



**HAL**  
open science

**PROGRAMME MEEM (DGPR / SRNH) -IRSTEA  
2017 Connaissance et prévention des risques naturels et  
hydrauliques Evaluation et Prévention du Risque Action  
414: Cartographies des risques liés aux inondations par  
Ruissellement Intense Pluvial (IRIP) DECEMBRE 2017**

Pascal Breil, Stanislas Bonne-C, Etienne Leblois, Angel Ekoko-Safi, Olivier  
Cerdan, Rosalie Vandromme

► **To cite this version:**

Pascal Breil, Stanislas Bonne-C, Etienne Leblois, Angel Ekoko-Safi, Olivier Cerdan, et al.. PROGRAMME MEEM (DGPR / SRNH) -IRSTEA 2017 Connaissance et prévention des risques naturels et hydrauliques Evaluation et Prévention du Risque Action 414: Cartographies des risques liés aux inondations par Ruissellement Intense Pluvial (IRIP) DECEMBRE 2017. [Rapport de recherche] Irstea. 2017. hal-02960502

**HAL Id: hal-02960502**

**<https://hal.science/hal-02960502>**

Submitted on 7 Oct 2020

**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 MEEM (DGPR / SRNH) - IRSTEA 2017**  
**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°2102049246

## Evaluation et Prévention du Risque

### Action 414 : **Cartographies des risques liés aux inondations par Ruissellement Intense Pluvial (IRIP)**

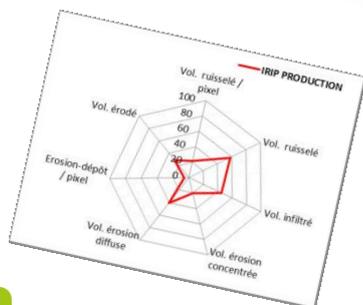
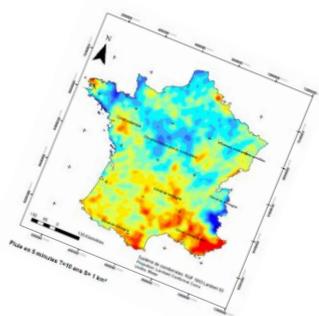
DECEMBRE 2017

**Pascal BREIL ; Stanislas BONNE-C**  
**Etienne LEBLOIS ; Angel EKOKO SAFI**

**Collaboration BRGM :**  
**Olivier CERDAN ; Rosalie VANDROMME**

Irstea, Unité de recherche RIVERLY  
5 rue de la DOUA  
CS 20244  
69616 Villeurbanne cedex

[www.irstea.fr](http://www.irstea.fr)





---

# Contenu

---

<b>1. Rappel et inflexions sur les objectifs de l'action 4.1.4.....</b>	<b>- 4 -</b>
<b>1. Analyse de la signification physique des cartes IRIP.....</b>	<b>- 8 -</b>
1.1.1 Méthode.....	- 8 -
1.1.1 Résultats.....	- 9 -
<b>2. Evaluation de la capacité de détection des modèles IRIP et WaterSed .....</b>	<b>- 10 -</b>
2.1.1 Choix des cartes à comparer .....	- 10 -
2.1.2 Les données de validation.....	- 11 -
2.1.3 Prétraitement des cartes en sorties de WATERSED et IRIP .....	- 11 -
2.1.4 Comparaison entre les incidents et les cartes IRIP et WATERSED prétraitées.....	- 12 -
2.1.5 Synthèse sur les performances des combinaisons IRIP/WS.....	- 13 -
2.1.6 Amélioration de la sensibilité des cartes IRIP .....	- 15 -
2.1.7 Conclusion du rapport.....	- 17 -
<b>ANNEXES.....</b>	<b>- 19 -</b>
1- Meilleures combinaisons des cartes IRIP et WaterSed (WS) pour détecter les incidents sur le bassin de l'Austreberthe.....	- 20 -
2- Réalisation d'une carte pedo-climatique du territoire français à la maille de 25 mètres en vue de l'intégration de celle-ci dans le logiciel IRIP.....	- 28 -
3- Analyse des données de lame d'eau radar pour l'étude des pluies fortes en France métropolitaine.....	51
4- Description du modèle IRIP.....	66
5- Fiche DGPR du modèle IRIP.....	69
6- Description du modèle WaterSed (version anglaise) .....	73
7- Fiche DGPR du modèle WaterSed.....	78



## 1. Rappel et inflexions sur les objectifs de l'action 4.1.4

### Titre initial de l'action

Cartographies du risque lié aux inondations par Ruissellement Intense (IRIP) : test méthode pour évaluation nationale et contribution EPRI 2017.

### Objectifs initiaux de l'action Irstea-HHLY

**Objectif 1 :** Etude des similitudes, différences et complémentarités des trois approches (IRIP, WaterSed, Exzeco) des inondations par ruissellement intense. Ce travail se fera sur 3 territoires représentatifs et choisis par le Schapi, disposant de données sur les inondations par ruissellement, situés hors emprise EAIP DI1. Cela comprend :

1. Le test de la méthode IRIP initiale et la version couplée avec le modèle WaterSed (WS) en collaboration avec le BRGM. Il sera nécessaire de croiser l'aléa de ruissellement avec les enjeux pour générer des cartes de risque dans l'idée d'aborder l'EPRI-ru d'ici fin 2017.
2. L'analyse critique des cartes sera faite en coordination avec les gestionnaires inondations de ces territoires pour évaluer plus en détail l'intérêt des différentes cartes proposées ainsi que les informations pertinentes à conserver.
3. Un travail complémentaire d'exploration sur le bassin de l'Austreberthe et de 3 autres bassins, bien renseignés, situés dans des contextes pédo-climatiques représentatifs des grandes tendances françaises.
4. Le territoire du Grand-Chalon et le bassin de la Dordogne sont des secteurs pré-identifiés.
5. La méthode IRIP pourra fournir des coefficients de ruissellement à la méthode Shyreg ainsi qu'à la modélisation probabiliste des inondations par C. Poulard.

**Objectif 2 :** Un travail exploratoire sera mené sur la France entière à l'aide des données de lame d'eau radar à maille kilométrique, pas de temps de 5 minutes, sur 10 années. Cela consiste à :

1. Développer une étude statistique des pluies fortes en intensité-durée-fréquence-surface afin de caractériser les territoires les plus sollicités ces 10 dernières années. Ceci en intégrant un historique des cumuls sur 72 heures.
2. Créer un indice d'exposition à des pluies fortes (en durée et ou intensité) qui permettra d'établir une couche « pluies de ruissellement intense » sur la France entière.
3. Combiner cette couche avec la cartographie nationale IRIP-WS pour créer une carte de sensibilité au ruissellement intense conditionnée par la pluie.
4. Utiliser cette information pour travailler sur la probabilité d'activation des mailles ruisselantes en utilisant une trentaine de petits bassins versants jaugés.
5. Le jeu de données pluie-radar permettra aussi de « rejouer » des événements de pluies intenses ou longues sur 2 ou 3 territoires qui ont été impactés et pour lesquels des données de vidéo ou de media sont disponibles.

## **Le partenariat avec le BRGM**

La fiche action du BRGM précisait les points suivants en cohérence avec l'action 4.1.4. :

**Objectif 1:** Nous travaillerons aussi sur des sites connus pour leur problématique inondations par ruissellement avec l'IRSTEA qui a soumis une action partagée WS-IRIP. Nous proposerons donc 3 à 4 sites supplémentaires sélectionnés en fonction de la disponibilité de données liées au ruissellement et de la représentativité au niveau national de la combinaison climat / type de sol. Parmi les bassins prévus, nous proposons de travailler sur celui de l'Austreberthe (beaucoup de données inondations ponctuelles récentes à inclure) sur lequel nous n'avons pas eu le temps de pousser la combinaison des modèles IRIP et WS en 2016.

La couche radar météo kilométrique, à 5 minutes, sera un atout certain pour améliorer la cartographie nationale en travaillant d'une part sur des événements datés et d'autre part sur une caractérisation des événements forts et récurrents depuis une dizaine d'année en tout point du territoire.

**Objectif 2 :** Test sur un petit territoire commun à EAIP DI1 et EAIP-ru. Une cartographie de synthèse sera alors réalisée avec des données plus fines (en particulier topographiques à 5m ou 1m) afin de réfléchir à l'apport de l'EAIP-ru dans l'analyse du risque.

### **Changement de commande de la DGPR du 10/08/2017**

Suite à une réunion de la DGPR avec ses services déconcentrés durant l'été 2017, la cartographie du ruissellement intense au niveau national n'est plus une priorité car elle semble trop complexe à prendre en compte. Les porteurs d'action « ruissellement » (Cerema, Irstea-Aix, Irstea-Lyon, BRGM) sont invités à continuer leurs travaux d'évaluation sur leurs bassins de travail. Une fiche de description des modèles est transmise et doit être complétée afin de fournir aux services déconcentrés les possibilités offertes par chacun des modèles. Ces fiches ont été insérées à la suite des présentations des modèles IRIP et WS en annexes 5 et 7 de ce rapport. Une réunion du comité « Experts ruissellement » est programmée fin 2017 pour clore l'activité du dit comité.

### **Objectifs réalisés de cette action 4.1.4 et compléments**

Pour l'objectif 1, les points 1, 2 et 3 ont été traités. Cependant l'analyse des enjeux et du risque a été plus formellement abordée dans l'action 4.1.5 sur le TRI de Nantes.

Le point 4 a seulement démarré avec une convention de collaboration signée durant l'été et une partie seulement des données transmises. Pour le bassin de la Dordogne les cartes géoréférencées n'ont pu être obtenues dans les temps. Le point 5 n'a pas démarré car l'action pilotée par C. Poulard a approfondi d'autres aspects en 2017. Le point 4 sera poursuivie en 2018 afin de délimiter des grandes zones pédo-climatiques où évaluer IRIP afin de couvrir une diversité représentative de ce qui existe en France métropolitaine. Ce point requiert de croiser les bases des informations sur les sols (Info-sols de l'Inra, données ESDAC, données géologiques du BRGM) avec les cartes de pluies fortes sur courtes et longues durées obtenues en cette fin d'année après traitement des données de pluie radar.

Le point 5 sera initié en 2018, cela en cohérence avec la note de synthèse sur l'articulation des actions « ruissellement », financées par la DGPR.

Pour l'Objectif 2, un gros travail de mise en forme et de nettoyage des données pluie-radar s'est avéré nécessaire en préliminaire à tout traitement. A suivi la mise en forme des données pour optimiser les temps de lecture. Une synthèse du rapport est fournie en annexe 3 avec le lien vers le rapport Irstea complet. Les points 1, 2 et 3 ont été traités. Les points 4 et 5 sont à nouveau proposés dans une action 2018 car la base des pluies radar et les fonctions pluie-intensité-durée-surface sont maintenant réputées disponibles.

### **Les cas d'étude traités en 2017**

En tout 6 cas d'étude sont considérés car ils ont tous fait l'objet d'une déclaration en catastrophe naturelle de type ruissellement et coulées de boue. Les 3 cas étudiés en détail par IRSTEA et BRGM sont Lucheux, Austreberthe et Gidy. Les 3 autres ont été traités avec IRIP seul.

BV	Dépt.	S. (KM <sup>2</sup> )	% Urb.	% Cult.	% Prai.	% For.
LUCHEUX	80	10.1	2	55	12	31
AUSTREBERTHE	76	214	7	64	18	11
GIDY	45	95.4	6	33	1	60
COSTAROS	43	6.9	5	36	41	18
GOUDET	43	24.1	3	28	38	31
VALLAURIS	06	4.6	11	54	6	29

Dans l'ensemble, il est observé un faible pourcentage d'urbanisation sur les 6 bassins versants excepté pour celui de Vallauris qui est situé dans le Var. Tous ces bassins ont cependant fait l'objet de déclarations CatNat en lien avec le ruissellement intense. C'est la preuve que le % d'éléments vulnérables comptabilisé au travers du bâti peut être sévèrement affecté dans un contexte péri-urbain, lieu de contact entre l'urbanisation et les pratiques agricoles intenses. Pour l'Austreberthe, nous disposons de données d'incidents liées aux inondations. Nous voyons dans le tableau suivant le nombre d'éléments impactés par type (bâti, entreprise, route). On note que 45% du total concerne des impacts hors de l'EAIP. Il faut aussi noter que la limite de l'EAIP hors du cours d'eau principal, soit l'essentiel du réseau hydrographique de l'Austreberthe, est obtenu par une hauteur d'eau forfaitaire via la méthode Exzeco. Celle-ci tend, on le pense, à sur estimer l'emprise de l'EAIP autour des talwegs dans le contexte des plateaux. Le nombre d'incidents hors débordement de talweg serait alors sous-estimé.

Table des données d'incidents sur le bassin de l'Austreberthe (2017)

	Bâti	Entreprises	Routes
dans EAIP	558	73	123
Hors EAIP	459	13	151
Total	1017	86	274

### **Le réseau ferré**

Les réseaux linéaires (routes, voies ferrées, fossés) constituent un autre élément de vulnérabilité que nous illustrons brièvement dans ce rapport par quelques résultats de la thèse de L.R. Lagadec (soutenue le 5 décembre 2017) et qui met en œuvre et évalue les prédictions du modèle IRIP à l'aide d'une base de donnée incidents d'origine pluviale sur la LGV qui relie Roue au Havre. Le risque routier est quant à lui abordé dans les données d'incidents fournies par le syndicat mixte de bassin de l'Austreberthe où il représente 20% des impacts.

### **La Haute Loire (Costaros et Goudet)**

L'événement de pluie intense survenu en Haute Loire en juin 2017 (déclaré CatNat depuis) a été intégré à la démarche d'évaluation de la méthode IRIP, suite à une reconnaissance de terrain post-événement.. Deux bassins versants impactés ont été étudiés en détail : Costaros et Goudet. Le détail de l'étude est fourni en annexe 2.

Ce cas a permis d'améliorer la carte de production de IRIP en remplaçant l'épaisseur de sol (de la base InfoSol) par la valeur de la réserve utile fournie par la carte sol de l'ESDAC (European Soil Data Center). Cela a aussi permis de montrer que malgré de très fortes pluies (Météo-France indique 220 mm en 3h et des mailles pluie-radar à 400mm / heure)<sup>1</sup>, certaines géologies avec des sols peu épais peuvent être très infiltrantes. Ainsi, on peut affirmer que « tout ne ruisselle pas » en cas de pluie même supra centennale dans ce cas précis. Les conséquences sont alors dans les talwegs (photos B et C) comme nous avons pu le constater sur le terrain, et non plus sur les versants. Ce résultat confirme la nécessité de la cartographie de l'aléa spatial de ruissellement intense.



*De gauche à droite sur commune de Goudet: prairie ravinée, dépôt d'un torrent en versant puis dans le village.*

### ***Le bassin urbanisé de Vallauris***

Il est rappelé pour mémoire car étudié en détail dans le rapport 2017. C'est un exemple intéressant d'inondation pluviale sous un orage intense de la côte méditerranéenne, d'abord par insuffisance du réseau d'assainissement urbain suivie d'une inondation pluviale issue des reliefs dénudés qui surplombent la ville de Vallauris. Ces éléments sont confirmés par une vidéo amateur prise dans une rue principale du village où l'écoulement d'abord clair avec refoulement du réseau d'assainissement est suivi d'un grossissement des flots qui deviennent boueux. L'étude IRIP permet de localiser les zones de production et les axes de transfert du ruissellement intense et paraît cohérente avec l'interprétation faite de la vidéo.

## **Resultats de l'objectif 1**

La collaboration sur IRIP/WS avait vocation à évaluer :

- la pertinence de la méthode géomatique IRIP pour décrire des processus réalistes et,
- la capacité de prédiction d'incidents géo-référencés liés au ruissellement intense.

Cela pour répondre aux questions soulevées par le comité d'experts en octobre 2016. Une première approche présentée fin décembre 2016 avait permis de confirmer l'intérêt d'approfondir cette analyse.

Les deux modèles utilisés sont :

- IRIP : modèle spatialisé de diagnostic sans calage qui met en relief les zones à fort aléa de ruissellement.
- WaterSed : modèle spatialisé pluie-débit événementiel qui décrit les processus d'érosion, transport des sédiments et d'infiltration des eaux.

---

<sup>1</sup> <http://actualite.lachainemeteo.com/actualite-meteo/2017-06-14-19h21/orage-d-une-extreme-violence-en-haute-loire-hier-43825.php>

On se reportera aux annexes 4 et 6 relatives à chacun des modèles pour plus de détail.

La comparaison des cartes produites par les deux modèles fait sens car les aléas liés au ruissellement intense sont les érosions, les dépôts, les coulées de boue et les submersions.

### **Définitions**

- Les cartes IRIP sont réalisées en format raster. La maille ou pixel de base est de 25m X 25m. Cette résolution est celle du MNT de l'IGN qui est disponible sur l'ensemble du territoire français pour réaliser un diagnostic. Un MNT plus fin peut être utilisé quand il est disponible.
- Le modèle WaterSed est siglé WS dans ce qui suit.
- L'EAIP-CE désigne l'Enveloppe Approchée des Inondations Potentielles en Cours d'Eau. Elle a été établie pour la France durant le 1<sup>er</sup> cycle de la Directive Inondation qui s'est terminé fin 2016.
- La notion de risque est intégrée aux jeux de données disponibles en ce sens qu'il s'agit de la géolocalisation d'incidents avérés en lien avec le ruissellement intense. La démarche consiste alors à vérifier la présence d'aléas forts sur ou à proximité des points d'incidents.
- Le POD indique la proportion d'incidents connus effectivement détectés par Irip (et Ws). La proportion de fausse alarme (FAR) ne peut être calculée qu'après une analyse à maille fine des vulnérabilités réellement exposées aux aléas, c.a.d. non déjà protégés (cf. thèse L.R. Lagadec). En phase de diagnostic le FAR n'est pas disponible et nous considérons le % de surface d'un territoire avec des aléas forts comme indicateur de pertinence.

## **1. Analyse de la signification physique des cartes IRIP**

### **1.1.1 Méthode**

Trois bassins versants sont utilisés pour cette étude. Ils ont tous les trois subi des événements de pluies fortes qui ont conduit à des dégâts considérables et le classement en catastrophe naturelle de type « inondation par ruissellement et coulée de boue ». Il s'agit des bassins versants des communes de Gidy, Lucheux et de la rivière Autreberthe, avec des surfaces de 10 à 200 km<sup>2</sup>.

Sur chacun de ces bassins le modèle WaterSed a été calé à l'aide de mesures ou par expertise. Ce modèle utilise une pluie de projet pour générer du ruissellement (voir en annexe 6). Il produit 7 cartes qui décrivent différents aspects du ruissellement intense

- Volume ruisselé produit en chaque pixel ;
- Volume ruisselé passé sur chaque pixel ;
- Capacité d'infiltration en chaque pixel ;
- Masse de terre mobilisable par érosion concentrée en chaque pixel ;
- Masse de terre mobilisable par érosion concentrée en chaque pixel ;
- Masse de terre érodée ou déposée en chaque pixel ;
- Masse de terre écoulee sur chaque pixel.

Ces 7 cartes sont croisées avec les 3 cartes IRIP :

- Potentiel de production du ruissellement intense en chaque pixel ;
- Potentiel de transfert et d'érosion en chaque pixel ;
- Potentiel d'accumulation et de dépôt en chaque pixel.

Comme les cartes IRIP sont en 6 niveaux de valeurs (0 à 5), et afin de réaliser les comparaisons, les cartes WS qui sont des métriques continues, ont aussi été classées en 6 niveaux (0 à 5) avec la méthode des seuils naturels de Jenks. Cette méthode minimise la variance à l'intérieur des classes et

maximise la variance à entre les classes. Nous avons ensuite comparé les valeurs des mailles des cartes Irip et WS en comptant 1 pour les mailles IRIP qui sont à +/- 1 des valeurs des mailles des cartes de WS , cela dans un voisinage (tampon) de 25m. Sinon on compte 0.

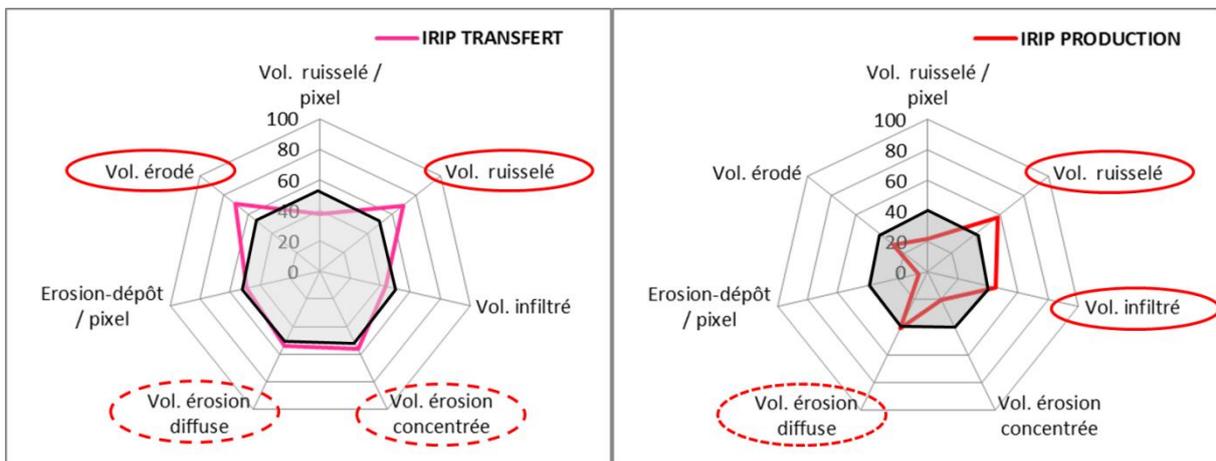
Le % de similitude est mesuré comme le rapport :

$$\text{nombre de 1} / (\text{nombre de 1} + \text{nombre de 0})$$

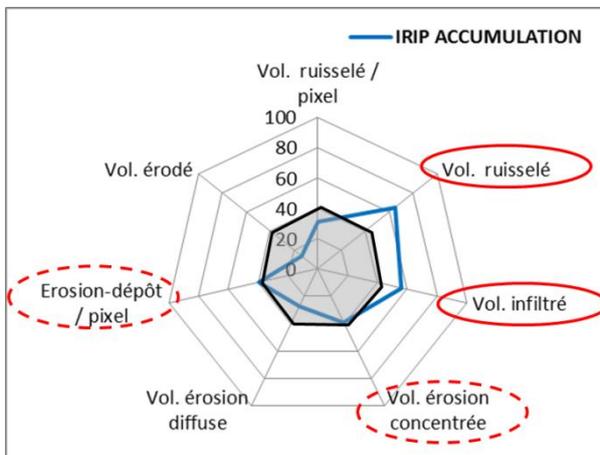
Ces nombres sont comptabilisés sur l'ensemble de chacun des trois bassins versants. La valeur moyenne du % de similitude calculée sur les 3 bassins versants est ensuite retenue pour évaluer les tendances communes.

### 1.1.1 Résultats

Les axes des diagrammes en araignée reprennent les 7 cartes du modèle WaterSed. Les courbes colorées représentent le % de similitude des cartes IRIP avec les 7 axes. Les polygones grisés figurent une zone qui délimite les plus forts pourcentages.



La carte de production présente de bonnes similitudes avec le volume ruisselé qui correspond aux fortes valeurs de production, ainsi qu'avec le volume infiltré qui correspond aux faibles valeurs production de la carte IRIP. Le lien avec l'érosion diffuse fait aussi sens car une forte production de ruissellement sur des terres mises à nu par les pratiques agricoles est responsable de ce type d'érosion.



La carte de transfert est liée au volume ruisselé et au volume érodé. C'est cohérent car le processus d'érosion est d'autant plus important que le volume ruisselé est lui-même important. Le lien avec le volume d'érosion concentré confirme des analogies déjà constatées sur le terrain. C'est moins évident avec le volume d'érosion diffuse.

La carte d'accumulation est aussi liée aux volumes ruisselés et infiltrés mais aussi au volume d'érosion-dépôt par pixel. On retrouve ici un lien avec la charge solide que peut déposer l'accumulation.

Cette comparaison réalisée sur 3 bassins versant permet de confirmer la signification des 3 cartes IRIP en termes de processus d'érosion et de dépôt. Les combinaisons des cartes "corrélées" et "non corrélées" entre WS et IRIP ont été testées dans ce qui suit pour évaluer le taux de prédiction des incidents sur l'Austreberthe.

## **2. Evaluation de la capacité de détection des modèles IRIP et WaterSed**

Les modèles WATERSED (BRGM) et IRIP (Irstea) sont utilisés pour caractériser le ruissellement par dépassement de capacité d'infiltration (hortonien) ou par saturation. En 2016 puis en 2017, une approche de la complémentarité de ces deux modèles est réalisée afin de mieux définir cartographiquement les processus liés au ruissellement, à savoir : sa genèse (dans les zones de production), son érosivité et son accumulation d'eau et de sédiments.

### ***2.1.1 Choix des cartes à comparer***

La méthode IRIP est un modèle de score à base géomatique qui produit 3 cartes en sortie :

- Une carte de susceptibilité à la production du ruissellement,
- Une carte de susceptibilité au transfert (érosion) du ruissellement,
- Une carte de susceptibilité à l'accumulation du ruissellement.

Ces cartes géomatiques caractérisent, pour chaque maille du territoire étudié, 6 niveaux de susceptibilité possibles.

WaterSed fournit 7 cartes géomatiques rasters liés aux écoulements liquides (e.g. volume, temps de montée de l'hydrogramme, débit de pointe, coefficient de ruissellement local) et de matières solides (e.g. masse de matières en suspension, concentration moyenne dans les eaux).

Bien que similaire d'un point de vue de la logique hydrologique, ces deux modèles ont deux approches différentes en terme de résultats. WaterSed fournit des valeurs quantifiées des aléas liés au ruissellement, tandis qu'IRIP produit des niveaux de sensibilité des territoires à ce phénomène.

Ce dernier aspect rend hypothétiquement la complémentarité IRIP-WS intéressante puis qu'elle permettrait d'affiner les résultats obtenus pour chaque modèle. Néanmoins, avant de réaliser ce travail, une première étape a consisté à déterminer quelles étaient les cartes possédant une logique du phénomène similaire pour réaliser des inter-comparaisons.

### 2.1.2 Les données de validation

La connaissance du bassin de l'Austreberthe est apportée par le BRGM (depuis 2015) et par le Syndicat Mixte du Bassin Versant de l'Austreberthe (SMBVA). Ce bassin versant est connu de longue date par le BRGM et le modèle WATERSED y est calé de façon précise. De plus une riche base d'incidentologie (1376 désordres liés au ruissellement intense ont été répertoriés), fournie par le SMBVA, nous offre une possibilité unique de tester la fiabilité des deux modèles et de l'apport de chaque modèle à la détection de ces incidents. Cette base d'incidents regroupe :

- Les inondations recensées sur le bâti, avec notamment des informations sur le type d'impact, la hauteur d'eau et l'adresse et la fréquence de l'inondation (source : SMBVA).
- Les coupures de routes, avec la description de la route, de la cause de la coupure, ainsi que la fréquence de celle-ci (source : SMBVA).
- Les entreprises inondées ou ayant eu connaissance d'une inondation par le passé (source : SMBVA).

Cette base regroupe donc 1376 incidents dans son état 2017, dont 759 dans l'EAIP-CE du 1<sup>er</sup> cycle et 617 hors EAIP-CE.

NBR MAILLES	DANS EAIP	HORS EAIP	TOTAL
INCIDENTS	759	617	1376
SURFACE BV	41885	307159	349044

%	DANS EAIP	HORS EAIP	TOTAL
INCIDENTS	55,2 %	44,8 %	100 %
SURFACE BV	11,9 %	88,1 %	100 %

Ce sont ces incidents qui vont nous permettre de quantifier la fiabilité des cartes produites par les deux modèles et de l'apport inter-modèle. La base d'incidents étant caractérisée par des désordres ponctuels, souvent rattachés à l'adresse postale du bien et non au lieu précis de l'impact, nous avons appliqué à ces incidents un tampon de 25 mètres. Un autre essai de tampon de 100 mètres a été réalisé, mais celui-ci s'est avéré peu discriminant car beaucoup de combinaisons détectaient la totalité des incidents. Le tampon 25 mètres correspond ici à une maille du MNT utilisé par les modèles WATERSED et IRIP sur le bassin versant de l'Austreberthe. *Le tampon autour des incidents est à différencier de celui testé autour des mailles à forts aléas de ruissellement pour évaluer la distance entre les zones de création des aléas et leurs zones d'impacts.*

### 2.1.3 Prétraitement des cartes en sorties de WATERSED et IRIP

Comme explicité précédemment, les cartes en sorties d'IRIP et de WATERSED ont une logique de processus hydrologique et sédimentaire similaires, mais IRIP est un modèle de score (allant de 0 à 5) alors que WATERSED est un modèle quantitatif. Dans un objectif de comparaison de ces modèles, une première étape à réaliser est l'homogénéisation des cartes en sortie. Ainsi, les cartes résultats de WATERSED ont été prétraitées de façon à qualifier chaque pixel du territoire comme un score allant de 0 à 5 (comme dans IRIP) et non plus une valeur quantitative.

Chaque carte en sortie de WATERSED est donc discrétisée en 6 classes croissantes allant de 0 à 5 à l'aide de la méthode statistique des « seuils naturels de Jenks ». Cette méthode de discrétisation

minimise les variances intra-classe et maximise les variances inter-classe. Ainsi, pour chaque classe les valeurs sont les plus proches possibles (à tendance homogène) et les classes sont les plus éloignées possibles (à tendance hétérogène). A noter la transformation logarithmique des valeurs de la carte Out.runoff.surface (ORS) du modèle WaterSed car il s'agit d'un flot cumulé d'amont en aval.

### ***2.1.4 Comparaison entre les incidents et les cartes IRIP et WATERSED prétraitées***

Une fois les cartes WATERSED et IRIP basées sur la même méthodologie de score, l'analyse des différentes cartes en sortie avec les tampons d'incident est possible. L'objectif de cette étape étant de connaître la valeur (de 0 à 5) au droit des incidents pour chaque carte en sortie des deux modèles. Le tampon de l'incident pouvant être décalé de la maille des cartes IRIP et WS, les valeurs fortes (>=3) des pixels situés dans le tampon ont été conservées.

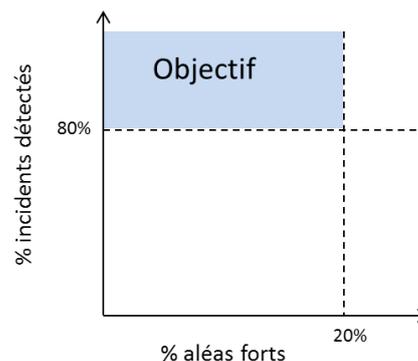
Donc pour chacun des 1376 incidents, une valeur de 0 à 5 est attribuée pour chaque carte en sortie d'IRIP et de WS. Cette base de données permet de réaliser les comparaisons d'efficacité de détection des différentes cartes, mais aussi l'apport chiffré (gain ou perte) d'une combinaison WS-IRIP.

En revanche seule les cartes out.runoff.surface (ORS) et d'imbibition (IMB) ont été couplées aux cartes Production (P), Transfert (T) et Accumulation(A) d'IRIP car ce sont des cartes ayant des logiques hydrologiques amont-aval identiques. Les autres cartes WS n'ont pas de logiques amont-aval (out.excess.runoff) ou sont plus axées sur la quantification de l'érosion (out.gross.eros.sheet, out.gross.eros.gully, out.net.eros.dep). Elles ont un taux de détection d'incidents faible. La complémentarité avec les cartes IRIP n'est alors pas très pertinente pour les valeurs fortes.

Toutes les combinaisons (addition et multiplication) des cartes WS et IRIP avec différents niveaux de sensibilité ont été analysées à travers d'un ratio qui définit un l'indicateur de performance suivant :

Indicateur de performance:

$$R = \frac{\% \text{ incidents détectés}}{\% \text{ mailles aléas forts}}$$



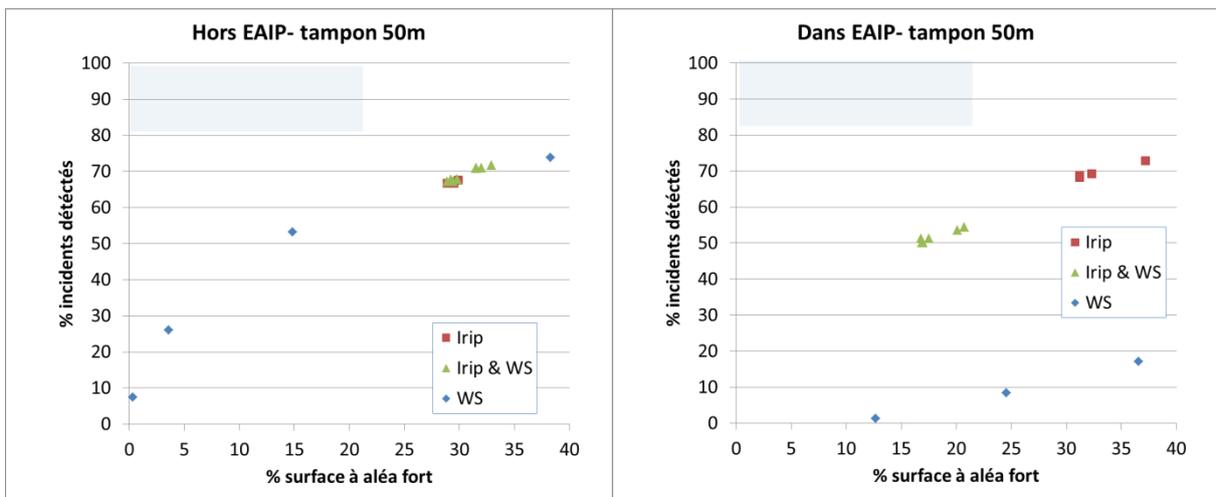
Ce ratio R augmente avec l'efficacité de la détection que l'on cherche à optimiser avec le moins possible de mailles en valeurs fortes. En effet, une détection de 100% des incidents est possible avec 100% du territoire en aléa fort mais cela ne présente aucun intérêt opérationnel.

Au-delà du ratio, le critère principal du gain d'une combinaison est le taux de détection. En effet, le ratio peut être très fort si la surface du bassin versant définie comme étant en aléas forts est elle-même faible. Un objectif a donc été d'obtenir plus de 80% d'incidents détectés avec moins de 20% du territoire en mailles fortes (ou surfaces dangereuses).

### 2.1.5 Synthèse sur les performances des combinaisons IRIP/WS

Les tableaux des principales combinaisons efficaces sont donnés en annexe 1. Nous présentons ci-dessous les performances de chacun des modèles et avec les meilleurs ratios de détections obtenus en les combinant. Les résultats sont d'abord présentés hors EAIP, ce qui correspond à l'hypothèse des inondations par ruissellement et non par débordement. Ensuite dans l'EAIP car les inondations par ruissellement sont tout à fait susceptibles de s'y produire. Dans les graphiques, la zone bleue est celle de l'objectif que nous souhaitons atteindre pour décider du caractère opérationnel des modèles ou de leurs combinaisons pour détecter efficacement les incidents.

