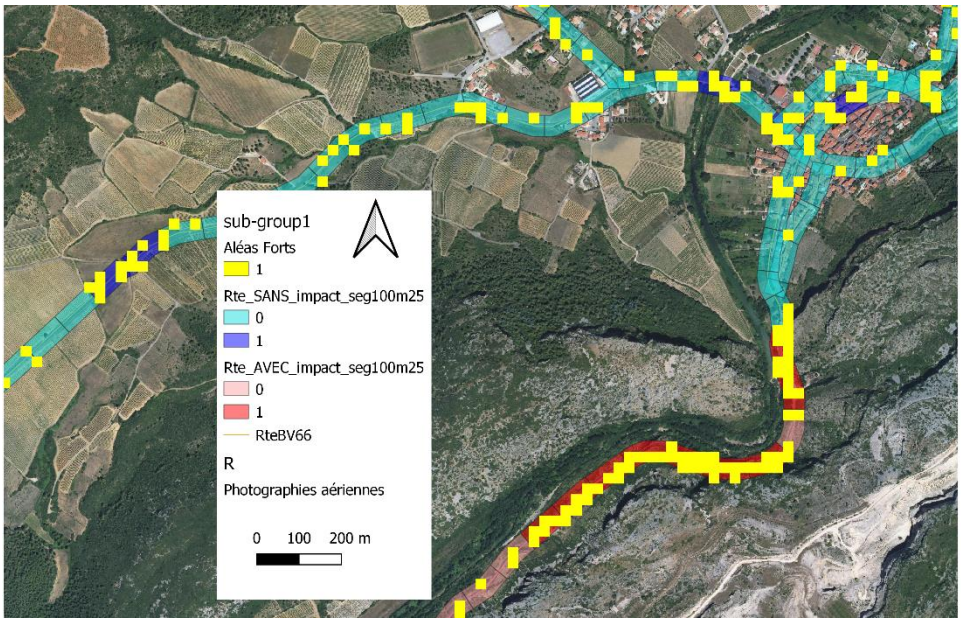


Figure 3 : Prise en compte des aléas forts en Transfert (>=3) et Accumulation (>=4) dans les tampons de route coupées et non coupées.

3) Cas des données surfaciques

Les données surfaciques sont constituées pour cette étude par les parcelles agricoles qui ont subi des dégâts lors de l'évènement de pluies intense d'octobre 2018 dans le département de l'Aude. La donnée a été collectée auprès de la DDTM11 qui détient les déclarations individuelles en Calamités Agricoles, consignées par les propriétaires et vérifiées sur le terrain par les services de l'Etat. L'intérêt de cette donnée est de distinguer des types de pertes, aux sols (type 1), aux vignes (type 2) avec 5 degrés de dégradation (1 à 5) et des dommages annexes aux chemins, ouvrages et engins agricoles (type 3). Le bassin de l'Orbiel, d'une surface de 252 km2, a été retenu car il concentre 294 parcelles agricoles impactées pour un total de 41676 parcelles. Comme une même parcelle pouvaient être déclarée avec plusieurs types de dégradation, il a été retenu à chaque fois celui de plus fort degré. En l'absence d'une notion de degré de dégradation comme pour les sols et les vignes, le degré 0 a été affecté par convention pour le type 3.

Test de la distribution spatiale des aléas forts

Pour évaluer la capacité de discrimination du modèle nous faisons ici l'hypothèse que l'ensemble des parcelles sans dégâts présente un signal moyen plus faible que celui des parcelles avec dégâts. L'aléa fort d'intérêt dans cet exemple est le seuil de valeur supérieur ou égal à 3 en accumulation uniquement. Dans ce cas, 23% de la surface du bassin sont concernés et 80% des parcelles avec dégâts sont détectées avec au moins 22% de mailles en aléas forts. Sous cette condition, 47% des parcelles sans dégâts peuvent être confondues avec les parcelles avec dégâts. Il faut bien noter que le territoire concerné est l'ensemble du bassin versant qui n'a pas forcément été exposé en tout lieu à des pluies suffisamment intenses pour déclencher du ruissellement. Le test du KHI-2 confirme à nouveau la dépendance entre les mailles avec aléas forts et les parcelles avec dégâts, comme l'indique la table des écarts relatifs dans le tableau 4.

