HAL
open science

EVALUATION D'UN OUTIL CARTOGRAPHIQUE POUR LA GESTION DU RUISSELLEMENT PLUVIAL INTENSE SUR LES VOIES FERREES

L. R. Lagadec, Isabelle Braud, Pascal Breil, L. Moulin, B. Chazelle

To cite this version:

L. R. Lagadec, Isabelle Braud, Pascal Breil, L. Moulin, B. Chazelle. EVALUATION D'UN OUTIL CARTOGRAPHIQUE POUR LA GESTION DU RUISSELLEMENT PLUVIAL INTENSE SUR LES VOIES FERREES. Congrès Lambda Mu 21 " Maîtrise des risques et transformation numérique : opportunités et menaces ", Oct 2018, Reims, France. hal-02072678

HAL Id: hal-02072678

https://hal.science/hal-02072678v1

Submitted on 20 Mar 2019

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.

EVALUATION D'UN OUTIL CARTOGRAPHIQUE POUR LA GESTION DU RUISSELLEMENT PLUVIAL INTENSE SUR LES VOIES FERREES

EVALUATION OF A MAPPING TOOL TO MANAGE INTENSE PLUVIAL RUNOFF ON RAILWAYS

Lagadec L-R.
SNCF Réseau, Ingénierie et Projets
Pôle Ingénierie Bordeaux, 54 bis rue Amédée Saint Germain, 33077 Bordeaux

Braud I. et Breil P.
Irstea, UR Riverly
5 rue de la Doua, CS 20244, 69625 Villeurbanne Cedex

Moulin, L.
SNCF Réseau, Direction Ingénierie et Projets
6 avenue François Mitterrand, 93574 La-Plaine-Saint-Denis cedex

Chazelle, B.
SNCF Réseau, Ingénierie et Projets, Pôle ingénierie Clermont-Ferrand, 31 Avenue Albert-et-Elisabeth, 63037 Clermont-Ferrand cedex

Résumé

Les voies ferrées sont particulièrement exposées au ruissellement et un épisode pluvieux important peut engendrer une dégradation précoce de l'infrastructure, des perturbations des circulations, voire engager la sécurité. La méthode IRIP, pour « Indicateur de ruissellement intense pluvial », est une méthode géomatique qui permet de cartographier la susceptibilité des territoires à l'aléa ruissellement. Cette communication présente une méthode d'évaluation de la pertinence des cartes IRIP, qui utilise des données d'impacts sur la voie ferrée comme données approchées pour représenter le risque de ruissellement. Nous illustrons la mise en œuvre de cette méthode sur un tronçon de voie de 80 km dans le nord de la France. Finalement, il est montré que la méthode IRIP peut être un outil simple et robuste d'aide à l'expertise et à l'écoconception.

Summary

Railways are exposed to water surface runoff and important rainfall can cause early deterioration of the infrastructure, can generate train disruption or even jeopardize safety. The IRIP method, for "Indicator of intense pluvial runoff", in French, is a geomatics method which allows mapping the susceptibility of territory to surface runoff. This paper presents a method to evaluate the surface runoff maps relevancy. The evaluation method uses runoff impacts on railways as proxy data to compare with the maps. The evaluation is made on a 80 km railway stretch in the North of France. Finally, it is shown that the IRIP method can be a simple and reliable tool to support decision making for expertise and for eco-design.

1. Introduction

Les voies ferrées sont des infrastructures critiques du territoire. Elles permettent le transport de millions de voyageurs et de tonnes de marchandises chaque jour. Les voies ferrées, en tant qu'infrastructure extérieure, sont exposées aux aléas naturels. Des études à l'échelle du réseau ferré européen estiment à environ 2 M€ le coût direct et indirect d'un évènement de pluie intense (Maurer et al., 2012). Cette étude se focalise en particulier sur les aléas liés au ruissellement pluvial. Lors d'épisodes pluvieux intenses ou à la suite de longues périodes de pluie, d'importantes quantités d'eau peuvent être générées en surface. Les écoulements, concentrés ou en nappe, peuvent alors engendrer des phénomènes dangereux sur les versants, tels que des inondations rapides, des incisions dans le sol, des glissements de terrain ou des coulées de boue. Les voies ferrées sont particulièrement exposées au ruissellement pluvial. Elles traversent tous types de territoires et coupent de nombreux petits versants, difficiles à surveiller. La constitution même de l'infrastructure ferroviaire la rend vulnérable au ruissellement. Les installations électriques de traction et de télécommunication sont sensibles à l'eau. Les ouvrages en terre (déblais, remblais, etc.) peuvent subir des ravinements, des petits glissements. Les déblais sont exposés aux inondations et aux dépôts boueux. Les remblais peuvent être mis en charge par les écoulements concentrés. Le ruissellement peut dégrader la plateforme, éroder l'assise des voies, polluer le ballast par des fines et engendrer une perte de portance de la voie. De plus, le ruissellement en circulant sur les versants peut se charger en sédiments fins et en débris plus volumineux, ce qui peut combler les dispositifs hydrauliques de drainage de plateforme et de protection contre les inondations.

En conséquence, le ruissellement pluvial peut engendrer une dégradation précoce de l'infrastructure, peut perturber les circulations, voire engager la sécurité des personnels et des voyageurs. Cet aléa doit donc être maîtrisé.
La gestion du ruissellement pluvial, et des risques liés à l'eau en général, peut être ponctuelle et curative, suite à un impact par exemple. Elle peut également se faire de manière plus préventive sur de grands tronçons de voie, lors de travaux de création ou de régénération. Les problématiques actuelles pour la gestion curative sont les contraintes d'emprises (composer avec le manque d'espace disponible et les infrastructures existantes), la gestion des sédiments dans les ouvrages hydrauliques (l'entretien et la maintenance doivent rester simples). Pour réaliser l'expertise terrain, il n'existe que peu d'outils pour appuyer ou confirmer le dire d'expert (formules Rationnelle d'estimation de débit), et l'expertise hydrologique est souvent davantage focalisée dans les emprises ferroviaires et moins dans le bassin versant. Pour la gestion préventive, sur de plus grands tronçons, la difficulté réside dans le manque de données sur le ruissellement. La recherche des désordres passés peut être chronophage et il n'existe pas de cartes de ruissellement à l'échelle nationale, telles qu'il peut en exister pour les inondations de cours d'eau par exemple. Les épisodes de ruissellement intense sont rapides et localisés, ils sont quasiment imprévisibles. De plus, le gestionnaire d'infrastructure est soumis à la règlementation liée à l'environnement. Le respect des contraintes (règlementations, délais, espace disponible, etc.) nécessite souvent de la créativité pour définir la solution technique. Les règlementations environnementales encouragent le recours aux techniques alternatives, à une gestion plus raisonnée et au plus proche du cycle de l'eau. Il existe un réel besoin d'outils d'aide à l'expertise pour mieux gérer les risques liés au ruissellement dans le contexte ferroviaire.