Comparaison avec tampon de 50m autour des pixels forts

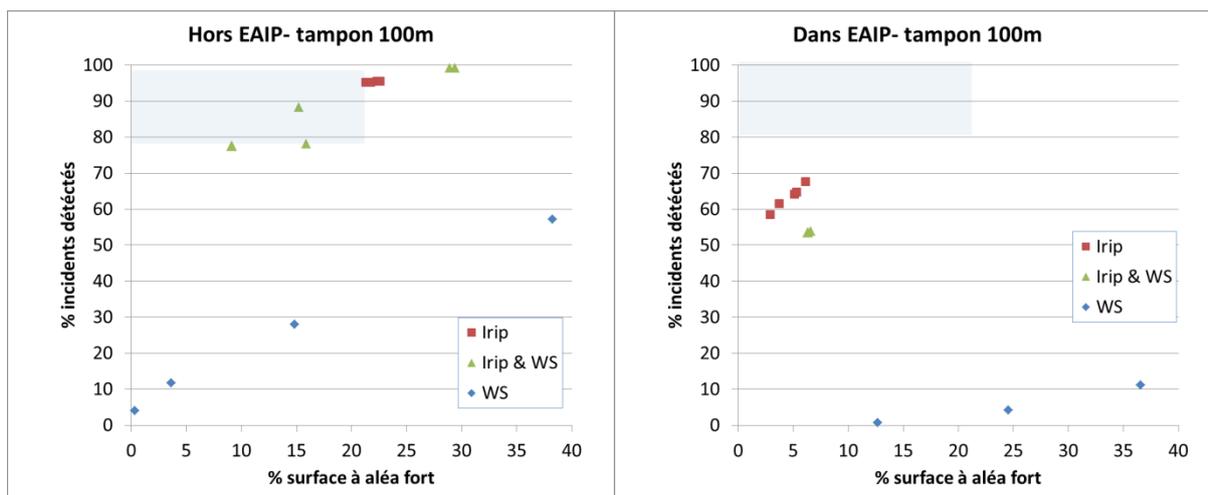


Avec un tampon de 50m nous observons qu'aucune des possibilités ne permet d'atteindre la zone objectif. Les meilleures valeurs sont autour de 70% de détection mais avec au moins 30% de surface à aléa fort.

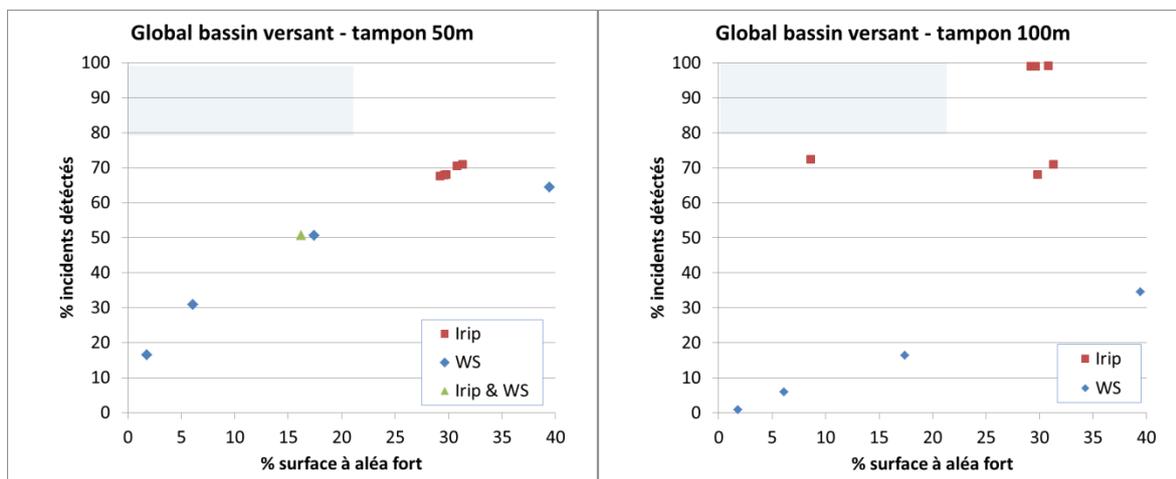
#### Comparaison avec tampon de 100m autour des pixels forts

Avec un tampon de 100m une des combinaisons de WS avec IRIP est dans la zone objectif. On obtient dans ce cas 89% de détection pour 15% de surface à aléa fort en combinant T2A4\*ORS1, soit le transfert moyen à fort d'IRIP avec l'accumulation forte d'IRIP et le volume ruisselé faible à fort de WS. On obtient aussi 95% de détection avec 21% de surface à aléa fort pour IRIP seul avec les cartes P3\*A5, soit la production forte et l'accumulation très forte.

IRIP fournit ici pour un tampon de 100m une détection de 72% pour 8.6% de surface à aléa fort, cela avec P4\*T3, c'est-à-dire les fortes valeurs des cartes de production et de transfert. C'est un résultat intéressant même si il n'atteint pas les 80% de détection car la surface est vraiment faible. Par comparaison, l'EAIP occupe 11.8% du bassin versant et peut être considéré comme la zone à aléa fort pour les inondations par débordement.



### Comparaison avec tampon de 50m et 100m pour bassin versant global



### En conclusion de ces combinaisons

Pour l'essentiel les résultats sont en-deçà de l'objectif fixé. Il faut cependant considérer que la prise en compte de l'ensemble des zones hors EAIP et dans l'EAIP crée un biais car nous ne disposons pas de données d'incidents hors des zones d'enjeu que sont les routes, bâtiments et entreprises. Il est donc maintenant considéré uniquement la zone d'enjeu avec un tampon de 25m. Cela conduit à restreindre l'évaluation du modèle au territoire des enjeux.

Le modèle WS paraît peu efficace dans l'EAIP mais cela s'explique pour partie par le fait que les résultats produits dans le réseau pérenne de rivière ne sont pas cartographiés, car jugés peu pertinents pour ce modèle qui est dédié aux écoulements en versants et talwegs. D'une manière générale IRIP et WS sont plus performants pour détecter les incidents hors de l'EAIP que dans l'EAIP.

L'objectif n'étant atteint que par une seule combinaison de IRIP et WS nous avons cherché à améliorer les performances d'IRIP seul dans ce qui suit.

### 2.1.6 Amélioration de la sensibilité des cartes IRIP

L'évaluation de la méthode IRIP par comparaison avec les données d'impacts sur le bassin versant de l'Austreberthe a permis de donner une estimation de la capacité à identifier les zones exposées à l'aléa ruissellement. L'objectif des modifications testées ci-après est d'obtenir un paramétrage de la méthode IRIP plus performant, en termes de détection des zones impactées, mais aussi plus pertinent et lisible, en termes de représentations spatialisées car des pixels forts apparaissent souvent isolés, ce qui n'a pas forcément de sens physique. Certains indicateurs sont en effet très sensibles à l'information topographique.

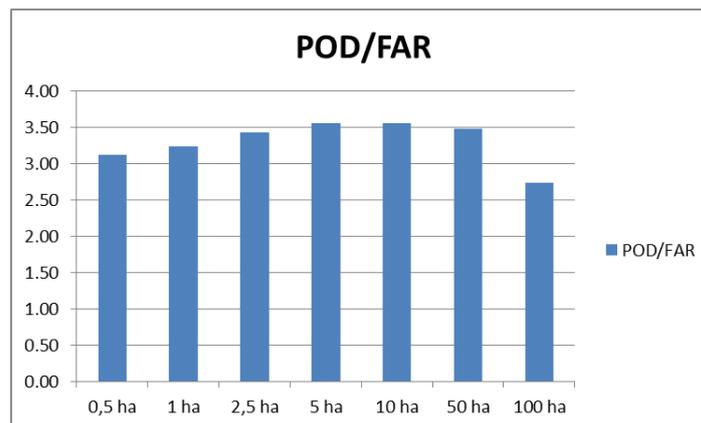
Cartes IRIP	INDICATEURS D'ORIGINE	INDICATEURS MODIFIES
Production	Perméabilité	Réserve utile
	Erodibilité	Battance
	Epaisseur	Zones ruisselantes
	Occupation des sols	Occupation des sols
	Pentes Fortes + Indice topographique	Pentes Fortes + Indice topographique
Transfert	Production amont	Production amont
	Pentes Fortes + Indice topographique	Pentes Fortes + Indice topographique
	Ruptures de pentes convexes	Ruptures de pentes convexes
	Réseaux linéaires	Erodibilité
	Indice de compacité	Aire drainée
Accumulation	Production amont	Production amont
	Pentes faibles	Pentes faibles
	Ruptures de pentes concaves	Ruptures de pentes concaves
	Indice topographique	Indice topographique
	Indice de compacité	Aire drainée

Pour le MNT IGN à mailles de 25M, la précision verticale est au mètre près. Cela peut faire osciller certains indicateurs entre favorable ou non favorable au ruissellement quand l'environnement topographique ne présente pas de tendance franche. Une première analyse a été réalisée en 2017 par L.R. Lagadec pour l'évaluation et le développement de la méthode IRIP en contexte ferroviaire. Le travail effectué ici est basé sur les conclusions de cette analyse, à savoir que certains indicateurs sont modifiés comme précisé dans le tableau ci-dessus.

Dans la carte de transfert, il est proposé de remplacer l'indicateur des axes linéaires au sol par l'indicateur d'érodabilité, remplacé lui-même par un indicateur de battance dans la carte de production. L'indicateur d'érodabilité dans la carte de transfert permet de mieux représenter le potentiel d'érosion du ruissellement notamment au niveau des zones d'accélération (pentes fortes, ruptures convexes). Ceci permet de visualiser beaucoup plus d'information sur la carte de transfert, par rapport à la méthode d'origine.

L'analyse détaillée des cartes met en évidence le fait que l'indicateur de compacité ne semble pas cohérent par rapport aux caractéristiques de surface. Pour remplacer l'indicateur de compacité, il est

proposé d'utiliser un indicateur d'aire drainée. Cet indicateur permet de représenter la potentialité en certains points de recevoir de grandes quantités d'eau de ruissellement. L'aire drainée était déjà utilisée dans la carte d'accumulation mais avec un seuil minimum de 1 km<sup>2</sup> pour indiquer une contribution au ruissellement. Ce seuil est apparu trop grand pour l'étude du ruissellement. Ainsi, plusieurs seuils d'aire drainée ont été testés (0,5 ha ; 1ha, 2,5ha, 5ha, 10ha, 50ha, 100ha=1km<sup>2</sup>) par L.R. Lagadec qui a utilisé les incidents sur le réseau ferroviaire pour évaluer cette influence. La figure suivante montre que le rapport POD/FAR du % de détection (POD) sur celui de fausses alarmes (FAR) croît de 0.5ha à 10ha puis diminue ensuite. En conclusion : les surfaces inférieures à 10 hectares sont a priori plus pertinentes pour représenter les aléas liés au ruissellement intense.



Les améliorations ont aussi porté sur l'utilisation de nouvelles données sol comme la battance et la réserve facilement utilisable (par les plantes), tirées de la base européenne LUCAS (v2 , 2017) de l'ESDAC, disponible à une résolution de 250 mètres.

La prise en compte de la pluie ne peut se faire qu'au sens statistique pour intégrer la durée sur laquelle les incidents de l'Austreberthe ont été consignés. Des quantiles de la pluie 30ans sur une durée de 1 heure ont été calculés sur la France entière à la maille de 1km<sup>2</sup> par traitement des données de pluie radar (voir en annexe 3). L'indicateur de la carte binaire (voir méthode IRIP en annexe 4) de la réserve facilement utilisable a alors été calculé en comparant la valeur d'un pixel de 25m à la quantité de pluie reçue par ce pixel. Il a été affecté 0 si la réserve utile était supérieure à la pluie et 1 dans le cas contraire. En effet, si la capacité d'infiltration est inférieure ou égale à la valeur de la pluie alors l'eau va saturer le sol et ruisseler. Le choix d'utiliser le quantile de pluie de 60 minutes pour une période de retour de 30 ans a été fait suite aux retours d'expérience réalisés depuis 2015 sur différents bassins (Biot, Vallauris, Lucheux, Costaros, Goudet). Les traces de ruissellement observées étaient liées à des pluies supra-décennales car il s'agissait toujours de bassins déclarés en catastrophe naturelle. La durée de 1 heure peut cependant paraître trop longue pour les surfaces de quelques hectares qui semblent mieux représenter les processus de ruissellement intense. Cela peut conduire à sous-estimer les surfaces ruisselantes pour ces types d'événements. *Des tests seront réalisés en 2018 pour vérifier ce point.*

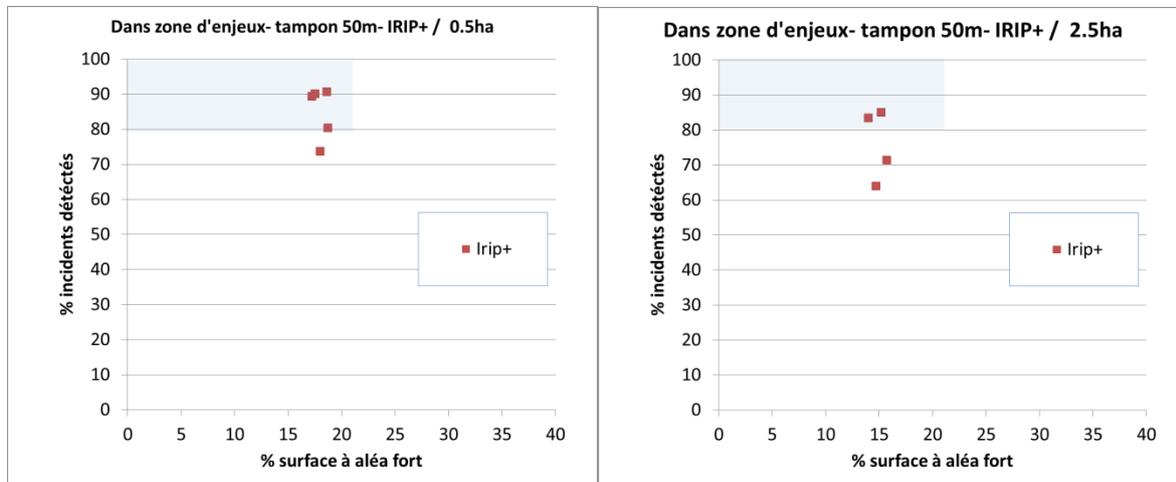
Les améliorations apportées nous font différencier cette version d'IRIP que l'on désigne par IRIP+.

### **Création de la carte pédo-climatique IRIP+ France métropolitaine**

Ces améliorations ont été intégrées dans une carte pédo-climatique réalisée pour la France entière à la maille de 25m. Elle comporte 7 niveaux (voir annexe 2) qui utilise les dernières données sols de l'ESDAC et les quantiles de pluie fournis par l'étude de pluies radar (voir annexe 3). Chaque niveau constitue une carte d'entrée possible de la méthode IRIP pour le calcul des indicateurs. *Cette carte*

pédo-climatique est à différencier de celle qui reposera sur une représentation régionalisée des quantiles de pluie et dont l'objet sera d'identifier en 2018 les combinaisons « sol-pluie » dominantes en France.

### Comparaison avec tampon de 50m autour des pixels forts pour IRIP+



Les nouvelles cartes IRIP+ sont obtenues en appliquant les améliorations présentées ci-avant. Ces cartes sont combinées afin d'optimiser le ratio décrit au paragraphe 2.4.1. Nous obtenons 90% de détection pour 18% de surface à aléa fort, cela pour plusieurs combinaisons possibles des cartes IRIP de transfert et accumulation, et un tampon de 50m, avec la surface de 0,5Ha pour l'aire drainée.

### 2.1.7 Conclusion du rapport

Les résultats des comparaisons réalisées sur trois bassins versants (ayant fait l'objet de déclaration en catastrophes naturelles « inondations par ruissellement et des coulées de boue ») avec le modèle WaterSed ont permis de confirmer que les cartes IRIP représentaient bien des processus d'écoulement liés au ruissellement intense, comme l'érosion diffuse, l'érosion concentrée et les dépôts.

Le pourcentage de détection des incidents pris sur deux cas d'étude à valeur statistique est de 90% à plus, cela avec des taux de « fausses alarmes » suffisamment réduits pour réaliser un diagnostic préliminaire de territoire. Les quantiles de pluie-radar apportent une plus-value à valoriser en 2018 pour l'identification de régions pédo-climatique liées au ruissellement intense.

La distinction entre les aléas accumulation d'eau, de boue, érosion de routes ou autres n'a pas été traitée à ce stade car il faudrait disposer d'un MNT plus fins, comme le lidar 5x5m utilisée par L.R. Lagadec dans sa thèse pour préciser les types d'aléas. On peut cependant imaginer que la probabilité de coulées boueuses se trouve dans la combinaison des cartes de production et de transfert. C'est une piste à creuser.

La méthode IRIP peut être considérée opérationnelle pour pré-identifier des zones à risque d'inondation par ruissellement intense, où des études et modèles plus physiques devraient être appliqués pour dimensionner des réponses de gestion.



# ANNEXES

## 1- Meilleures combinaisons des cartes IRIP et WaterSed (WS) pour détecter les incidents sur le bassin de l'Austreberthe

S. BONNET-CARRIER, 2017

---

Les combinaisons ont été testées sur la globalité du bassin versant, puis uniquement en dehors de l'emprise de l'EAIP-1<sup>er</sup> cycle et enfin uniquement dans l'emprise de l'EAIP-1<sup>er</sup> cycle. Les résultats des meilleures combinaisons sont retranscrits ci-dessous :

- Combinaisons sur l'ensemble du territoire de l'Austreberthe :

GLOBAL – TAMPON INCIDENT DE 50 M			
NOM CARTES	% INCIDENTS DETECTES	% SURFACES DANGEREUSES	RATIO INCIDENT / SURFACE
P4T2A4 * ORS1	50,8	16,2	3,1
T2A4	70,5	30,8	2,3
T2A5	67,6	29,2	2,3
ORS3	28,9	16,7	1,7
IMB3	20,9	37,7	0,6

Sur ce premier tableau définissant les combinaisons sur l'ensemble du bassin versant de l'Austreberthe, on remarque que les combinaisons des cartes IRIP et WS n'ont pas donné de gain véritable à la détection des incidents. Effectivement, seule la combinaison P4T2A4 \* ORS1 ((Production  $\geq$  4+ Transfert  $\geq$  2+Accumulation  $\geq$  4)\*(out.runoff.surface  $\geq$  1)) donne un ratio incident-surface fort mais peu pertinent puisqu'elle ne détecte que 50 % des incidents sur l'ensemble du bassin versant. Lorsque l'on met en commun deux carte IRIP, il s'agit toujours du « OU inclusif ». C'est-à-dire qu'il faut qu'une des deux cartes ou les deux détectent l'incident. Le « ET exclusif » n'est pas viable sur les carte IRIP, car celles-ci cartographient des processus différents (érosion, dépôts) spatialement rarement superposés. L'utilisation de ces cartes « ET exclusif » serait donc peu pertinent.

Les meilleures combinaisons sont issues de l'addition des cartes de transfert et d'accumulation IRIP (Transfert  $\geq$  2 et Accumulation  $\geq$  4 ou 5) puisque celles-ci détectent près de 70% d'incidents pour seulement 30% du bassin versant concerné. A titre indicatif, les meilleures combinaisons de WS ont été indiquées (out.runoff.surface  $\geq$  3 et Imbibition  $\geq$  3) mais ne présentent pas de taux de détection suffisamment forts pour être retenues.

- Combinaisons hors de l'emprise de l'EAIP-1<sup>er</sup> cycle du territoire de l'Austreberthe :

L'emprise hors EAIP 1<sup>er</sup> cycle représente 88,1 % du bassin versant et 617 (45% environ) des incidents liés au ruissellement sur le territoire de l'Austreberthe.

HORS EAIP UNIQUEMENT - TAMPON INCIDENT DE 50 M			
NOM CARTES	% INCIDENTS DETECTES HORS EAIP	% SURFACES DANGEREUSES HORS EAIP	RATIO INCIDENT / SURFACE
T2A5 + ORS4	71	31,5	2,3
T2A4 + IMB5	67,9	29,8	2,3
T2A5 + ORS5	67,7	29,2	2,3
T2A4	67,6	29,9	2,3
T2A5 + IMB5	67,1	28,9	2,3
T2A5	66,8	28,9	2,3

Sur ce second tableau définissant les combinaisons en dehors de l'emprise EAIP-1<sup>er</sup> cycle sur le bassin versant de l'Austreberthe, on remarque que les combinaisons des cartes IRIP et WS n'apportent pas un gain sensible à la détection des incidents ou à la réduction des surfaces avec un aléa fort.

En effet, seules les combinaisons T2A4-5+ORS4-5 ((Transfert  $\geq$  2+Accumulation  $\geq$  4 ou 5) + (out.runoff.surface  $\geq$  4 ou 5)) ou T2A4-5+IMB4-5 ((Transfert  $\geq$  2+Accumulation  $\geq$  4 ou 5) + (imbibition  $\geq$  4 ou 5)) donnent un ratio incident-surface similaire aux cartes combinées IRIP seules.

Le choix de la meilleure combinaison ici est plus complexe car plus diverse. En revanche, en termes d'optimisation d'efficacité, il est préférable de se retourner vers les cartes IRIP seules car la méthode nécessite moins de données d'entrée et de calage que le modèle WS.

On remarque aussi le fait que les cartes les plus pertinentes pour détecter un maximum d'incidents avec un minimum de surfaces à aléas forts sont les mêmes que pour l'analyse du bassin versant global (EAIP + hors-EAIP), à savoir T2A4 et T2A5 (Transfert  $\geq$  2 et Accumulation  $\geq$  4 ou 5). Ces deux combinaisons détectent près de 70 % d'incidents hors EAIP (sur les 617 recensés) avec environ 30% de surface à aléa fort (sur les 88,1% du BV total).

- Combinaisons dans l'emprise de l'EAIP-1<sup>er</sup> cycle du territoire de l'Austreberthe :

L'EAIP 1<sup>er</sup> cycle représente 11,9 % du bassin versant et 759 (55%) des incidents liés au ruissellement sur le territoire de l'Austreberthe

Sur ce troisième tableau définissant les combinaisons dans l'emprise EAIP-1<sup>er</sup> cycle du bassin versant de l'Austreberthe, on remarque que les combinaisons des cartes IRIP et WS ne sont pas pertinentes à la détection des incidents ou à la réduction des surfaces avec un aléa fort. Cela s'explique notamment par le fait que WS n'implémente pas le phénomène du ruissellement sur les fond de talwegs (avec un tampon), et passe donc au travers de beaucoup d'incidents situés en fond de ces talwegs. C'est pourquoi le taux de détection est proche de 50 % avec WS alors qu'il est proche de 70% (sur les 759 dans l'emprise de l'EAIP) avec les combinaisons de cartes IRIP seules.

DANS L'EAIP UNIQUEMENT - TAMPON INCIDENT DE 50 M			
NOM CARTES	% INCIDENTS DETECTES DANS EAIP	% SURFACES DANGEREUSES DANS EAIP	RATIO INCIDENT / SURFACE DANS EAIP
T2A5 * ORS1	50,3	16,9	3
T2A4 * ORS1	53,6	20,1	2,7
T2A5	68,2	31,2	2,2
T2A4	72,9	37,2	2

Encore une fois, les cartes les plus pertinentes pour détecter un maximum d'incidents avec un minimum de surface à aléa fort sont les mêmes que pour l'analyse du bassin versant global et en dehors de l'emprise de l'EAIP, à savoir T2A4 et T2A5 (Transfert  $\geq 2$  et Accumulation  $\geq 4$  ou 5). Ces deux combinaisons détectent près de 70 % d'incidents hors EAIP (sur les 759 recensés) avec environ 31 à 37 % de surface dans l'EAIP à aléa fort (sur les 11,9% du BV total).

- Combinaisons appliquées aux zones à enjeux :

Afin d'améliorer le ratio « incidents détectés sur la surface à aléa fort » une hypothèse de travail consistant à dire que seules les zones vulnérables (à enjeux forts) peuvent être prises en compte. L'absence d'un désordre sur une zone à aléa fort ne veut pas forcément dire que le modèle se trompe. Effectivement, l'absence d'enjeux au droit de cette zone à aléa fort peut expliquer le fait qu'il n'y ait pas d'incident car le risque (notion couplant un aléa et un enjeu) est faible du point de vue de la vulnérabilité.

Ainsi, se focaliser sur les zones à enjeux (routes et bâtiments) est une hypothèse de travail viable permettant de réduire les zones à aléas fort. Pour cela, l'utilisation de la BD\_TOPO\_3D de l'IGN (2017) offre une information précise (métrique) et complète sur le bassin versant de l'Austreberthe. Ainsi un tampon de 25 mètres est réalisé autour des bâtiments et des voies de communications terrestres (routes et chemin de fer).

EN MAILLES	DANS EAIP	HORS EAIP	TOTAL BV
INCIDENTS	759	617	1376
SURFACE ENJEUX	17802	101920	119722

EN % SUR LE BV	DANS EAIP	HORS EAIP	TOTAL BV
INCIDENTS	55,2 %	44,8 %	100 %
SURFACE ENJEUX	5,1 %	29,2 %	34,3 %

Les enjeux (routes et bâtis avec tampon de 25 mètres) représentent environ 34,3 % du bassin de l'Austreberthe et comptabilisent 1376 incidents.

En appliquant la même méthodologie combinatoire que précédemment, on obtient de bien meilleurs ratios incidents détectés sur la surface à aléa fort. Encore une fois les combinaisons inter modèles

entre WS et IRIP ne sont pas très pertinentes puisque la meilleure possède un fort ratio (4,3) mais ne détecte que 51 % des incidents. L'amélioration du ratio s'explique par la réduction des zones à aléa fort de 5 points par rapport au test sur le bassin global de l'Austreberthe. Il en va de même pour les cartes obtenues en sortie de WS, où Out.runoff.surface  $\geq 3$  et Imbibition  $\geq 3$  ne dépassent pas les 30 % de détection.

ENJEUX + TP 25M – TAMPON INCIDENT DE 50 M			
NOM CARTES	% INCIDENTS DETECTES	% SURFACES DANGEREUSES	RATIO INCIDENT / SURFACE
T2A4	70,5	19,8	3,6
T2A5	67,6	19,1	3,5
ORS3	28,9	7,3	4
P4T2A4*ORS1	50,8	11,8	4,3
IMB3	20,9	17	1,2

En revanche il est intéressant de mettre en évidence la progression significative du ratio concernant les combinaisons des cartes IRIP T2A4 et T2A5 (Transfert  $\geq 2$  et Accumulation  $\geq 4$  ou 5). Effectivement, le nombre d'incidents détectés reste inchangé (environ 70%) en revanche la surface définie comme aléa fort a été réduite de près de 10 points pour arriver à 20 % du territoire de l'Austreberthe.

Si l'on récapitule l'ensemble des informations explicitées ci-dessus, on remarque que les cartes T2A4 et T2A5 (Transfert  $\geq 2$  et Accumulation  $\geq 4$  ou 5) ont souvent les ratios les plus élevés avec un taux de détection très fort :

ANLAYSE DES CARTES IRIP T2A4 ET T2A5			
NOM CARTES	% INCIDENTS DETECTES	% SURFACES DANGEREUSES	RATIO INCIDENT / SURFACE
T2A4_ENJEUX	70,5	19,8	3,6
T2A5_ENJEUX	67,6	19,1	3,5
T2A4_GLOBAL	70,5	30,8	2,3
T2A5_GLOBAL	67,6	29,2	2,3
T2A4_HORS_EAIP	67,6	29,9	2,3
T2A5_HORS_EAIP	66,8	28,9	2,3
T2A5_EAIP	68,2	31,2	2,2
T2A4_EAIP	72,9	37,2	2

Comme le montre le tableau ci-dessus, ces combinaisons de carte semblent les plus pertinentes pour la mise en place d'un diagnostic de territoire. Cela correspond bien à la logique voulue par la méthode IRIP : C'est à dire que les cartes de transfert (érosion) et d'accumulation soient des cartes d'aléa et qu'elles définissent les zones susceptibles de créer des désordres s'il y a présence d'enjeux. Dans cet

exemple, sur le territoire de l'Austreberthe, les zones identifiées comme à risques représenteraient seulement 20 % du bassin versant de l'Austreberthe.

Ainsi, un travail sur d'autres bassins versants (avec des topographies, des climats ou une occupation des sols différents) serait une perspective intéressante afin de développer une méthodologie cartographique de diagnostic de territoire à l'ensemble du territoire national.

### *Amélioration de la sensibilité des cartes IRIP*

L'évaluation de la méthode IRIP par comparaison avec les données d'impacts sur le bassin versant de l'Austreberthe a permis de donner une estimation de la capacité à identifier les zones exposées à l'aléa ruissellement. L'objectif des modifications testées est d'obtenir un paramétrage de la méthode IRIP plus performant, en termes de détection des zones impactées, mais aussi plus pertinent, en termes de représentations spatialisées. Une première analyse de ce travail a déjà été réalisé en 2017 (Lagadec - 2017 - Evaluation et développement de la méthode IRIP) et préconise certains remplacement d'indicateurs. Le travail effectué ici est basé sur les conclusions de l'étude précédente, à savoir que les indicateurs de bases sont remplacés tels que :

Cartes IRIP	INDICATEURS D'ORIGINE	INDICATEURS MODIFIES
Production	Perméabilité	Réserve utile
	Erodibilité	Battance
	Epaisseur	Zones ruisselantes
	Occupation des sols	Occupation des sols
	Pentes Fortes + Indice topographique	Pentes Fortes + Indice topographique
Transfert	Production amont	Production amont
	Pentes Fortes + Indice topographique	Pentes Fortes + Indice topographique
	Ruptures de pentes convexes	Ruptures de pentes convexes
	Réseaux linéaires	Erodibilité
	Indice de compacité	Aire drainée
Accumulation	Production amont	Production amont
	Pentes faibles	Pentes faibles
	Ruptures de pentes concaves	Ruptures de pentes concaves
	Indice topographique	Indice topographique
	Indice de compacité	Aire drainée

Les cartes modifiées améliorent nettement la lisibilité des cartes de transfert et d'accumulation. Pour la carte de transfert, il est proposé de remplacer l'indicateur des axes linéaires au sol par l'indicateur d'érodabilité, remplacé lui-même par un indicateur de battance dans la carte de production. L'indicateur d'érodabilité dans la carte de transfert permet de mieux représenter le potentiel d'érosion du ruissellement notamment au niveau des zones d'accélération (pentes fortes, ruptures convexes). Ceci permet de visualiser beaucoup plus d'information sur la carte de transfert, qui était très faible avec la méthode par défaut. L'analyse détaillée des cartes met en évidence le fait que l'indicateur de compacité ne semble pas cohérent par rapport aux caractéristiques de surface. Pour remplacer l'indicateur de compacité, il est proposé d'utiliser un indicateur d'aire drainée. Cet indicateur permet de représenter la potentialité en certains points de recevoir de grandes quantités d'eau de ruissellement. L'aire drainée était déjà utilisée dans la carte d'accumulation mais avec un seuil de 1 km<sup>2</sup> qui paraissait trop important pour l'étude du ruissellement. Ainsi, 3 seuils d'aire

drainée ont été testés (0,5 ha ; 1ha et 2,5ha) afin de définir le seuil de favorabilité. L'évaluation quantitative montre que ce seuil est grand, moins de zones impactées sont détectées.

Dans l'hypothèse d'origine, pour la carte de sensibilité à la production, seule l'érodibilité est remplacée par la battance. Pour la comparaison avec les incidents issus du SMBVA, des données sol plus précises ont été utilisées : la battance et la réserve utile (LUCAS v2 (2017) à une résolution de 500 mètres) et les zones ruisselantes issues de la différence entre les quantiles de pluies trentenaux pour une pluie de durée 60 minutes (données PANTHER de Météo-France à la maille kilométrique) et la capacité d'infiltration (donnée infiltration du BRGM à maille de 25 mètre en hiver). Sur ce dernier cas, si la capacité d'infiltration est supérieure à la valeur de la maille d'une pluie donnée alors la maille (le pixel de la carte sol IRIP) prendra la valeur 0 sur la carte sol finale dans la carte intermédiaire IRIP. En effet, l'eau va s'infiltrer entièrement et ne favorisera pas l'aléa ruissellement. A l'inverse, si la capacité d'infiltration est inférieure ou égale à la valeur de la maille d'une pluie donnée alors la maille (le pixel de la carte sol IRIP) prendra la valeur 1 dans la carte intermédiaire IRIP puisque l'eau va saturer le sol et ruisseler.

Le choix d'utiliser le quantile de pluie avec la pluie la plus longue (60 minutes) pour une période de retour importante (30 ans) a été fait dans le but d'intercepter un maximum d'incidents. En effet, la base d'incidentologie ne renseigne pas la période de retour de la pluie ayant causé le désordre). Néanmoins, l'utilisation d'une pluie de durée plus faible (15 minutes) et de période de retour 10 ans a été testé et les résultats sont quasi similaires puisque sur ce bassin versant l'augmentation de surfaces ruisselantes entre P15' 10 ans et P60' 30 ans est d'environ 30 %. Hors ces 30 % représentent 6% de la carte de production (1 facteur sur 5) et donc 1.2 % de modifications sur la carte de transfert et d'accumulation (puisque la production amont représente 1 facteur sur 5). Il n'y a donc pas de changement significatif sur ce bassin versant pour la donnée de zones ruisselantes.

En appliquant les mêmes méthodes combinatoires décrites précédemment sur les nouvelles cartes IRIP nous obtenons les résultats suivants pour les meilleures combinaisons avec des aires drainées de 0,5Ha, 1Ha et 2,5Ha sur l'ensemble du bassin versant, puis hors EAIP-1<sup>er</sup> cycle et enfin dans l'EAIP-1<sup>er</sup> cycle .

On remarque tout d'abord que les meilleures combinaisons correspondent à l'accumulation ou à la combinaison du transfert et de l'accumulation. L'accumulation supérieure ou égale à 3 et (OU inclusif) le transfert supérieur à 4 ou 5.

On remarque que les ratios sont meilleurs pour les surfaces drainées supérieures à 2,5 hectares. En effet, même si le nombre d'incidents détectés est moindre, la surface d'aléa fort est fortement diminuée. Si l'on compare ces résultats à ceux obtenus précédemment, on n'observe pas de gain particulier sur le ratio puis que les incidents détectés augmentent en moyennes de 20 points mais les surfaces à aléa fort aussi. Le gros avantage de l'utilisation de ces modifications IRIP va être la clarté de la lecture des cartes proposées par le modèle.

En effet, faire une carte c'est faire des choix. La carte est une simplification de la réalité et selon que l'on choisisse ou non de faire apparaître telle ou telle information, la représentation du réel ne sera pas la même. Il peut y avoir un intérêt, un enjeu, à ne pas faire apparaître telle ou telle information sur une carte, ou au contraire faire apparaître différents types d'informations sur une même carte. L'objectif des cartes IRIP étant de rendre compte via un diagnostic de la sensibilité des sols à l'aléa ruissellement intense pluvial sur un territoire donné, la qualité des cartes de sorties est une constante primordiale, pour les utilisateurs de ces cartes.