Tableau 4 : matrice réalisée, matrice du hasard, matrice écarts relatifs

		Dégât	
		Non	Oui
Aléa fort	Non	288889	4249
	Oui	82937	3797

		Dégât	
		Non	Oui
Aléa fort	Non	286929	6209
	Oui	84897	1837

		Dégât	
		Non	Oui
Aléa fort	Non	0.007	-0.316
	Oui	-0.023	1.067

Pour réduire la confusion entre parcelles avec et sans dégâts, il est intéressant de tester l'hypothèse que le degré de dégradation d'une parcelle est corrélé à la quantité d'aléas forts qu'elle contient. De même il est possible de tester la différence entre la quantité d'aléas forts entre les parcelles non impactées et les types de dégâts. Le nombre de parcelles sans dégâts est de 41384. Celui des parcelles impactées varie de 44 à 57 selon le degré de dégâts. La figure 6 illustre les distributions des quantiles 0.05 ; 0.25 ; 0.5 ; 0.75 et 0.95.

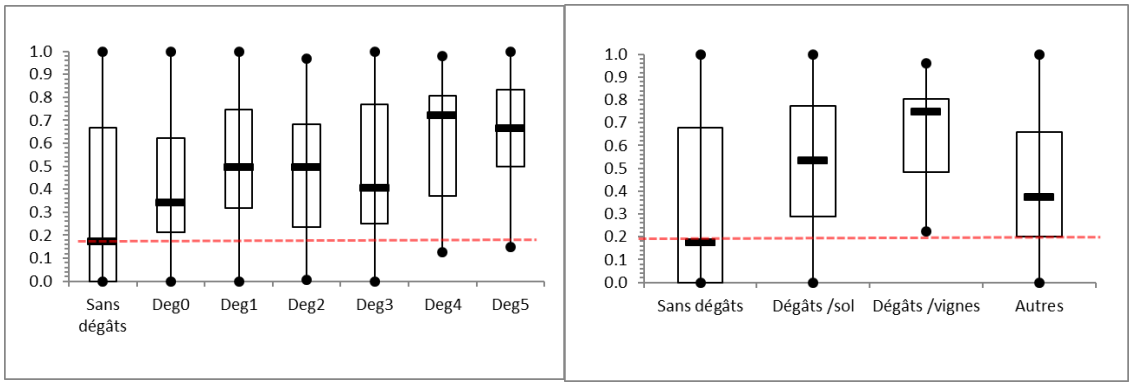


Figure 7 : Pourcentage d'aléas par degré de dégradation des parcelles (gauche) et par type de dommage (droite).

Nous voyons ainsi une tendance à l'augmentation de la quantité d'aléas forts avec le degré de dégradation. Les parcelles les plus dégradées ont une valeur médiane de 70% d'aléas forts par comparaison aux parcelles sans dégâts déclarés dont la médiane est à 20%. En ce qui concerne les types de dommage, la différence est aussi significative avec les parcelles sans dégâts. Les vignes présentent le plus forts pourcentage d'aléas forts, puis suivent les sols et enfin les autres dommages. Ce type d'information permet de cibler les zones à prédire. Ainsi, il est possible de détecter 80% des parcelles déclarées en calamités agricoles avec un degré 5 et au minimum 40% d'aléas forts. Sous cette condition 38% des parcelles sans dégât répondent à ce critère.

d. Conclusion - Discussion

L'évaluation des cartographies prédictives du ruissellement intense et de ses aléas associés a été abordée au travers de trois types de proxy données, ponctuelle, linéaire et surfacique. La question de l'évaluation est soumise pour chaque type à des hypothèses de travail qu'il faut argumenter puis tester selon une méthode bien décrite.