Le présent article porte sur une méthode de cartographie de la susceptibilité des territoires au ruissellement, et présente son développement, son évaluation et son application au contexte ferroviaire. Cette méthode de cartographie, appelée IRIP pour « Indicateur de Ruissellement Intense Pluviale », a été créée à l'Irstea, Institut de Recherche en Sciences et Techniques de l'Environnement et de l'Agriculture (Dehotin et Breil, 2011a, b), et est actuellement en co-développement à SNCF Réseau. La création de cette méthode a été initiée suite à l'expression, par des gestionnaires du territoire (collectivités, EPTB, etc.), d'un besoin de disposer d'un outil ou d'une méthodologie pour réaliser des cartographiques de l'aléa ruissellement, la réalisation de ce type de cartographie passant souvent par des expertises terrains chronophages et dépendantes de l'expert qui les produit. Le besoin pour une méthode de référence pour cartographier le ruissellement a émergé et c'est dans ce contexte que le partenariat entre l'Irstea et SNCF Réseau a été initié, afin d'adapter la méthode IRIP aux besoins et contraintes du contexte ferroviaire.
Suite aux premiers tests prometteurs dans un contexte de recherche, le besoin d'évaluer rigoureusement la méthode IRIP est devenu crucial pour une application dans un contexte opérationnel. L'enjeu de l'évaluation est de connaître précisément la pertinence et la valeur des informations produites et le domaine d'applicabilité de la méthode IRIP. Un tel outil peut aider à prendre des décisions qui peuvent engendrer des coûts et mettre en jeu la sécurité, il est indispensable de caractériser la fiabilité de l'outil. L'évaluation des outils numériques est d'autant plus importante que la précision des informations produites mène à croire qu'elles sont également très fiables. La difficulté réside dans le manque de données de comparaison et dans le défaut de méthodologie pour réaliser des évaluations rigoureuses. Il est essentiel de tester les limites des outils numériques où la multitude d'informations générées peut-être source d'incertitudes, voire conduire à des conclusions erronées, et devenir une menace pour l'utilisateur.
L'objectif de cet article est d'évaluer la contribution de la méthode IRIP de cartographie du ruissellement à la gestion des risques sur l'infrastructure ferroviaire. Seront évalués : la facilité de mise en œuvre de la méthode, la valeur et la fiabilité des informations produites, ainsi que la contribution concrète de ces représentations spatialisées à la gestion des risques liés à l'eau dans le contexte ferroviaire. Dans un premier temps, la méthode IRIP sera présentée, ainsi que la méthode d'évaluation mise en œuvre. Ensuite, les résultats de l'évaluation sont présentés pour un cas d'étude dans le nord de la France. Ce travail est ensuite discuté dans la perspective de la méthode IRIP comme outil d'aide à l'expertise pour améliorer la gestion des risques liés à l'eau sur le réseau ferré.

2. Matériels et méthodes

2.1. La méthode IRIP

Le principe de la méthode IRIP est de combiner de manière géomatique différents indicateurs géographiques du paysage. Les cartes produites sont des cartes de susceptibilité au ruissellement, elles indiquent les zones les plus propices au ruissellement, en décomposant le phénomène de ruissellement en trois processus :

- La production du ruissellement : lorsque l'eau ne peut pas ou plus être infiltrée dans le sol et qu'elle apparait en surface.
- Le transfert du ruissellement : lorsque l'eau générée se met en mouvement et est susceptible d'atteindre des vitesses

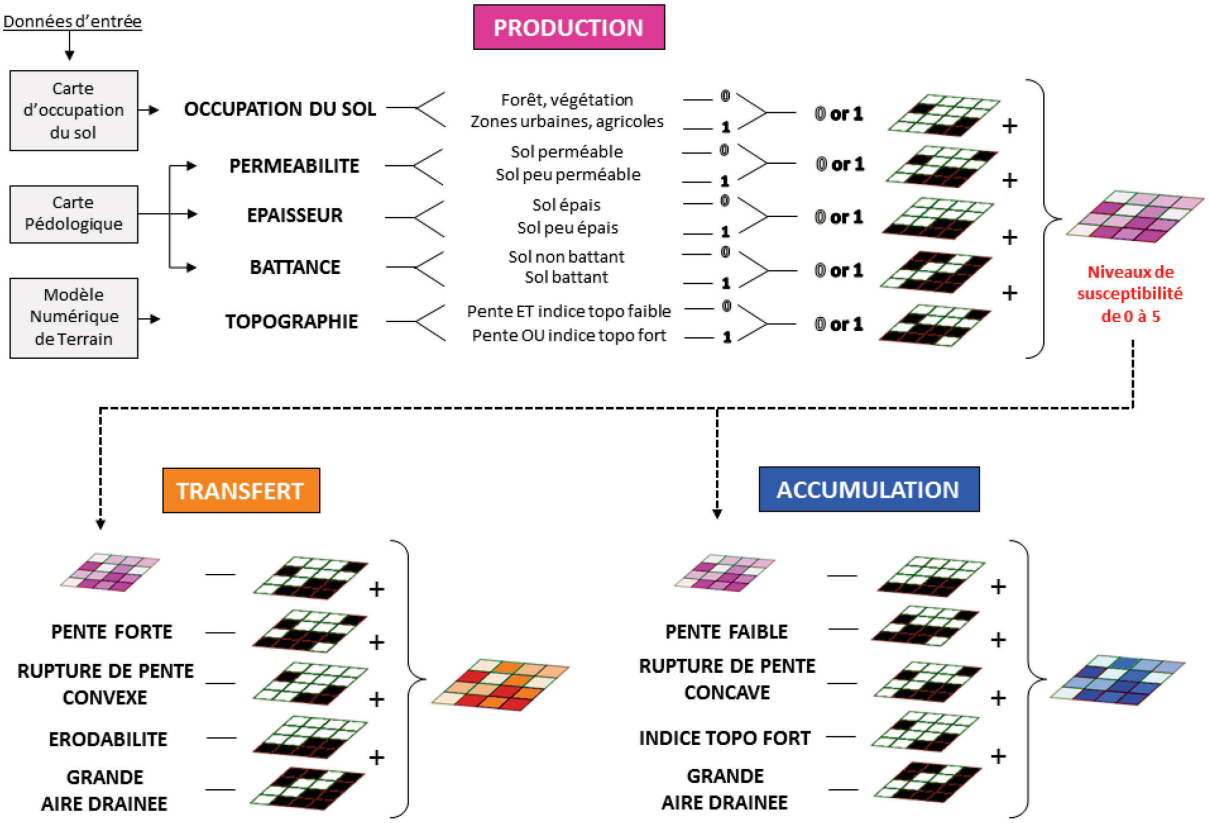


Figure 1. Principe de création des cartes IRIP de susceptibilité au ruissellement

d'écoulement importantes, ce sont des zones propices à l'érosion.
- L'accumulation du ruissellement : lorsque les écoulements sont ralentis ou stagnent, les hauteurs d'eau peuvent être importantes, ce sont des zones propices aux inondations ou aux dépôts de sédiments.

Ces différents processus peuvent se produire simultanément (accumulation sur des zones de production), rapprochés dans l'espace (une zone de transfert suivie par une zone d'accumulation), ou de façon alternée (alternance de zones de transfert et d'accumulation pouvant être assimilée à une alternance d'érosion et de dépôts).