GLOBAL-MODIF_IRIP - TAMPON 50 M - SURF_DRAIN_0,5HA				GLOBAL-MODIF_IRIP - TAMPON 50 M SURF_DRAIN_1HA				GLOBAL-MODIF_IRIP - TAMPON 50 M - SURF_DRAIN_2,5HA			
NOM CARTES	% INCIDENTS DETECTES	% SURFACES DANGEREUSES	RATIO INCIDENT / SURFACE	NOM CARTES	% INCIDENTS DETECTES	% SURFACES DANGEREUSES	RATIO INCIDENT / SURFACE	NOM CARTES	% INCIDENTS DETECTES	% SURFACES DANGEREUSES	RATIO INCIDENT / SURFACE
A3	89,4	52,7	1,7	A3	86,3	46,3	1,9	A3	83,4	42,8	1,9
T4A3	90,7	55,8	1,6	T4A3	87,8	49,2	1,8	T4A3	85	45,7	1,9
T5A3	90,2	53,4	1,7	T5A3	86,6	46,6	1,9	T5A3	83,4	42,9	1,9

HORS EAIP UNIQUEMENT-MODIF_IRIP - TAMPON 50 M SURF_DRAIN_0,5HA				HORS EAIP UNIQUEMENT-MODIF_IRIP - TAMPON 50 M - SURF_DRAIN_1HA				HORS EAIP UNIQUEMENT-MODIF_IRIP - TAMPON 50 M - SURF_DRAIN_2,5HA			
NOM CARTES	% INCIDENTS DETECTES	% SURFACES DANGEREUSES	RATIO INCIDENT / SURFACE	NOM CARTES	% INCIDENTS DETECTES	% SURFACES DANGEREUSES	RATIO INCIDENT / SURFACE	NOM CARTES	% INCIDENTS DETECTES	% SURFACES DANGEREUSES	RATIO INCIDENT / SURFACE
A3	84,2	50,2	1,7	A3	79,3	43,6	1,8	A3	76,4	40,1	1,9
T4A3	86,9	53,4	1,6	T4A3	82,4	46,6	1,8	T4A3	79,6	43	1,9
T5A3	85,9	51	1,7	T5A3	80	43,9	1,8	T5A3	76,4	40,2	1,9

DANS L'EAIP UNIQUEMENT-MODIF_IRIP - TAMPON 50 M SURF_DRAIN_0,5HA				DANS L'EAIP UNIQUEMENT-MODIF_IRIP - TAMPON 50 M - SURF_DRAIN_1HA				DANS L'EAIP UNIQUEMENT-MODIF_IRIP - TAMPON 50 M - SURF_DRAIN_2,5HA			
NOM CARTES	% INCIDENTS DETECTES DANS EAIP	% SURFACES DANGEREUSES DANS EAIP	RATIO INCIDENT / SURFACE DANS EAIP	NOM CARTES	% INCIDENTS DETECTES DANS EAIP	% SURFACES DANGEREUSES DANS EAIP	RATIO INCIDENT / SURFACE DANS EAIP	NOM CARTES	% INCIDENTS DETECTES DANS EAIP	% SURFACES DANGEREUSES DANS EAIP	RATIO INCIDENT / SURFACE DANS EAIP
A3	93,7	70,4	1,3	A3	92,1	65,5	1,4	A3	89,2	62,3	1,4
T5A3	93,7	71,3	1,3	T5A3	92,2	68,4	1,3	T5A3	89,3	64,9	1,4

Tout comme précédemment, et afin d'améliorer le ratio « incidents détectés sur la surface à aléa fort », et dans la logique de l'ajout de la vulnérabilité des territoires, seules les zones vulnérables (Zones de bâtis et voies de communications terrestres) sont prises en compte, soit environ 35% du bassin versant de l'Austreberthe. Les résultats de ces test sont présentés ci-dessous pour une surface drainées de 0,5 hectare, 1 hectare et enfin 2,5 hectares :

ENJEUX UNIQUEMENT-MODIF_IRIP - TAMPON 50 M SURF_DRAIN_0,5HA				ENJEUX UNIQUEMENT-MODIF_IRIP - TAMPON 50 M - SURF_DRAIN_1HA				ENJEUX UNIQUEMENT-MODIF_IRIP - TAMPON 50 M - SURF_DRAIN_2,5HA			
NOM CARTES	% INCIDENTS DETECTES	% SURFACES DANGEREUSES	RATIO INCIDENT / SURFACE	NOM CARTES	% INCIDENTS DETECTES	% SURFACES DANGEREUSES	RATIO INCIDENT / SURFACE	NOM CARTES	% INCIDENTS DETECTES	% SURFACES DANGEREUSES	RATIO INCIDENT / SURFACE
A3	89,4	17,2	5,2	A3	86,3	15,2	5,7	A3	83,4	14	6
T5A3	90,2	17,5	5,1	T5A3	86,6	15,3	5,7	T5A3	83,4	14	6
T4A3	90,7	18,6	4,9	T4A3	87,8	16,5	5,3	T4A3	85	15,2	5,6
T3A4	80,4	18,7	4,3	T3A4	76	17	4,5	T3A4	71,4	15,7	4,5
T3A5	73,8	18	4,1	T3A5	69,1	16,2	4,3	T3A5	64	14,7	4,4

Lorsque l'on se concentre sur les enjeux, soit 35 % du territoire on remarque que le ratio est sensiblement affecté par la diminution de la zone d'étude. Effectivement, on observe des améliorations de l'ordre de 2 à 5 points sur les surfaces à aléas fort mais une augmentation du nombre d'incidents détectés passant d'environ 70 % à près de 90%, soit près de 20 points de mieux qu'avec IRIP classique.

Le choix de la meilleure combinaison est subjectif, mais il semble que l'accumulation supérieure ou égale à 3 et le transfert supérieur ou égale à 3 soient les cartes les plus pertinentes à combiner avec les infos de vulnérabilité sur le bassin versant de l'Austreberthe. Ces améliorations IRIP mettent donc en évidence 90% des incidents recensés sur moins de 18% du territoire de l'Austreberthe. Une étude plus approfondie sur les incidents non détectés, leurs configurations, et leurs causes serait pertinente. En effet, ces incidents non détectés peuvent être la résultante de singularité locales ou temporelles et donc ne pouvant pas être introduit par IRIP dans son diagnostic de territoire.

## ***2- Réalisation d'une carte pedo-climatique du territoire français à la maille de 25 mètres en vue de l'intégration de celle-ci dans le logiciel IRIP.***

**S. BONNET-CARRIER, 2017**

---

### ***Introduction***

Les données sols occupent une place prépondérante dans la logique de la méthode IRIP puisque 3 des 5 facteurs caractérisant la sensibilité à la production du ruissellement sont liés aux caractéristiques pédologiques (Bonnet-CARRIER, Poulard, et Breil 2013; Dehotin et Breil 2011). En effet, l'épaisseur, la perméabilité et l'érodibilité sont les facteurs de base implémentés dans la méthode IRIP pour la réalisation du diagnostic de territoire.

### ***Données sol disponibles à l'échelle nationale***

Il existe peu de données sols homogènes à l'échelle du territoire français. En effet, beaucoup d'études pédologiques et géologiques se concentrent sur des spécificités locales à régionales. Mais aucune ne fait consensus en terme méthodologique concernant la création d'une banque de données sol uniforme. C'est pourquoi l'application de ces données fines à la méthode IRIP n'est viable qu'à l'échelle de l'étude sol réalisée précédemment.

Néanmoins il existe 2 bases de données sols complètes et homogènes, en termes d'acquisition de données, à savoir :

- La Base de données sol Gis Sol créé en 2011 pour constituer et gérer un système d'information sur les sols de France (INRA, US 1106 InfoSol, Orléans 2015) et répondre aux demandes des pouvoirs publics et de la société au niveau local et national à l'échelle 1/250 000.
- Les bases de données l'ESDAC à l'échelle de l'Europe à la résolution de mailles demi-kilométriques puis jusqu'à 250 mètres. Il s'agit des banques de données LUCAS 2015 (G. Tóth, Jones, et Montanarella 2013; Ballabio, Panagos, et Monatanarella 2016; Panagos et al. 2015) pour la minéralogie et la texture, et 3D Soil Hydraulic Database (B. Tóth et al. 2017) pour les informations relatives aux qualités physico-mécaniques intrinsèques des sols.

Ces deux bases de données font évidemment références en termes de qualitatif. En revanche, suite à un diagnostic de territoire via IRIP, on remarque souvent que la donnée pédologique à un impact important et bruite fortement les résultats obtenus. En effet, sur certains territoires, l'absence d'une discrimination précise vis à vis du type de sol dégrade les résultats obtenus par le logiciel (Bonnet-CARRIER, Poulard, et Breil 2013). C'est pourquoi la création d'une base de données sol plus fine, plus précise, plus discriminante, et réalisée de manière homogène à l'échelle de la France métropolitaine, est devenue un réel enjeu, voire une nécessité.

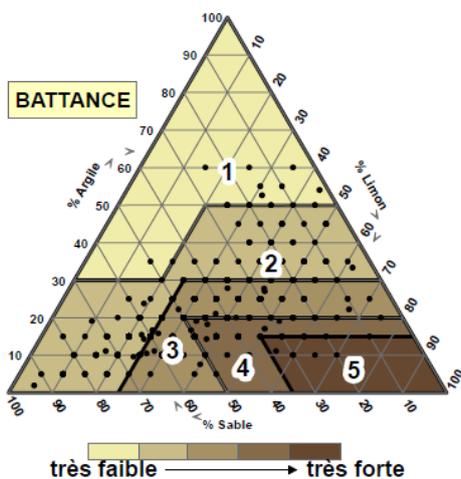
### Données utilisées

Au-delà des trois composantes pédologiques nécessaires au logiciel IRIP : épaisseur, érodibilité et perméabilité (Dehotin et Breil 2011). D'autres caractéristiques pédo-géologiques ont été intégrés afin d'avoir une base de données sol la plus complète possible mais aussi pour permettre à l'utilisateur de choisir les informations pédo-géologiques à intégrer dans IRIP (en fonction de la connaissance de son territoire). Ainsi l'ensemble des composantes utilisées sont détaillées ci-dessous :

- La battance :

La battance est une dégradation liée à l'instabilité structurale des sols en surface qui entraîne une diminution importante de l'infiltrabilité et de la rugosité des sols. Elle engendre une érosion diffuse lors du ruissellement puis, en cas de concentration de flux, la formation de ravines (Le Bissonnais et al. 2002; Le Bissonnais 2000; Le Bissonnais et al. 1996).

Pour déterminer si un sol est battant ou non, l'utilisation de règles de pédo-transferts via le triangle des textures ont été mises en avant (Cerdan et al. 2006; Souchère et al. 2007). En effet, comme montre la figure ci-dessous, la composition du sol va déterminer son niveau de battance (de 1 à 5) avec 1 le niveau le moins battant et 5 le plus battant. Dans les légendes pour les cartes IRIP, il a été décidé arbitrairement de définir comme fort (niveau 1) les battances supérieures ou égales à 4 et faibles (niveau 0) pour les battances inférieures ou égales à 3.

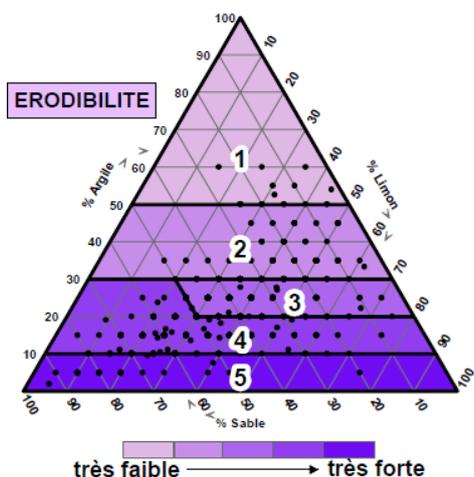


La composition des sols est issue des cartes de l'ESDAC et en particulier de la version 2 de la base LUCAS (2015). Ainsi le pourcentage d'argile, de limons et de sable est obtenu à l'échelle européenne à la maille de 500 mètres. Il est donc possible de réaliser une légende IRIP binaire à l'échelle du territoire français de façon homogène. Le résultat final est donc un raster binaire de la battance des sols de résolution 500 mètres à l'échelle du territoire français.

- L'érodibilité :

L'érodibilité correspond à la stabilité et à la cohésion d'un sol, c'est-à-dire à leur résistance au cisaillement et à leur plus ou moins grande facilité à être mobilisés par le ruissellement (Panagos et al. 2017).

Tout comme pour la battance, l'érodibilité est fonction de la composition des sols. Ainsi, un schéma similaire à la battance a été pris en compte et donc la détermination d'un sol érodible ou non sera fonction du triangle textural ci-dessous (Cerdan et al. 2006).



La teneur en argile / sable / limon va déterminer le niveau d'érodibilité d'un sol (de 1 à 5) avec 1 le niveau le moins érodible et 5 le plus érodible. Dans les légendes pour les cartes IRIP, il a été décidé arbitrairement de définir (comme pour la battance) comme fort (niveau 1) les niveaux d'érodibilité supérieurs ou égaux à 4 et faibles (niveau 0) pour les niveaux d'érodibilité inférieurs ou égaux à 3.

La composition des sols est issue des cartes de l'ESDAC et en particulier de la version 2 de la base LUCAS (2015). Ainsi le pourcentage d'argile, de limons et de sable est obtenu à l'échelle européenne à la maille de 500 mètres. Il est donc possible de réaliser une légende IRIP binaire à l'échelle du territoire français de façon homogène. Le résultat final est donc un raster binaire de l'érodibilité des sols de résolution 500 mètres à l'échelle du territoire français.

- L'épaisseur des sols :

L'épaisseur est assimilée ici à la capacité de stockage du sol en eau. Un sol peu épais aura tendance à saturer plus rapidement. Cette notion de capacité de stockage se rapproche de la définition de la réserve utile (Ballabio, Panagos, et Monatanarella 2016; Panagos et al. 2017, 2015). En effet, la réserve utile correspond au volume d'eau que le sol est susceptible d'absorber et mobilisable par les végétaux.

Au sein de la base de l'ESDAC, la réserve disponible ou utile « AWC » (B. Tóth et al. 2017) est définie à l'échelle européenne à travers une zonation des propriétés hydrauliques des sols (3D Soil Hydraulic Database (2017)) à une résolution de 250 mètres. Pour la détermination des niveaux forts IRIP, les valeurs de réserve utile ont été classifiées en 5 quantiles à l'échelle de la France. Les 2 quantiles ayant les valeurs de réserve utile les plus faibles ont arbitrairement été définis comme des niveaux forts IRIP (1). Inversement, les 3 quantiles restants, possédant donc des réserves utiles plus grandes, ont été définis comme des niveaux faibles (0) pour IRIP.

- Les zones ruisselantes :

Les zones ruisselantes correspondent aux zones où la pluie (de durée et de période de retour connu) va dépasser la capacité de stockage. Ces données de zones ruisselantes sont donc issues de la combinaison de deux facteurs : L'infiltration et la pluie. Il va donc pouvoir être possible d'avoir plusieurs cartes de zones ruisselantes, chacune correspondant à une durée et une période de retour différente.

L'infiltration est une donnée issue du BRGM déterminée selon les propriétés physiques du sol à dire d'expert de façon mensuelle à annuelle (identique au modèle STREAM (Souchère et al. 2007;

Dubreuil et al. 2002; Bywater-Reyes, Segura, et Bladon 2017)). Cette donnée va dépendre des couches d'occupation des sols et plus particulièrement d'un croisement entre le Registre Parcellaire Graphique, le Recensement Général Agricole (distinction culture hiver / printemps) et Corine Land Cover (Landemaine 2016). La couche d'infiltration est donc valable pour une année et une saison donnée (ici l'hiver en 2014) et son unité est en millimètre par heure. Pour chaque mois de l'année, il est donc possible d'avoir une couche infiltration sur l'ensemble du territoire français à la maille de 25 mètres en mm/h.

Outre la donnée sol ci-dessus, la composante pluie est additionnée pour réaliser la carte des zones ruisselantes du territoire français. Ces données pluies sont issues des données pluies PANTHERE de Météo-France. Ces données radars sont disponibles à la maille kilométrique sur la période 2006-2016 avec un pas de temps de 5 minutes. Durant cette période, des quantiles de pluies ont été calculés et extrapolés (pour les périodes de retours supérieures à 10 ans) pour obtenir quatre cartes à l'échelle France entière à la maille kilométrique :

- (P15' 10ans) : Pluie de durée 15 minutes ; période de retour = 10 ans,
- (P15' 30ans) : Pluie de durée 15 minutes ; période de retour = 30 ans,
- (P60' 10ans) : Pluie de durée 60 minutes ; période de retour = 10 ans,
- (P60' 30ans) : Pluie de durée 60 minutes ; période de retour = 30 ans.

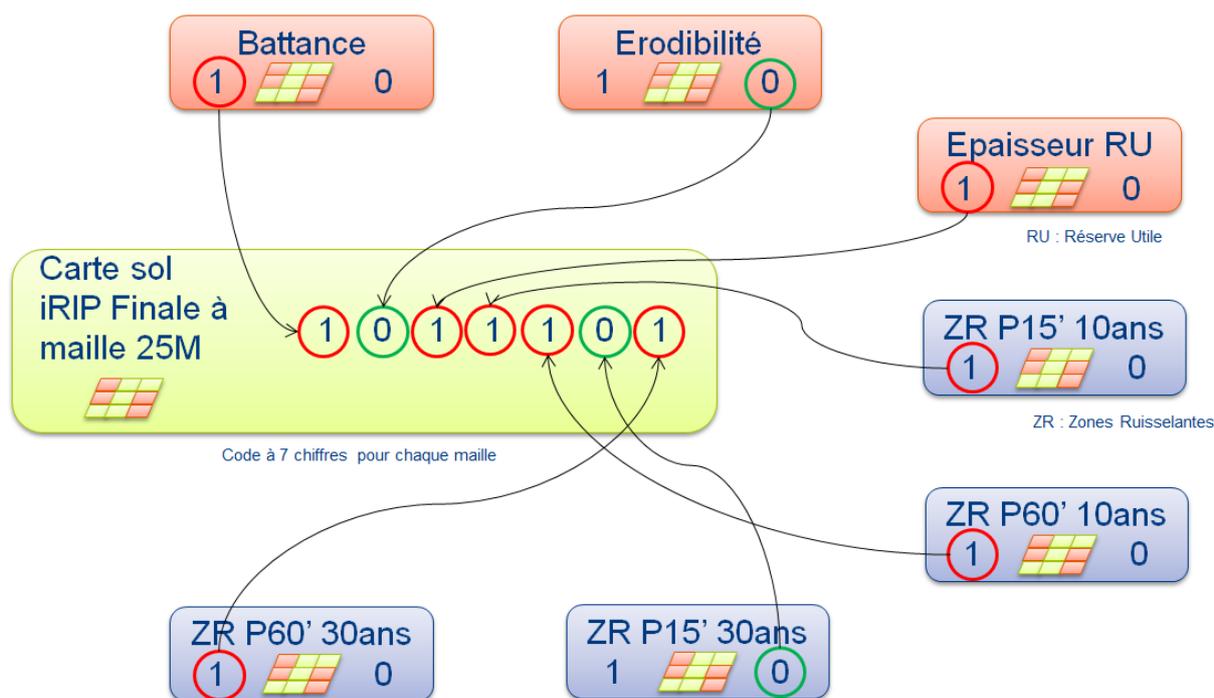
Au droit de chaque maille, il convient alors de regarder, si la capacité d'infiltration est supérieure à la quantité d'eau tombée pour une durée et une période de retour donnée. Si la capacité d'infiltration est supérieure à la valeur de la maille d'une pluie donnée alors la maille (le pixel de la carte sol IRIP) prendra la valeur 0 sur la carte sol finale dans les fichiers légendes IRIP. En effet, l'eau va s'infiltrer entièrement et ne favorisera pas l'aléa ruissellement. A l'inverse, si la capacité d'infiltration est inférieure ou égale à la valeur de la maille d'une pluie donnée alors la maille (le pixel de la carte sol IRIP) prendra la valeur 1 dans les fichiers légendes IRIP puisque l'eau va saturer le sol et ruisseler. La combinaison de ces cartes pluies et de la capacité d'infiltration est réalisée sous SIG de façon à avoir les cartes finales telles que :

- $ZR (P15' 10ans) = (Infiltration - 4*(P15' 10ans)) > 0 \rightarrow$  Valeur carte sol IRIP = 0
- $ZR (P15' 10ans) = (Infiltration - 4*(P15' 10ans)) \leq 0 \rightarrow$  Valeur carte sol IRIP = 1
  
- $ZR (P60' 10ans) = (Infiltration - (P60' 10ans)) > 0 \rightarrow$  Valeur carte sol IRIP = 0
- $ZR (P60' 10ans) = (Infiltration - (P60' 10ans)) \leq 0 \rightarrow$  Valeur carte sol IRIP = 1
  
- $ZR (P15' 30ans) = (Infiltration - 4*(P15' 30ans)) > 0 \rightarrow$  Valeur carte sol IRIP = 0
- $ZR (P15' 30ans) = (Infiltration - 4*(P15' 30ans)) \leq 0 \rightarrow$  Valeur carte sol IRIP = 1
  
- $ZR (P60' 30ans) = (Infiltration - (P60' 30ans)) > 0 \rightarrow$  Valeur carte sol IRIP = 0
- $ZR (P60' 30ans) = (Infiltration - (P60' 30ans)) \leq 0 \rightarrow$  Valeur carte sol IRIP = 1

Le résultat final sera donc 4 cartes des zones ruisselantes binaires (0 ; 1) à la maille de 25 mètre pour l'ensemble du territoire français.

### Création de la carte pédo-climatique IRIP France métropolitaine

Au-delà de l'objectif qualitatif de la nouvelle base de données pédo-géologiques pour IRIP, un second objectif de modularité de cette base a été mis en avant. En effet, la logique de création de cette nouvelle base sol est de permettre la réalisation de mises à jour (avec des données plus fines, plus précises, etc...) et l'ajout de cartes intermédiaires complémentaires. En effet, afin d'être viable dans le temps, cette base de donnée se doit d'être codifiée de façon simple et claire afin que les futurs utilisateurs puissent rajouter leurs données (BD\_LUCAS 2018, Pluie T=20, 50ans, etc...). C'est pourquoi Les cartes intermédiaires décrites ci-dessus sont compilées de la façon suivante :



Les 7 cartes intermédiaires binaires (Battance, Erodibilité, Réserve utile, et les 4 cartes de zones ruisselantes) vont attribuer un code à 7 chiffres correspondant à la compilation de ces cartes comme montré sur la figure ci-dessus. L'ordre du codage doit être respecté car ce codage va permettre la réalisation des fichiers textes légendes IRIP.

Lors de l'ajout des données pédologiques dans le logiciel IRIP, l'utilisateur devra donc charger la « carte sol IRIP » et va pouvoir choisir à travers les fichiers légendes IRIP existant ce qu'il souhaite utiliser comme données d'entrée pour la carte de production du ruissellement. Par exemple, Si ça connaissance terrain le pousse à observer des sols très battant, épais et pour un évènement intense horaire trentennal, alors il pourra charger les légendes IRIP Battance, Epaisseur RU, et ZR P60'30ans.

Pour mettre à jour cette base sol, il suffira donc de rajouter la carte intermédiaire binaire voulue sur SIG, de façon à ce que :  $(\text{Carte\_IRIP\_solMAJ}) = (\text{Carte\_IRIP\_sol}) * 10 + (\text{Nouvelle\_Carte\_intermédiaire})$ . L'utilisateur se devra aussi de mettre à jour les fichiers textes légendes IRIP et créer sa propre légende binaire IRIP (0 ; 1) pour la carte qu'il a souhaité ajouter.

**Exemple d'application : le cas de l'évènement intense sur la commune de Costaros (Haute-Loire)**

Le 13 juin 2017 en fin d'après-midi, le plateau du Devès (Haute-Loire) et spécialement les bourgs de Costaros, Landos, Le Brignon, « Ussel » et Goudet se sont retrouvés noyés sous les eaux d'un orage d'une rare intensité. Pendant deux heures, l'orage et la grêle ont stagné, il est tombé près de 200 mm d'eau et comme partout, les dégâts sur la voirie, les infrastructures et les habitations sont nombreux (cf. Photos ci-dessous). Les témoins de ces évènements font état de coulées boueuses et de la vitesse d'apparition du phénomène.



Photos des dégâts causés par l'épisode intense du 13 juin 2017 sur les communes de Goudet (à gauche) et de Costaros (milieu et à droite)

Une visite terrain a donc été réalisée par IRSTEA suite à ces incidents dans l'objectif :

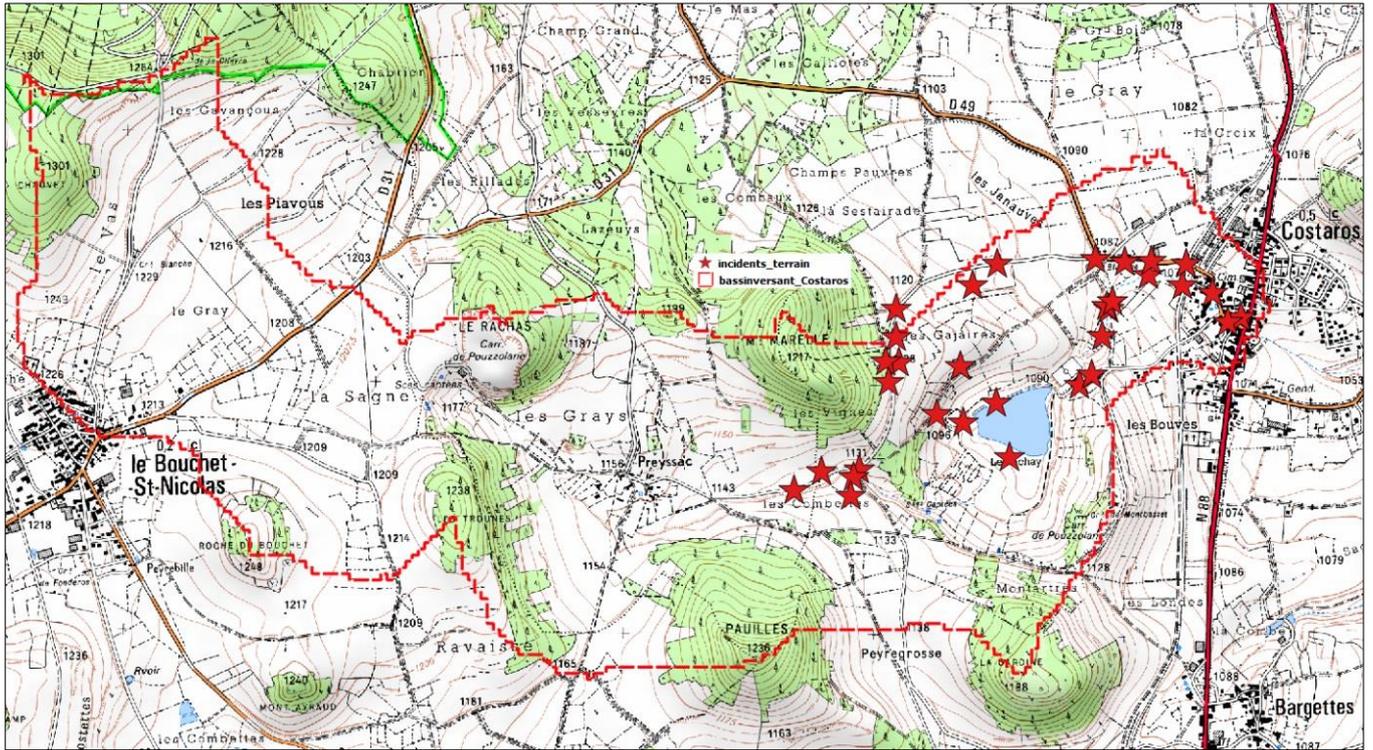
- De comprendre les mécanismes et les processus ayant causés ces désordres,
- De valider les informations que nous fournit IRIP de base sur ce territoire, sans qu'aucune modification ou amélioration ne soit effectuée sur le diagnostic de territoire par la méthode.

Les bassins versants concernés (Costaros et Goudet) sont deux petits bassins versants caractérisés par une occupation des sols principalement composé de prairies (ou sols nus) et de forêts (d'après CLC2012) comme le montre le tableau ci-dessous :

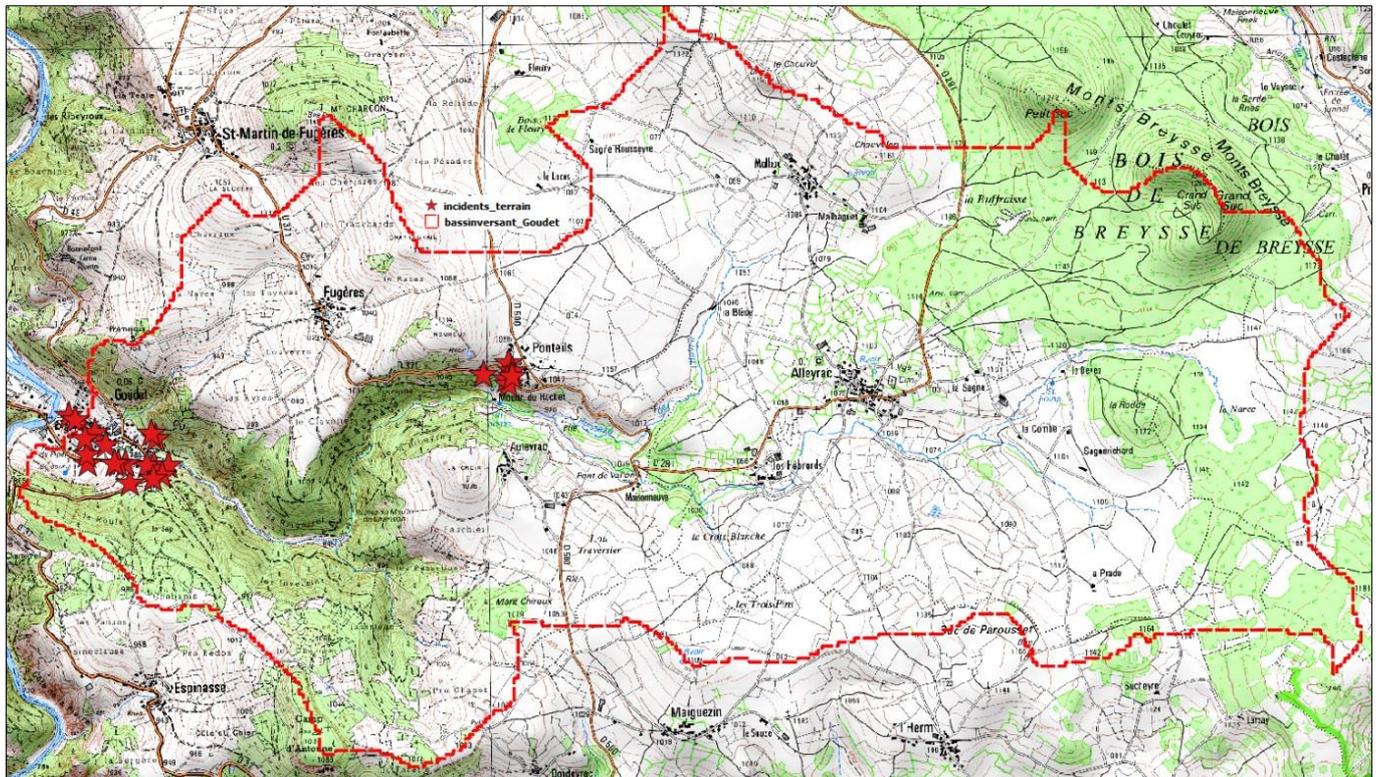
BV	SUPERFICIE (KM <sup>2</sup> )	% ZONES URBAINES	% CULTURES	% PRAIRIES	% FORETS
COSTAROS	6,9	5	36	41	18
GOUDET	24,1	3	28	38	31

Tableau récapitulatif des propriétés des bassins versants de Costaros et de Goudet (Haute-Loire – 43) d'après CLC2012

Comme le montre les cartes ci-dessous, les incidents (incisions, coulées boueuses, arrachements, laisses de crues, etc..) ont été géoréférencés de manière à constituer une base de données incidents (étoiles rouges sur la carte) afin de valider le diagnostic fourni par IRIP.



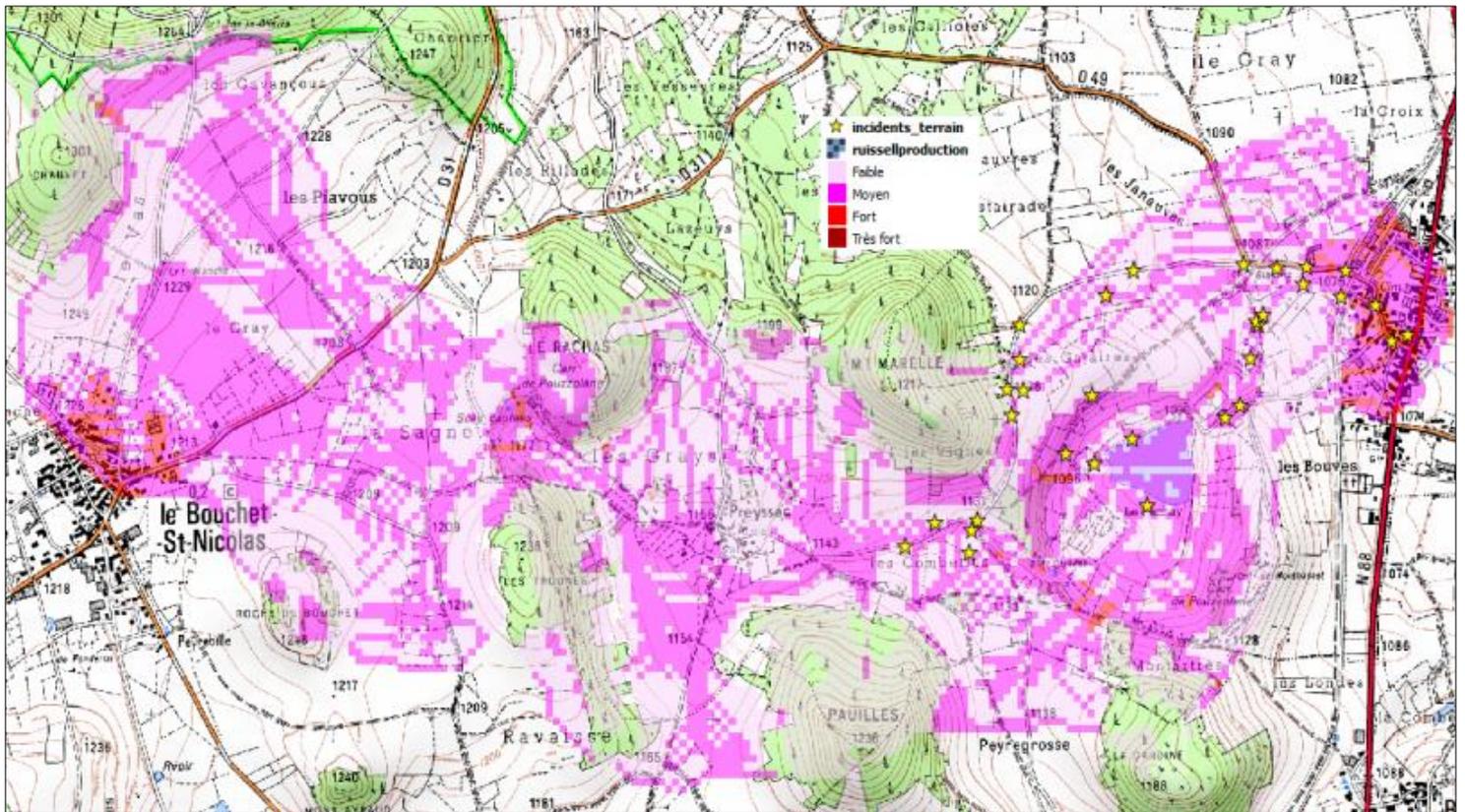
Localisation sur la carte IGN 25 000 du bassin versant dit de « Costaros » en rouge et des incidents répertoriés sur le terrain.