Que pouvons-nous retirer de tout cela ? Prenons l'exemple des parcelles : si l'on tient compte du nombre de parcelles avec et sans dégâts, il y a bien plus de parcelles sans dégâts qui sont exposées d'après leurs quantités d'aléas que de parcelles avec dégâts détectées. Cela tient au fait que le nombre de proxy qui sont disponibles sur un bassin versant ou un linéaire est très faible par rapport à la surface considérée. Les voies d'amélioration sont :

- Une plus grande exhaustivité des dégâts, par exemple via les données satellites très hautes résolution et fréquence d'acquisition ;
- Limitation des zones d'études à l'emprise des lames d'eau radar suffisantes pour déclencher le ruissellement intense; Limitation des zones d'études aux enjeux ;
- Amélioration du pouvoir discriminant de la méthode de calcul des aléas de ruissellement en utilisant des données de résolution cartographique plus fine pour l'occupation du sol (la carte du CES-BIO à 10m est une avancée mais peut se révéler encore imprécise dans le détail) et surtout la pédologie. La base LUCAS de l'ESDAC est un pas vers l'homogénéisation des données sol à l'échelle européenne mais c'est encore insuffisant. Les données radar des satellites pourraient être une solution avec le suivi à haute fréquence de l'humidité des sols qui permettra d'en caractériser l'hydrodynamique via les contrastes saisonniers.

- Prise en compte des dispositifs ou aménagements hydrauliques de protection qui sont une réponse à des dégâts répétitifs.

e. Remerciements

Les données de cette étude ont été collectées auprès du Grand Chalon, de la DDTM des Pyrénées Orientales et de la DDTM de l'Aude. Ce travail a bénéficié du soutien financier de la DGPR (subvention n°21367400) au sein du programme SRNH - INRAE 2020 sur la connaissance et prévention des risques naturels et hydrauliques.

f. Références

Ali G.A., Roy A.D. (2010). Shopping for hydrologically representative connectivity metrics in a humid temperate forested catchment. *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 46, W12544, doi:10.1029/2010WR009442

Braud I., Lagadec L.R., Moulin L., Chazelle B., Breil P. (2020). Evaluation of a model for mapping intense pluvial runoff hazard using proxy data of runoff-related impacts. Application to the railway context. Special Issue: Natural hazard impacts on technological systems and infrastructures; *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*., 20, 947–966, 2020; https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/20/947/2020/nhess-20-947-2020.pdf

Cantón Y., Solé-Benet A., de Ventec J., Boix-Fayos C., Calvo-Cases A., Asensio C., Puigdefábregas J. (2011). A review of runoff generation and soil erosion across scales in semiarid south-eastern Spain. *Journal of Arid Environments*. **Volume** 75, Issue 12, December 2011, Pages 1254-1261. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.03.004

Kelman I. (2003) Defining Risk. *FloodRiskNet Newsletter*, Issue 2, Winter 2003. http://www.ilankelman.org/abstracts/kelman2003frn.pdf

Lagadec L.R., Moulin L., Braud I., Chazelle B., Breil P. (2018) A surface runoff mapping method for optimizing risk analysis on railways. *Safety Science - Special issue: Railway Safety*. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01549762/document - 10.1016/j.ssci.2018.05.014

Sivapalan M. (2003). Process Complexity at Hillslope Scale, Process Simplicity at the Watershed Scale: Is There a Connection?', Hydrological Processes 17(5): 1037-1041. https://doi.org/10.1002/hyp.5109

II. Diagnostic de l'exposition et de la vulnérabilité à l'aléa ruissellement adapté aux enjeux du réseau ferroviaire de la région PACA

Figures et commentaires extraits de l'article court de la conférence[3] « Risque ruissellement : Diagnostic et Solutions » , présenté par Loïc MOULIN[a], Lilly-Rose LAGADEC[a], Marie-Anne MOULIN[a], Isabelle BRAUD[b], Pascal BREIL[b].
La version complète publiée de l'article est accessible en page 567 dans la compilation des articles @ https://bassinversant.org/wp-content/uploads/2021/02/Actes-ruissellement_compressed.pdf

[a] : SNCF
[b] : INRAE

g. Enjeux du cas d'étude

Le cas d'étude ici présenté, la ligne ferroviaire Marseille – Vintimille en région Provence Alpes Côte d'Azur (PACA), 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 PACA est connue à travers le souvenir d'événements exceptionnels comme en 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 de la région PACA, 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 :

[3] https://www.shf-hydro.org/manifestations/archives-manifestations-1/risque-ruissellement/

- Les études hydrauliques menées sur les projets impliquant de nouveaux ouvrages en terres, plateformes et drainages ferroviaires
- Les visites de surveillance et de maintenance des ouvrages en terre et hydrauliques répertoriés
- Les alertes météo qui induisent le ralentissement ou l'arrêt des circulations et le déclenchement des tournées intempéries sur les ouvrages connus pour leur sensibilité au ruissellement