Pour produire les cartes de susceptibilité au ruissellement trois données d'entrée sont nécessaires : une carte d'occupation des sols, une carte de la pédologie et un modèle numérique de terrain (MNT). A partir de ces données d'entrée, plusieurs indicateurs sont calculés. Par exemple, à partir d'un MNT, la pente, l'indice topographique et les ruptures de pentes sont calculés. Puis, des indicateurs de perméabilité, d'épaisseur, de battance et d'érodabilité sont estimés sur la base d'une carte des sols. Pour créer les cartes, cinq indicateurs par carte sont combinés (Figure 1). Chaque indicateur est divisé en deux catégories, favorable (1) ou non favorable (0) au ruissellement, et des cartes binaires (0 ou 1) sont créées. La somme des cinq cartes binaires donne une carte de susceptibilité sur 6 niveaux de 0 à 5, où une note de 5 correspond à une zone extrêmement favorable au ruissellement. C'est donc une méthode de score qui permet de croiser des données de natures et de précisions différentes. La carte de susceptibilité à la production est reclassée et réintégrée comme indicateur pour créer les cartes de transfert et d'accumulation. Les seuils fixes ont été déterminés suite à une revue bibliographique et les seuils variables tels que les pentes sont définis grâce à un algorithme de classification. La méthode IRIP est décrite dans sa totalité dans la thèse de Lagadec (2017), notamment le choix des indicateurs, leur méthode de calcul, le choix des seuils, etc. Dans la thèse, deux paramétrages sont présentés, ici, seul le paramétrage final conseillé de la méthode IRIP est considéré.

L'intérêt de la méthode IRIP est avant tout sa simplicité. Elle requiert seulement 3 données d'entrée et peut être utilisée sans calage a priori sur tout type de zone d'étude. La décomposition du ruissellement en processus permet d'avoir une vision simplifiée du territoire et de pouvoir identifier facilement les zones les plus propices à la genèse du ruissellement, à l'érosion, aux inondations, aux dépôts de boue, etc. Les limites de la méthode IRIP sont que sa simplicité implique une précision relative (pas de description physique des processus, résolution des cartes finales basée sur celle du modèle numérique de terrain utilisé en entrée). Les cartes de susceptibilité indiquent une occurrence plutôt qu'une intensité (cartes statiques et qualitatives). Les seuils des indicateurs peuvent être jugés arbitraires, bien qu'il soit possible a postériori de les faire varier selon les connaissances disponibles sur la zone d'étude. L'évaluation de la méthode IRIP a pour but de caractériser la pertinence et la fiabilité de cette méthode simple et originale.

2.2. La méthode d'évaluation

Pour évaluer les cartes IRIP, il faut disposer de données de référence et d'une méthode de comparaison. La difficulté réside tout d'abord dans le manque de données relatives au ruissellement. Le ruissellement est un phénomène fugace et les traces dans le paysage sont rapidement effacées par l'action de l'homme ou la végétation. Il est alors nécessaire pour étudier le phénomène de recourir à des données approchées. Les données d'impacts, par exemple, peuvent attester de l'occurrence de ruissellement intense en certains points. Il n'existe pas ou peu de base de données d'impacts liés au ruissellement disponibles sur de grands territoires. L'étude présentée dans cet article propose d'utiliser les données d'impacts sur les voies ferrées comme données de comparaison pour évaluer la méthode IRIP. La difficulté réside également dans le fait de comparer des informations différentes en fond et en forme. En effet, les impacts ne représentent pas exactement le phénomène de ruissellement. Les données d'impacts ne sont pas exhaustives, elles ne sont pas toujours précisément géolocalisées, les descriptions sont qualitatives et parfois subjectives selon la personne qui relève l'impact. De plus, pour comparer les données d'impact sur les voies ferrées avec les cartes IRIP d'aléa, il faut prendre en compte la vulnérabilité structurelle de l'infrastructure ferroviaire. Un aléa d'une même intensité n'impacte pas de la même manière des zones différents du réseau ferré, selon leur vulnérabilité et leur configuration. Par exemple, si une zone est protégée par un ouvrage hydraulique, la probabilité qu'un aléa impacte l'infrastructure décroît. La méthode d'évaluation proposée (Figure 2) tient compte de tous ces éléments et est composée de quatre étapes :

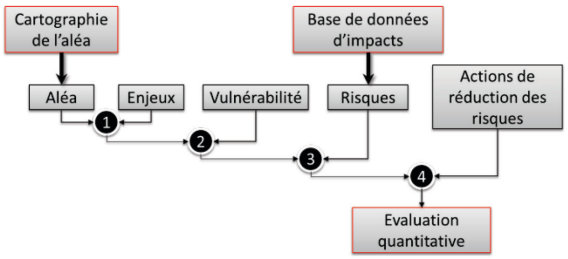


Figure 2. Méthode d'évaluation des cartes IRIP

Etape 1 : définition de la zone d'étude pour l'évaluation

Dans un premier temps, les cartes IRIP sont réalisées sur la zone d'étude. Dans le cas d'un tronçon ferroviaire, la zone d'étude est l'ensemble des bassins versants interceptés par le tronçon de voie ferrée. Ensuite, les cartes IRIP sont découpées autour de la voie ferrée, dans une bande tampon de 25 m de part et d'autre du linéaire de voie ferrée (d'autres distances tampon autour de la voie ont été testées, 25 m a été considéré la plus pertinente au vu de la résolution du MNT pour cette étude, voir Lagadec – 2017, chap 1 part 2). En effet, les données d'impact se situent exclusivement sur la zone à enjeu qui est l'emprise ferroviaire dans le cas de l'étude. Les cartes IRIP sont donc étudiées seulement dans le périmètre de l'emprise ferroviaire.

Etape 2 : caractérisation de la vulnérabilité

Pour caractériser la vulnérabilité de la voie ferrée, un système de notation a été proposé sous forme d'arbre de décision (Figure 3). Le principe de cet arbre de vulnérabilité est de donner une note par tronçon. Les tronçons sont les ouvrages en terre, qui peuvent être de différents types : remblais, déblais, profils mixtes et rasants. Les notes vont de 0 à 4, 4 signifiant un tronçon très vulnérable. Cet arbre de vulnérabilité a été réalisé par expertise et vérifié avec des données d'impacts (Lagadec, 2017). Il est constitué de quatre critères :

- L'exposition : les zones non exposées sont des tronçons de tunnels longs ou de grands viaducs. Si la zone est exposée, elle a déjà une note de vulnérabilité de 1.
- Le type de profil et sa longueur: Les types de profils considérés comme les plus vulnérables sont les déblais longs et les remblais courts. Les

déblais longs sont propices aux inondations, ils doivent gérer davantage d'eau en provenance des versants qu'ils recoupent et il est plus probable qu'ils subissent un disfonctionnement dans le drainage. Les remblais courts sont propices à la mise en charge par les eaux de ruissellement. Ils peuvent jouer un rôle de verrou hydraulique.

- Présence d'une singularité : Les singularités sont soit des passages à niveau, des ponts routes ou des têtes de tunnels. Ce sont des zones propices aux arrivées d'eau sur la plateforme. Ces singularités constituent généralement des discontinuités dans la topographie de l'ouvrage. Si une de ces singularités est présente dans l'enveloppe d'un ouvrage en terre, sa note de vulnérabilité est augmentée de 1.