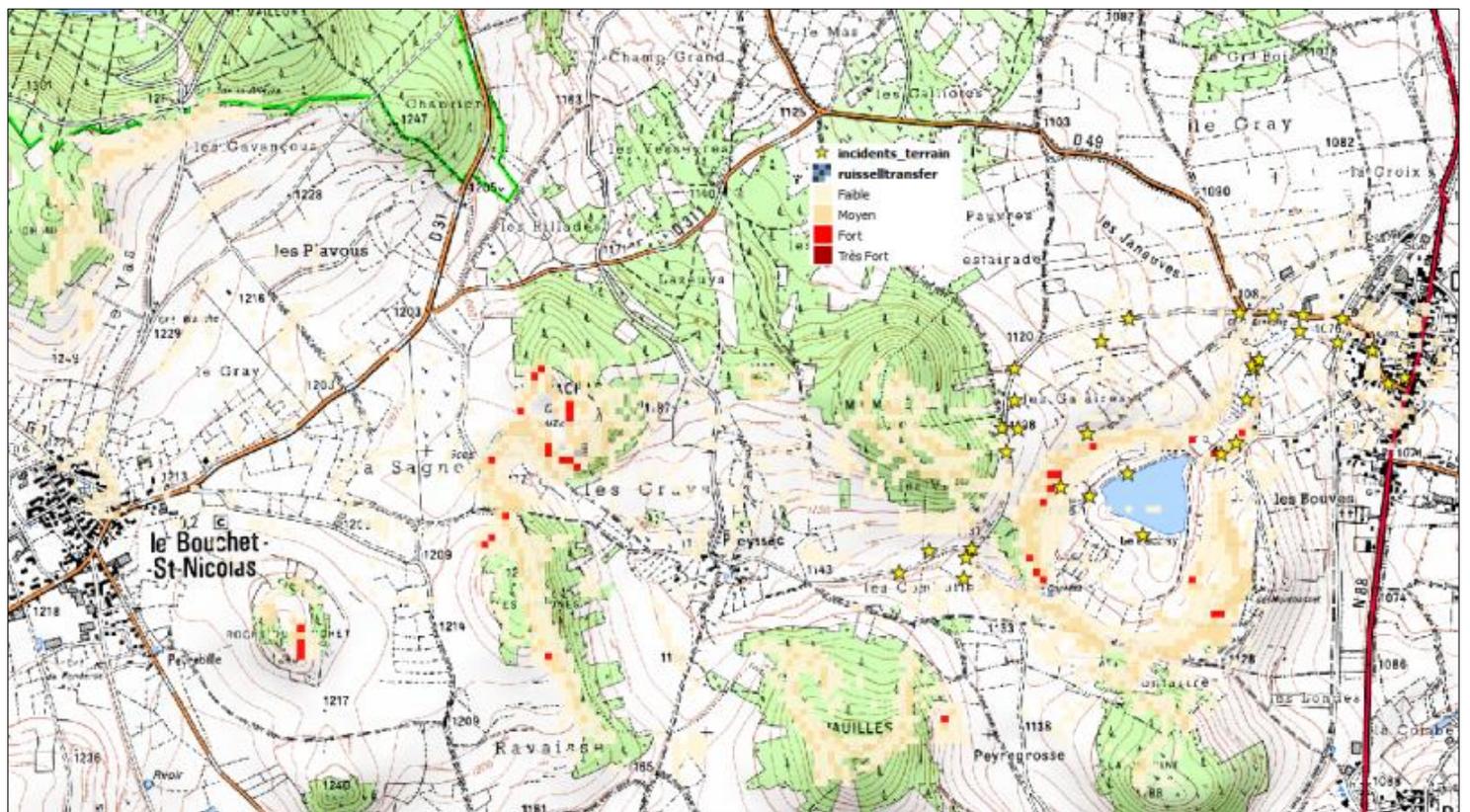
Localisation sur la carte IGN 25 000 du bassin versant dit de « Goudet » en rouge et des incidents répertoriés sur le terrain.

Les cartes ci-dessous présentent les cartes de production, transfert et d'accumulation réalisée par IRIP-base sur les communes de Costaros et de Goudet :

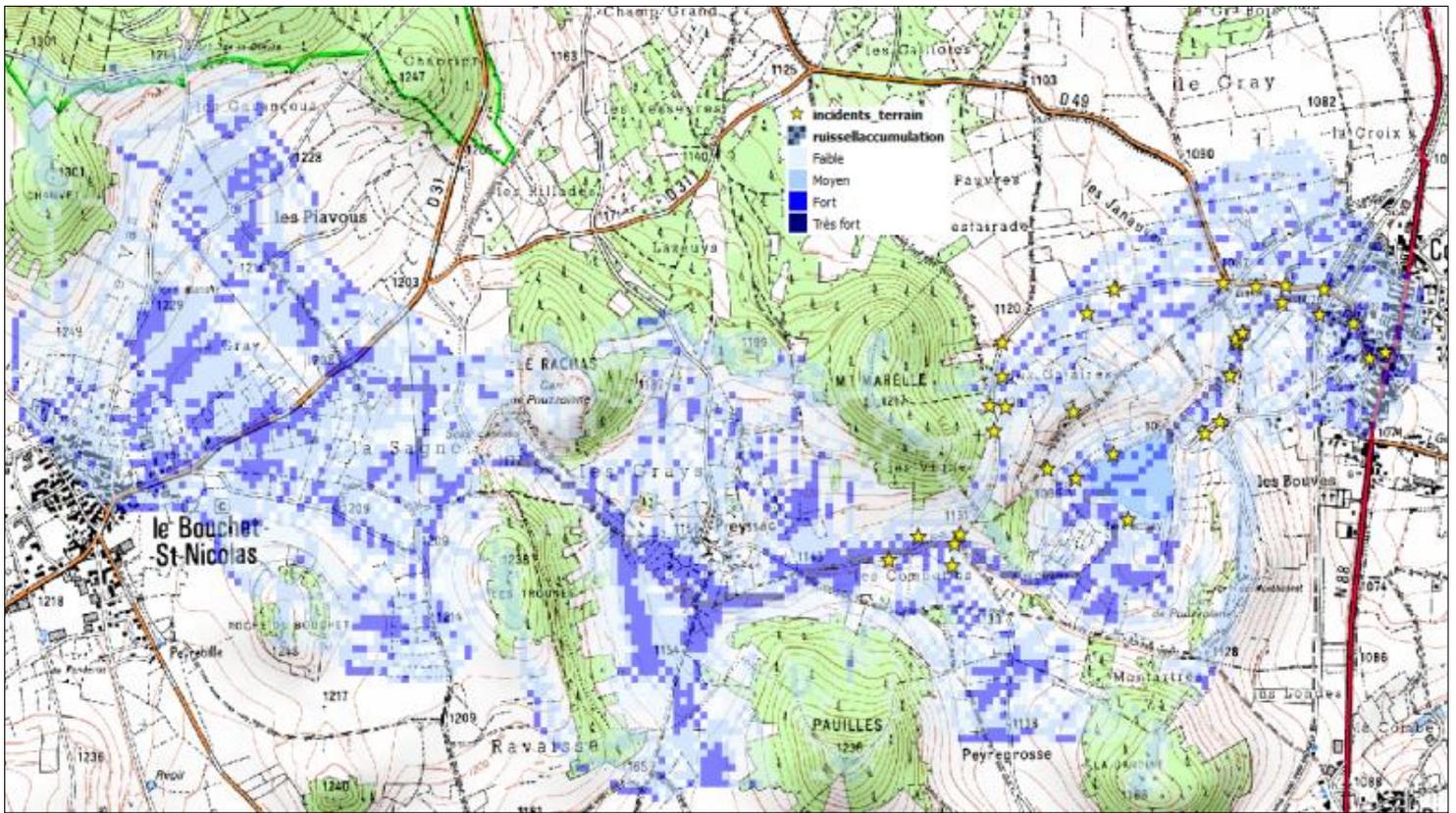
- Cartes IRIP-base sur le BV de Costaros (6,9 km<sup>2</sup>) sur fond IGN 25 0000



Carte de sensibilité à la production du ruissellement du bassin versant de Costaros d'après IRIP-base

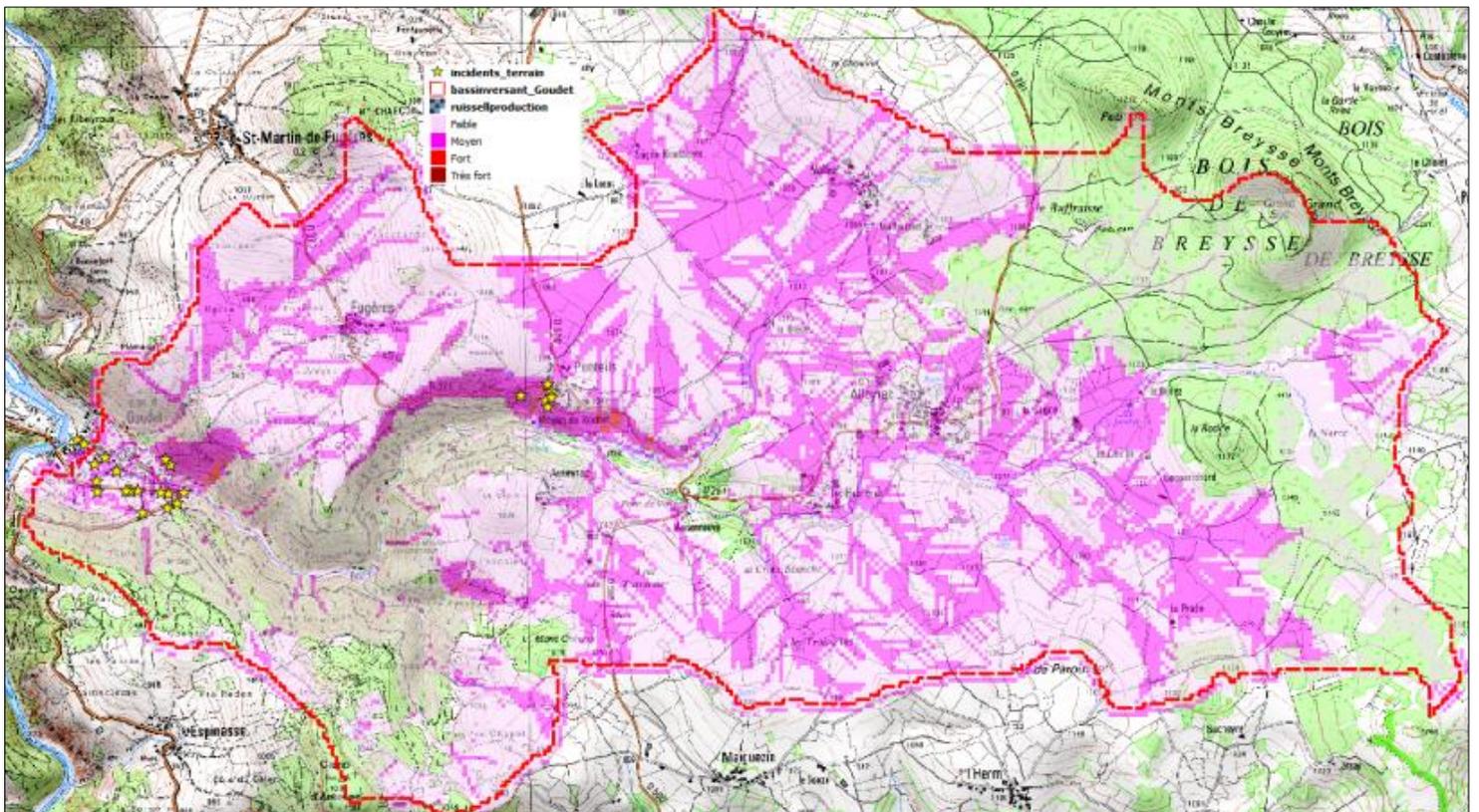


Carte de sensibilité au transfert du ruissellement du bassin versant de Costaros d'après IRIP-base

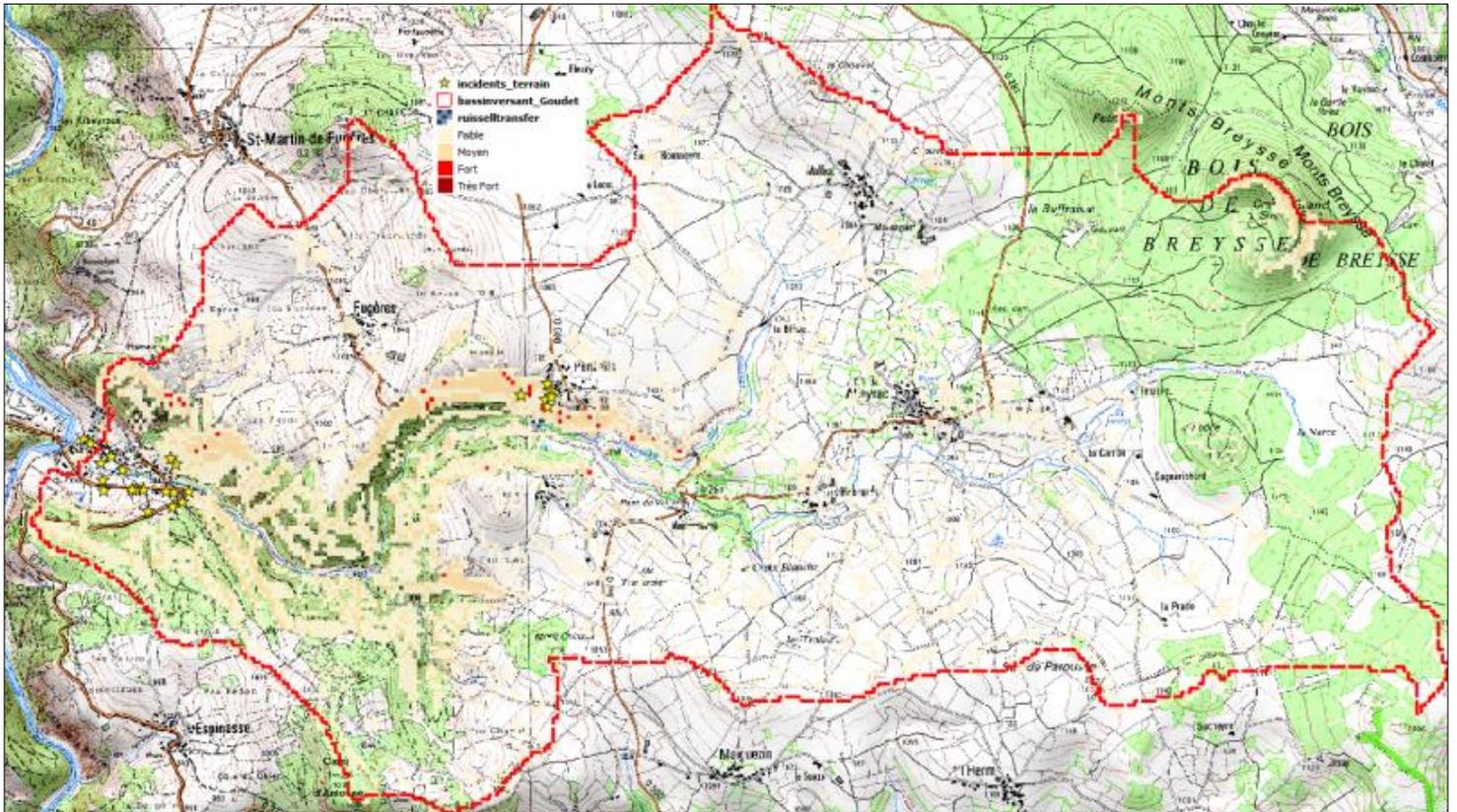


Carte de sensibilité à l'accumulation du ruissellement du bassin versant de Costaros d'après IRIP-base

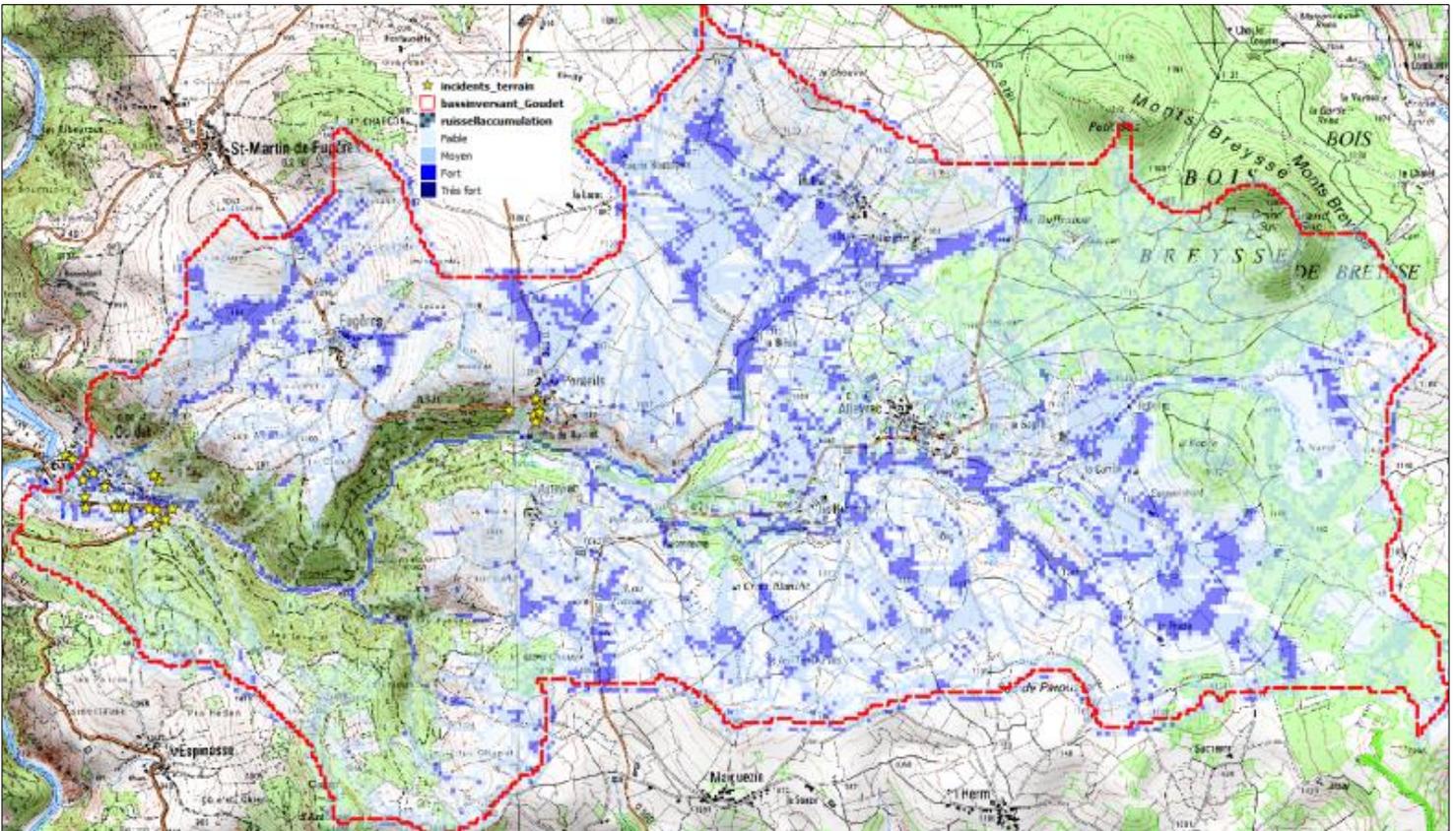
- Cartes IRIP-base sur le BV de Goudet (24,1 km<sup>2</sup>) sur fond IGN 25 000



Carte de sensibilité à la production du ruissellement du bassin versant de Goudet d'après IRIP-base



Carte de sensibilité au transfert du ruissellement du bassin versant de Goudet d'après IRIP-base



Carte de sensibilité à l'accumulation du ruissellement du bassin versant de Goudet d'après IRIP-base

Lors de la visite sur le terrain nous avons constaté divers incidents (arrachements, dépôts sédimentaires, laisses de crues....) correspondant bien aux zones définies comme susceptibles au transfert (érosion) et à l'accumulation du ruissellement. Néanmoins, beaucoup de zones décrites comme sensibles par IRIP n'ont pas eu de stigmates de ruissellement intense pluvial. En effet, nous avons observé des sols peu épais et très perméables compte tenu du peu de traces d'incisions même sur les cultures à nu. La présence de marches de plusieurs mètres marque la topographie des champs. Ces marches correspondent à l'évidence à des coulées de laves qui présentent une grande capacité d'infiltration liée à la fracturation thermique (orgues volcaniques). En l'espèce, cela explique le fait que les talwegs de tête de bassin aient répondu violemment par un phénomène de transfert rapide à la base des coulées. Cela explique aussi qu'il y ait peu de traces de ruissellement intense sur les versants alors même que la pluviométrie a été très intense (220 mm en 3 h, localement 400 mm sur images radar)

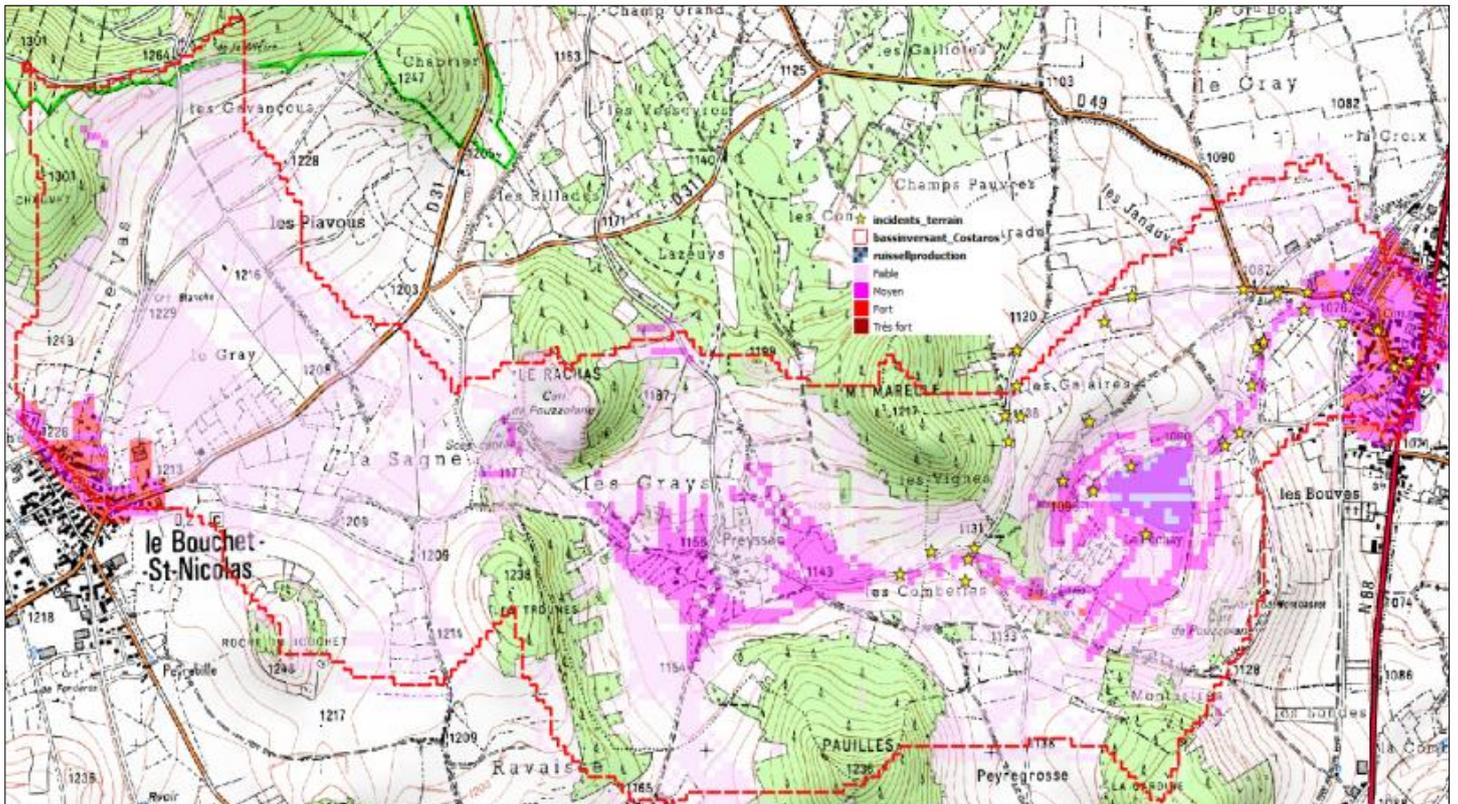
L'information sol (BD\_INRA) utilisée par IRIP est donc inadaptée dans ce cas car sur ces terrains, si les sols sont bien identifiés comme peu épais, la roche de sous couche est quant à elle très perméable. Afin de mieux représenter la réalité du phénomène sur cette zone d'étude, nous avons choisi de remplacer la base sol de l'INRA par la base géologique (BD\_CHARM) du BRGM. Les cartes IRIP obtenues (ci-dessous) sont plus proches de la réalité physique observée que les cartes IRIP réalisées avec la BD\_INRA.

Sur ces cartes on remarque bien l'importance des processus dans les talwegs ainsi que les arrachements localisés en bordures de ceux-ci. L'utilisation de la géologie comme base sol est donc, pour des territoires similaires, une nécessité permettant l'amélioration du diagnostic de territoire. Dans le cas présent la couche de sol peu épaisse est aussi très perméable (pas de limons ou d'argiles) mais si cette couche avait été peu perméable elle-aurait conditionnée le ruissellement. Il paraît donc nécessaire de combiner les deux informations que sont le sol et géologie.

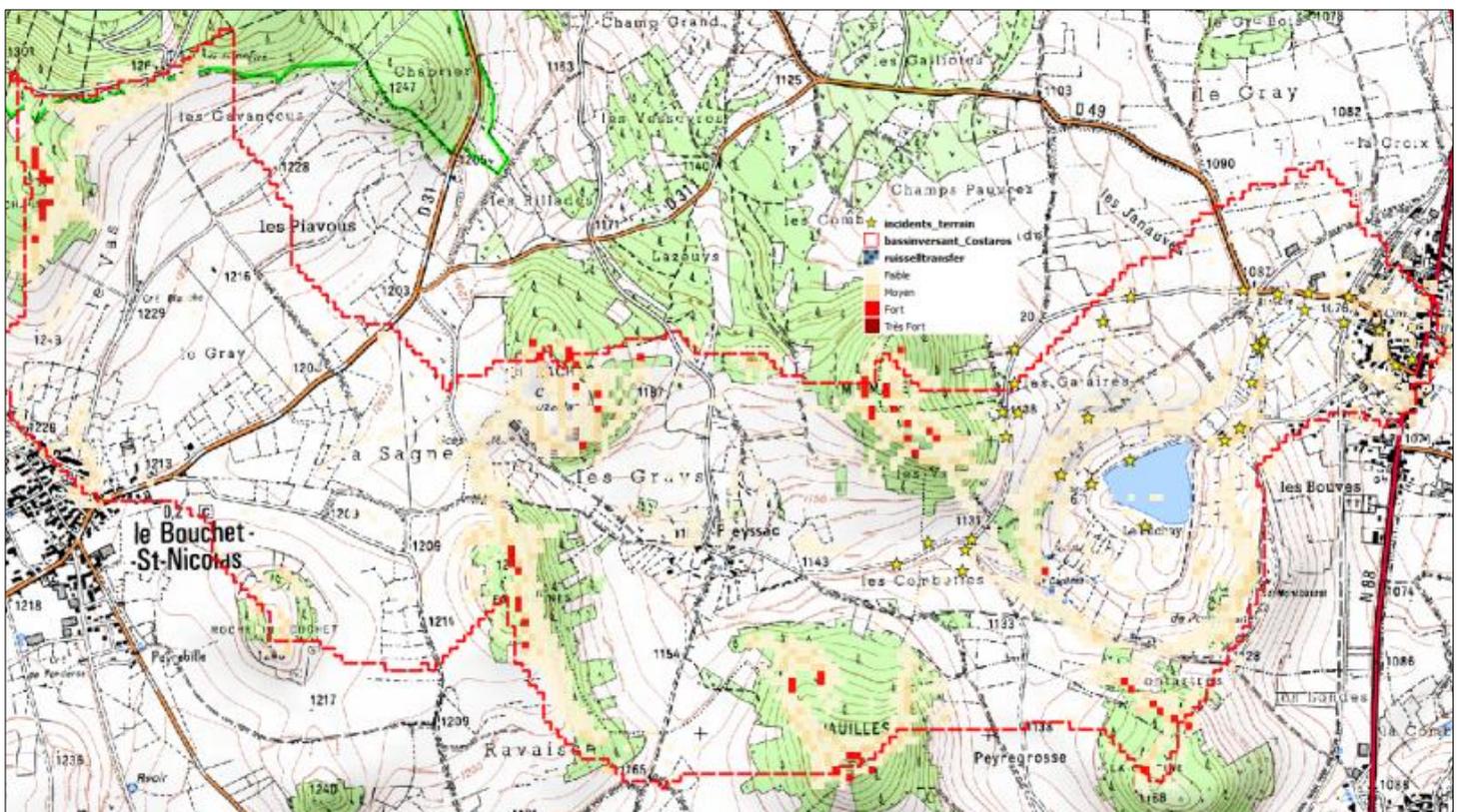
L'une des alternatives à la base de données géologique (qui n'est pas libre de droit) est l'utilisation de la carte sol IRIP décrite dans les parties précédentes. En effet, L'apport d'une érodibilité plus discriminante que la base INRA ainsi que l'incorporation de la réserve utile donne des résultats similaires à ceux obtenus par l'utilisation de la BD\_CHARM du BRGM. Ainsi, la réserve utile intégrée dans la « BD\_sol\_IRIP » va prendre en compte la fracturation du milieu et donc la forte capacité de stockage des terrains du plateau de Devès (Haute-Loire). De plus, d'après KERONNAUS et Météo-France, l'évènement intense qui a perduré pendant un peu plus d'une heure est qualifiable de trentennal. C'est pourquoi l'ajout de la donnée spatiale des zones ruisselantes, pour une pluie horaire de période de retour égale à 30 ans, est pertinent par rapport à la perméabilité de la base INRA.

L'utilisation de la « BD\_sol\_IRIP » comme base de données sol à la méthode de diagnostic de territoire IRIP, donne des résultats proches à ce que nous avons vu précédemment avec la base géologique. Effectivement, les principales zones validées sur le terrain et sur les cartes IRIP géologiques se retrouvent sur les cartes réalisées avec la « BD\_sol\_IRIP » ci-dessous. Donc les cartes obtenues avec la « BD\_sol\_IRIP » peuvent être aussi pertinentes sur des territoires où le complexe sol-roche mère peut être perméable.

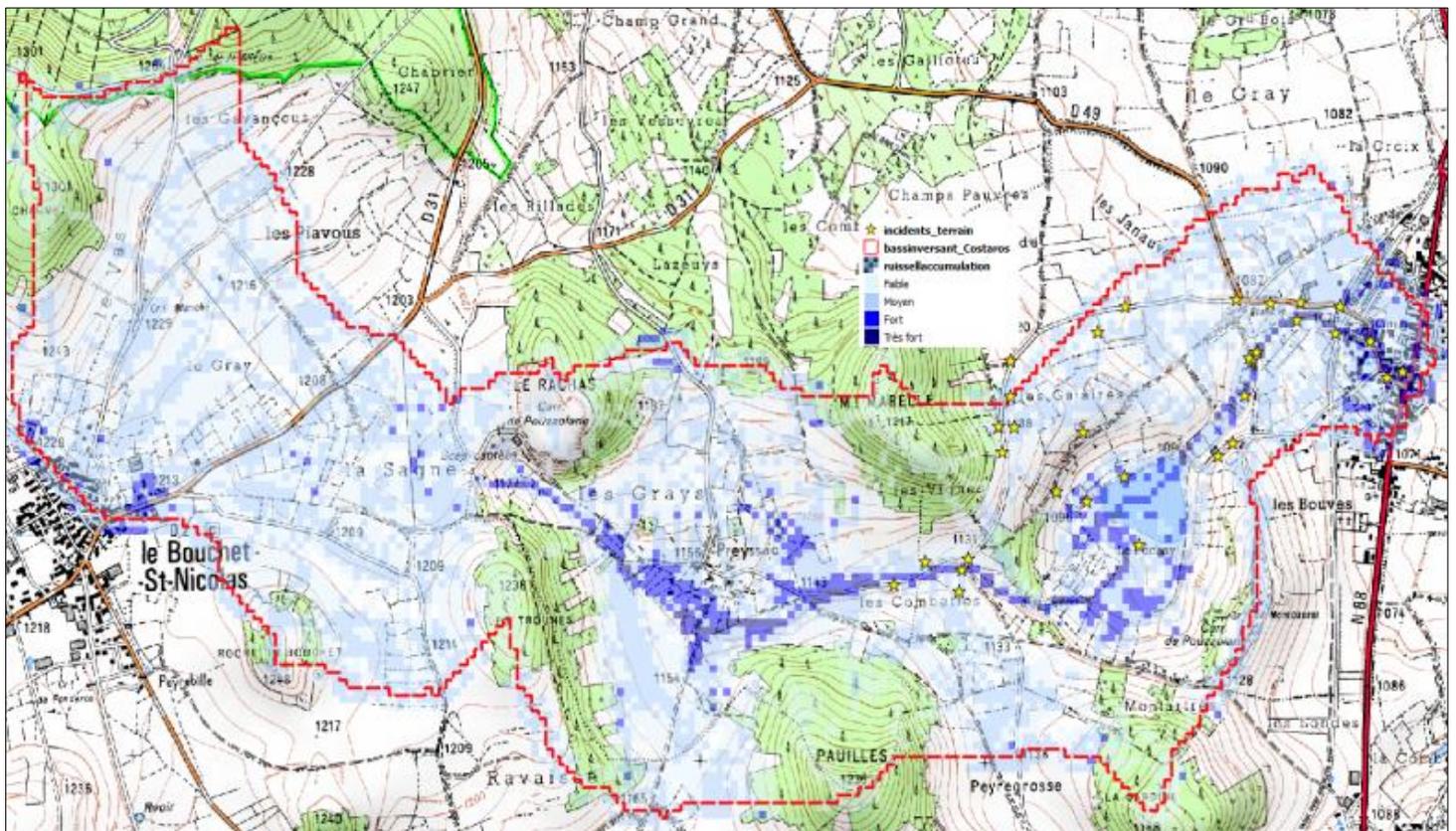
- Cartes IRIP-GEOL sur le BV de Costaros (6,9 km<sup>2</sup>) sur fond IGN 25 000



Carte de sensibilité à la production du ruissellement du bassin versant de Costaros d'après IRIP-GEOL

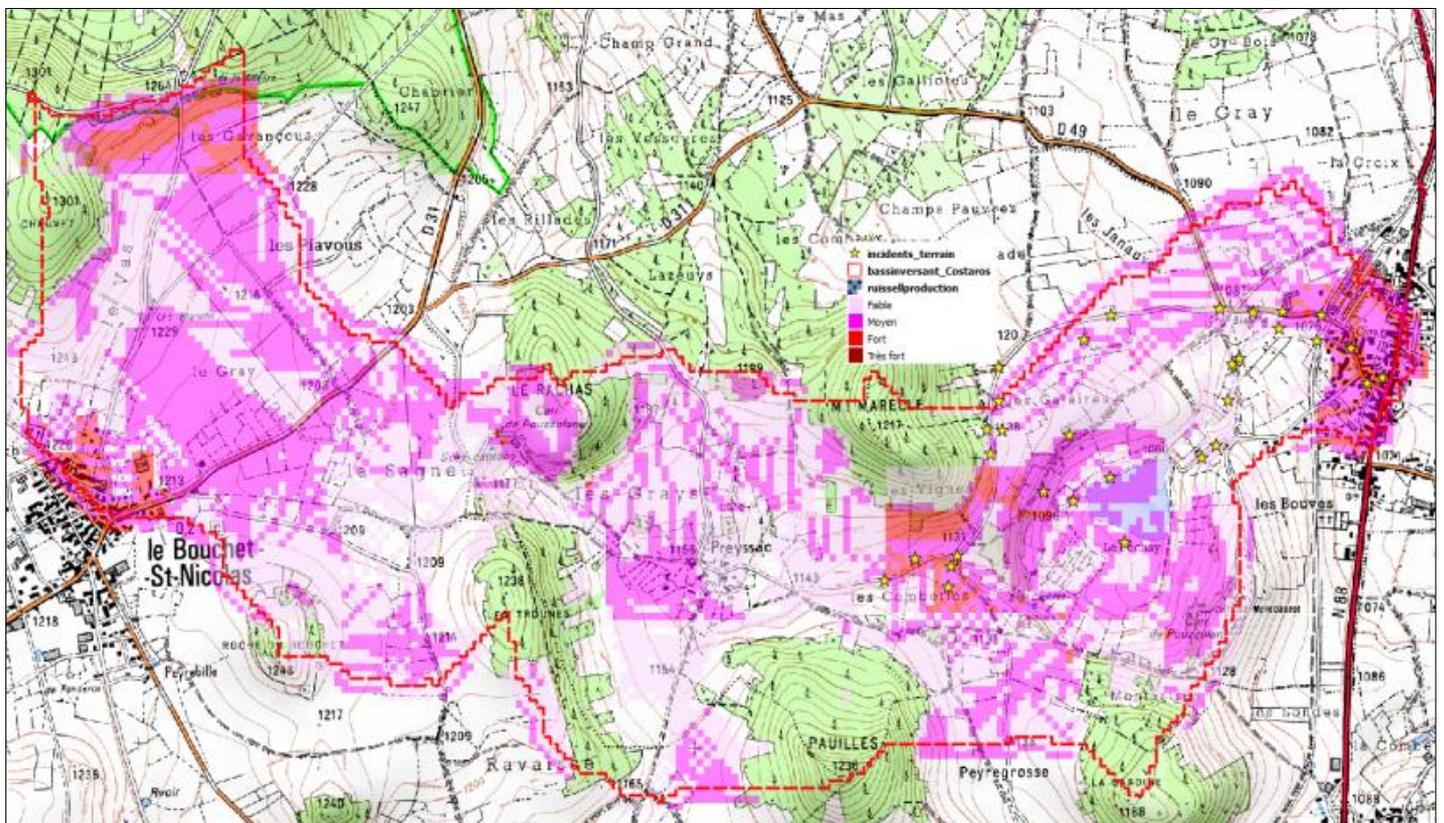


Carte de sensibilité au transfert du ruissellement du bassin versant de Costaros d'après IRIP-GEOL