Le diagnostic des risques liés au ruissellement présenté ici porte sur tout l'axe Marseille-Vintimille et est d'abord à destination d'une Maîtrise d'Ouvrage Projet qui veut s'assurer que le ruissellement intense ne fasse pas porter un risque accru sur les installations de signalisation projetées. Ce nouveau système de signalisation (ERTMS) est un élément essentiel pour l'amélioration de la performance (régularité, robustesse, sécurité) de l'axe Marseille-Vintimille. 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 de l'enjeu macroscopique. On travaille donc avec des données disponibles au bureau et avec un objectif de hiérarchisation des zones par rapport à un risque potentiel. L'enjeu reste donc à l'échelle du tronçon.

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 au sol 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 (actions de protection/barrières de prévention).

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.

Le diagnostic ruissellement pourrait aussi alimenter 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. La portée du PCA couvre toutes les activités de l'Entreprise contribuant à la continuité d'activité. Le PCA offre un outil d'aide à la décision lorsque la situation se dégrade (sinistre majeur, telle une crue importante), avec une planification anticipée, et s'appuyant sur le vécu, du maintien de l'activité et/ou une reprise d'activité graduée. Le PCA regroupe une analyse de vulnérabilité, la définition des actions préalables à mettre en place pour rester sous le seuil de vulnérabilité et enfin la définition et la mise en œuvre d'un plan de survie, définissant les ressources et procédures requises en période de crise, pour rétablir les ressources critiques, jusqu'à la reprise de la situation normale. Le diagnostic ruissellement serait alors une contribution à l'analyse de la vulnérabilité 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.

h. Données et méthodes de détermination de l'aléa et de la vulnérabilité

La méthode est présentée et analysée 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 de l'incidentologie dans une base métier « Ouvrages en Terre » OT). Les aléas liés à l'eau observés sur cette ligne sont notamment du type glissements, coulées et inondations, et certaines chutes de blocs rocheux peuvent aussi avoir pour conséquence une accumulation d'eau de ruissellement.

i. Production des cartes IRIP d'aléas transfert et accumulation

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

Les cartes obtenues ont donc la même résolution que le MNT, soit25 m (figure 2).