Les cartes de susceptibilité à l'aléa sont ensuite combinées avec les notes de vulnérabilité de l'infrastructure afin d'identifier les zones potentiellement à risque. La notion de zone à risque a été définie selon le principe que « plus une zone est vulnérable au ruissellement, plus un aléa faible suffit pour produire un désordre ». Ainsi, pour chaque ouvrage en terre, le niveau IRIP (niveau du pixel le plus fort en transfert ou en accumulation) et le niveau de vulnérabilité sont combinés selon la Figure 4, matrice de gauche. Les cases noires sont les configurations considérées comme à risque. La matrice de droite (Figure 4) montre le cas dans lequel la vulnérabilité n'est pas prise en compte, c'est-à-dire qu'une zone est considérée comme à risque seulement si le niveau d'aléa est supérieur ou égal à 4.

Etape 3 : évaluation de la pertinence des zones identifiées comme à risque

La troisième étape est l'étape de comparaison entre les zones identifiées comme à risque et les impacts effectivement observés. Des tableaux de contingence sont utilisés pour effectuer la comparaison (Tableau 1). Si un impact a été observé sur une zone à risque, le tronçon est compté « vrai positif ». Si aucun impact ne s'est produit sur une zone identifiée comme non à risque, le tronçon est compté « vrai négatif ». Si un impact a été observé sur une zone non à risque, c'est un impact manqué, un « faux négatif ». Enfin, si aucun impact ne s'est produit sur une zone à risque, le tronçon est une fausse alarme, un « faux positif ».

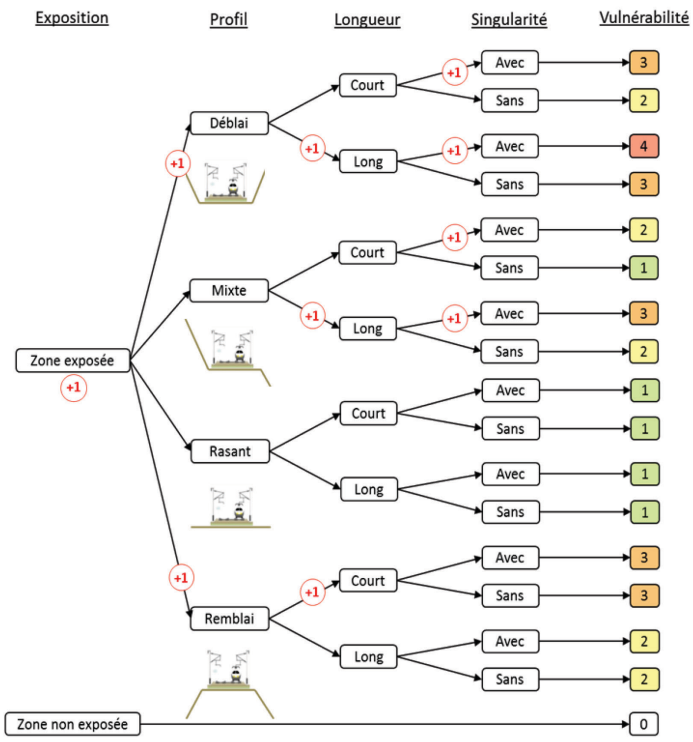
Sur la base de ce tableau de contingence, trois indicateurs de performance sont calculés (Tableau 2). La probabilité de détection (POD) indique la proportion d'impacts observés qui s'est produit sur des zones effectivement à risque. Le taux de fausses alarmes (FAR) indique la proportion de zones à risque avec des fausses alarmes. Plus POD est proche de 1 et FAR proche de 0, plus le

Tableau 1. Tableau de contingence

	Impact observé	Impact non observé
Zone à risque	V+	F+ « Fausse alarme »
Zone non à risque	F- « Impact manqué »	V-

Tableau 2. Indicateurs de performance

	Formules	Interprétation
Probabilité de détection (POD)	$\frac{(V+)}{(V+)+(F-)}$	Varie de 0 à 1 Score parfait 1
Taux de fausses alarmes (FAR)	$\frac{(F+)}{((V+)+(F+)}$	Varie de 0 à 1 Score parfait 0
Test du X²	$\sum \frac{(Obtenus - Théoriques)^2}{Théoriques}$	P(χ² ≥ 10,83) = 0,001 « Extrêmement significatif »



Vulnérabilité \ Aléa	0	1	2	3	4	5
0						
1						■
2					■	■
3				■	■	■
4			■	■	■	■

Vulnérabilité \ Aléa	0	1	2	3	4	5
0					■	■
1					■	■
2					■	■
3					■	■
4					■	■

Figure 3. (ci-contre) Proposition d'un système de notation de la vulnérabilité structurelle de l'infrastructure ferroviaire face au ruissellement, sous forme d'arbre de décision à quatre critères. Les +1 indiquent les configurations vulnérables.

Figure 4. (au-dessus) Méthode de combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité (les cases noires sont les configurations à risque) ; en haut, combinaison utilisée pour cette étude ; en bas, exemple dans le cas où la vulnérabilité n'est pas prise en compte.

résultat est satisfaisant. Le test du X² permet d'évaluer la significativité statistique d'un résultat. Ici, on teste si la relation de dépendance entre les niveaux IRIP forts et la localisation des impacts est significative, c'est-à-dire, si la distribution du nombre de tronçons classés V+, V-, F+ ou F- dans le tableau de contingence est significative. Le X² se calcule en comparant la distribution obtenue avec une distribution théorique, suivant la formule indiquée au Tableau 2. Pour un tableau de contingence à 1 degré de liberté (dans notre cas), la probabilité d'obtenir un X² supérieur à 10.83, est inférieur à 0.1%. On peut donc considérer que la distribution des tronçons V+, V-, F+ et F- est très significative à partir d'un X² de 10.83. D'autres indicateurs statistiques de comparaison sont utilisés dans Lagadec (2017).

Etape 4 : Prise en compte des actions de mitigation du risque

Dans une quatrième et dernière étape, les informations sur les actions de réduction des risques sont étudiées afin d'évaluer si il est possible d'expliquer et même de lever une partie des fausses alarmes. Les actions de réduction peuvent être des actions de protection telles que la mise en place d'ouvrages hydrauliques de traversée sous voie ou de bassins de rétention. Les actions de réduction peuvent également être des actions de résilience, telles que les tournées de surveillance déclenchées lors de dépassement de seuils de précipitation. Si une zone identifiée comme à risque, n'a pas subi de désordre, mais qu'elle fait l'objet d'une attention particulière, via des actions de réduction des risques, elle passe de « fausse alarme » à « vrai positif ». Il est en effet considéré que si un ouvrage hydraulique a été positionné sur le tronçon ou, si le tronçon est dans la liste des tournées de surveillance renforcée, c'est qu'un risque a été identifié et qu'une action de réduction a été mise en place. La carte d'aléa proposée par IRIP peut alors être considérée comme correcte.

A l'issue de ces quatre étapes, on obtient une évaluation quantitative de la performance des cartes IRIP à détecter les zones exposées à l'aléa ruissellement.