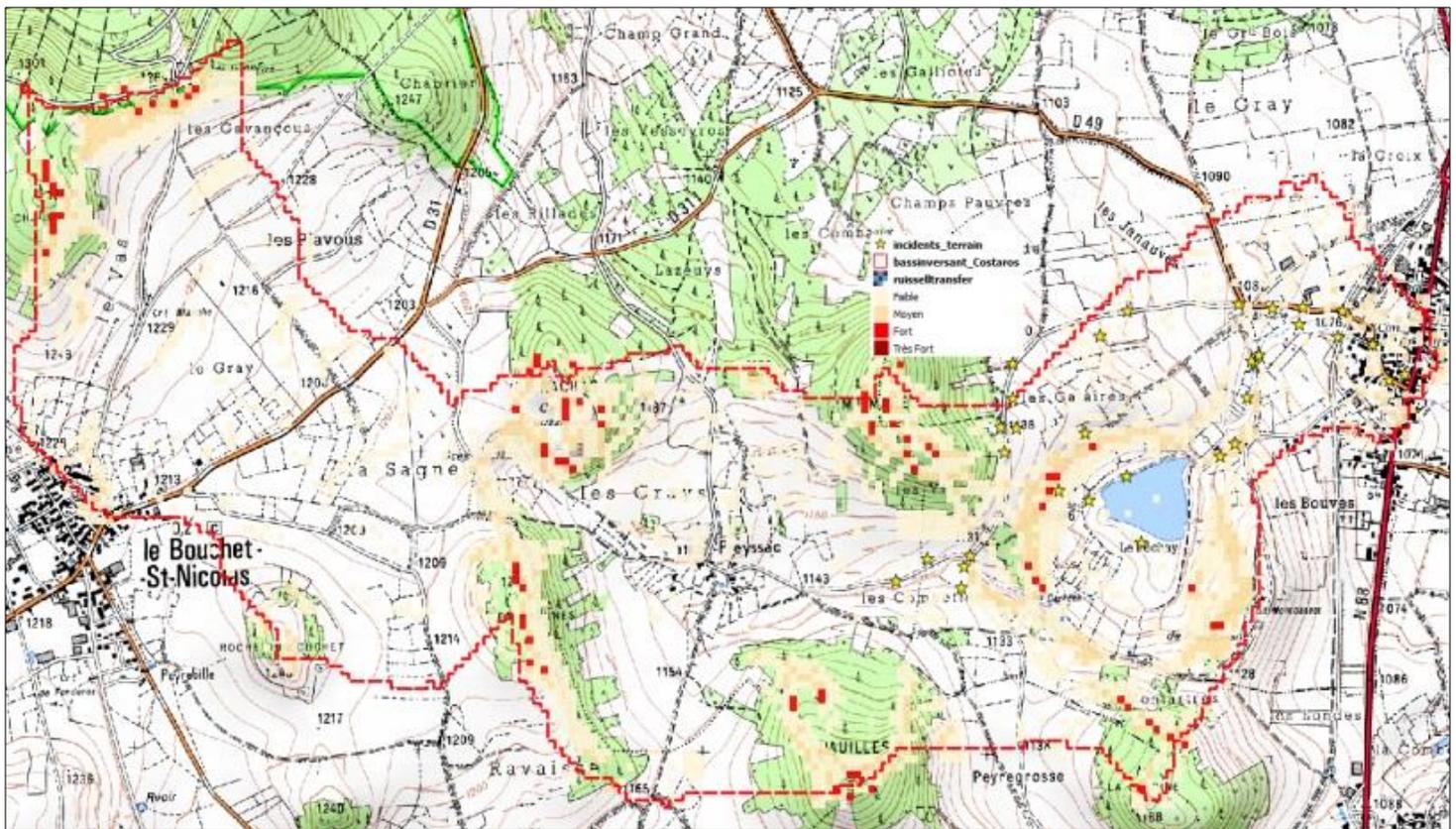


Carte de sensibilité à l'accumulation du ruissellement du bassin versant de Costaros d'après IRIP-GEOL

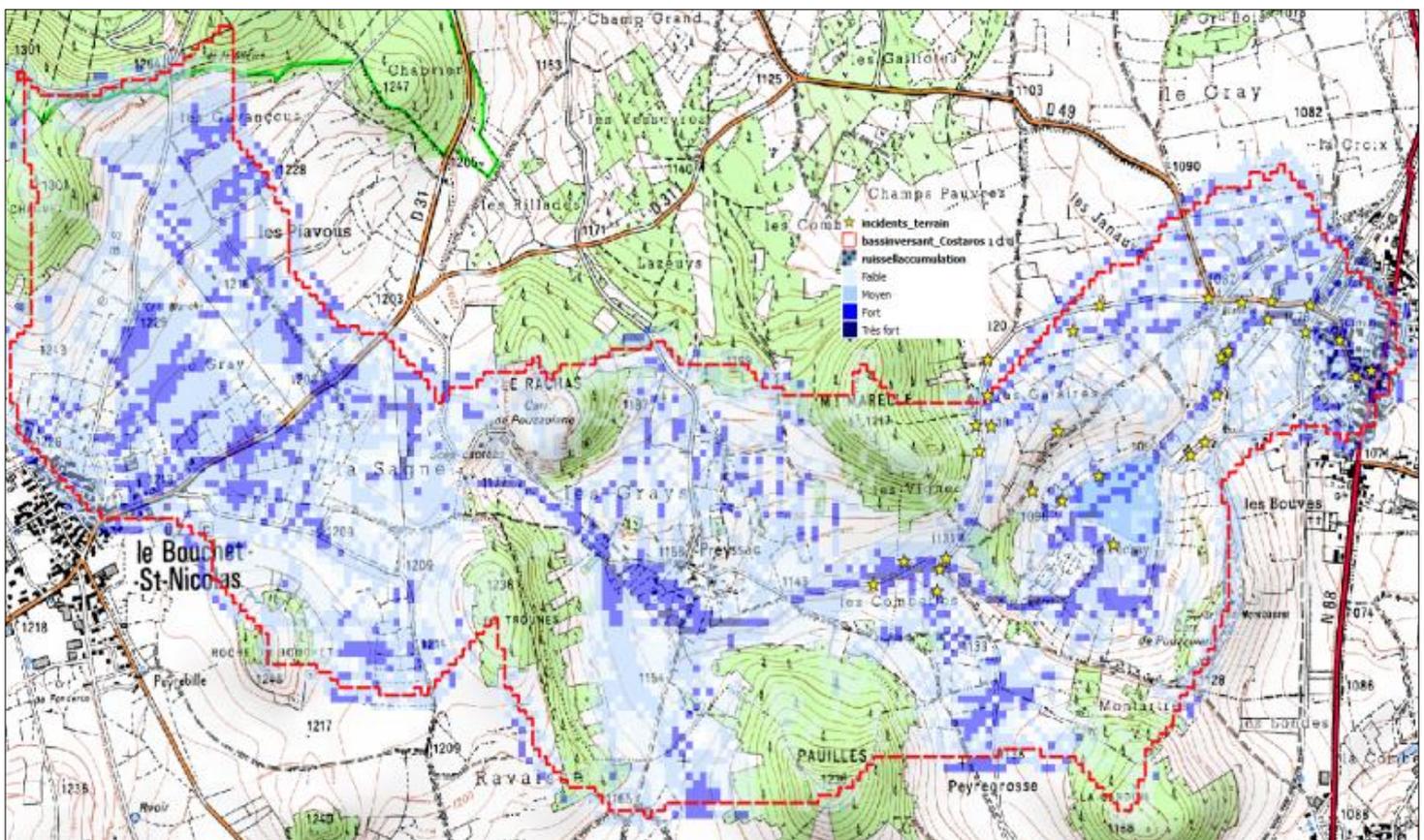
- Cartes IRIP-SOL IRIP sur le BV de Costaros (6,9 km<sup>2</sup>) sur fond IGN 25 000



Carte de sensibilité à la production du ruissellement du bassin versant de Costaros d'après IRIP-SOL\_IRIP

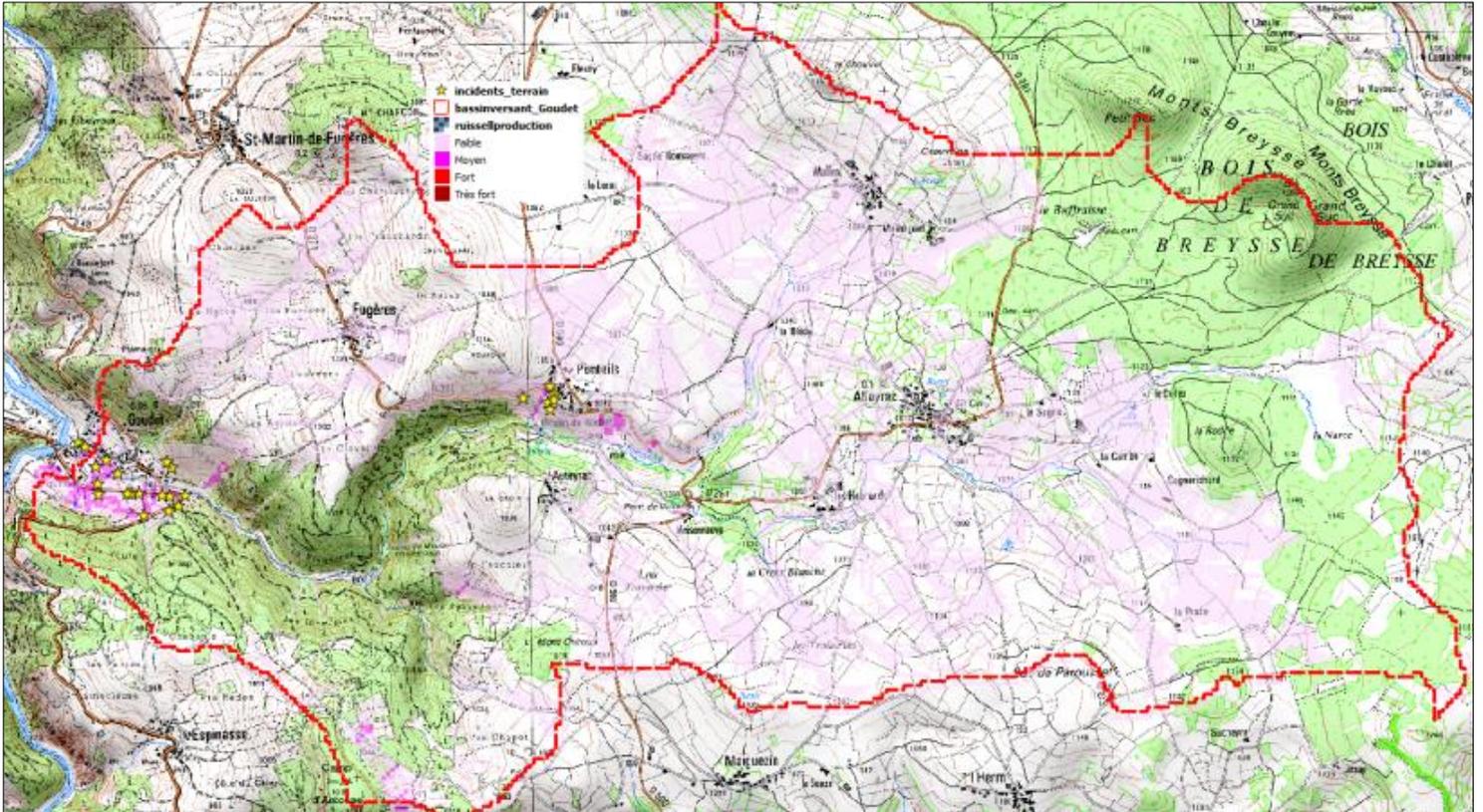


Carte de sensibilité au transfert du ruissellement du bassin versant de Costaros d'après IRIP-SOL\_IRIP

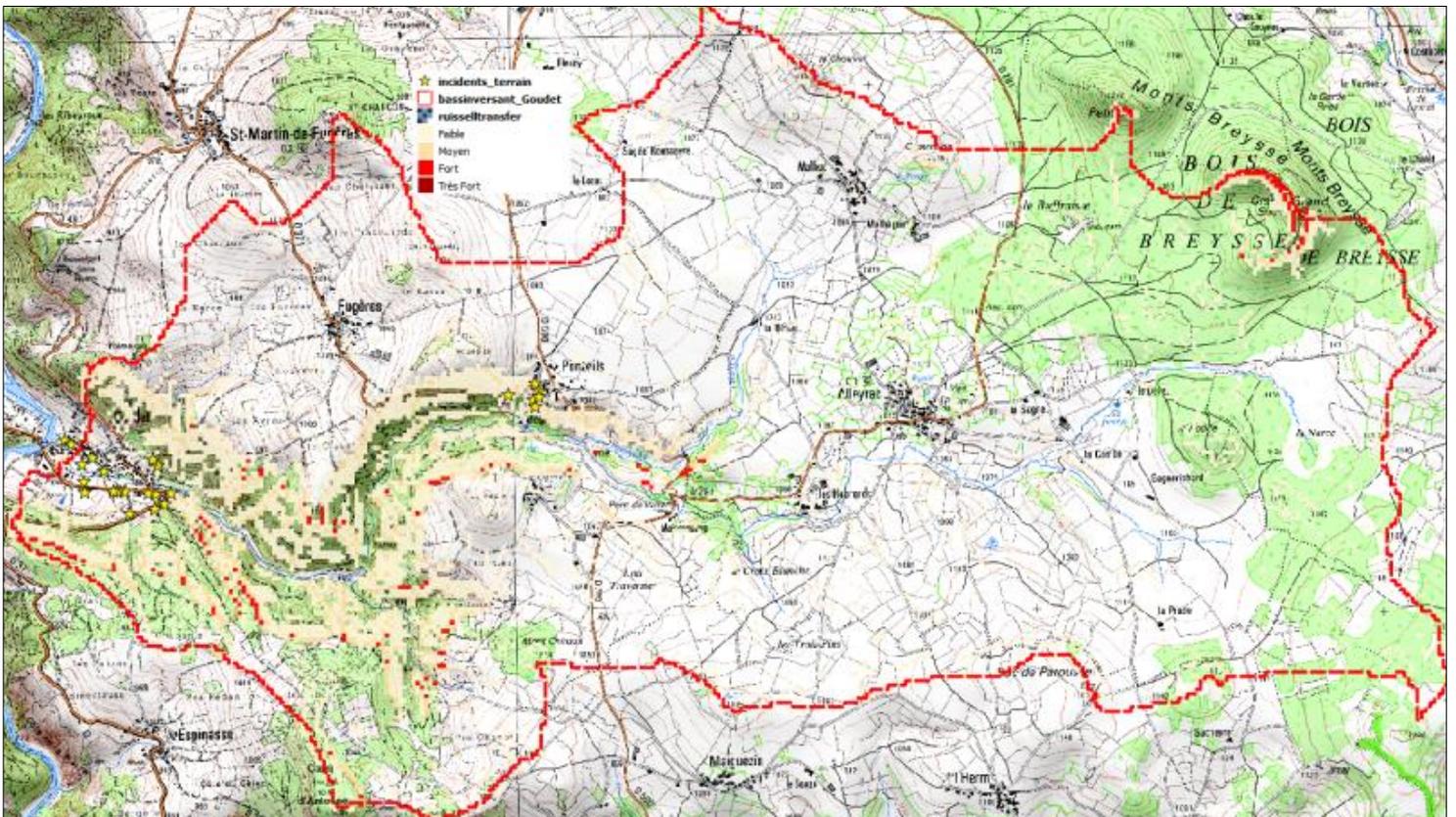


Carte de sensibilité à l'accumulation du ruissellement du bassin versant de Costaros d'après IRIP-SOL\_IRIP

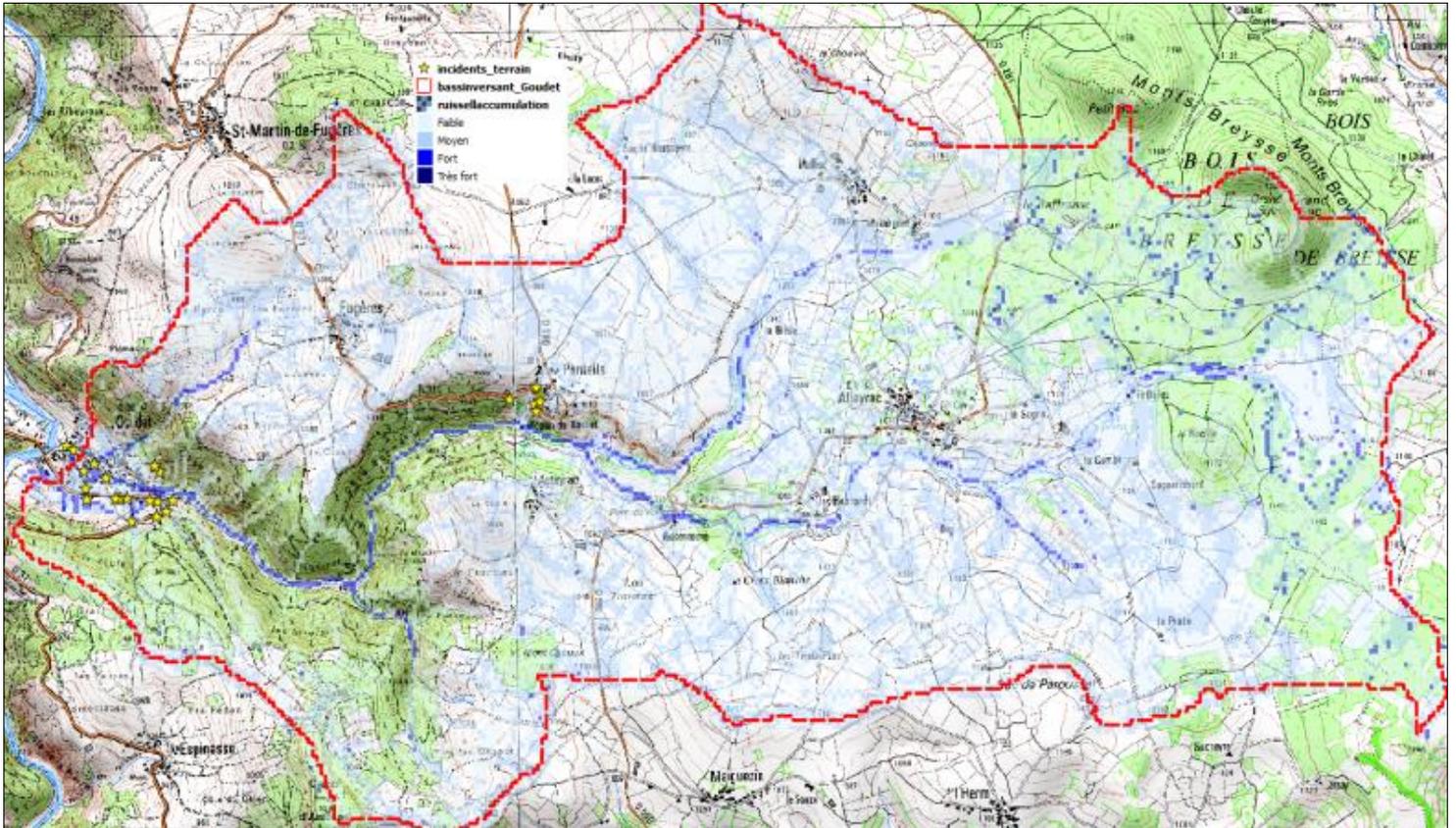
- Cartes IRIP-GEOL sur le BV de Goudet (24,1 km<sup>2</sup>) sur fond IGN 25 000



Carte de sensibilité à la production du ruissellement du bassin versant de Goudet d'après IRIP-GEOL

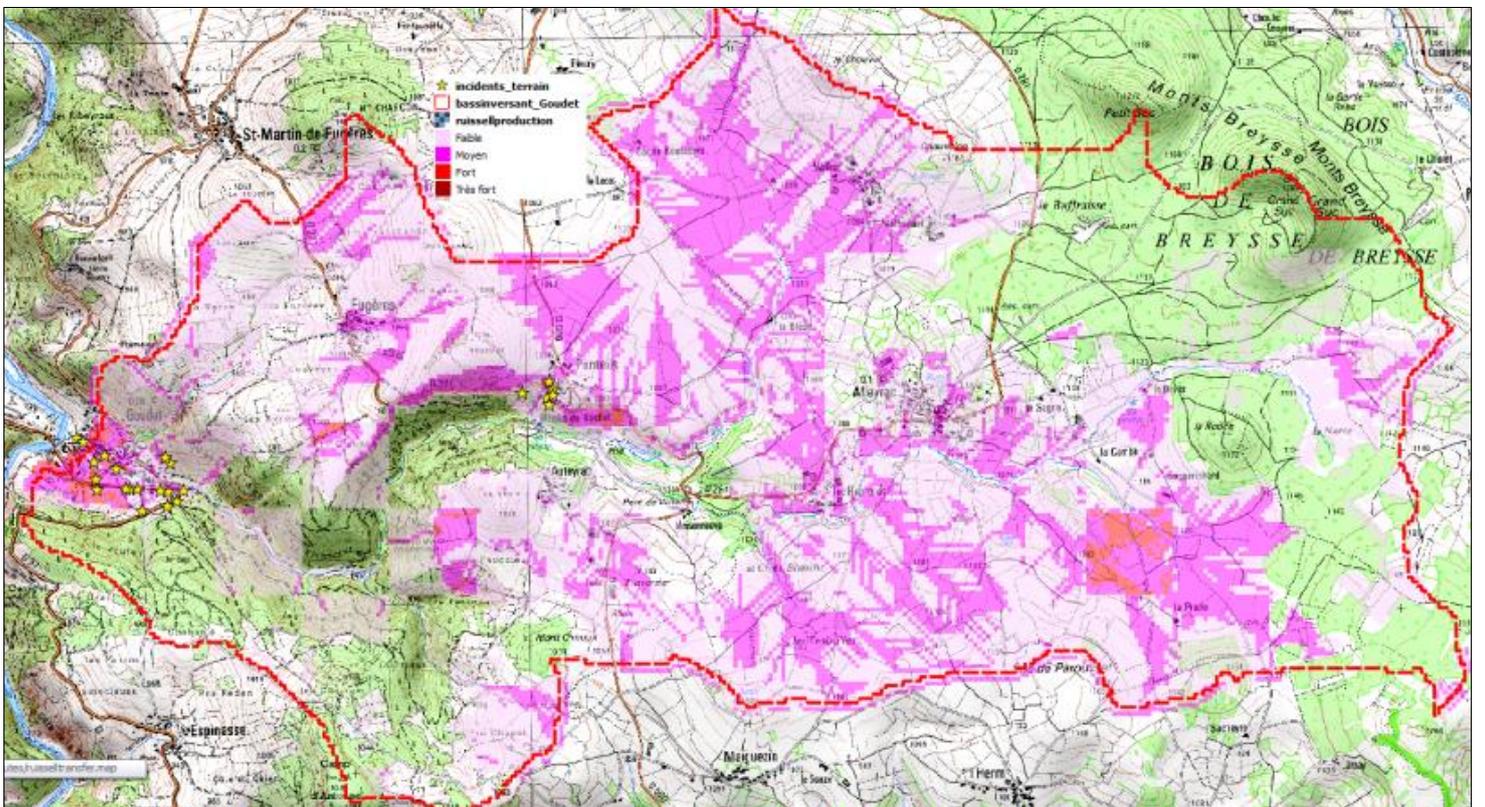


Carte de sensibilité au transfert du ruissellement du bassin versant de Goudet d'après IRIP-GEOL

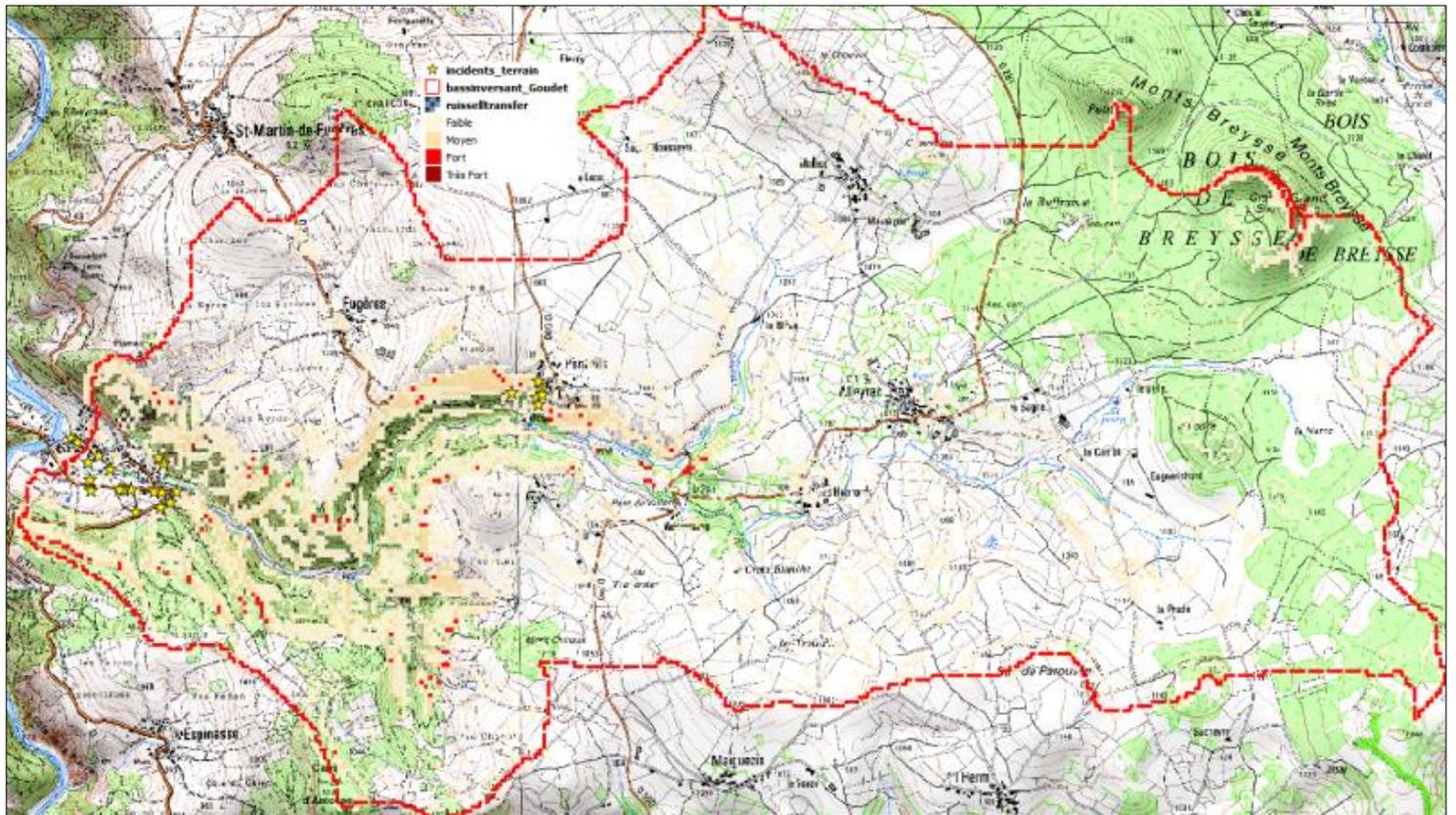


Carte de sensibilité à l'accumulation du ruissellement du bassin versant de Goudet d'après IRIP-GEOL

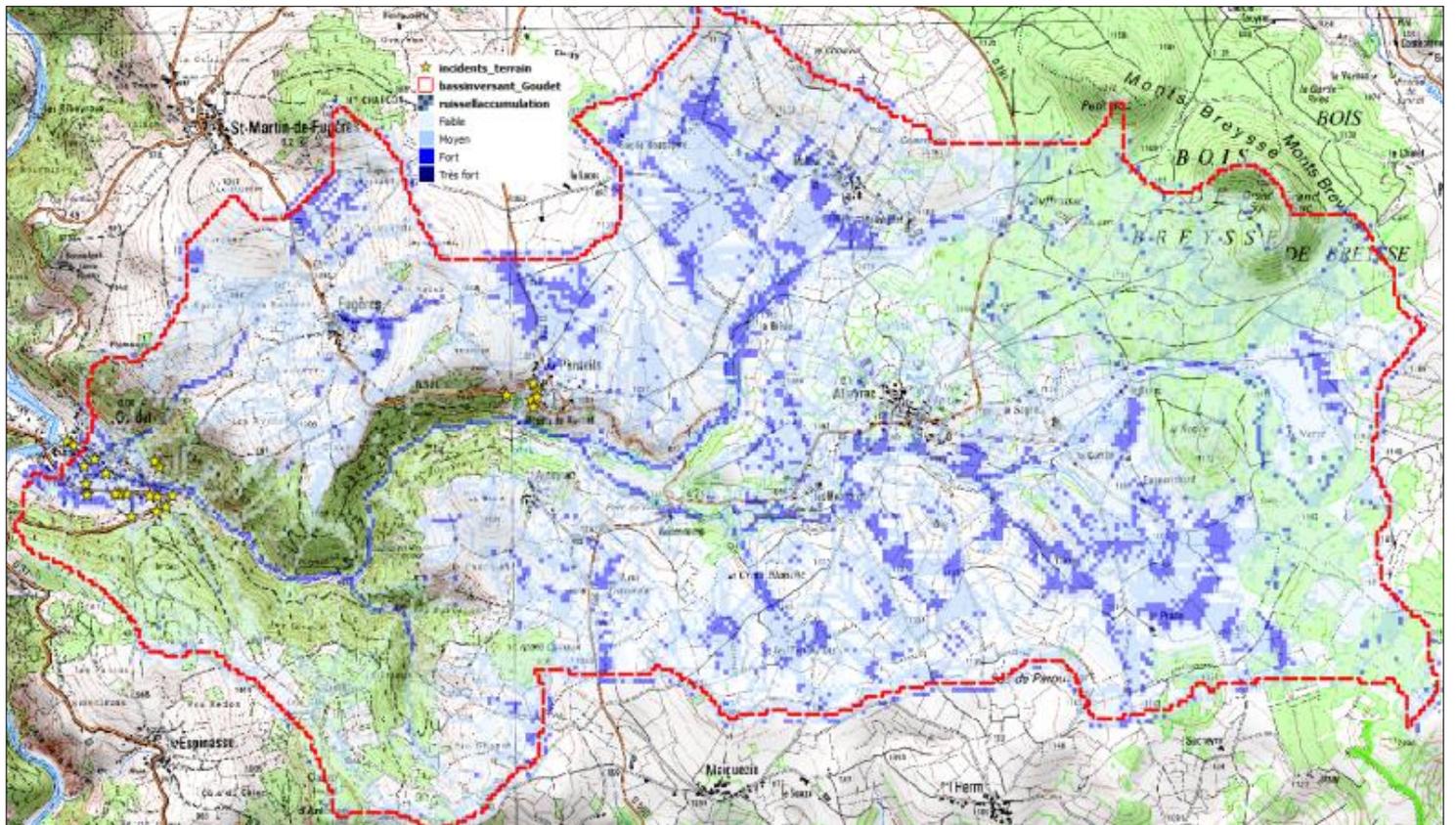
- Cartes IRIP-SOL IRIP sur le BV de Goudet (24,1 km<sup>2</sup>) sur fond IGN 25 000



Carte de sensibilité à la production du ruissellement du bassin versant de Goudet d'après IRIP-SOL\_IRIP



Carte de sensibilité au transfert du ruissellement du bassin versant de Goudet d'après IRIP-SOL\_IRIP



Carte de sensibilité à l'accumulation du ruissellement du bassin versant de Goudet d'après IRIP-SOL\_IRIP

### *Création d'une carte sol à partir des données d'occupation des sols*

La donnée pédologique est une donnée complexe, aussi bien à l'obtention que lors de son utilisation, qui peut s'avérer très imprécise en fonction de la zone d'étude. Afin de contourner cette difficulté, un premier travail de réflexion s'est orienté vers l'utilisation de données visibles pouvant caractériser l'état d'un sol. Ces réflexions ont alors mis en évidence l'importante connectivité entre l'état du sol et l'utilisation de celui-ci (André, Guillaude, et Bahoken 2002; Alaoui 2015; Cortignani et Dono 2015).

- Les données d'occupation des sols, des données de plus en plus pointues :

L'occupation des sols est une composante primordiale pour la gestion des territoires (André, Guillaude, et Bahoken 2002). En effet, en plus de favoriser l'aléa ruissellement intense, l'occupation des sols va aussi définir les enjeux et donc les zones à risque. Cette donnée est facilement accessible depuis des observations aériennes locales (drones, avions, etc...) mais aussi depuis des observations spatiales à très haute résolution. Les sources de données (IGN, NASA, SPOT, etc..) tendent à se démocratiser et offrir un panel de typologies d'occupation du sol et de leurs caractéristiques de plus en plus détaillées (King 2002). Au-delà de l'accès aux données de plus en plus précises (jusqu'à 20cm de résolution pour la BD\_ORTHO\_HR de l'IGN) les images satellites ont l'avantage de pouvoir intégrer un horodatage. En effet, ces images hautes résolutions peuvent ainsi fournir des données à différentes périodes de l'année (et donc introduire une saisonnalité dans IRIP) mais aussi pré/post-événementielles. Dans cette perspective, l'utilisation de l'image satellite permettrait de mettre en évidence les désordres sur un territoire suite à un événement extrême et ainsi faciliter la validation des cartes produites par la méthode IRIP.