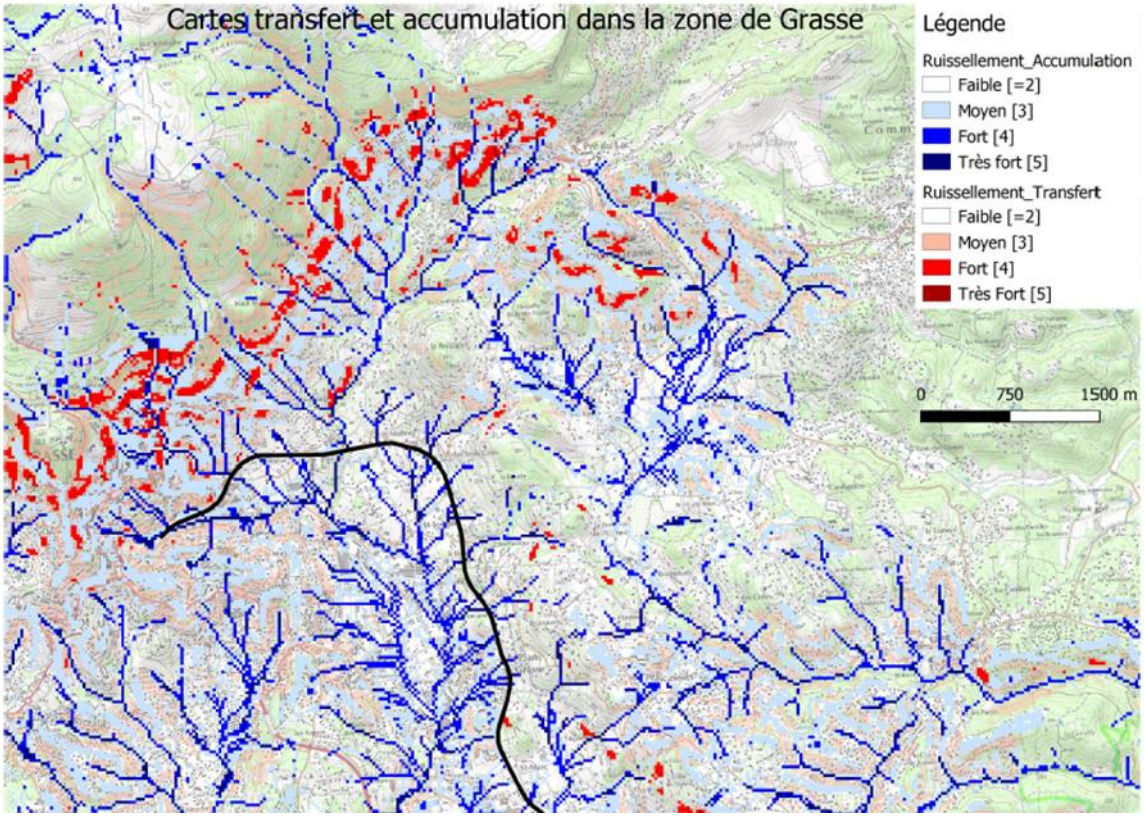


Figure 2 : Extrait des Cartes de Transfert et Accumulation autour de Grasse

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 du 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.

j. Evaluation de la vulnérabité

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) : correspond-t-elle principalement à une surélévation par rapport au terrain naturel (remblai) ou 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 collecteur et évacuateur 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 3) classée en 4 catégories :

1. 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 ;
2. 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 ;
3. Remblai : l'eau ruisselante atteint le pied de talus bien avant les autres enjeux ferroviaires : la transparence hydraulique est l'aspect sur lequel il faut être vigilant, 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 ont peu de volume de stockage ;
4. 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).

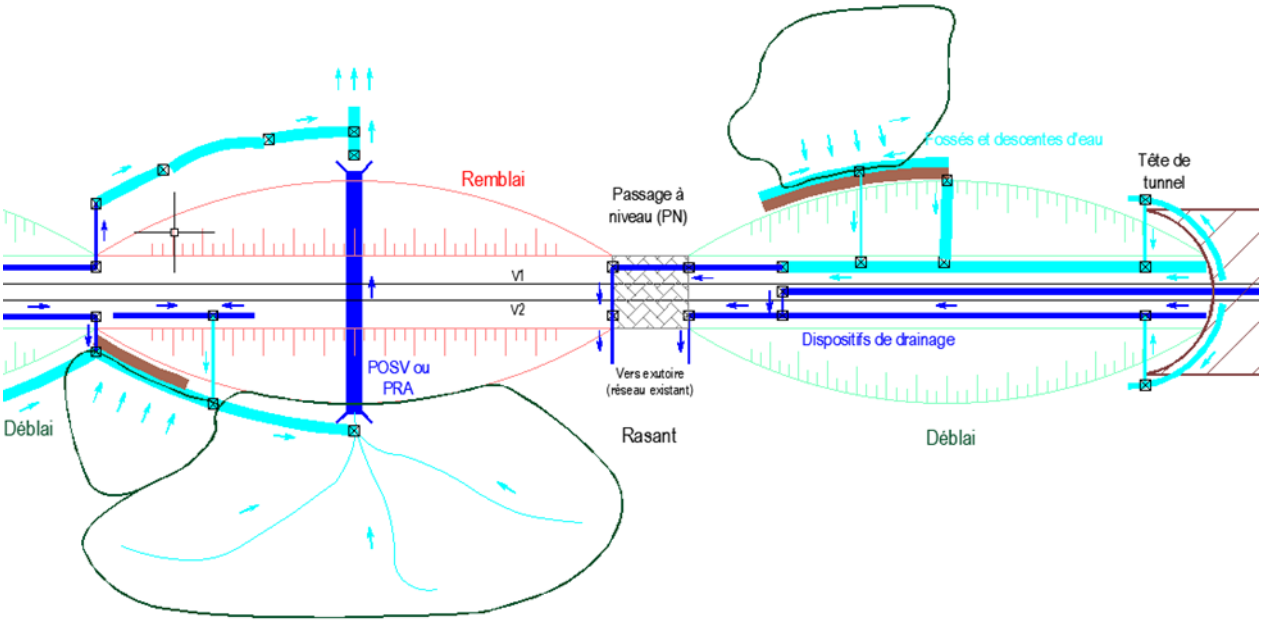


Figure 3 : Configurations de l'infrastructure et éléments de sensibilité aux écoulements extérieurs

• 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:

1. Ponts-Routes (PRo) : pistes et dispositifs hydrauliques voient souvent leur section réduite par le perré ou les piles du pont ;
2. 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 ;

3. Têtes de tunnel : une zone de transition favorable à la discontinuité des dispositifs et 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 4.