2.3. Application au tronçon Rouen – Le Havre

2.3.1. Description de la zone d'étude

Dans le présent article, l'évaluation est réalisée sur le tronçon ferroviaire de Rouen au Havre (Figure 5). Ce tronçon, long de 80 km, fait partie de la ligne n° 340 000 du réseau ferré national, et est en service depuis 1847. Cette ligne est un enjeu fort pour la région, elle relie Paris au Havre en un peu plus de 2 heures et elle connecte Paris aux grands ports fluviaux et maritimes de Rouen et du Havre. Le tronçon d'étude est situé en Seine-Maritime, dans la zone Géographique du Pays de Caux, particulièrement connue pour ces phénomènes de ruissellement intense. L'occupation du sol est principalement rurale et agricole. Les sols, composés de limons et d'argiles à silex, sont sensibles à l'érosion et à la battance (formation de croûte en surface réduisant significativement la capacité d'infiltration du sol). L'ensemble des bassins versants interceptés par la voie ferrée représentent une superficie totale de 500 km². Seuls deux cours d'eau croisent la voie ferrée, mais le réseau de talwegs (ligne qui rejoint les points les plus bas) pouvant s'activer lors d'évènements pluvieux est très dense.

2.3.2. Création des cartes de ruissellement

Les cartes IRIP ont été créées sur la zone d'étude, à partir de trois données d'entrée : la topographie, Le modèle numérique de terrain (MNT) BD ALTI® de l'IGN, d'une résolution de 25 m ; l'occupation du sol, Mode d'Occupation de Sol (MOS) de 2009 de la région Haute Normandie ; la pédologie, European Soil Database (ESDB)

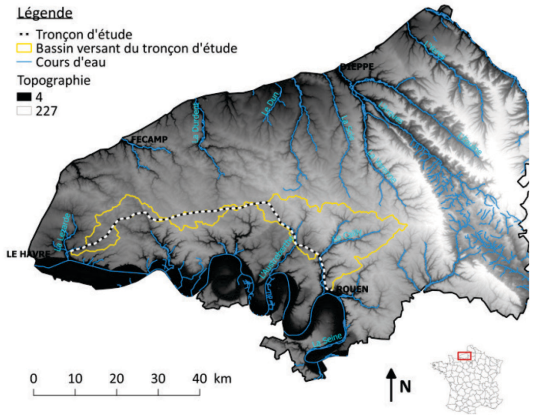


Figure 5. Le tronçon d'étude et le bassin versant d'étude

Tableau 3. Paramétrage pour la création de la carte de susceptibilité la production

Indicateurs	Seuils de favorabilité (note de 1)
Perméabilité	Ks < 10^-6 m/s + zones urbaines (ZU)
Battance	ZU + Battance ≥ 3 (fonction de pédo-transfert)
Epaisseur	Epaisseur <= 50 cm + ZU
Occupation du sol	ZU et agricoles = 1
Pentes fortes + indice topographique	Algorithme de classification

Tableau 4. Paramétrage pour la création de la carte de susceptibilité au transfert

Indicateurs	Seuils de favorabilité (note de 1)
Production amont	Mode du bassin versant amont >= 3
Pentes fortes	Algorithme de classification
Ruptures de pentes convexes	≤ 0,0018 (fonction GRASS GIS r.param.scale ; 3 pixels)
Aire drainée	A ≥ 2,5 Ha
Erodabilité	ZU + Erodabilité ≤ 3 (fonction de pédo-transfert)

Tableau 5. Paramétrage pour la création de la carte de susceptibilité à l'accumulation

Indicateurs	Seuils de favorabilité (note de 1)
Production amont	Mode stat du bassin versant amont >= 3
Pentes faibles	Algorithme de classification
Ruptures de pentes concaves	≤ -0,0018 (fonction GRASS GIS r.param.scale ; 3 pixels)
Aire drainée	A ≥ 2,5 Ha
Indice topographique	Algorithme de classification

V2.0 d'une résolution de 500 m. Pour réaliser l'évaluation des cartes IRIP, il a été choisi d'utiliser des données faciles d'accès et disponibles sur toute la France, afin d'évaluer la pertinence des cartes IRIP dans des conditions d'utilisation basique. Différentes résolutions de données d'entrée ont été testées dans Lagadec (2017). Le paramétrage utilisé pour la méthode IRIP est décrit dans les Tableaux 3 à 5.

La Figure 6 présente les cartes IRIP de susceptibilité à la production, au transfert et à l'accumulation du

ruissellement. La carte de production montre une forte sensibilité à la genèse de ruissellement sur les plateaux agricoles, davantage sur les zones urbanisées et moins sur les coteaux qui sont davantage végétalisés. La carte IRIP de transfert du ruissellement montre de forts potentiels, sur les coteaux des talwegs principaux. D'autres petits talwegs apparaissent également en plus clair sur l'ensemble de la zone, montrant des zones potentiellement sensibles à l'érosion. La carte d'accumulation montre, l'ensemble des chemins d'écoulements préférentiels, depuis les cours d'eau pérennes jusque loin dans les têtes de bassins, sur les zones plus planes.

2.3.3. Constitution de la base de données d'impacts

L'objectif de la base de données est de rassembler sur le tronçon d'étude tous les impacts liés au ruissellement depuis la création de la ligne à nos jours. La création de la base de données a été réalisée en deux étapes : une étape de collecte et une étape de traitement des données. La collecte des données d'impact a été réalisée avec l'appui de compétences en archivistique. Quatre lieux d'archives ont été visités, suivant l'ancienneté des documents. La difficulté a été de gérer la diversité des formats (papier, numérique) et de gérer les doublons. Le travail de collecte a duré quatre mois. 506 documents ont été retenus et inventoriés, datant de 1903 à 2017. L'étape de traitement des données a consisté à retracer l'historique de chaque zone impactée, les circonstances des incidents, les travaux engagés et ce, jusqu'à la situation actuelle. Une difficulté a été de gérer les incertitudes, notamment pour la localisation des impacts et de déterminer s'ils sont des conséquences directes d'un épisode de ruissellement intense. Finalement, la base de données est constituée de 62 zones impactées au moins une fois, allant de zones ponctuelles à une zone étendue sur 1,3 km. L'ensemble des zones impactées au moins une fois représente une longueur cumulée de 12 km, sur les 80 km du tronçon, soit 15% du linéaire étudié. Une couche d'information géographique des impacts géoréférencés avec leur date, leur type et leur incertitude a enfin été créée afin de réaliser des traitements géomatiques (Figure 7).