- Acquisition des données d'occupation des sols pour l'utilisation dans le logiciel IRIP :

Actuellement, le travail de traitement des images satellites est encore imprécis et ne permet pas une discrimination claire des différents terrains et/ou des types de cultures. C'est pourquoi l'utilisation d'une autre source de donnée a été envisagée : la BD\_TOP\_3D de l'IGN (2017) à la précision métrique. La BD\_TOPO\_3D offre quatre principales informations :

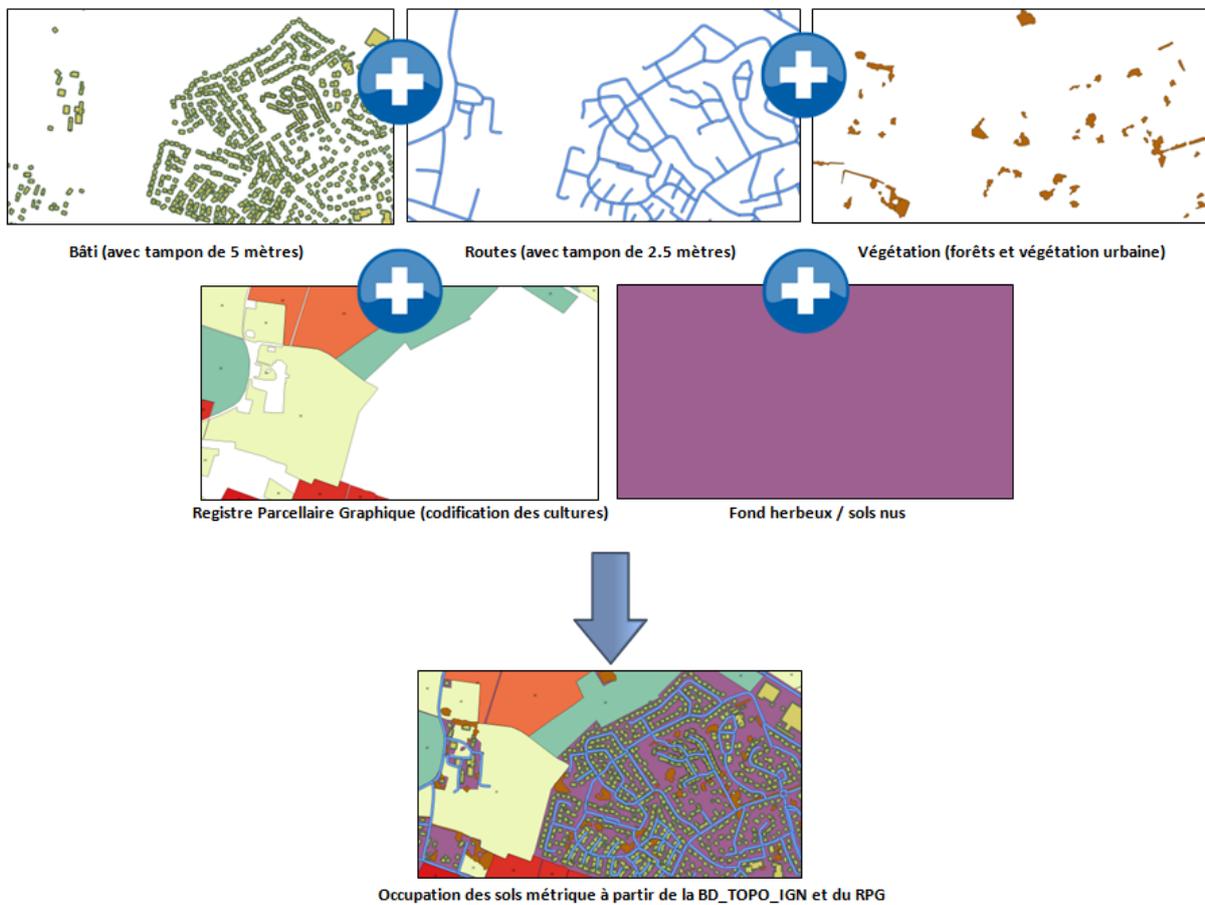
- Le bâti : délimitant les constructions pérennes avec une grande précision,
- Les routes et autres grands réseaux linéaires : allant caractériser du simple chemin en terre aux grandes voies routières ferrées,
- La végétation : définissant toutes les zones de forêts, mais aussi les espaces verts urbains
- Les cours d'eau et zones humides.

A cette donnée d'occupation des sols, l'ajout du Registre Parcellaire Graphique (RPG) est pertinent puisqu'il va permettre de mettre en évidence les zones agricoles et les prairies mais aussi définir le type de culture présent. Le RPG (IGN 2014) est une base de données géographiques servant de référence à l'instruction des aides de la politique agricole commune (PAC). Bien qu'elle ne codifie que 28 types de cultures (uniquement les cultures éligibles à la PAC, mais représentant 93% des cultures françaises selon l'Agence de Services et de Paiement en 2007) et ne repose que sur des déclarations à la PAC, cette donnée reste pertinente pour la création d'une base d'occupation des sols de résolution métrique à intégrer à IRIP sur le territoire national.

- Réalisation d'une carte d'occupation des sols métrique à intégrer dans IRIP :

Avant de combiner les cartes, un tampon de 5 mètres autour du bâti et de 2.5 mètres autour des routes est réalisé afin de conserver la réalité du territoire sur les zones imperméables (routes de 5 mètres de largeur et bâti avec une zone de « trottoir / béton »).

La combinaison des cartes du bâti, des routes, de la végétation, des cours d'eau et du RPG est réalisé sous SIG de manière à ce que chaque pixel du bassin versant soit caractérisé par une seule de ces occupations comme le montre le schéma ci-dessous. Afin d'éviter les « trous », une autre carte en fond est ajoutée correspondant aux zones dites blanches, définies comme des sols nus ou des zones enherbées (notamment en bordure des tampons de routes ou de bâtis).



- Création des légendes IRIP :

La réalisation d'une légende IRIP est une étape indispensable à l'intégration de la donnée dans le logiciel IRIP (Dehotin et Breil 2011). L'objectif étant l'intégration de données d'occupation des sols en données pédologiques, la légende IRIP va donc se diviser en deux parties : une pour la carte d'occupation des sols IRIP et l'autre pour la carte pédologique.

La version 1 d'IRIP étant codée en dur, les légendes d'occupation des sols se doivent être composées de deux fichiers textes : un général, et un pour les zones urbaines (Dehotin et Breil 2011). Dans ce cas

d'étude, les bâtis, les routes ainsi que les zones tampons de ceux deux types d'occupations vont être considérés comme totalement imperméables (Gadiolet 2013). Les zones urbaines ne sont donc pas un problème puisque, dans la logique IRIP, ces zones sont favorables à la genèse du ruissellement (Bonnet 2012). Au-delà des zones urbaines, une première approche est utilisée pour classer les différentes cultures comme propices à la production du ruissellement (1) ou non (0).

La difficulté va être de détailler les légendes pédologiques pour les types d'occupations obtenus par le RPG (types de cultures). Effectivement, le type de culture est influencé par la nature du sol (Le Bissonais et al. 2002). Par exemple, il sera difficile de cultiver des céréales sur des sols compacts. Les pratiques culturales préfèrent alors utiliser des plantes fourragères (comme la luzerne) pour décompacter les sols. C'est pourquoi, chaque type d'occupation et donc de culture du RPG, va déterminer la nature du sol et le renseigner sur sa battance (1 oui ; 0 non), son érodibilité (1 oui ; 0 non), son épaisseur (0 oui ; 1 non) et sa perméabilité (0 oui ; 1 non).

Le tableau ci-dessous résume donc les premières études basées sur la bibliographie (Chambre d'agriculture de région Nord-Pas-de-Calais 2012) et sur le retour d'expériences auprès de pédologue et d'exploitants agricoles. La compilation de données est encore incomplète pour certains types de culture et un travail important de collecte d'information auprès des acteurs cités précédemment sera nécessaire pour affiner ces résultats. Une autre possibilité d'obtention d'information sur les caractéristiques intrinsèque des sols et la réalisation d'une campagne d'essai d'infiltration sur des occupations de sol différentes (Bonnet 2012).

Tableau récapitulatif des légendes pédologiques IRIP appliquée à une occupation des sols précise

CODE GROUPE	NOM_GROUPE_OOC_SOL	COMMENTAIRES	OCCUPATION DES SOLS		PEDOLOGIE				
			LEGENDES IRIP PRODUCTION	ZONES URBAINES (TBL)	IRIP BATTANCE	IRIP ERODIBILITE	IRIP PERMEABILITE	IRIP EPAISSEUR	
-	ROUTES	Tampon 5M	1	1	1	1	1	1	1
-	VEGETATION - FORETS	Possibilité de discriminer le type de forêts (feuillus, conifères,,)	0	0	0	0	0	0	0
-	BATI		1	1	1	1	1	1	1
-	ZONES BETONNEES + CONTOURS BATI	Tampon environ 5M autour du Bati	1	0	1	1	1	1	1
-	ZONES HERBEUSES OU A NUS	Pour éviter les zones blanches sans occupation des sols	0	0	0	0	0	0	0
-	ZONES CULTIVEES (RPGIGN)								
1	BLE TENDRE	Sols argilo-limoneux avec beaucoup de labour	0	0	1	1	0	0	0
2	MAIS GRAIN ET ENSILAGE	Variation en fonction des saisons, plants espacés	1	0	1	1	0	0	0
3	ORGE		0	0	?	?	?	?	?
4	AUTRES CEREALES		0	0	?	?	?	?	?
5	COLZA		0	0	?	?	?	?	?
6	TOURNESOL		1	0	?	?	?	?	?
7	AUTRES OLEAGINEUX		0	0	?	?	?	?	?
8	PROTEAGINEUX	soja,,,,,	0	0	?	?	?	?	?
9	PLANTES A FIBRES	(Coton, Lin,,)	0	0	?	?	?	?	?
10	SEMENCES	Sols nus	1	0	?	?	?	?	?
11	GEL (SURFACES GELÉES SANS PRODUCTION)	Sols nus	1	0	1	1	1	1	0
12	GEL INDUSTRIEL	Sols nus	1	0	1	1	1	1	0
13	AUTRES GELS	Sols nus	1	0	1	1	1	1	0
14	RIZ	Zone marécageuses	0	0	0	0	1	1	1
15	LEGUMINEUSES A GRAINS		1	0	?	?	?	?	?
16	FOURRAGE	Sol compact	1	0	1	1	1	1	0
17	ESTIVES LANDES	Sol compact	1	0	1	0	1	1	0
18	PRAIRIES PERMANENTES	Sol compact	1	0	0	0	1	1	0
19	PRAIRIES TEMPORAIRES	Sol compact	1	0	0	0	0	0	0
20	VERGERS	Arbres espacés avec souvent de l'herbe entre chaque arbre	1	0	1	1	1	0	0
21	VIGNES	Fonction du type de culture et de désherbage	1	0	?	?	?	?	?
22	FRUITS A COQUE	Arbres espacés avec souvent de l'herbe entre chaque arbre	1	0	1	1	1	0	0
23	OLIVIER	Arbres espacés avec souvent de l'herbe entre chaque arbre	1	0	1	1	1	0	0
24	AUTRES CULTURES INDUSTRIELLES		0	0	?	?	?	?	?
25	LEGUMES - FLEURS	Sous serre souvent (Hors sol)	0	0	0	0	1	1	1
26	CANNE A SUCRE	Pas dans nos latitudes	0	0	-	-	-	-	-
27	ARBORICULTURE	Arbres espacés avec souvent de l'herbe entre chaque arbre	0	0	1	1	0	0	0
28	DIVERS	Pas plus de données	0	0	-	-	-	-	-

## Conclusion

La méthode IRIP est une méthode de diagnostic de territoire permettant d'améliorer la compréhension des processus du ruissellement intense pluvial. Cette méthode de score se base sur la topographie, mais aussi sur l'usage et la nature des sols. Ces deux dernières données interviennent dans 4/5<sup>ème</sup> des données sur la carte de production et de manière indirecte sur 1/5<sup>ème</sup> pour les cartes de transfert et d'accumulation.

La qualité des données d'usage et de nature des sols est donc essentielle à la réalisation du diagnostic de territoire. Ces données sont parfois difficilement accessibles ou très imprécises. Pour autant d'autres approches permettent de palier à ces difficultés. C'est dans cet objectif qu'une carte sol nationale modulable à la maille de 25 mètre a été créée. Une autre approche a été d'utiliser la donnée d'usage des sols pour en définir une nature. Bien que cette approche n'a pu être testée en condition réelle, par manque d'information sur le lien entre la nature et l'usage des sols, la méthodologie de création reste viable et une perspective d'amélioration sérieuse.

En outre, l'arrivée des nouveaux capteurs à très haute résolution spatiale (THRS), les données de télédétection sont aujourd'hui de plus en plus utilisées. La cartographie de l'occupation des sols est une application très répandue. En effet, son apport suscite un intérêt à la fois pour les scientifiques mais aussi les gestionnaires des territoires. Désormais, l'étude de la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol ne se limite pas seulement à l'analyse de la classification à partir des images multi-dates. Elle peut être complétée et enrichie par l'analyse des métriques spatiales (ou paysagères) pour quantifier et qualifier les formes du paysage. A l'origine, les métriques spatiales ont été développées pour l'écologie du paysage dans les années 1980 (Skupinski et al, 2009). Elles sont utilisées pour décrire l'organisation et l'hétérogénéité spatiale des paysages à une échelle spatiale donnée (Aguejdad et Hubert-Moy, 2016). Les métriques paysagères sont aujourd'hui appliquées dans des études urbaines dont l'objectif est de caractériser l'évolution de la forme des paysages dans un contexte de forte croissance urbaine et donc de spatialiser l'aléa et les enjeux (Skupinski et al, 2009 ; Aguejdad et Hubert-Moy, 2016).

## Bibliographie

- Aguejdad, R. et Hubert-Moy, L. (2016) «Suivi de l'artificialisation du territoire en milieu urbain par télédétection et à l'aide de métriques paysagères. Application à une agglomération de taille moyenne, Rennes Métropole». Cybergéo
- Alaoui, Abdallah. 2015. « Modelling Susceptibility of Grassland Soil to Macropore Flow ». Journal of Hydrology 525 (juin):536-46.
- André, Gilles, Richard Guillande, et Françoise Bahoken. 2002. « Cartographie des zones inondées par imagerie spatiale radar, optique et modèles numériques de terrain : capacités et limites illustrées par des exemples en France (Aude 1999) et à l'étranger (Honduras 1998, Venezuela 1999 et Madagascar 2000) ». La Houille Blanche, no 1 (février):49-54.
- Ballabio, Cristiano, Panos Panagos, et Luca Monatanarella. 2016. « Mapping Topsoil Physical Properties at European Scale Using the LUCAS Database ». Geoderma 261 (janvier):110-23.
- Bonnet, Stanislas. 2012. « Cartographie des zones potentielles de production ou d'accumulation du ruissellement de surface en région cévenole ».
- Bonnet-Carrier, Stanislas, Christine Poulard, et Pascal Breil. 2013. « Cartographie de l'aléa ruissellement. Inventaire des éléments de validation. » IRSTEA-Lyon.
- BRGM. 2000. « Cartographie de l'aléa érosion des sols en Haute-Normandie. » RP-50454-FR.

- Bywater-Reyes, Sharon, Catalina Segura, et Kevin D. Bladon. 2017. « Geology and Geomorphology Control Suspended Sediment Yield and Modulate Increases Following Timber Harvest in Temperate Headwater Streams ». *Journal of Hydrology* 548 (mai):754-69.
- Cerdan, Olivier, Y. Le Bissonnais, Véronique Souchère, Christine King, V. Antoni, N. Surdyk, I. Dubus, D. Arrouays, et Jean-François Desprats. 2006. « Guide méthodologique pour un zonage départementale de l'érosion des sols Rapport n°3 : Synthèse et recommandations générales ». No. BRGM-RP-55104-FR. BRGM-INRA.
- Chambre d'agriculture de région Nord-Pas-de-calais. 2012. « Lutte contre les ruissellements et l'érosion des sols agricoles. »
- Cortignani, Raffaele, et Gabriele Dono. 2015. « Simulation of the Impact of Greening Measures in an Agricultural Area of the Southern Italy ». *Land Use Policy* 48 (novembre):525-33. Dehotin, Judicaël, et Pascal Breil. 2011. « Rapport technique du projet IRIP Cartographie de l'aléa ruissellement ».
- Dubreuil, N., V. Lecomte, C. King, Véronique Souchère, et Yves Le Bissonnais. 2002. « Régionalisation d'un modèle de ruissellement en zone agricole (STREAM) ». BRGM/RP-51115-FR.
- Gadiolet, Pierre. 2013. « Stratégie de gestion concertée et intégrée des eaux pluviales à l'échelle d'un petit BV rural. » Journée technique d'information et d'échanges de l'A.R.R.A.
- INRA, US 1106 InfoSol, Orléans. 2015. « DoneSol version 3.2. Dictionnaire de données. »
- King, Christine. 2002. « Etats de surface et ruissellement, l'approche par télédétection ». *La Houille Blanche*, no 1 (février):41-48.
- Landemaine, Valentin. 2016. « Érosion des sols et transferts sédimentaires sur les bassins versants de l'Ouest du Bassin de Paris : analyse, quantification et modélisation à l'échelle pluriannuelle ». Université de Rouen Normandie.
- Le Bissonnais, Yves. 2000. « Analyse expérimentale des mécanismes d'érosion: la dégradation structurale superficielle et le détachement des particules des sols cultivés ». *Ingénieries-EAT*, no 22:p-27.
- Le Bissonnais, Yves, Hassan Benkhadra, E. Gallien, M. Eimberck, D. Fox, Philippe Martin, C. Douyer, Laurence Ligneau, et Jean-François Ouvry. 1996. « Genèse du ruissellement et de l'érosion diffuse sur sols limoneux : analyse du transfert d'échelle du m<sup>2</sup> au bassin versant élémentaire agricole/Runoff and interrill erosion on silty loamy soils: analysis of scale transfer from m<sup>2</sup> to small cultivated catchments ». *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 2 (3):51-64. <https://doi.org/10.3406/morfo.1996.885>.
- Le Bissonnais, Yves, Jacques Thorette, Cécile Bardet, et Joël Daroussin. 2002. « L'érosion hydrique des sols en France ». Rapport INRA, IFEN.
- Panagos, Panos, Cristiano Ballabio, Katrin Meusburger, Jonathan Spinoni, Christine Alewell, et Pasquale Borrelli. 2017. « Towards Estimates of Future Rainfall Erosivity in Europe Based on REDES and WorldClim Datasets ». *Journal of Hydrology* 548 (mai):251-62.
- Panagos, Panos, Pasquale Borrelli, Katrin Meusburger, Christine Alewell, Emanuele Lugato, et Luca Montanarella. 2015. « Estimating the Soil Erosion Cover-Management Factor at the European Scale ». *Land Use Policy* 48 (novembre):38-50.
- Souchère, Véronique, Luc Sorel, Alain Couturier, Yves Le Bissonnais, et Olivier Cerdan. 2007. « Application du modèle STREAM à l'échelle d'un bassin versant au cours d'un cycle hydrologique ». Report of the French National Institute of Agricultural Research (INRA).
- Skupinski, G., BinhTran, D., et Weber, C. (2009) « Les images satellites Spot multi-dates et la métrique spatiale dans l'étude du changement urbain et suburbain – Le cas de la basse vallée de la Bruche (BasRhin, France) ». *Cybergéo*
- Tóth, Brigitta, Melanie Weynants, László Pásztor, et Tomislav Hengl. 2017. « 3D Soil Hydraulic Database of Europe at 250 m Resolution ». *Hydrological Processes* 31 (14):2662-66.
- Tóth, Gergely, Arwyn Jones, et Luca Montanarella. 2013. « The LUCAS Topsoil Database and Derived Information on the Regional Variability of Cropland Topsoil Properties in the European Union ». *Environmental Monitoring and Assessment* 185 (9):7409-25.

### ***3- Analyse des données de lame d'eau radar pour l'étude des pluies fortes en France métropolitaine.***

**A. EKOKO-SAFI ET E. LEBLOS, 2017**

---

Le rapport complet du master est disponible sur le lien :

<https://irsteadoc.irstea.fr/cemoa/PUB00055546>

#### ***Matériels et méthodes***

Afin de préciser les endroits du territoire français les plus exposés au ruissellement intense pluvial, il est nécessaire d'avoir l'information sur les pluies fortes et leurs cumuls (Breil et al., 2016). Dans le cadre de cette étude, la méthode retenue consiste en une analyse exploratoire sous approche statistique à partir des données des pluies fournies par les radars météorologiques. Pour des raisons inhérentes aux erreurs radar que nous expliquerons plus bas, ces données contiennent des valeurs manifestement exagérées par des phénomènes non météorologiques. Nous avons opté pour leur filtrage afin de réduire des aberrations pouvant conduire à des résultats erronés. D'une part, nous déterminerons par une approche intuitive le seuil au-delà duquel nous rejetons les données aberrantes, et d'autre part, par une approche formelle (géostatistique), nous remplacerons les valeurs aberrantes par des valeurs estimées. Après ce filtrage, nous exploiterons ces données pour les calculs des quantiles à partir de différentes approches statistiques. Une interface qui permet de visualiser les résultats de statistiques des pluies fortes réalisées pour l'ensemble des zones couvertes par les radars français a été développée et sera présentée. Pour finir, nous réaliserons la cartographie des quantiles des pluies. En particulier, nous avons constitué des échantillons sup-seuil sur chaque pixel. Ils sont composés de 6 valeurs de pluies les plus fortes en moyenne sur l'année, soit 60 valeurs pour 10 ans au pas de temps de 5 minutes. A partir de ce pas de temps de base (5 minutes), nous avons cumulé les pluies. Un cumul de 15 minutes, correspond donc à la somme de trois pas de temps successifs de 5 minutes. La même approche a été adoptée pour les pas de temps de 30 à 10 jours. Notre apport est donc, d'une part, le développement d'une interface permettant d'analyser et de présenter les résultats de pluies radar, et , d'autre part la réalisation de la cartographie des quantiles de période de retour à l'échelle de la France métropolitaine. Cette cartographie sera mise en forme à l'aide des SIG †† qui sont des gestionnaires informatiques de données spatiales. Ils se révèlent être des outils très pratiques à des fins hydrologiques (Anctil et al., 2005).

#### ***Présentation des données***

Au cours de ce travail nous nous sommes intéressés à la lame d'eau radar qui connaît actuellement de nombreuses évolutions et dont l'usage se développe tant dans le monde de la recherche qu'en milieu opérationnel (dans les services de prévision de crues par exemple). Les données que nous exploitons, représentent 4 téra-octets (environ 4000 gigaoctets), ce qui est un volume inhabituel difficile à manipuler et une opportunité importante pour être exploitées dans le cadre de la recherche scientifique.

Figure 12. Carte de la mosaïque de lame d'eau radar en format geotiff (source : SCHAPI)

Ces données proviennent des radars météorologiques de Météo-France et nous ont été fournies par le SCHAPI ¶¶. Ce service du ministère en charge de l'environnement est implanté à Toulouse et favorise les synergies avec Météo-France et les équipes scientifiques qui y sont rassemblées, afin d'alerter les réseaux hydrologiques français des risques de crues et d'inondations. Les données couvrent une période de 10 ans soit du 01 juillet 2006 au 30 juin 2016 et sont des lames d'eau de la mosaïque PANTHERE. Ces données, nous ont été fournies sous le format geotiff (figure 12.) mesurées par centième de millimètre et possèdent une résolution temporelle originale de 5 minutes et une résolution spatiale proche de 1 km<sup>2</sup>. A notre connaissance, elles n'ont pas encore été exploitées sous cette résolution de base dans une perspective climatologique. Concrètement, toutes les cinq minutes, le radar renvoie une matrice rectangulaire de 1351 lignes par 1452 colonnes correspondant à un tableau de 1.961.652 de valeurs des pluies. Ce qui permet d'avoir sur un pixel donné, 288 valeurs par jour et 1.052.064 valeurs sur 10 ans correspondant à environ mille milliards de valeurs totales à analyser. Dans le fichier on trouve des valeurs d'intensités de pluies non-nulles, des valeurs nulles et des valeurs manquantes. Ces dernières correspondent au manque d'informations dû à l'inaccessibilité pour les radars dans certains endroits. Avant leur utilisation, plusieurs conversions ont été incontournables pour permettre la lecture de données, sinon leur manipulation était quasi impossible sur nos ordinateurs de bureau. Elles ont principalement concerné le passage du format Geotiff au format Ascii à l'aide de la librairie GDAL. Ensuite, la conversion sous le format binaire a été réalisée. Enfin, les chroniques de pluies ont été placées dans des blocs de 16 km \* 16 km. Le total du nombre blocs réalisé s'élève à 5972 et représente environ 1.700.000 chroniques de pluies. Ces conversions très lourdes représentent pour nous un état initial. Notre choix sur l'utilisation de ces données résulte du fait la fine résolution spatiotemporelle des images radar permettra à l'équipe IRIP de pouvoir mieux traiter l'étude du ruissellement intense pluvial.

### *L'interface des lames d'eau radar*

Afin de pouvoir répondre au besoin de chaque utilisateur intéressé par les analyses des lames d'eau radar, et, compte tenu du volume de données, nous avons jugé important de développer l'interface informatique ébauchée pour la mise en forme des données. Cette interface est un outil convivial qui permet de lancer un traitement en accédant de manière automatisée aux données pertinentes. Elle a été développée à l'aide de l'environnement de développement intégré (EDI) Lazarus, intégrant un compilateur open source pour le langage PASCAL objet. Ainsi, elle a joué quatre rôles distincts dans cette étude à savoir : l'accès aux données, la visualisation des données d'entrée, le traitement des données statistiques et la visualisation des résultats après analyses mais avant transmission aux SIG § (QGIS et ArcGIS). La figure 13 présente un exemple de l'interface développée.

Figure 13. Interface de l'outil d'exploitation

Cette interface est principalement composée de trois fenêtres (A, B et C) permettant la visualisation. En effet, les fenêtres (A) et (B) permettent la visualisation de données rendues possibles par la restructuration des fichiers initiaux et la fenêtre (C) permet de visualiser les résultats de traitements automatisés. Suivant la recherche de l'utilisateur, chaque bouton restitue un jeu de résultats sous

forme de valeurs numériques ou graphiques. L'image radar située à gauche dans l'interface, contient les lames d'eau et les limites départementales françaises. Chaque point de cette image correspond à un pixel de 1 km<sup>2</sup>, lié à une chronique de pluies ayant environ un million de données pour une période de 10 ans. Par ailleurs, il est intéressant de noter qu'au-delà des traitements et visualisation, cette interface permet aussi d'éviter de refaire les analyses statistiques à chaque fois. Elle est facile d'utilisation et chaque bouton porte le nom d'une analyse statistique spécifique réalisée sur les données. Avant de visualiser les résultats, l'utilisateur doit d'abord cliquer sur le bouton aperçu géographique et climatologique situé dans la fenêtre (A), puis sur l'un des boutons de la fenêtre (C) qui correspond au nom de l'analyse statistique pour laquelle il veut s'informer. Enfin, à chaque fois qu'il passera sa souris dans la fenêtre (A), la fenêtre (C) lui affichera les résultats en tout point du territoire. Parallèlement, l'interface génère des fichiers (texte ou PNG) de résultats.

### *Approche statistique*

L'analyse de données repose sur l'utilisation des statistiques descriptives des événements extrêmes précédées du filtrage. Les statistiques servent à deux choses à savoir : la diminution de la quantité d'informations à conserver et le passage d'un espace d'événements historiques à un espace des probabilités. Cette analyse consiste à caractériser les événements extrêmes (quantiles) en tout point du territoire afin de décrire par la suite les courbes d'Intensité-Durée-Fréquence (IDF), de pluie-durée-fréquence et de pluie-durée-aire-fréquence. Les courbes IDF sont obtenues à partir d'ajustement statistique des observations effectuées à une station pluviométrique. Elles traduisent l'évolution de l'intensité moyenne maximale ( $i$ ) (mesurée en mm/h) de la pluie en fonction de la durée (D) (mesurée en minutes) et de la fréquence (F) ou période de retour ( $T=1/F$ ) (Ghanmi, 2014). En effet, les relations entre l'intensité, la durée et la fréquence d'apparition des pluies sont étudiées statistiquement et reportées selon des courbes caractéristiques appelées les courbes IDF. Lorsqu'on remplace les intensités par des quantiles, on parle des courbes de pluie-durée-fréquence (PDF) et lorsqu'on introduit dans cette dernière relation la surface, on parle des courbes de pluie-durée-aire-fréquence (PDAF). Notons que l'IDF est l'information qui est calculée de manière classique à partir d'un poste pluviométrique pour caractériser les pluies fortes d'un lieu. L'étude des pluies fortes en intensité, durée et fréquence est nécessaire pour connaître l'aléa, puis le risque lié au ruissellement pluvial. Il existe une relation entre ces trois paramètres. Pour une même fréquence d'apparition, donc un même temps moyen de retour, l'intensité d'une pluie est d'autant plus forte que sa durée est courte. Plus l'intensité et la durée des pluies sont élevées, plus le risque du ruissellement est grand. L'aléa ruissellement est lié à la fois aux intensités d'une pluie mais aussi à la durée des intensités fortes

### *Filtrage de données*

Bien que ces données aient été filtrées à la base par Météo-France, nous avons procédé à un examen visuel des images radar à l'aide de l'interface (figure 14) développée à partir de notre algorithme. Cette vue générale nous a permis de faire une première critique sur nos données. De cette image radar que nous présenterons dans les résultats, il ressort la présence des phénomènes non météorologiques qui semblent être des artéfacts. En effet, en passant la souris sur un bon nombre des points qui se situent à l'endroit où se trouvent les phénomènes jugés non-météorologiques du fait de leurs structures spatiales radiales par exemple, l'interface nous affiche des valeurs de pluies supérieures à 50 mm au pas de temps de 5 minutes. Ce qui nous paraît absurde, car la valeur maximale record de pluies observée en France à l'aide des pluviomètres automatiques depuis 1980 et au pas de temps de 6 minutes s'élève à 36 mm. C'est pour cette raison que nous nous sommes

orientés vers le filtrage des données d'entrée afin de réduire et/ou de supprimer ces erreurs. Pour y parvenir, nous avons proposé deux méthodes de filtrage, à savoir : le filtrage par seuil et le filtrage par l'analyse géostatistique.

### *Filtrage par seuil*

Cette méthode est une approche intuitive. Elle nous a permis de supprimer quelques données de pluies considérées comme aberrantes au regard de l'image radar que nous présenterons dans la partie des résultats pour une comparaison avec celle obtenue après le filtrage. Principe de la méthode Par hypothèse raisonnable, le seuil considéré pour qualifier une donnée de "aberrante" est vu de deux façons. La première consiste à considérer que dans l'absolu, cette valeur ne peut exister dans la nature et la seconde se fait en jugeant une pluie beaucoup trop forte par rapport aux mesures qui lui sont contiguës (valeur ne pouvant non plus exister dans la nature). Ces valeurs aberrantes sont donc, remplacées dans le fichier par le code de valeur manquante (65535) et ne sont pas prises en compte dans les calculs. Par ailleurs, il est important de noter que cette méthode considère pour cible, le pixel qui contient une valeur de pluie jugée forte par les critères du filtrage. Par conséquent, il est comparé avec ses voisins dans le temps et dans l'espace pour être validé ou non.

Figure 14. Schéma illustratif de représentation d'un pixel cible et ses voisins dans l'espace et dans le temps

Dans l'espace, un pixel est observé comme situé dans une couche à deux dimensions. Si on rajoute le temps, il est donc représenté en trois dimensions (Figure 14). En effet, dans le temps et dans l'espace, un pixel cible est entouré de huit voisins (chaque couche a une taille de 3\*3). Pour trois dimensions, ce même pixel est donc entouré de 26 voisins auxquels il peut être comparé pour enfin être considéré valide ou invalide. Sur la figure 14, (t) représente la dimension temporelle où se situe la cible, (t-1) et (t+1) représentent respectivement la dimension qui précède et celle qui suit la cible (t).

### *Application de la méthode*

Les critères fixés pour le pas de temps de 5 minutes, considèrent comme donnée manquante, toute pluie :

1. supérieure à 5 mm et ayant moins de 6 voisins pluvieux.
2. supérieure à 10 mm et ayant moins de 10 voisins pluvieux.
3. supérieure à 36 mm quelque-soit le nombre de voisins pluvieux.

Les pixels radar dont la valeur ne respecte pas les critères fixés ont été considérés comme présentant des intensités anormalement élevées et ont été considérés invalides.

### *Le choix de cette méthode porte sur deux aspects :*

- Le premier concerne le fait que nous jugeons incohérent de trouver dans la nature pour une résolution spatio-temporelle fine, des pluies présentant des intensités anormalement élevées seules (par exemple une pluie supérieure à 5mm en 5 minutes).

- le deuxième résultat du fait qu'après la fouille des valeurs maximales de pluies en 6 minutes sur la base de données de Météo-France (annexe 3), nous avons constaté que depuis la mise en place des pluviomètres automatiques en 1980, la valeur record rencontrée s'élève à 36 mm et a été observée en Drôme (Rhône-Alpes) le 20 septembre 1982.

Ainsi, cette valeur maximale de pluies record en 6 minutes sur une période de 37 ans, a été retenue comme notre valeur de référence à laquelle aucune donnée radar à notre disposition ne pourra être supérieure. Bien que nos données s'échelonnent de 2006 à 2016, nous n'avons pas utilisé cette période pour choisir le seuil de référence, car la valeur record certifiée en 1982 nous a paru statistiquement représentative. De plus, il nous a paru logique de considérer une plus longue période pour retenir le seuil, compte tenu de la fine résolution spatiale du radar relativement au pluviomètre. Autrement dit, le pluviomètre ne nous apporte des informations que sur quelques points très distants et fixes (mesure ponctuelle), alors que le radar nous informe sur les pluies à résolution fine et ayant de grandes portées (80 à 200 km). Donc, si nous ne prenons en compte que notre période pour déterminer le seuil de rejet des aberrations, il y a de fortes chances de perdre de données sur des pluies réellement observées qui se trouvent aux endroits sans les pluviomètres. Par ailleurs, il nous semble intéressant de signaler qu'avant d'arriver au seuil absolu de 36 mm, nous avons procédé à plusieurs tentatives. Cependant, les différents seuils absolus essayés n'avaient pas de base formelle et nous conduisaient à des résultats non satisfaisants.

### *Analyse géostatistique*

La géostatistique se définit comme l'étude des phénomènes régionalisés. Elle est construite à partir des phénomènes qui s'étendent dans l'espace géographique (qui incluent éventuellement l'axe temporel) et y présentent une « organisation » ou « structure » (Journel et Huijbregts, 1989). Après le filtrage par seuil, cette méthode nous a permis de poursuivre le nettoyage de notre fichier.

Les formules décrites précédemment ont été introduites dans l'algorithme et les variogrammes ont été ainsi ajustés à l'aide du modèle exponentiel ci-dessous, afin de décrire la structure spatio-temporelle de nos données.

Cette partie technique est détaillée dans le rapport de master de Angel Ekoko-Safi (2017) sur le lien suivant : <https://irsteadoc.irstea.fr/cemoa/PUB00055546>

Cette description a permis de voir la détérioration de la corrélation entre les points mesurés lorsque leur distance augmente. Ainsi, les variogrammes ont été calculés en trois dimensions pour des pluies non-nulles et l'intermittence, afin de s'assurer de la direction de la continuité spatiale. De ce fait, la première dimension concerne la direction Ouest- Est, la deuxième concerne la direction Sud-Nord et la troisième dimension est temporelle. Une fois que nous avons calculé les variogrammes, les données aberrantes ont été donc estimées à l'aide de la méthode du krigeage. Cette méthode d'interpolation spatiale a consisté à estimer chaque valeur de pluie radar à partir de son voisinage, sur la base du principe selon lequel des objets rapprochés dans l'espace tendent à posséder des caractéristiques similaires. Enfin, l'erreur associée à chaque valeur estimée a été calculée et une limite de référence correspondant à quatre écart-type d'estimation a été fixée.

Les valeurs de pluies au-delà de la limite de référence devraient être considérées comme aberrantes et donc remplacées par les valeurs krigées correspondantes. Telle était du moins l'intention. Malheureusement la variance de krigeage n'est facile à interpréter en terme d'intervalle de confiance qu'avec des données gaussiennes, ce que la pluie n'est pas. Cette démarche formelle, élégante dans son principe est restée inachevée. Elle donne cependant un élément de base théorique au filtrage par seuil avec le voisinage.

### *Analyse régionale des précipitations*

L'analyse régionale décrit par Hosking et Wallis (1997) est utilisée pour établir les quantiles à n'importe quel site à l'intérieur d'une région donnée (Journel et Huijbregts, 1989). Elle permet la consolidation de l'information régionale et, par conséquent, peut conduire à une estimation différente de la distribution obtenue localement, à une station donnée (Onibon, 2004). Il existe deux grandes étapes pour estimer les quantiles de période de retour sur base de la théorie des moments linéaires (L-moments). La première consiste à former des groupes hydrologiques homogènes. La seconde consiste à sélectionner une loi statistique régionale correspondant au type d'échantillonnage, puis déterminer les paramètres de cette loi pour enfin estimer les quantiles (Figure 16).