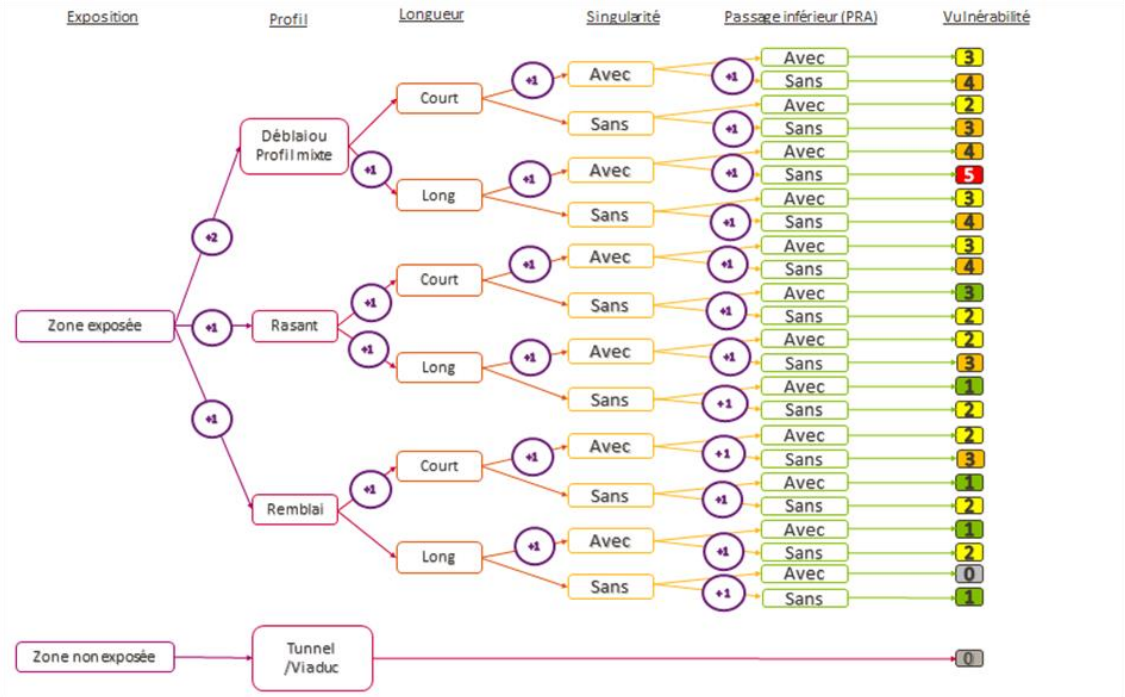


Figure 4 : Arbre de vulnérabilité

k. Discussions : Variantes de finalisation de l'analyse préliminaire

1) Comment croiser intensité de l'aléa et vulnérabilité ?

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 5).

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

Figure 5 : Proposition de matrice de croisement Vulnérabilité/Intensité.

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 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 n'a pas été retenue, car il a été décidé de réserver les actions de terrain aux seules zones exposées où la Maîtrise d'Ouvrage identifiera des enjeux.

- Evaluer par tronçons l'intensité de l'aléa pour la croiser avec la vulnérabilité et aboutir à une gravité macroscopique. Cela ne va pas sans certains choix à discuter.

I. Quel est l'impact de la méthode de découpage en tronçons ?

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. Une automatisation du découpage en ouvrages en terre a été réalisée sur la base du MNT 1 m. Cependant, le calcul repose sur une fixation a priori du pas longitudinal entre profils en travers considéré comme représentatif du tronçon, et de la distance entre les points topographiques des profils en travers, considérés comme représentatifs de la voie et de ses 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).
On peut préférer l'œil de l'opérateur humain en balayant une série de photos prises depuis les trains en circulations (plateforme Imajnet accessible au bureau). Cette méthode n'est toutefois pas univoque et dépend de l'attention et la sensibilité de l'expert.
Les deux approches génèrent des découpages qui diffèrent dans les détails, ce qui n'est pas sans conséquences, comme le montre la Figure 6 :

- 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 que des profils mixtes, ce qui fait varier le calcul de la vulnérabilité.