3. Résultats

Le tronçon Rouen – Le Havre de 80 km est découpé en 182 tronçons ouvrages en terre (remblais, déblais, profils mixtes et rasants). Chaque tronçon a une note de vulnérabilité allant de 0 à 4. Par traitement géomatique, la note de vulnérabilité est combinée avec le niveau IRIP maximal du tronçon (sur la carte de transfert ou d'accumulation), et cette combinaison est comparée à la présence d'une zone d'impact dans le tronçon. Chaque tronçon est alors déterminé V+, V-, F+ ou F-. Par exemple, sur la Figure 8 :

- Pour les deux tronçons V+ de la zone A (à gauche), les notes de vulnérabilité sont supérieures ou égales à 2 et il existe des pixels

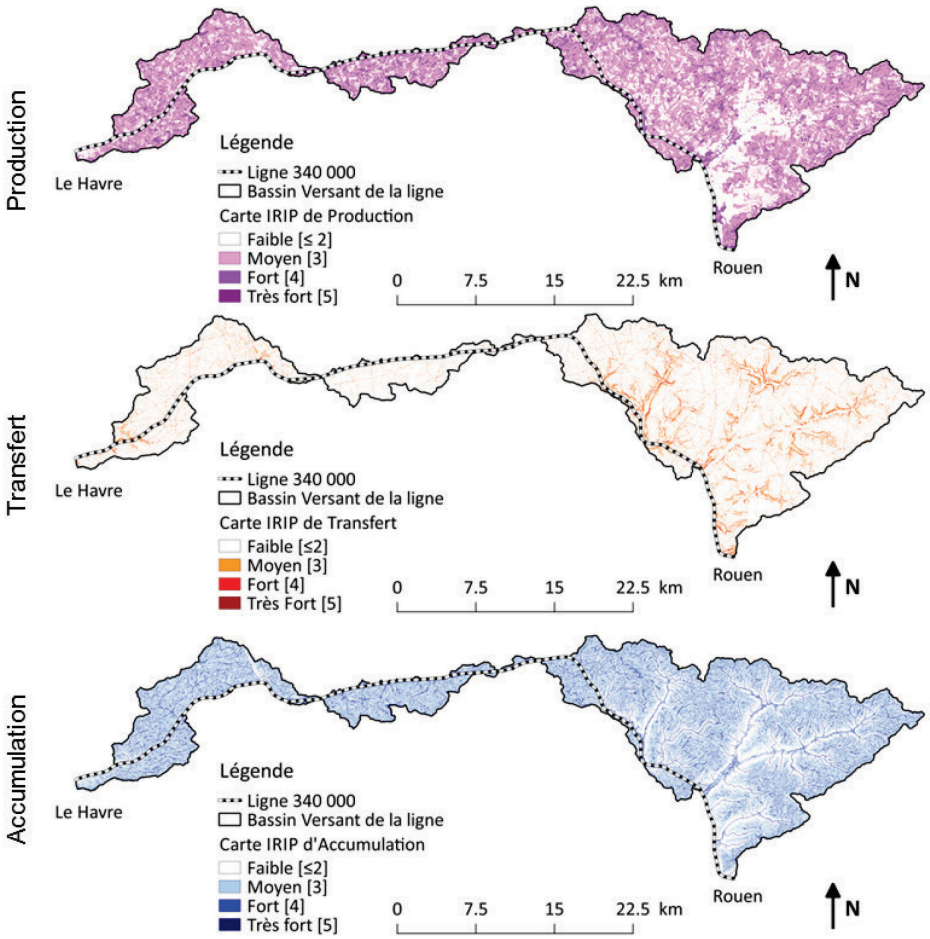


Figure 6. Les trois cartes IRIP de susceptibilité à la production, au transfert et à l'accumulation de ruissellement créées sur la zone d'étude

avec des niveaux IRIP supérieurs ou égaux à 4, ces tronçons ont déjà été impactés au moins une fois, ce sont donc des vrais positifs.

- Le tronçon V- sur la zone A, a une vulnérabilité de 2, son niveau IRIP maximum est 3, il n'y a pas eu d'impact, donc le tronçon est bien un vrai négatif.
- Le tronçon F+ (zone A) a la note de vulnérabilité maximale de 4, donc un niveau IRIP 3 suffit pour considérer le tronçon à risque, néanmoins aucun impact n'a été observé d'après les recherches d'archives effectuées. Le tronçon est alors compté en tant que faux positif (fausse alarme). Attention au terme fausse alarme, il ne signifie pas que l'information est fausse mais qu'on ne peut pas la prouver. Même s'il n'y a eu aucune incidence passée, il pourrait éventuellement s'en produire une.
- Sur la zone B, Le tronçon F- est noté très peu vulnérable avec une note de 1, un niveau IRIP 5 est requis pour considérer la zone à risque mais ce n'est pas le cas (niveau maximum de 4). Pourtant cette zone a déjà été impactée par du ruissellement intense, elle est d'ailleurs équipée d'un ouvrage de traversée sous voie. Ce tronçon est donc considéré comme un faux négatif (impact manqué). Cet exemple montre les limites de la méthode d'évaluation, car on peut voir que la carte IRIP montre bien une arrivée ponctuelle de ruissellement donc la carte semble correcte. C'est la configuration du tronçon en profil rasant qui fait qu'il est considéré comme peu vulnérable. L'arbre de vulnérabilité ou la méthode de combinaison aléa/vulnérabilité pourrait être retravaillés afin de mieux prendre en compte les spécificités de ce type de configuration.
- Enfin, sur la zone B, le tronçon V+ a une note de vulnérabilité de 2 et un niveau IRIP maximum de 5, il est donc considéré comme à risque, pourtant aucun impact n'a été reporté. Ce tronçon devrait être noté en faux positif (fausse alarme), mais on remarque qu'il est équipé d'un ouvrage de traversée sous voie qui a pu jouer un rôle de protection contre l'aléa. La localisation de cet ouvrage montre que l'aléa est effectivement présent à cet endroit et que la carte IRIP est correcte, le tronçon est donc noté vrai positif.

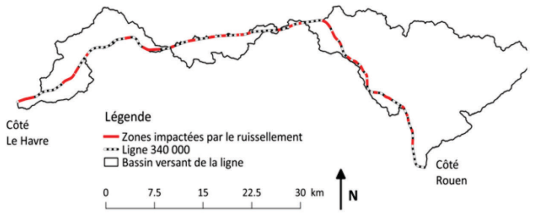


Figure 7. Couche d'information géographique des 62 zones d'impacts

Par traitement géomatique, les 182 tronçons de la ligne ont été analysés. Le Tableau 4 présente les résultats de la comparaison entre les cartes IRIP et les données d'impacts, avant et après prise en compte de la vulnérabilité de l'infrastructure et des actions de réduction des risques liés au ruissellement. On peut retenir que sur la zone d'étude, 96 % des zones impactées se situent au niveau de zones détectées comme à risque, et 28 % des zones détectées comme à risque n'ont a priori jamais été impactées par un épisode de ruissellement intense. Le test du X^2 montre que cette distribution est statistiquement très significative (59.8 >10.8), un fort lien de dépendance existe bien entre les cartes IRIP et les données d'impacts. On peut noter également l'apport pour la méthode d'évaluation de la prise en compte de la vulnérabilité et des actions de mitigation (ouvrages de protection) et de résilience (surveillance renforcée). Ce sont en effet des informations essentielles lorsque l'on compare risque et aléa. La probabilité de détection augmente légèrement (86 à 96 %) et le taux de fausses alarmes chute de 62 à 28 %. Ceci confirme que ces données doivent être capitalisées à plus large échelle pour un objectif d'amélioration de la gestion des risques liés au ruissellement.