Figure 16. Schéma illustratif des étapes de l'analyse régionale des précipitations.

En règle générale pour estimer les caractéristiques d'un événement pluvieux de période de retour  $T$  avec précision, il est nécessaire de disposer d'une durée d'observation suffisante, de l'ordre de 5 à 7 fois  $T$ , 3 fois étant considéré de manière empirique comme un minimum. Par contre, si la durée d'observations est insuffisante mais qu'il existe localement plusieurs stations d'observations, il est possible de consolider les données des stations afin d'améliorer la précision des estimations pour des périodes de retour élevées (Anctil et al., 2005). La consolidation des chroniques de pluies situées dans une même zone homogène à partir de l'analyse régionale, nous a été d'une grande importance du fait qu'à la base nous avons une durée d'observations faible (10 ans) pour prétendre estimer une période de retour 10 ans ( $T=10$ ). Car comme décrit plus haut, il nous faudrait au moins 30 années d'observations. Ainsi, à l'aide des échantillons sup-seuils et de la consolidation de nos données, nous avons été capable de déterminer les quantiles de période de retour 10 ans et plus. Nos échantillons sup-seuil sont constitués de 6 plus fortes valeurs des pluies en moyenne par an, soit 60 valeurs pour 10 ans au pas de temps de 5 minutes, ainsi que leurs cumuls (15, 30, 60, 120, 240, 360, 720, 1440, 2880, 5660, 14400 minutes). Ceci nous a permis d'estimer avec fiabilité une pluie décennale puisque nous disposons dans notre échantillon d'analyse de 6 valeurs par année au lieu d'être limité à une seule valeur comme pour un échantillon max-annuel. L'échantillon sup-seuil est plus riche et stable que l'échantillon max-annuel, même s'il contient nécessairement des valeurs plus faibles. Nous avons ensuite ajusté une loi généralisée de Pareto (GPD) sur tous les échantillons sup-seuil supposés tirés d'un processus homogène.

### *Détermination des régions homogènes*

Comme nous venons de l'évoquer, la première étape de l'estimation régionale d'une variable hydro-météorologique est la décomposition de la zone d'étude en groupes homogènes de stations (Onibon, 2004 ; Godart, 2009 ). Il existe plusieurs manières permettant d'estimer une zone homogène :

1. La première concerne la définition d'une zone homogène par une autorité compétente au sens scientifique ou administratif selon le besoin exprimé. Dans ce cas l'hydrologue peut cependant, vérifier l'homogénéité de la zone à l'aide des méthodes statistiques.

2. la deuxième consiste de faire appel aux méthodes de partitionnement comme la méthode des moments linéaires, l'analyse en composante principale, la méthode de K-means, la méthode de Kohonen, etc...

3. La troisième méthode est celle qui consiste à faire le lissage à partir des moyennes mobiles ou moyennes glissantes. Chaque pixel est considéré comme étant un point central qu'on affecte d'une loi régionale lui accordant plus de poids. Tout le voisinage contribue à la loi régionale. Le voisinage est ensuite centré sur le pixel suivant. Notre travail valorise cette méthode. Dans notre étude, nous avons d'abord calculé les moyennes mobiles avec un écart-type correspondant à 3 km. Ensuite nous avons fait la même chose avec 9 km. Ceci a été réalisé grâce à la méthode de Hosking et Wallis (1997) qui permet la consolidation de données régionales.

Notre choix s'est porté sur cette méthode parce qu'elle permet d'atténuer la variabilité exagérée des ajustements locaux en regroupant tous les pixels situés dans un voisinage raisonnable.

#### *Sélection d'une loi statistique régionale, estimation des paramètres et détermination des quantiles.*

Comme nous l'avons présenté, l'analyse de fréquence régionale est basée sur la théorie des moments linéaire notée "L-moments". Cette méthode est adaptée pour les ajustements des lois statistiques des événements extrêmes et a été développée par Hosking (1990) à partir des moments de probabilité pondérés (Onibon et al., 2004 ; Hosking, 1990 ; Hosking et Wallis, 1997 ). Elle permet à l'aide d'une loi statistique régionale, d'imposer à toutes les valeurs d'une zone homogène donnée, une distribution statistique commune malgré la présence des valeurs extrêmes afin de mieux estimer les quantiles.

Il existe plusieurs lois d'ajustements des événements extrêmes :

La loi généralisée de Pareto (GPD ) ajuste au mieux les échantillons au dessus d'un seuil donné (échantillon sup-seuil), contrairement à la loi générale des valeurs extrêmes (GEV) qui convient mieux aux échantillons de maxima annuels des pluies. Il est important de noter qu'un échantillon sup-seuil est constitué par un nombre élevé de valeurs de pluies en moyenne par année, par contre, un échantillon max-annuel ne prend en compte dans son échantillon qu'une seule valeur maximale par année. C'est dans cette logique que nous avons opté pour les échantillons sup-seuil compte tenu du fait que nous disposons d'un nombre d'années d'étude faible. Ceci nous a permis d'avoir des résultats plus robustes qu'en utilisant un échantillonnage classique par valeurs maximales annuelles, qui est plus sensible à la distribution d'échantillonnage du fait de la quantité réduite d'information utilisée.

La méthode des L-moments nous a permis à partir de la loi GPD et des échantillons sup-seuil, de régionaliser nos données. En d'autres termes, elle nous a permis d'imposer à toutes les valeurs d'une zone homogène donnée, une distribution statistique commune. Ce qui nous a autorisé à partir des L-

moments régionaux, de calculer les paramètres de la loi GPD permettant l'estimation des quantiles des périodes de retour.

### *Résultats : Statistiques et cartographiques*

Les résultats se présentent sous différentes formes. Ils peuvent être observés en appuyant sur l'un des boutons de l'interface réalisée comme décrit précédemment, suivant l'analyse que l'on recherche. Les résultats statistiques sont présentés sous forme graphique ou sous forme de valeurs numériques. Après l'extraction des rasters des quantiles des pluies pour différentes durées, la présentation est réalisée sous forme cartographique. Les paramètres libres (durée d'intérêt, période de retour et surface considérée) rendent difficilement envisageable une exportation systématique. C'est pourquoi, nous nous bornerons aux quantiles les plus utiles.

### *Statistique*

Comme évoqué tout au long du rapport, l'analyse régionale des pluies a été rendue possible grâce à des statistiques descriptives, afin de caractériser les événements extrêmes (quantiles) en tout point du territoire pour enfin décrire les courbes d'Intensité-Durée- Fréquence (IDF), de Pluie-Durée-Fréquence (PDF) et celles de Pluie-Durée-Aire-Fréquence (PDAF). Ces analyses ont été précédées du nettoyage de données afin de réduire les erreurs dues aux radars pouvant conduire à de fortes variabilités dans les calculs statistiques.

### *Résultats du filtrage des données*

Afin de vérifier de manière formelle la présence des erreurs radar à partir du comportement des données spatiales, nous avons tout d'abord procédé à l'analyse variographique. Ensuite nous avons soumis ces données au filtrage par seuil et le filtrage par géostatistique via la méthode du krigeage.

### *Variogrammes des pluies*

La figure 17 présentée ci-dessous, illustre les variogrammes des pluies en trois dimensions (dimension Ouest-Est, Sud-Nord et temporelle). Ces variogrammes ont été calculés avec des données brutes avant de procéder au filtrage. L'analyse variographique que nous avons présenté au paragraphe 2.3.1.2, est l'une des deux étapes de la géostatistique. Elle consiste à décrire la structure spatiale et de voir l'augmentation de la variabilité entre les points de mesure lorsque la distance augmente. Le variogramme est un outil formel qui permet de détecter les anomalies dans les données spatiales. Il s'intéresse à la variabilité en général et il reste correct dans la mesure où les valeurs aberrantes ne sont pas très nombreuses.

Figure 17. Variogrammes des pluies en 3 dimensions.

Nous rappelons que l'analyse variographique de données a été réalisée en trois dimensions à savoir : la dimension Ouest-Est, Sud-Nord et temporelle. Sur l'axe des abscisses, le graphique porte le décalage ou la distance entre les points de mesure séparés de 1 km (pour la vue spatiale) ou 5 minutes (pour la vue temporelle). L'axe des ordonnées porte la variabilité des pluies exprimée en mm<sup>2</sup>.

Ce graphique présente des courbes de variogrammes pour des pluies non-nulles et l'intermittence. Au regard des variogrammes des pluies non-nulles, il ressort l'absence d'effet de pépite. Cela résulte de l'absence de fortes variations entre des mesures des pluies rapprochées. De plus, chaque variogramme présente un palier et une portée. Cela permet d'observer l'endroit où il n'y a plus de

corrélation entre les valeurs mesurées lorsque la distance augmente. Du point de vue temporel, nous observons un palier à partir d'un décalage d'environ 20 minutes. Cette limite marque le délai après lequel les pluies deviennent indépendantes les unes des autres. En regardant sur la vue spatiale de ces pluies, les paliers s'observent à partir d'environ 8 à 14 km et ceci marque l'indépendance des données. En nous focalisant sur les variogrammes de l'intermittence, nous observons que l'effet de pépète est nécessairement présent sur toutes les dimensions. Cela pourrait s'expliquer du fait qu'il s'agit d'une variable discontinue de Bernoulli. Ensuite, sur environ 20 km et 100 minutes, respectivement pour les dimensions spatiale et temporelle, aucun palier n'est observé. Autrement dit, l'intermittence des pluies n'atteint pas d'indépendance aux échelles observées. En définitive, que ce soit pour les pluies non-nulles ou pour l'intermittence, toutes les deux ne suivent pas de direction préférentielle et la variabilité peut donc être considérée comme spatialement isotrope. Par ailleurs, il est important de noter qu'après l'analyse variographique ci-dessus, les valeurs aberrantes détectées par la méthode du krigeage, pourraient être remplacées par leurs estimations. Ce qui serait un apport très utile, mais pas suffisant du fait que la méthode du krigeage se base sur le voisinage rapproché pour estimer une valeur observée ou manquante. Cette approche a permis essentiellement de bien estimer les artéfacts isolés parmi les vraies pluies ayant des valeurs proches.

### *Image radar avant et après le filtrage*

La figure 18 ci-dessous, présente les résultats du filtrage de données radar.

Figure 18. Illustration du filtrage : A gauche Image radar avant le filtrage. A droite Image radar après le filtrage

Comme cela a été expliqué au paragraphe 2.3.1 , avant le filtrage, la plupart des phénomènes non météorologiques possédaient des valeurs supérieures à 50 mm au pas de temps de 5 minutes. C'est l'une des raisons qui nous avait conduit à soumettre nos données au filtrage.

La figure à gauche présente l'image radar avant le filtrage. Sur cette image, nous observons visiblement la présence des phénomènes non météorologiques. L'image à droite a été réalisée avec un seuil absolu de 36 mm selon notre hypothèse. C'est ce seuil qui nous a permis de supprimer tous les artéfacts qui étaient visibles sur l'image initiale. Plusieurs images radar ont été vérifiées de la même façon. En comparant les deux images, il ressort une différence visible. Nous observons la suppression de tous les artéfacts qui étaient visibles sur l'image avant le filtrage. Ces valeurs aberrantes représentent environ 1% de l'ensemble de pluies non-nulles de départ. Globalement, la méthode du filtrage que nous avons développé, a permis de nettoyer le fichier de données radar. Ces résultats constituent pour nous une étape car nous avons enfin travaillé avec des données relativement saines.

#### 3.1.2. Cas d'étude : Echantillon sup-seuil d'une chronique des pluies dans le département de l'Ardèche.

Étant donné le nombre des chroniques disponibles, nous nous focaliserons ici sur un seul pixel. Chaque point de l'image radar, correspond à une chronique de pluies de 10 années que l'on peut appréhender en statistiques descriptives. La figure 19 en est un exemple pour un pixel localisé dans le département de l'Ardèche. Dans cette figure, nous ne présenterons que les résultats de quelques éléments des statistiques descriptives associés aux chroniques de pluies obtenus en appuyant sur le bouton de l'interface correspondant à cette requête.

Figure 19. Illustration des statistiques descriptives d'une chronique des pluies (échantillon sup-seuil pour le département de l'Ardèche) Pour un échantillon sup-seuil de plusieurs durées (5, 15,

30 et 4320 minutes), les éléments descriptifs sont donnés. Nous observons pour chaque durée le nombre de données des pluies non-nulles observées (OBS.n), la moyenne de l'intermittence des pluies (Ind.m), la moyenne des pluies non-nulles (PNN.m), l'écart-type (PNN.s), la pluie d'une période de retour 1 an ( $x_0$ ), le gradex (gr) et la pluie décennale ( $p_{10}$ ). Nous observons également la série de neuf plus fortes valeurs des événements pluvieux sur 10 ans et leur date précise. gradient des valeurs extrêmes de survenue.

Ces informations pourraient déjà permettre à l'équipe IRIP de confronter nos résultats aux données de l'aléa ruissellement à leur disposition. Regarder par exemple ce qui s'était produit aux différents endroits du territoire, aux dates et heures indiquées. Aussi, confronter ces résultats aux données de dégâts et voir si ces événements ont été enregistrés aux dates et heures indiquées. Les données de dégâts sont disponibles à Irstea k et viennent de la base de dégâts développée par Saint-Martin et al. (2016). Ces résultats peuvent intéresser plus d'un chercheur, afin de remonter dans le temps et voir ce qui s'était passé concernant la crue, l'inondation ou le ruissellement. Cela pourrait apporter une valeur ajoutée à la gestion de l'environnement car à notre connaissance, ces données ont été utilisées à des fins de prévisions et non pas pour celles à caractère climatologique.

Les courbes : IDF, PDF, PDAF Comme nous l'avons présenté au point 2.2.3, une fois qu'on sait estimer les paramètres de la loi généralisée de Pareto (GPD) en tout point du territoire, on peut alors proposer une représentation graphique qui met en relation l'intensité, la durée, la fréquence (ou période de retour T) et la surface. Le quantile étant la valeur associée à chaque période de retour, par exemple un quantile associé à la période de retour  $T=10$  ans, donnera la valeur de la pluie décennale suivant l'équation 16. Nous rappelons le principe : La représentation graphique de la relation précitée pour une seule durée est nommée courbe d'IF ‡, pour plusieurs durées, ce sont les courbes d'IDF. Ensuite, lorsque ces courbes sont réalisées pour une surface donnée, on parle dans ce cas des courbes d'IDAF. †† Enfin, lorsqu'on décide de mettre en relation les pluies fortes (quantiles), la durée et la fréquence, on parle de PDF† et de PDAF‡‡ lorsque cette dernière relation est fonction d'une surface. Toutes ces analyses sont des variantes d'une seule et même approche, mais appliquées à des variables d'intérêt pluviométriques différentes. k. Institut de recherche scientifique et technologique sur l'eau et l'agriculture ‡. Intensité-Fréquence . Intensité-Durée-Fréquence ††. Intensité-Aire-Durée-Fréquence †. Pluie-Durée-Fréquence ‡‡. Pluie-Durée-Aire-Fréquence

### *Les courbes IDF*

La figure 20, nous présente les courbes qui mettent en relation l'intensité, la durée et la fréquence réalisées pour 11 pas de temps notamment 5,15, 30 minutes et 1, 2, 3, 4, 6, 12, 16, 24 heures pour de période de retour de 10 ans.

Figure 20. Représentation graphique des courbes IDF

Comme évoqué plus haut, ces courbes viennent confirmer pour les lames d'eau radar, la relation qui existe entre ces trois paramètres (intensité-durée-fréquence). Nous observons que pour une même fréquence d'apparition d'une pluie forte (pour le même temps de retour), l'intensité de cette pluie est d'autant plus forte que sa durée est courte. Par exemple pour ces courbes IDF obtenues sur les Cévennes et pour une pluie décennale ( $T=10$ ), les intensités d'environ 45 et 80 mm par heure correspondent aux durées respectives de 1 heure et de 30 minutes. Nous voyons bien que l'intensité

est plus élevée pour une faible durée. Les précipitations extrêmes de courte durée peuvent dépasser la capacité d'infiltration du sol, cela pourrait engendrer l'aléa ruissellement selon la vision de Horton (1933).

### *Les courbes PDF*

La figure 21 présente la relation entre le quantile, la durée et la fréquence.

Figure 21. Représentation graphique des courbes PDF

Nous observons sur les courbes PDF l'augmentation des quantiles avec la durée. Pour une même période de retour (exemple 10 ans), plus les pluies sont cumulées plus la hauteur des pluies décennales est élevée ce qui est assez logique. Signalons que, les courbes de PDF ont leur utilité mais sont strictement équivalentes aux IDF quant aux informations apportées. Le comportement des courbes PDF est typique à la vision du ruissellement Hewlettien selon laquelle le ruissellement se forme par refus d'infiltration après saturation du sol provoquée par l'accumulation des pluies de longues durées.

### *Les courbes PDAF*

La figure 22 présente les courbes de pluie, durée, surface et fréquence.

Figure 22. Représentation graphique des courbes de PDAF

Cette figure montre l'exemple des courbes de pluie-durée-surface-fréquence pour les surfaces allant de 1 à 256 km<sup>2</sup>. Les quantiles correspondant à un pixel (1 km<sup>2</sup>) sont en rouge.

Pour des surfaces de domaines plus grande, les quantiles sont moindres.

L'information apportée par ces courbes consiste à montrer la notion de l'abattement.

Ainsi, pour une quantité de pluie donnée, la probabilité de l'observer est plus grande en moyenne sur un point ponctuel ou une petite surface que sur de grandes surfaces.

Notons cependant que à l'échelle du bassin versant, l'impact d'une pluie forte dépend aussi des autres caractéristiques géométriques comme son relief et sa forme. Par exemple la forme d'un bassin versant pourrait influencer l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire.

La forme allongée favorise, pour une même pluie, les faibles débits de pointe de crue, ceci en raison des temps d'acheminement de l'eau à l'exutoire plus importants. Les courbes PDAF ignorent cet aspect pour ne retenir que l'effet de la superficie.

### *La cartographie*

Comme annoncé depuis le début, notre mission était d'étudier les pluies fortes à l'échelle de la France métropolitaine et les présenter sous différentes formes dont l'une est la cartographie. A l'aide de notre interface, nous avons créé des rasters des quantiles des pluies pour 11 durées et 5 surfaces différentes. 3.2.1. Les cartes rasters des quantiles Figure 23. Illustration des cartes rasters lissées par la méthode de Hosking et Wallis : (A) sans lissage, (B) lissage avec 3 km d'écart-type, (C) lissage avec 9 km écart-type Avant de mettre en forme nos cartes rasters sous les SIG § , nous les avons lissées. Les cartes à la figure 23 nous présentent les résultats des lissages effectués par la méthode de Hosking et Wallis afin de supprimer les fluctuations dues à de fortes variabilités dans nos échantillons. Comme cela a été évoqué au paragraphe 2.3.2.1, ces lissages ont été réalisés sous un noyau gaussien, d'une part à partir d'un écart-type de 3 km et d'autre part par un écarttype de 9 km.

Le lissage n'est pas que cosmétique, il représente une hypothèse hydrologique qui est l'homogénéité locale. Il est traité de façon statistiquement appropriée. La première image (A) présente la carte réalisée avant le lissage. Les fluctuations sont visibles et se présentent par des irrégularités sur l'image. C'est pour cela que nous avons tenté le premier lissage (B), avec les moyennes mobiles à 3 km d'écart-type, afin de supprimer ces fluctuations. Cependant, les résultats n'étant pas satisfaisants nous avons augmenté l'écart-type à 9 km. Cela nous a permis de supprimer ces fluctuations comme nous le montre l'extrait de la carte (C). Enfin, nos cartes lissées ont été placées sous SIG pour leur mise en forme.

### *Cartographie des quantiles des pluies*

Dans cette partie, nous présenterons les cartes de quantiles pour quelques résolutions spatio-temporelles. La période de retour définie étant de 10 ans, à l'échelle de la France métropolitaine.

#### A. Distribution géographique des quantiles

Afin d'avoir une vision spatialisée des pluies fortes en France métropolitaine, la figure 24 présente la répartition géographique des quantiles des pluies pour une résolution spatiale de 1 km<sup>2</sup> et une résolution temporelle de 5 minutes. Figure 24. Répartition géographique des quantiles de pluies pour une durée de 5 minutes Il est intéressant d'observer comme évoqué dans les généralités (cf. figure 5) que toute la France est concernée par les pluies fortes. La région méditerranéenne est caractérisée par des valeurs relativement fortes, comparé au reste du territoire. La partie majeure au nord du territoire est dominée par de quantiles faibles. Les contreforts du massif central, les Pyrénées orientales, le sud-est (Var, Alpes maritime) et les Cévennes vivarais qui sont connus par de pluies intenses, sont déjà bien représentés pour des quantiles de 5 minutes. Par contre les valeurs faibles observées dans les Alpes externes sont ambiguës car nous savons que les radars sont difficilement accessibles dans les Alpes internes mais pas dans les Alpes externes. A notre connaissance, l'effet d'abri existe mais il se pourrait que cette sous-estimation de mesures provienne de l'effet de masque de radar dû à son inaccessibilité à certains endroits masqués par les chaînes de montagne. Nous observons également de fortes pluies aux endroits qui sont en général caractérisés par de pluies faibles par exemple les départements de Finistère, de Loire-Atlantique et de Maine et Loire. Globalement, les hauteurs de précipitations sont plus élevées au sud et diminuent vers le Nord. Les cartes de résolutions temporelles de 30 minutes et d'une heure pour la même résolution spatiale (1 km<sup>2</sup>) ont été réalisées (cf rapport complet). Elles montrent avec plus de précision de fortes précipitations localisées dans la région méditerranéenne comparativement à la carte de 5 minutes. En conclusion cette carte des quantiles en 5 minutes montre une continuité des événements pluvieux qui en général ne sont pas visibles sur les cumuls. Ce qui représente une vraie valeur ajoutée pour l'étude des pluies dans les petits bassins versants, afin de pouvoir mieux étudier les aléas (érosion, ruissellement, etc.).

#### B. Distribution statistique des pluies décennales

La figure 25 présente la distribution des quantiles décennaux d'après notre base radar. Figure 25. Distribution spatiale de quantiles décennaux de 5 minutes Dans l'histogramme de la figure précédente (figure 24), nous observons des valeurs usuelles variant entre environ 4 et 14 mm de hauteur. Le quantile de 6 mm est la plus observée et représente 15%. La réalité des valeurs inférieures à 4 mm paraît devoir être confirmée. Par ailleurs, après le lissage de données par la méthode de Hosking et Wallis, la valeur maximale s'élève à 21 mm de hauteur. En supprimant le

lissage de la carte à partir de l'interface précédemment décrit, nous retrouvons approximativement de valeurs des pluies observées à partir des pluviomètres au sol. Nous citons par exemple les évènements pluvieux du 09 novembre 2014 (25 mm) et du 28 juillet 2013 (28 mm) observés respectivement dans les départements de Var et de Gard. La régionalisation de Hosking et Wallis (1997) revient à diluer ces évènements sur le voisinage. Les histogrammes de résolutions temporelles de 30 minutes et de 3 heures pour la même résolution spatiale (1 km<sup>2</sup>) ont été réalisées (cf rapport complet). Nous observons bien l'augmentation générale des quantiles avec la durée. Curieusement, la valeur la plus fréquente de 13 mm est la même pour la durée de 30 minutes et de 3 heures.

### C. Distribution géographique des quantiles pour une surface fixée

La figure 26 présente la carte régionale des quantiles des pluies sur les pas de temps de 5 minutes et de surface de 256 km<sup>2</sup>.

Figure 26. Répartition spatiale des quantiles sur des zones de 256 km<sup>2</sup>

Sur les quantiles des pluies régionalisés, nous observons une diminution de l'échelle avec des quantiles variant entre 0 et 12 mm de hauteur. Comparativement à la surface de 1 km<sup>2</sup>, la tendance globale est la même avec moins de pluie pour la surface de 256 km<sup>2</sup>. Nous observons par exemple de faibles quantités des pluies dans les départements de Jura, de Haut-Rhin et de Doubs qui montraient de fortes valeurs des pluies ponctuelles. Pour la même surface, les cartes ont été réalisées (cf rapport complet). Sur les pas de temps de 30 minutes et de 3 heures, nous observons de différences à proprement dites entre elles. Plus la durée augmente moins on a de précision sur des quantiles de base au pas de temps de 1 km<sup>2</sup>. Les Cévennes et le Languedoc-Roussillon se dessinent clairement pour le pas de temps de 3 heures. Dans l'ensemble de la France, les quantiles deviennent moins visibles lorsque la surface augmente. Les deux cas (augmentation de la durée, augmentation de la surface) correspondent à un même effet d'échelle affectant les pluies fortes.

Discussion et perspectives Les résultats de notre étude reposent notamment sur la qualité des données utilisées en entrée. Nous montrerons tout d'abord les améliorations de cette qualité dans notre étude et nous proposerons des méthodes pour affiner le filtrage et/ou les résultats. Ensuite, nous effectuerons une analyse critique de l'intérêt mais aussi des limites de la méthodologie afin de dégager des perspectives d'amélioration.

### *Qualité des données de base et validation des résultats*

Qualité des données de base Les données utilisées sont celles qui ont été collectées de 2006 à 2016 et qui ont servi à la réalisation des modèles de prévision en temps réel qui permettent d'alerter les réseaux hydrologiques français des risques de crues et d'inondations. Elles ont été utilisées sans ambiguïté au pas de temps horaire dans plusieurs études, par exemple pour la modélisation pluie-débit (Caseri, 2017 ; Emmanuel, 2011). Afin de mieux appréhender le comportement du ruissellement intense pluvial, il a été proposé d'utiliser les données à leur pas de temps de base de 5 minutes. Cependant, un simple contrôle visuel a mis en lumière des phénomènes non-météorologiques captés par les radars. Ceci nous a amené à développer différentes méthodes de pré-traitement des données de base. Ces méthodes nous ont permis de supprimer visiblement les phénomènes non météorologiques qui étaient présents dans le fichier initial.

Validation des résultats Les résultats de notre étude ont été obtenus grâce aux analyses statistiques appropriées aux évènements extrêmes. Cependant, pour son utilisation, nous proposons deux démarches pouvant permettre de les valider.

1. Démarche de validation : Elle consiste à rapprocher la cartographie des pluies fortes que nous avons réalisé à celle de la pluviométrie au sol au pas de 6 minutes pour la même période. C'est tenter de valider des mesures riches en terme de résolution à des valeurs fiables, quoique d'une densité beaucoup plus faible. méthode IRIP de détermination de l'aléa de ruissellement intense

2. Démarche de fusion des données : Elle consiste à faire l'ajustement spatialisé sur toute la lame d'eau radar (tout le fichier de données) au pas de 5 minutes à partir des données des mesures pluviométriques au sol au pas de 6 minutes. Ce qui permettra de nettoyer tout le fichier à l'amont afin d'éviter les erreurs dues à l'ajustement horaire effectué par Météo-France. Notons qu'il s'agit de méthodes extrêmement lourdes qui restent toute fois réalisables.

### *Intérêts et limites de la méthodologie*

Intérêts Cette étude a permis de travailler sur des données conçues à l'origine pour faire des modèles de prévisions des crues et d'inondations afin de résoudre un problème hydrologique. Nous les avons exploitées à leur pas de temps de base que Météo-France n'utilise pas sous l'angle climatologique à notre connaissance. Pour réaliser les prévisions, elle se sert des images en temps réel. Le filtrage par la méthode du seuil et par la méthode de géostatistique a permis de supprimer les artéfacts qui auraient pu conduire à des analyses statistiques erronées. Deux observations situées l'une près de l'autre spatialement devraient, en moyenne être plus semblables que deux observations éloignées. Cet argument de nature géostatistique nous a permis de filtrer nos données de manière réaliste. La méthodologie de l'analyse de fréquence régionale basée sur la théorie des moments linéaires a été d'une grande importance pour mener à bien cette étude et atteindre notre objectif. Sans cette méthode, nous ne pourrions arriver à la régionalisation de nos données pour enfin, cartographier les quantiles de période de retour.

Limites Compte tenu du mauvais rapport entre le temps imparti et le volume de travail à réaliser, il convient de signaler que notre méthodologie présente un certain nombre de limites. D'une part, nous n'avons pas pu mettre en place les chemins de drainage permettant d'étudier les pluies fortes à l'échelle de bassins versants particuliers. Ce qui nous auraient permis au delà des pluies fortes par superficie arbitraire, de déterminer aussi les pluies des bassins versants concrets. D'autre part, nous n'avons pas pu confronter nos données d'entrée à des données de la pluviométrie au sol (6 minutes), telles que celles collectées par la ville de Lyon et disponibles à Irstea k. Globalement, cela nous aurait permis de faire un jugement objectif sur nos données d'entrée avant sa validation complète.

### *Perspectives d'amélioration*

Ce travail doit être considéré comme une première étape qui mériterait de nombreux approfondissements comme :

- rapprocher la cartographie des pluies fortes à celle de la méthode de l'Indicateur du Ruissellement Intense Pluvial (IRIP) afin de réaliser la cartographie du ruissellement intense conditionnée par la pluie. La cartographie ainsi réalisée, permettrait de préciser de manière objective, les endroits du territoire français les plus exposés aux écoulements intenses.

- Inclure le chemin de drainage sur toute la France afin d'extraire les pluies des bassins. Cela permettrait au delà de la connaissance des pluies fortes en intensité- durée fréquence comme déterminée par zone homogène, de rajouter la surface pour avoir les courbes d'IDAF propres à chaque bassin. Ces courbes sont très utiles dans le sens où elles constitueront un moyen pertinent de connaissance des pluies fortes tombées relativement à une surface donnée et à une période de retour donnée. De telles données constitueront le point de départ pour mieux se protéger contre les inondations, en déterminant l'impact qu'auraient les pluies fortes, selon qu'elles se trouveraient dans un bassin versant élémentaire ou un grand bassin versant. La superficie d'un bassin versant est un paramètre hydrologique incontournable puisque la quantité d'eau drainée est proportionnelle au bassin (taille, forme etc.).
- Étudier le phénomène d'épicentrage qui consiste à évaluer la relation entre la variabilité des phénomènes locaux, et leur occurrence au sein d'un territoire donné, ou le long d'une ligne donnée (par exemple sur une ligne de transport)
- Enfin, rajouter dans cette étude l'information sur la répartition des pluies fortes selon les saisons. Cela permettrait par exemple de mieux traduire les nuances entre les différents climats.

## ***4- Description du modèle IRIP***

**S. Bonnet Carrier, L.R. Lagadec, P. Breil**

---

IRIP est une méthode permettant de produire des cartes de susceptibilité au ruissellement de surface intense. La méthode permet de produire trois cartes reflétant trois étapes de ruissellement de surface: génération (ou production), transfert et accumulation. La carte de susceptibilité de la production de ruissellement de surface représente les zones les plus à même de constituer une accumulation d'eau par excès de la pluie ou par saturation du profil de sol peu profond. Une pente minimale permet la mise en mouvement de cette accumulation. La carte de susceptibilité du transfert de ruissellement de surface représente les zones favorables à l'accélération de l'eau de surface, ce qui lui confère une capacité d'érosion et de transport. La carte de susceptibilité de l'accumulation de ruissellement de surface représente les zones où le ruissellement de surface se concentre (talweg et zones en dépression) ou ralentit en cas de rupture concave des pentes et où le niveau d'eau peut augmenter. Les zones d'accumulation correspondent à des zones de dépôt. Le concept de méthode IRIP est basé sur l'analyse de différents facteurs de paysage qui peuvent être plus ou moins favorables au ruissellement de surface et dont les effets cumulatifs peuvent conduire à des conditions très favorables pour l'occurrence de ruissellement de surface.

IRIP est une méthode géomatique. Le tableau 1, 2 et 3 de la susceptibilité à l'occurrence du ruissellement de surface sont dérivés de quatre données d'entrée: un modèle numérique d'élévation (DEM), une carte des sols, une carte d'utilisation des terres et les réseaux linéaires de surface. A partir d'un modèle numérique de terrain, on obtient cinq indicateurs: la pente, la rupture de la pente, l'index topographique [29], le facteur de forme [30] et l'accumulation de flux. A partir de la carte des sols, sont dérivés trois indicateurs: la perméabilité du sol, l'épaisseur et l'érodibilité. Un indicateur est dérivé de la carte d'utilisation du sol et un autre du réseau linéaire de surface. De plus, la carte de la génération de ruissellement de surface devient un indicateur d'entrée après reclassement pour les deux autres cartes. Les indicateurs topographiques sont calculés sur chaque pixel par rapport au sous-captage associé au pixel. Chaque indicateur peut être favorable ou non favorable au ruissellement de surface. A chaque pixel, 1 est attribué si l'indicateur est favorable au ruissellement de surface et 0 s'il n'est pas favorable (Tableau 1, 2 et 3). Chacune des trois cartes est créée en ajoutant 5 indicateurs. Par conséquent, les cartes résultantes sont trois cartes de susceptibilité de la génération, du transfert et de l'accumulation de ruissellement de surface, avec une échelle de 0 à 5 niveaux (0 faiblement sensible et 5 très sensible).

Une version logicielle, appelée IRIP ©, a été développée par la SNCF pour son propre usage et est utilisée pour cette étude.

La méthode IRIP produit des cartes de sensibilité et est indépendante du risque météorologique. Pour obtenir une carte de risque de ruissellement, les cartes IRIP doivent être combinées avec les précipitations.

Permeabilité	0: sol perméable
	1: Sol peu perméable
Epaisseur	0: Sol épais
	1: Sol peu épais
Erodibilité	0: Sol peu érodable
	1: Sol érodable
Topographie	0: Pente < $t_1$ ET indice topographique < $t_2$
	1: Pente > $t_1$ OU indice topographique > $t_2$
Occupation du sol	0: Occupation du sol infiltrante
	1: Occupation du sol imperméabilisante

Tableau 1. Détail des indicateurs utilisés pour créer la carte IRIP de la susceptibilité à la Production (ou Génération) de ruissellement de surface et leurs valeurs possibles

Prédisposition de l'amont à la production	0: Faiblement prédisposé
	1: Fortement prédisposé
Pente	0: Pente < $t_1$
	1: Pente > $t_1$
Rupture de pente	0: Rupture de pente concave
	1: Rupture de pente convexe
Compacité	0: Indice de Horton faible
	1: Indice de Horton fort
Axes linéaires au sol	0: Pas d'axe linéaire
	1: Présence d'axes linéaires

Tableau 2. Détail des indicateurs utilisés pour créer la carte IRIP de la susceptibilité au transfert de ruissellement de surface et leurs valeurs possibles.

Prédisposition de l'amont à la production	0: Faiblement prédisposé
	1: Fortement prédisposé
Pente	0: Pente > $t_1$
	1: Pente < $t_1$
Rupture de pente	0: Rupture de pente convexe
	1: Rupture de pente concave
Indice topographique	0: Indice topographique < $t_2$
	1: Indice topographique > $t_2$
Aires drainées amont	0: Petite surface drainées
	1: Grande surface drainées

Tableau 3. Détail des indicateurs utilisés pour créer la carte IRIP de la susceptibilité à l'accumulation de ruissellement de surface et leurs valeurs possibles.