- En outre le remblai qui suit le tronçon d'intérêt, commence plus avant que prévu dans 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, ce qui est logique. 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. 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 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 Imajnet (Découpage 2). Cela a des conséquences à la fois sur le nombre et le pourcentage de tronçons mais aussi sur le nombre de kilomètres qui peuvent être retenus pour une analyse détaillée, comme on le montrera plus bas.

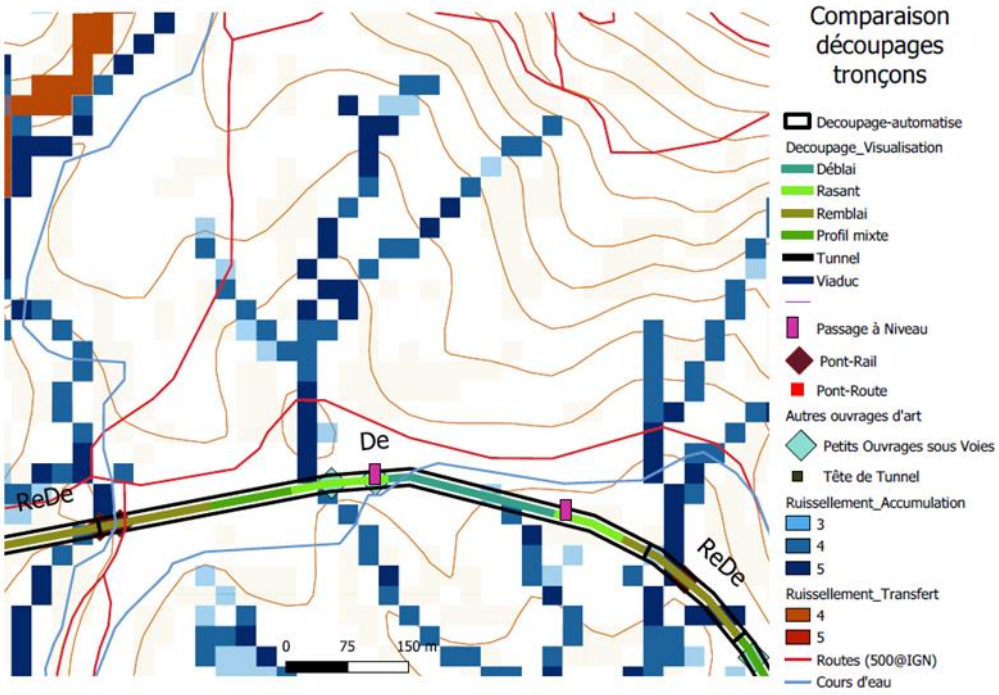


Figure 6 : Illustration de deux découpages différents des tronçons OT

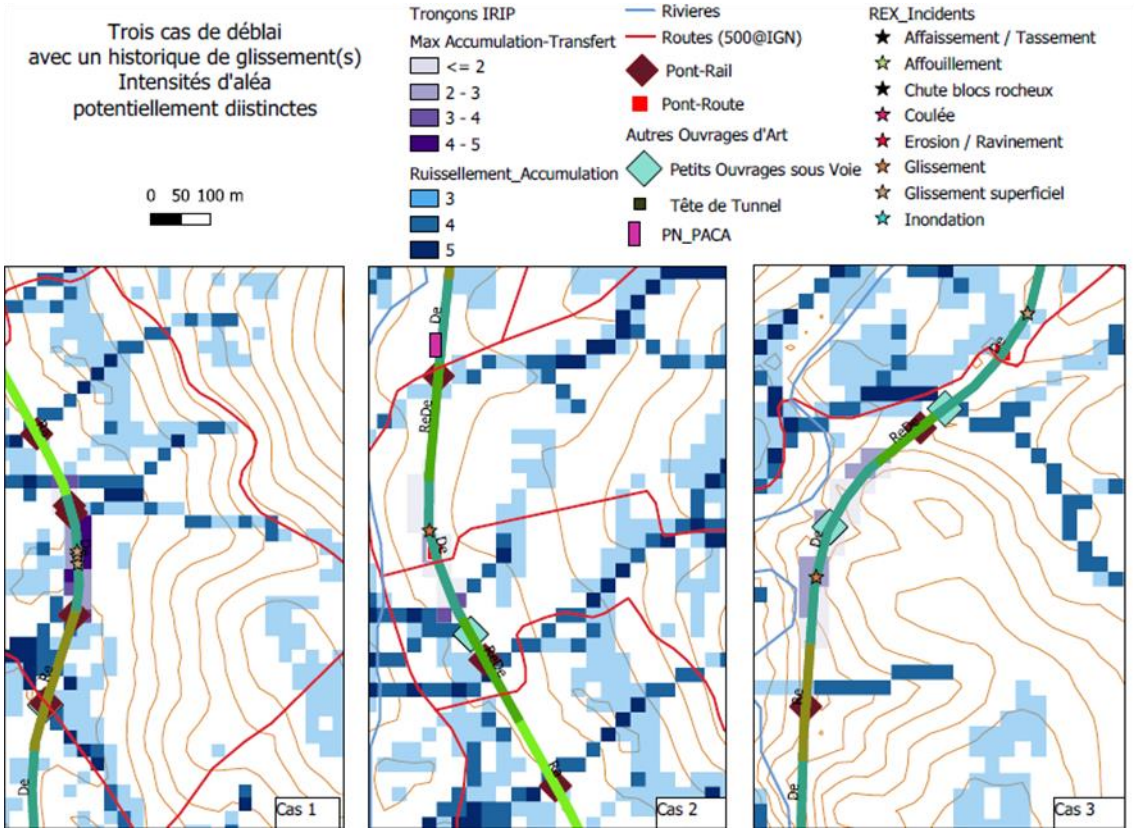
m. Comment traduire de l'information des cartes de ruissellement en valeur d'intensité par tronçons ?

L'intensité de l'aléa est évaluée selon l'analyse des valeurs 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 ou 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 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 7) 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.

n. 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 Maitrise 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'habitacle, efforts actuellement mis 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

Pour conclure, il faut accepter d'avoir des ambitions modestes sur la prévention des risques liés au ruissellement. Une étude permettant de mettre en évidence des zones qui étaient jusqu'alors dans l'« angle mort » du management du risque, mais qui pourraient être affectées par le ruissellement, c'est « mieux que rien ». 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.

o. Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Malory Flipo, chargé de mission pour la DT PACA puis 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 PACA. Les remerciements vont également à Alain Ducreau, chef de projet Haute Performance Marseille Vintimille (HPMV), qui, par son partage des enjeux du projet HPMV 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.