Il faut aussi noter que les données historiques d'impact sont pour partie anachroniques de l'état d'occupation des sols répertorié en 2009. Cette évolution est l'une des raisons possibles d'une plus grande occurrence des impacts sur les dernières décennies avec le développement de l'agriculture intensive. On ne peut cependant exclure l'effet de la systématisation des relevés des impacts dans les pratiques de la SNCF durant cette période. L'ancienneté des « alarmes ratées » serait à considérer avec des états d'occupation des sols

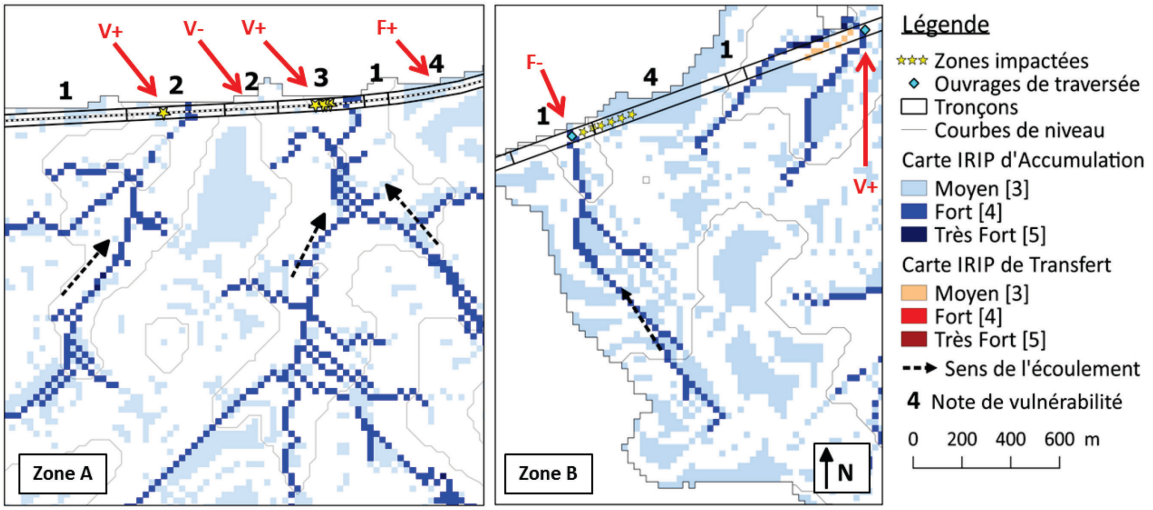


Figure 8. Illustration de l'indentification d'un tronçon V+, V-, F+ ou F-. Les chiffres le long de la voie ferrée correspondent aux notes de vulnérabilité attribuées à chaque tronçon.

Tableau 4. Résultats de la comparaison statistique entre les cartes IRIP et les données d'impacts, avec et sans prise en compte des informations sur l'infrastructure ferroviaire

	Sans prise en compte de la vulnérabilité	Avec prise en compte de la vulnérabilité et des actions de réduction des risques
V+	51	95
F+	83	37
V-	40	46
F-	8	4
POD	86 %	96 %
FAR	62 %	28 %
X^2	7.4	59.8

possiblement différents de l'actuel mais cela impliquerait des recherches poussées sur cet axe.

4. Discussion

Ce travail d'évaluation a permis de s'assurer de la pertinence de la méthode IRIP (approche par combinaison géomatique d'indicateurs) et de sa fiabilité. Les représentations cartographiques sont en accord avec la localisation des impacts de ruissellement observés sur la voie ferrée. L'intérêt de cet outil cartographique est sa simplicité (trois données d'entrée) et sa robustesse (pas de calage). Ses limites sont que ce sont des cartes de susceptibilité, elles ne peuvent pas être traduites directement en cartes règlementaires. Elles ne font pas de prévision, bien qu'elles puissent aider à affiner les zones de tournées de surveillance. De plus, les niveaux de susceptibilité ne sont pas assimilables aux variables usuelles telles que les débits ou les périodes de retour. Les cartes donnent des indications sur le potentiel d'occurrence : plus les niveaux sont élevés, plus il y a d'indicateurs du territoire qui sont favorables au ruissellement.
Concernant l'influence de la résolution des données d'entrée sur les cartes finales, plusieurs résolutions et qualités de MNT ont été comparées dans Lagadec (2017, chap 3 part 2), cinq MNT allant de 250 m à 5 m. Il a été montré qu'il y a une persistance spatiale de l'information des petites résolutions sur les résolutions les plus grossières. Il a également été montré que les données acquises par lidar (5 m testé) apportent des informations très pertinentes qui aident à la compréhension du phénomène de ruissellement. Bien que l'idéal soit d'avoir des résolutions de données d'entrée homogènes, le MNT compte pour, respectivement, 64 % et 84 % dans la création des cartes de transfert et d'accumulation. La qualité de cette donnée est primordiale pour l'étude de ces deux cartes. La carte de production se base pour 60 % sur la carte des sols. La qualité de cette donnée est donc essentielle pour l'interprétation de la carte de production. Si un choix doit être fait, la priorité pour la résolution des données d'entrée dépend donc de l'usage des cartes finales, mais aussi de la taille de la zone d'étude, pour faciliter la lecture des cartes et pour optimiser les ressources de calcul. Il est conseillé de réaliser des zooms successifs. Identifier les zones les plus exposées avec les résolutions grossières puis zoomer avec des résolutions plus fines.

D'autres travaux d'évaluation de la méthode IRIP ont été réalisés dans le contexte ferroviaire, sur la ligne St-Germain-des-Fossés – Nîmes dans le Gard (Lagadec et al., 2016) ou encore sur la ligne Bréauté – Fécamp en Normandie (Lagadec et al., 2018), montrant ainsi la contribution des cartes IRIP à différentes tâches de la gestion des risques. Un gain de temps et de précision peut être apporté, en utilisant ces cartes comme nouvelle source d'information pour éclairer des expertises terrain. Les cartes aident à préparer l'expertise, à mieux appréhender le contexte et une fois sur place, elles permettent de se focaliser sur des zones précises et de se déplacer sur certains points du bassin versant (zones de genèse de ruissellement, zones d'érosion, de dépôts ou de stagnation). Pour les études sur de plus grands linéaires, la méthode permet d'identifier automatiquement l'ensemble des zones exposées. En croisant avec la configuration de l'infrastructure, on obtient un pré-diagnostic des zones à risque. IRIP constitue un outil d'aide à l'identification de l'aléa ruissellement.
Pour les phases de gestion du risque, de définition de la solution technique, les cartes de ruissellement peuvent également apporter des éléments. Les cartes représentent les processus hydrologiques de surface sur l'ensemble du bassin versant autour de la voie ferrée. Ceci peut aider à la mise en place d'actions en versant, à choisir l'emplacement des solutions, et à les adapter aux processus hydrologiques selon les zones (érosion, dépôts, stagnation). Travailler hors emprise ferroviaire est aujourd'hui encore difficile, tout d'abord d'un point de vue juridique il faut avoir l'accord des propriétaires de parcelles et contractualiser les opérations de maintenance. De plus, les solutions techniques alternatives sont souvent hors référentiels, ceux-ci proposant plutôt des dimensionnements (en débit et en volume) de réseaux complets amenant artificiellement l'eau jusqu'à un exutoire. La mise en œuvre de techniques alternatives privilégie en revanche des solutions adaptées localement, et une validation par l'analyse de risque. Ceci demande donc davantage de recherche et des étapes de validation supplémentaires. Néanmoins, agir dans le versant est parfois la seule solution pérenne pour gérer le ruissellement. Les apports de sédiments sont difficiles à gérer par les ouvrages hydrauliques classiques et le manque d'espace dans l'emprise ferroviaire rend difficile l'implantation de solutions adaptées. Les contraintes de rejets dans l'environnement étant très restrictives, gérer le ruissellement peut nécessiter la création de bassin de rétention, solution qui est souvent incompatible avec l'espace disponible Il serait intéressant de réduire les débits entrants, par exemple en créant des mares de rétention au niveau des zones d'accumulation, en réhabilitant ou en créant des zones humides (Fressignac et al., 2016), en mettant en place des fascines sur les axes de transfert pour piéger les sédiments et éviter les pertes en sol, en développant des bandes enherbées sur les zones de dépôts pour laisser s'épandre les fines et les boues, en évitant les terres laissées à nues ou en favorisant la végétation sur les zones de genèse de ruissellement pour augmenter la capacité d'infiltration. Ces techniques d'hydraulique douces sont à utiliser en complément des techniques hydrauliques classiques qui gèrent les évènements exceptionnels. A long terme, les actions en versant limitent la dégradation des éléments de l'infrastructure ferroviaire, réduisent les risques pour la sécurité, ainsi que les pertes économiques. L'intérêt est également écologique en créant des zones humides ou boisées et sociale avec une amélioration de la perception des voies ferrées dans le paysage. Les problématiques de ruissellement rencontrées au droit de l'infrastructure ferroviaire, impactent généralement aussi en amont de l'infrastructure. Que ce soit pour des zones urbaines (risque inondation) ou des zones agricoles (risque érosion), le ruissellement nécessite aussi d'être maîtrisé. Il semblerait plus pertinent et techniquement plus performant de gérer le ruissellement de façon distribuée sur tout le bassin versant. Les freins à une telle maîtrise sont nombreux : législation complexe, difficulté de communication, différences de délais et de budget selon

les acteurs, etc. Disposer d'un outil visuel et pédagogique, illustrant l'impact à l'aval d'une action à l'amont, et l'interconnexion des enjeux sur le territoire, peut favoriser une telle synergie. IRIP peut être un outil d'aide à l'écoconception.

5. Conclusion

Le travail présenté dans cet article contribue à apporter des méthodes pour améliorer la gestion des risques liés au ruissellement sur l'infrastructure ferroviaire. L'étude porte sur la méthode IRIP qui permet de cartographier la susceptibilité des territoires au ruissellement et l'objectif était d'évaluer sa pertinence et sa fiabilité pour un usage opérationnel. Pour cela, une base de données d'impacts sur un tronçon ferroviaire sur une période de plus d'un siècle a été élaborée grâce à un travail de recherche en archive. Pour les comparer aux cartes IRIP, une méthode de notation de la vulnérabilité de l'infrastructure au ruissellement a été proposée sur quatre critères (exposition, type et longueur du profil et présence de singularité). Pour comparer l'aléa, la vulnérabilité et les impacts, des tableaux de contingence ont été réalisés, sur la base desquels trois indicateurs de performance ont été calculés : la probabilité de détection, le taux de fausses alarmes et le test du X^2. En prenant en compte les actions de réduction des risques mis en œuvre, les cartes IRIP de transfert et d'accumulation permettent de retrouver 96 % des impacts observés, avec 28 % de fausses alarmes, à mettre en regard de l'incertitude liée à la non exhaustivité des données d'impacts.

Ce travail d'évaluation permet d'apporter des éléments concrets sur l'intérêt d'un tel outil pour différentes phases de la gestion des risques : l'expertise terrain, le pré-diagnostic de risque, le choix des zones de surveillance renforcée, etc. Au-delà d'une contribution directe aux méthodes actuelles en tant que nouvelle donnée d'entrée pour les études, les cartes de ruissellement offrent une opportunité de faire évoluer les techniques de gestion. L'information spatialisée sur les processus hydrologiques de surface permettrait d'aller davantage vers une gestion en dehors de l'emprise ferroviaire, au niveau des zones stratégiques du bassin versant, au plus près du cycle de l'eau. La gestion distribuée à l'échelle du bassin et en interaction avec les différents acteurs du territoire est essentielle pour bien maîtriser le ruissellement. Ce travail a apporté un socle technique pour le déploiement de la méthode en tant qu'outil d'aide à l'expertise et à l'écoconception, et a contribué aux réflexions sur l'amélioration de la stratégie globale de gestion des risques liés à l'eau.

Remerciements

Les auteurs remercient tous les contributeurs au projet IRIP Rail, et en particulier : Sixtine de Bejarry, archiviste, pour avoir significativement contribué à la constitution de la base de données d'impact ; Stéphane Landormy, Correspondant Ouvrages en Terre du Pôle d'Ingénierie de Rouen pour sa disponibilité et le partage de ses connaissances ; ainsi que Judicaël Dehotin, pour la création de la méthode IRIP et la réalisation du logiciel iRIP®. L'ANRT (Association Nationale pour la Recherche et les Technologies) est également remerciée pour avoir financé en partie ce projet.

Références

Dehotin, J., Breil, P., 2011a. Projet IRIP : Rapport bibliographique. Cartographie de l'aléa inondation par ruissellement (Rapport Irstea). Irstea Unité de recherche Hydrologie-Hydraulique.

Dehotin, J., Breil, P., 2011b. Projet IRIP : Rapport technique. Cartographie de l'aléa inondation par ruissellement (Rapport Irstea). Irstea Unité de recherche Hydrologie-Hydraulique.

Fressignac C., Breil P., Matillon Y., Nullans A., Chazelle B., Sarrazin B., Vallod D. (2016). Assurer la maitrise du ruissellement grâce aux zones humides au voisinage des infrastructures de transport dans une perspective de conservation de la biodiversité. La revue électronique en sciences de l'environnement. http://vertigo.revues.org/17406 ; DOI : 10.4000/vertigo.17406.

Lagadec, L.-R., Breil, P., Chazelle, B., Braud, I., Moulin, L., 2016. Use of post-event surveys of impacts on railways for the evaluation of the IRIP method for surface runoff mapping, FLOODRisk, E3S Web Conf. 7 10005, 17-21 October 2016, doi: 10.1051/e3sconf/20160710005.

Lagadec, L.-R., 2017. Evaluation et développement de la méthode IRIP de cartographie du ruissellement. Application au contexte ferroviaire. Thèse de Doctorat. Université Grenoble-Alpes.

Lagadec, L.-R., Braud, I., Breil, P., Chazelle, B., Moulin, L., 2018. A surface runoff mapping method for optimizing risk assessment on railways. Safety Science.

Maurer, H., Rudzikaite, L., Kiel, J., Partzsch, I., Pelikan, V., Sedlacek, N., Mitsakis, E., Stamos, I., Papanikolaou, A., Celano, M., 2012. Weather Extremes: Assessment of Impacts on Transport Systems and Hazards for European Regions. Weather project synthesis report. doi:<hal-00803668>