p. Références

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 Hydrologye-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 lies 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

Résumé

Cette première version du plugin de la méthode IRIP pour QGIS 3.X permet de travailler directement dans l'environnement de ce SIG libre et maintenu par une communauté très active. Les résultats cartographiques des calculs intermédiaires qui conduisent aux cartes finales sont tous disponibles dans cette interface. Il est possible de faire apparaitre les images satellite pour mieux comprendre les environnements des résultats produits dans les cartes finales. La prise en compte de la période de retour de la pluie dans les cartes de production du ruissellement est maintenant effective.

Livrée tardivement (mars 2020) en raison des nombreux essais et aller-retours nécessaires avec le développeur informatique, cette première version libre appelée IRIP-plugin a été mise en test au sein d'un groupe d'utilisateurs qui ont tous bénéficié d'une formation en ligne à son usage. L'objectif est de faire remonter des besoins de la part des utilisateurs, en particulier au niveau des post-traitements thématiques (cartes de risque, scénarios d'aménagement) et des démarches d'étalonnage des cartes IRIP sur un secteur d'étude, cela à partir de vérités terrain.

L'évaluation des cartes IRIP a été confrontée à l'usage de différentes données proxy afin de développer des méthodes appropriées pour les données ponctuelles (Grand-Chalon), les données linéaires (routes des PO, DDTM66) et les données surfaciques (parcelles agricoles, DDTM 11). L'étude du risque d'atteinte par le ruissellement aux infrastructures linéaires ferroviaires a été développée tout particulièrement par SNCF en région PACA avec une analyse de l'expression de la vulnérabilité qui servira d'inspiration pour les autres types d'enjeux.