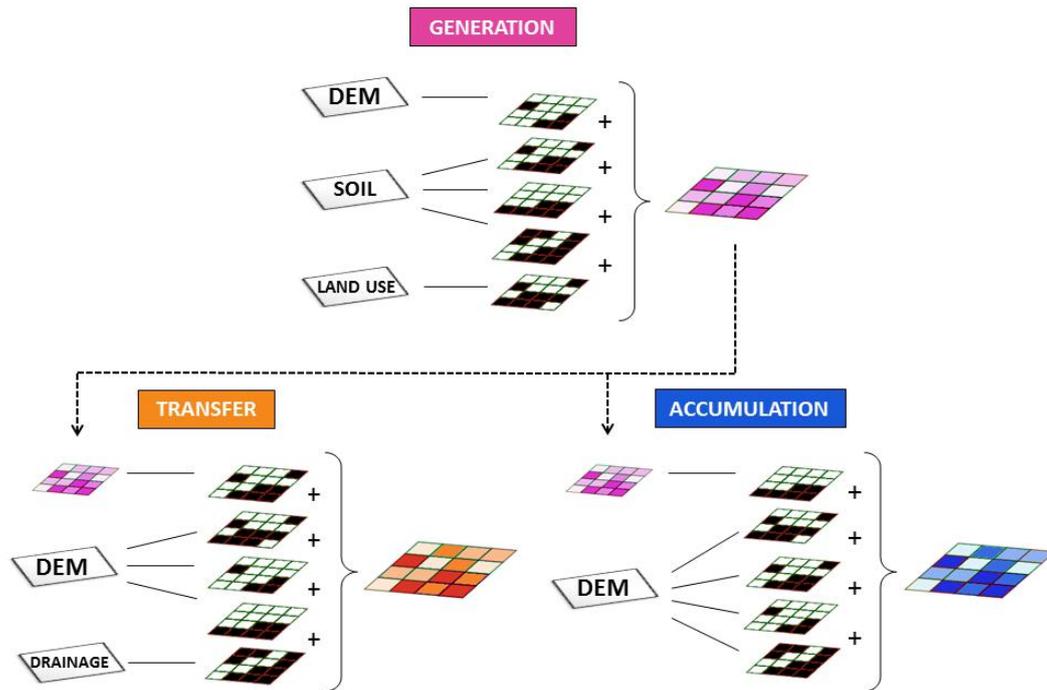


Figure : Schéma de la méthode IRIP et combinaison des données d'entrée et de la carte de génération pour produire trois cartes de susceptibilité de génération, de transfert et d'accumulation de ruissellement de surface sur une échelle de six niveaux, de 0 à 5

D'après des études antérieures menées pour évaluer la pertinence des cartes IRIP, plusieurs points ont été tirés et certaines hypothèses ont été soulevées. En comparant les cartes IRIP aux zonages réglementaires des risques, il existe des accords entre la carte d'accumulation IRIP et le réseau talweg sec et entre la carte IRIP de transfert et le risque d'érosion des sols. Cependant, certaines parties de la carte d'accumulation de IRIP correspondent également aux zones à risque d'érosion des sols. L'hypothèse est que la carte d'accumulation montre également les zones de dépôt de sédiments. La comparaison entre les cartes IRIP et les enquêtes post-événement permettent de discuter de cette hypothèse. De plus, des études antérieures ont porté sur les cartes IRIP de transfert et d'accumulation.

## 5- Fiche DGPR du modèle IRIP

P. Breil



### Groupes de travail ruissellement Fiche de renseignement modèle

Cette fiche est destinée à synthétiser les principales caractéristiques d'un modèle, avec notamment son utilisation potentielle, ses avantages et ses inconvénients. En principe, une fiche doit être consacrée à un seul modèle. Cependant, si une famille de modèles peut être décrite plus facilement dans une seule fiche, en présentant les caractéristiques communes (très majoritaires) et les nuances (légères) qui différencient les membres de la famille, une seule fiche peut être utilisée. L'ensemble de la fiche restera de préférence dans la limite de quatre pages.

Dénomination	IRIP : Indicateur du ruissellement Intense Pluvial  Vocation : mettre en relief de manière rapide dans un territoire les zones les plus susceptibles de provoquer des aléas liés au ruissellement intense dans les versants et les talwegs. Concerne les événements de ruissellement liés à des pluies intenses de quelques kilomètres carrés et sans connexion systématique avec les cours d'eau.
Auteur/ propriétaire / porteur	- Auteurs : Dehotin et Breil (2011) - Propriété intellectuelle de la méthode : Irstea - Propriétaire du logiciel IRIP avec interface utilisateur : SNCF - Porteurs : Irstea pour la recherche et SNCF pour ses besoins propres.
Distribution (gratuit, payant, open- source, limitations d'utilisations éventuelles...)	Actuellement en usage limité aux applications recherche et développement et missions d'appui aux services de l'État.  En étude une version libre fonctionnant en ligne sur internet, permettant d'extraire sa zone d'étude à partir des couches d'entrée générales (MNT, infosol, CLC) ou de données plus précises ainsi que les données d'évaluation-calage à déposer dans une base Irstea et servant de ressource pour continuer l'amélioration d'IRIP.
Langage de programmation et type de plate-forme	- Développement : Python - Résultats : cartes au format raster exploitables par tout SIG pour post-traitements.
Temps de calcul (donner une information sur le calculateur utilisé)	Dans la version actuelle, le calcul est réalisé sur PC en 32 bits. Le temps de calcul dépend de la quantité de mailles (surface territoire / résolution du raster). A titre indicatif : - MNT 10Mo, 50Mo, 130 Mo -> Temps de calcul : env.10min, 45mn, 120mn. - La France entière a été traitée à la maille de 25m en 244 sous bassins et environ 180 min chacune.
Type (pluie- débit uniquement, hydraulique, couplé, autre)	La donnée pluie-radar de Météo-France (maille kilométrique) a été caractérisée en PdF (Pluies-durées-Fréquences) par régionalisation géostatistique en 2017. La méthode IRIP utilise cette donnée dans les couches d'entrée en comparant par exemple la quantité de pluie sur une 1 heure pour T=30 ans à celle de la capacité . La comparaison des avec qui permet de filtrer les mailles de la carte de production qui ruissellent pour cette période de retour. On obtient alors des cartes de ruissellement intense qualifiées en période de retour. A l'expérience des cas de terrain étudiés, une période de retour $\geq$ à 30 ans est nécessaire pour générer des dégâts liés au ruissellement intense.

-

Page 1 sur 5

GT ruissellement : fiche modèle

Résolution (global, semi-distribué, distribué, point de grille...)	Modèle distribué - La résolution est similaire à la maille du MNT en donnée d'entrée (métrique avec lidar , 5, 25 ou 30 m selon source IGN, Aster,...).	
Données en entrée	- MNT - Données pédologiques ou/et géologiques - Occupation des sols - Réseaux linéaires : routes, voies ferrées, fossés, (optionnel)	
Processus physiques pris en compte dans le modèle (i.e. réalisme physique du modèle)	Le modèle Irip utilise une logique hydrologique des écoulements selon un plan de drainage 8 directions calculé à partir du MNT. Les processus physiques sont résumés par 3 cartes qui expriment le potentiel à produire du ruissellement, le potentiel à transférer et le potentiel à accumuler, cela à partir de 5 facteurs favorables calculés sur le territoire d'étude pour chaque carte. Les potentiels transfert et accumulation dépendent de celui de la production.	
Paramètres en sortie (hauteurs, débits, périmètres inondés...)	Les potentiels sont exprimés par des scores de 0 à 5 car un calcul numérique n'aurait pas de sens étant considéré les natures et les incertitudes en valeurs des différentes couches d'entrée du modèle (MNT, pédologie/géologie, OS avec effets saisonniers des cultures). Les combinaisons des trois cartes permettent de chaîner les trajectoires du ruissellement et selon les potentiels traversés, de cartographier les types d'aléas associés.	
Potentiel d'utilisation pour des applications opérationnelles	-Diagnostic de territoire pour pré-ciblage rapide des zones les plus sensibles au ruissellement intense et cartographie du risque; permet de cibler des études plus fines avec données plus précises et modèles de simulation plus physiques pour dimensionner des ouvrages. -Priorisation des zones d'action de lutte contre l'érosivité et l'accumulation du ruissellement mais aussi pour la réduction de la production du ruissellement intense ; -Identification des zones pour la redirection des axes de transfert créant une situation de risque pour l'aval (coulée de boue, submersion, dépôt en masse) -Délimitation des zones humides potentielles pouvant servir de protection contre les aléas du ruissellement intense (démarche GEMAPI) à même d'impacter des des éléments vulnérables en aval (routes, bâti,...).	
Exemples d'utilisation opérationnelle ou, à défaut, R&D (service, type d'usage)	- CATNAT (ex : Lucheux, Costaros-Goudet, Biot-Valauris) - PPRi (Lézarde, Grand Chalon) - TRI (Le Havre, Nantes) - Gestionnaires d'infrastructures linéaires (SNCF, routes)	
Évaluations réalisées (protocole, conclusions)	Le ruissellement intense se manifeste dans les versants et les talwegs où aucune mesure directe des flux d'eau et de matières ne peut être exploitée de manière statistique sur de grand territoire faute de données. C'est la raison de la « méconnaissance » des modèles hydrologiques sur ces processus de versant.  Un dispositif de mesures dédiées a été réalisé pour évaluer IRIP sur un bassin expérimental de 8 km <sup>2</sup> (Dehotin et al., 2015) . Il a confirmé les processus physiques de ruissellement (zones de production, zone de transfert, zone d'accumulation) localisés par IRIP dans le bassin expérimental. En dehors de mesures directes, l'évaluation porte sur des données liées aux conséquences (coulées de boue, coupures d'axes de circulation), à des résultats d'observation et de modélisation de l'érosion (WaterSed, Rusl, Stream,Lisem), ou	
-	Page 2 sur 5	GT ruissellement : fiche modèle

	<p>des vidéo prises durant les événements. Ces différentes possibilités ont été utilisées pour évaluer les cartes produites par la méthode IRIP depuis 2009 en différents points du territoire de la France métropolitaine. Les vidéos donnent accès à la dynamique du processus et confirment la succession des étapes production-transfert-accumulation (Biot, Vallauris, Lucheux).</p> <p>Le principe de l'évaluation repose sur la coïncidence géographique entre les mailles à fort potentiel de ruissellement (aléa fort) et les données liées aux manifestations du ruissellement (érosion coulée de boue, inondation, dépôts solides, impacts sur ouvrages,...). L'évaluation peut-être qualitative « par comparaison d'un phénomène observé à un type d'aléa prédit » - c'est alors une méthode de diagnostic a posteriori. L'évaluation peut être quantitative quand le nombre de données liées est suffisant pour développer des analyses basées sur des statistiques de contingence (bassin de l'Austreberthe, ligne SNCF) comme le Khi-2, le Phi et les métriques des matrices basées sur les vrais-faux positifs et les vrais-faux négatifs.</p> <p><b>En conclusion :</b> Les résultats obtenus au travers des différentes approches menées sur différents bassins versants en France (Nord, Sud, Centre, Ouest) ont montré une réelle capacité de la méthode IRIP à prédire des contextes favorables aux impacts des aléas liés au ruissellement intense pluvial. Les prédictions sont d'autant meilleures que la vulnérabilité des éléments exposés est prise en compte (Thèse Lagadec, 2017). Le modèle IRIP et ses métriques d'efficacité sont adaptés à la nature des données d'entrées et des données d'évaluation.</p>
Types de bassins modélisés de manière satisfaisante	<p>Bassin périurbain de Biot – 10 km<sup>2</sup> - où les anciens villages construits sur les crêtes amplifient la production et déclenchent des coulées boueuses qui impactent les activités en vallée. Pluies intenses du 3 octobre 2015 – 109 mm en 2 h - bons recouvrements avec les coulées de boue recensées et avec les zones d'accumulation d'eau vues dans une vidéo tournée durant l'événement ;</p> <p>Bassin agricole de l'Austreberthe - 230 km<sup>2</sup> - (76) : 1376 incidents recensés par le syndicat de bassin dont 615 hors EAIP-CE. IRIP prédit 95% des incidents hors EAIP pour 21% de surface du bassin classé en fort potentiel de ruissellement . La combinaison IRIP-WaterSed prédit 88 % d'incidents pour 15 % du bassin. La zone EAIP couvre 11.8 % du bassin ;</p> <p>Versants essentiellement ruraux interceptés par ligne train Rouen-Le Havre sur 80 km (# 450 km<sup>2</sup>) (Thèse Irstea-SNCF de LR Lagadec, 2017) : 100 % de prédiction des 62 incidents sur 183 tronçons découpés selon leur vulnérabilité. La méthode prédit 30 % de faux positifs en plus (=risques prédits non observés).</p> <p>Bassin forêts-cultures de Lucheux (80) – Orage stationnaire du 7 juin 2016 – 92.6 mm en 1h15 - Saisine du préfet de la Somme pour évaluation de Lucheux en CatNat – Cartes IRIP en accord avec localisation des zones de production, genèse de la coulée de boue et nombreuse données terrain ainsi que vidéo tournée durant l'événement. (Breil et al., 2016).</p> <p>Bassin avec gradient rural à urbain de Vallauris (06) – Avec l'événement pluvieux intense du 3 octobre 2015 – 109 mm en 2 h – Interprétation des cartes IRIP colle avec données terrains et vidéo tournée durant événement, ce qui permet de comprendre l'enchaînement ruissellement d'origine urbaine puis rurale;</p> <p>Bassin agricole de la Lézarde (76) – recoupement entre zonage érosion et aléa de transfert fort IRIP – recoupement entre routes coupées lors d'un orage violent et les aléas forts de transfert et d'accumulation de IRIP. (Lagadec et al., 2015).</p> <p>Bassin forêts-prairies du Mercier (69) - dispositif métrologique expérimental d'évaluation des processus physiques mis à l'œuvre lors du ruissellement intense dans les différentes étapes (production, transfert, accumulation) vues par IRIP. Confirmation statistique. (Dehotin et al., 2015)</p>

Types de bassins plus difficilement modélisés	Sol et géologie très perméable dans bassin en forêt et prairies. Cas de Costeros et Goudet (Haute Loire, 43) – orage du 13 juin 2017 – 193 mm en 2h (« 3em record de France »)- communes passées en CatNat; La visite de terrain réalisée montre peu d'effet érosif en versants alors que les sols sont de faible épaisseur et vus par IRIP comme favorables au ruissellement. L'analyse de la géologie révèle des coulées de laves fissurées qui marquent le paysage par des « marches ». Une recherche bibliographique indique que les coulées de lave peuvent présenter une macro-porosité de fissure qui confère une perméabilité importante. Cela a favorisé le transfert rapide vertical puis latéral du ruissellement au contact de sous-couches, puis le drainage vers les talwegs qui ont eux fortement réagi. Cette information a permis d'améliorer les indicateurs à prendre en compte dans IRIP au niveau de la production. On peut maintenant dire que des pluies exceptionnelles n'impliquent pas systématiquement un ruissellement intense en versant, d'où l'intérêt d'une cartographie basée sur les caractéristiques au sol.	
Améliorations prévues	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Version en ligne en usage libre associée à base de données incidents</li> <li>- Amélioration de la vitesse de calcul</li> <li>- Utilisable avec projection WGS 84 pour collaborations internationales</li> </ul>	
Principaux articles publiés	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dehotin J., Chazelle B., Laverne G., Hasnaoui A., Lambert L., Breil P., Braud I. (2015) Mise en oeuvre de la méthode de cartographie du ruissellement IRIP pour l'analyse des risques liés aux écoulements sur l'infrastructure ferroviaire. La Houille Blanche, n° 6, 2015, p. 56-64. <a href="https://www.shf-lhb.org/articles/lhb/abs/2015/06/lhb20150069/lhb20150069.html">https://www.shf-lhb.org/articles/lhb/abs/2015/06/lhb20150069/lhb20150069.html</a></li> <li>- Dehotin, J., Breil, P., Braud, I., de Lavenne, A., Lagouy, M., Sarrazin, B. (2015). Detecting surface runoff location in a small catchment using distributed and simple observation method. J. Hydrology, 525, 113–129. <a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415001638">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415001638</a></li> <li>- Fressignac C., Breil P., Matillon Y., Nullans A., Chazelle B., Sarrazin B., Vallod D. (2016). Assurer la maîtrise du ruissellement grâce aux zones humides au voisinage des infrastructures de transport dans une perspective de conservation de la biodiversité. La revue électronique en sciences de l'environnement. <a href="http://vertigo.revues.org/17406">http://vertigo.revues.org/17406</a></li> <li>- Lagadec L.R., Patrice P., Braud I., Chazelle C., Moulin L., Dehotin J., Hauchard E., Breil P. (2016). Description and evaluation of a surface runoff susceptibility mapping method. Journal of Hydrology, Volume 541, Part A, October 2016, Pages 495–509 ; <a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002216941630316X">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002216941630316X</a></li> </ul>	
Autres informations	<p>Fin 2016 et durant 2017 un travail de test de complémentarité des modèles IRIP(Irstea) et WaterSed (BRGM) a été réalisé. Ce test a mis en évidence sur 3 bassins versants différents la convergence des cartographies au sens de la production du ruissellement, des zones d'érosion en versant et en ravine et des zones d'accumulation d'eau et de sédiment. Une proposition d'avenir consiste à utiliser WaterSed sur les secteurs identifiés à risque par IRIP (aléas ruissellement intense IRIP X vulnérabilités) pour développer des études de faisabilité d'aménagements et d'ouvrages.</p> <p>Par ailleurs il est vérifié sur le bassin de l'Austreberthe que les combinaisons des cartes IRIP-WS permettent d'atteindre de très bon niveaux de détection, cela avec des surfaces contributives au ruissellement proches de celle de l'EAIP-CE.</p> <p>L'utilisation de données sols plus appropriées (European Soil Data Center) et le calcul de facteurs dérivés de ruissellement plus stables ont aussi permis d'améliorer les cartographies et les taux de détection. La prise en compte de la vulnérabilité a permis d'atteindre des taux de détection des impacts très performants sur le réseau ferré.</p> <p>On peut aujourd'hui conclure qu'IRIP peut servir à mettre en relief les zones à forts aléas de ruissellement intense dans un territoire. Les niveaux de potentiel à conserver doivent s'appuyer sur différentes sources d'informations locales déjà utilisées en évaluation avec IRIP, comme les zonages érosion, les fréquences des déclarations CatNat, les bases de données incidents (coupures de routes,...). De là, il est possible de développer l'étude de risques.</p>	
-	Page 4 sur 5	GT ruissellement : fiche modèle

## 6- Description du modèle WaterSed (version anglaise)

R. Vandromme, O. Cerdan

---

### WATERSED model description

The WATERSED model is a non-dynamic model using a raster-based distributed approach to model the spatial distribution of runoff and soil erosion within a catchment for a given rainfall event. The WATERSED model is an upgrade of the STREAM model (Cerdan et al., 2001; Souchere et al., 1998) which simulates the hydrological processes by conceptualizing each raster grid cell as a reservoir whose properties are calculated at the event-scale, and by routing water and sediment according the surface flow network and predefined functions. The elements of the conceptual framework of the STREAM model and new functionalities of the WATERSED model are presented below.

#### Hydrologic module

##### Hydrologic balance

For a given rainfall event, the state of each cell is given by the hydrologic balance, called  $HB_{R_i}$  (mm), (Cerdan et al., 2001) as:

$$HB_{R_i} = R_i - IR_i - (\theta \cdot IC_i \cdot t_{eff_i}) \quad (1)$$

Where  $R_i$  is the rainfall amount for the cell  $i$  (mm),  $IR_i$  the amount of rainfall needed to reach soil saturation (mm),  $IC_i$  the steady-state infiltration rate ( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ), and  $t_{eff_i}$  the effective rainfall duration (min). Positive values mean an excess rainfall after initial and continuous abstractions, and on the contrary, negative values indicate potential infiltration for upstream runoff.

Variations around the infiltration rate value defined by expert-judgement is possible, an adjustment parameter  $\vartheta$  is introduced. The validity of the Eq. 1 is assumed to be reasonable for a small catchment, where the flow travel time to the outlet is similar to the effective rainfall duration. For large catchment, where flow travel times could be much longer than the effective rainfall duration, the application of Eq. 1 results in a large underestimation of re-infiltration processes. To improve the limitation of the STREAM model, the WATERSED model now estimates the continuous abstraction for the runoff duration for each cell. Runoff duration needs the estimation of the velocity and the flow travel time of each grid cell.

##### Flow velocity and flow travel time

The average excess rainfall intensity,  $e_i$  ( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ) can be derived from the excess rainfall,  $E_{R_i}$  (mm or  $\text{m}^3$ ), as:

$$e_i = \frac{E_{R_i}}{t_{eff_i}} \quad (2)$$

Overland flow travel time in a grid cell is estimated using Manning's formula (Chow, 1988; Melesse and Graham, 2004). Using this methodology, the overland flow velocity,  $V_{H_i}$  ( $m.s^{-1}$ ), is calculated as:

$$V_{H_i} = \frac{S_i^{0.3} L_i^{0.4} e_i^{0.4}}{n_i^{0.6}} \quad (3)$$

Where  $S_i$  is the slope of surface in cell  $i$  ( $m.m^{-1}$ ),  $L_i$  is the flow length of the cell, i.e. equal to cell size or north-south and east-west flow, and equal to  $\sqrt{2}$  times cell size for diagonal flow directions, and  $n_i$  is the Manning's roughness coefficient ( $s.m^{-1/3}$ ).

The channel flow velocity,  $V_{C_i}$  ( $m.s^{-1}$ ), is estimated by combining Manning's equation and the steady state continuity equation for a wide channel (Chow, 1988; Muzik, 1996) as:

$$V_{C_i} = S_i^{0.3} \left( \frac{Q_i}{W_i} \right)^{0.4} n_i^{-0.6} \quad (4)$$

Where  $Q_i$  is the cumulative discharge through the cell, obtained by summing upstream flow contributions and the contribution from precipitation excess for that cell  $i$  ( $m^3.s^{-1}$ ), and  $W_i$  is the channel width (m).

To avoid unrealistic velocities values on hillslope and channel, a minimum velocity of  $0.02 m.s^{-1}$  and a maximum velocity of  $2 m.s^{-1}$  are applied based on the common range incorporated into hydrologic models (Grimaldi et al., 2010). Based on overland and channel flow velocity, the travel time of each cell is computed by dividing travel distance by cell velocity.

#### *Runoff duration and flow routing*

The flow through a given cell during the runoff duration can be described with a runoff hydrograph. A triangular unit hydrograph was chosen. From this concept, the lag time (i.e. the time from the centroid of rainfall to the runoff peak) is calculated for each cell by summing up upslope travel time, weighted by the cumulative discharge. The effective rainfall is assumed to be equally distributed over time and the centroid of the effective rainfall is  $t_{eff_i}/2$ . Therefore, the time to peak  $T_{P_i}$  (h) is obtained by summing up the lag time,  $L_i$  (h), and  $t_{eff_i}/2$  as:

$$T_{P_i} = \frac{t_{eff_i}}{2} + L_i \quad (5)$$

The runoff duration, also called time of concentration,  $T_{C_i}$  (h), is derived from the time to peak  $T_{P_i}$  and a recession parameter,  $\alpha$  (-), as:

$$T_{C_i} = T_{P_i} + \alpha \cdot T_{P_i} \quad (6)$$

Large errors are generally recognized on the estimation of the time of concentration for similar models (Grimaldi et al., 2012). An incorrect estimation of this parameter implies errors on the re-infiltration estimations. A recession parameter was introduced to adjust re-infiltration and to take into account potential errors on the flow travel time estimations. Thus re-infiltration is reevaluated based on the runoff duration  $T_{C_i}$  for each cell.

In the WATERSED model, the flow is routed according two flow direction algorithms. Both Multiple Flow Direction (MFD) and Single Flow Direction (SFD) are used, depending on the local slope value. For values under 2% the flow is routed using MFD, allowing the flow to diverge over large flat areas. Over 2%, the flow is concentrated in a single width cell, corresponding to SFD. This threshold was chosen from fields surveys, comparing the gully, rills, and the sediment deposits, with the terrain attributes (Cerdan et al., 2002a).

Water volumes are accumulated at the catchment scale from the runoff / infiltration balance calculated for each cell taking account of the runoff flow network. A two-step calculation allows cells to re-infiltrate the totality or a part of generated upstream surface runoff. Accordingly, the hydrological balance is calculated once at the beginning of the simulation and a second time during the flow routing.

Using the total runoff volume through the cell,  $V_i$  ( $m^3$ ), the runoff duration, and assuming a triangular unit hydrograph for each cell, a runoff peak,  $Q_{P_i}$  ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ), is computed as:

$$Q_{P_i} = \frac{2V_i}{T_{C_i}} \quad (7)$$

## Sediment module

### *Sheet and gully erosion*

The model assumes that topography, soil surface characteristics, and rainfall characteristics are the main determinants for interrill and concentrated erosion (Cerdan et al., 2002c; Martin, 1999). For interrill erosion, a table is used to assign a potential sediment concentration in the flow,  $SC_i$  ( $g \cdot l^{-1}$ ), to each combination of soil surface characteristics and rainfall intensity (Cerdan et al., 2002b). The corresponding interrill erosion,  $SE_{S_i}$  (kg), is calculated as:

$$SE_{S_i} = E_{R_i} \cdot SC_i \quad (8)$$

where  $E_{R_i}$ , (mm or  $m^3$ ), is the excess rainfall. Gully erosion occurs when the peak discharge on a hillslope grid cell exceeds a critical peak discharge,  $Q_{crit}$  ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ), defined as a model parameter. The

critical peak discharge can be estimated by comparing the location of gullies on aerial photography and those predicted by the model.

A gully is assumed to be rectangular and unique per cell. The calculation of the cross section requires first the gully width,  $W_{G_i}$  (m), calculated from an empirical relationship developed by [Nachtergaele et al., \(2002\)](#) as:

$$W_{G_i} = 2.51Q_{peak_i}^{0.412} \quad (9)$$

Next, flow velocity,  $V_{G_i}$  ( $m \cdot s^{-1}$ ) is computed according to the empirical relationship developed by [Govers, \(1992\)](#) as:

$$V_{G_i} = 3.52Q_{peak_i}^{0.294} \quad (10)$$

Then gully height,  $H_{G_i}$  (m), is deduced from the gully width  $W_{G_i}$ , the gully velocity  $V_{G_i}$ , and the peak discharge  $Q_{peak_i}$ , as:

$$H_{G_i} = \frac{Q_{peak_i}}{W_{G_i}V_{G_i}} \quad (11)$$

The gully cross section,  $A_{G_i}$  ( $m^2$ ) is finally determined from the gully width  $W_{G_i}$  and the gully height  $H_{G_i}$  (Eq. 12). A maximum cross section value of  $0.25 \text{ m}^2$  is fixed in order to avoid unrealistic values. The gully volume  $VOL_{H_i}$  ( $m^3$ ) is then obtained by multiplying this cross section of incision by the grid cell length (Eq. 13). The gully volume is weighted by a soil erodibility factor,  $EF_i$  (-), in the range [0-1] computed from rules adapted from the methodology developed by [Souchère et al., \(2003a\)](#) to determine the sensitivity to gully erosion.

$$A_{G_i} = W_{G_i} \cdot H_{G_i} \quad (12)$$

$$VOL_{H_i} = A_{G_i} \cdot L_i \cdot EF_i \quad (13)$$

Last, the gully erosion,  $SE_{G_i}$  (kg) is calculated by multiplying the gully volume  $VOL_{H_i}$  by the bulk density,  $\rho$  ( $kg \cdot m^{-3}$ ), as:

$$SE_{G_i} = VOL_{H_i} \cdot \rho \quad (14)$$

Therefore, the gross erosion,  $SE_i$  (kg), of a cell corresponds to the sum of the interrill erosion and gully erosion as:

$$SE_i = SE_{S_i} + SE_{G_i} \quad (15)$$

#### *Sediment yield and deposition*

At the catchment scale, sediments are transported in proportion of the runoff volumes. For cell  $i$  producing runoff, the mass of sediment leaving this cell,  $SY_i$  (kg), is expressed as:

$$SY_i = SY_{\alpha} + SE_i \quad (16)$$

Where  $SY_\alpha$  is the mass of sediment coming from upslope cells (kg), and  $SE_i$  is the gross erosion (kg). Sediment deposition occurs in two cases. First, if a cell has the potential to infiltrate a part or the totality of the upslope runoff, the mass of deposited sediment,  $SD_i$  (kg) (Eq. 17), corresponds the product of the infiltrated water volume,  $I_i$  (m<sup>3</sup>), and the mean suspended sediment concentration of the flow,  $\overline{SC}_i$  (g.l<sup>-1</sup>) (Eq. 18).

$$SD_i = I_i \cdot \overline{SC}_i \quad (17)$$

$$\overline{SC}_i = \frac{SY_\alpha}{Q_\alpha} \quad (18)$$

In this case, the sediment yield becomes:

$$SY_i = SY_\alpha + SD_i \quad (19)$$

Second, sediment deposition occurs when the mean suspended sediment concentration of the flow  $\overline{SC}_i$  exceeds the suspended sediment concentration for the sediment transport capacity,  $SC_{TC_i}$  (g.l<sup>-1</sup>).

In this case, the sediment yield is calculated as:

$$SY_i = Q_i \cdot SC_{TC_i} \quad (20)$$

Where  $Q_i$  (m<sup>3</sup>) is the runoff volume leaving the cell  $i$ . The mass of deposited sediment is then deduced as:

$$SD_i = SY_\alpha - SY_i \quad (21)$$

In the STREAM model, the suspended sediment concentration for the transport capacity  $SC_{TC_i}$  is defined as a fixed threshold value for topography and vegetation cover. This definition means the same  $SC_{TC_i}$ , regardless of water depth (i.e. flow energy). A new formulation of  $SC_{TC_i}$  is thus proposed in the WATERSED model, by weighting the mean suspended sediment concentration in the flow  $\overline{SC}_i$  by a ratio between the hydraulic resistance of vegetation, expressed by the Manning's roughness coefficient  $n_i$ , and the submergence of the cell expressed by the mean water depth  $h_i$  (m) (Eq. 22).

$$SC_{TC_i} = \overline{SC}_i \cdot \exp\left(-\beta \cdot \frac{n_i}{h_i}\right) \quad (22)$$

Where  $\beta$  is a decay parameter (-). The mean water depth  $h_i$  is calculated by dividing the runoff volume  $Q_i$  with the runoff duration  $T_C$  and the contributing area,  $A_i$  (m<sup>2</sup>) as:

$$h_i = \frac{Q_i}{T_C \cdot A_i} \quad (23)$$

When runoff and sediment reaches the river, they are directly delivered to the most downstream end of the river link. The model does not predict riverbank erosion or within channel storage.

## 7- Fiche DGPR du modèle WaterSed

R. Vandromme, O. Cerdan



Groupe de travail ruissellement

### Fiche de renseignement modèle

Cette fiche est destinée à synthétiser les principales caractéristiques d'un modèle, avec notamment son utilisation potentielle, ses avantages et ses inconvénients. En principe, une fiche doit être consacrée à un seul modèle. Cependant, si une famille de modèles peut être décrite plus facilement dans une seule fiche, en présentant les caractéristiques communes (très majoritaires) et les nuances (légères) qui différencient les membres de la famille, une seule fiche peut être utilisée. L'ensemble de la fiche restera de préférence dans la limite de quatre pages.

Dénomination	WATERSED : Modélisation du ruissellement et de l'érosion des sols.
Auteur/propriétaire / porteur	BRGM
Distribution (gratuit, payant, open-source, limitations d'utilisations éventuelles...)	Distribution gratuite sur demande (o.cerdan@brgm.fr)
Langage de programmation et type de plate-forme	- Toolbox SAGA GIS ( <a href="http://www.saga-gis.org">http://www.saga-gis.org</a> , logiciel libre en C++)
Temps de calcul (donner une information sur le calculateur utilisé)	- fonction de la résolution spatiale des données et de l'étendue de la zone d'étude. Exemple : une dizaine de secondes pour 300 km <sup>2</sup> à 25x25m ou 15 minutes pour 25 km <sup>2</sup> à 1x1 m.
Type (pluie-débit uniquement, hydraulique, couplé, autre)	- Modélisation hydrologique et géomorphologique
Résolution (global, semi-distribué, distribué, point de grille...)	- Résolution fonction de celle des données d'entrée, en général la résolution du MNT. - Modèle distribué
Données en entrée	- Modèle numérique de terrain + cours d'eau - Données sols (texture, RU, etc) - Occupation des sol (RPG, RGA, BDTopo, télédétection, etc.) - évènement pluvieux
Processus physiques pris en compte dans le modèle (i.e. réalisme physique du modèle)	- Ruissellement par dépassement de capacité d'infiltration (hortonien) ou par saturation - simulation des processus hydrologiques par conceptualisation réservoir pour chaque pixel - routage des flux multidirectionnel - calcul sur toutes les cellules du domaine pour chaque évènement pluvieux
DGPR/SRNIH/SCHAPI	Page 1 sur 3
GT ruissellement : fiche modèle	

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Processus d'érosion concentrée et laminaire</li> <li>- Ruissellement et érosion post-incendie</li> <li>- Drainage agricole</li> </ul>	
Paramètres en sortie (hauteurs, débits, périmètres inondés...)	<p>Multiples rasters liés aux écoulements liquides (e.g. volume, temps de montée de l'hydrogramme, débit de pointe, coefficient de ruissellement local) et de matières solides (e.g. masse de matières en suspension, concentration moyenne dans les eaux)</p>	
Potentiel d'utilisation pour des applications opérationnelles	<ul style="list-style-type: none"> <li>- PPRI ruissellement</li> <li>- carte d'aléa inondation par ruissellement</li> <li>- coulée de boue</li> <li>- Aléa érosion</li> </ul>	
Exemples d'utilisation opérationnelle ou, à défaut, R&D (service, type d'usage...)	<p>Opérationnel : plusieurs études opérationnelles sur les territoires de Lucheux, Scarpe amont, Oise, Hangenbieten, Pays de Caux, Loiret.  Recherche : Intégration dans des projets de recherche au Japon (Fukushima), Brésil, Belgique, Cauterets (Pyrénées), Seine Maritime, Bassin de la Loire, Mayotte, Corse, Louroux (région centre), Pouille (Italie)...</p>	
Évaluations réalisées (protocole, conclusions)	<p>Evaluations sur bassins jaugés en Seine Maritime, Mayotte, Japon, Corse, Louroux. Intercomparaison avec d'autres modèles au sein de l'action COST CONNECTEUR, Brésil</p>	
Types de bassins modélisés de manière satisfaisante	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Voir liste de bassin tests ci-dessus</li> </ul>	
Types de bassins plus difficilement modélisés	<p>Bassins avec fonte de permafrost, Bassins très karstifiés sans donnée sur les pertes des karsts</p>	
Améliorations prévues	<p>Intégration onde cinématique</p>	
Principaux articles publiés	<p>Rousseau M., Cerdan O., Delestre O., Dupros F., James F., Cordier S. 2015. Overland flow modelling with the Shallow Water Equation using a well-balanced numerical scheme: Adding efficiency or just more complexity? <i>Journal of Hydrologic Engineering</i></p> <p>Delmas, M., Pak, It., Cerdan, O., Souchere V., Le Bissonnais Y., Couturier A., Sorel L. 2012. Water and sediment transfer from the field to the river in an agricultural catchment of the European Loess belt, <i>Journal of Hydrology</i> 420-421, 255-263.</p> <p>Landemaine V. (2016) - Erosion des sols et transferts sédimentaires sur les bassins versants de l'Ouest du Bassin de Paris : analyse, quantification et modélisation à l'échelle pluriannuelle. Thèse Université de Rouen</p> <p>Landemaine et al., submitted. The scale dependency of erosion and runoff for three agricultural catchments in the Western Paris Basin, France</p>	
DGPR/SRNH/SCHAPI	Page 2 sur 3	GT ruissellement : fiche modèle

Autres informations	<p>Fin 2016 et durant 2017 un travail de test de complémentarité des modèles IRIP(Irstea) et WaterSed (BRGM) a été réalisé. Ce test a mis en évidence sur 3 bassins versants différents la convergence des cartographies au sens de la production du ruissellement, des zones d'érosion en versant et en ravine, de manière distinctes, et des zones d'accumulation d'eau et de sédiment.</p> <p>Par ailleurs il est vérifié que les combinaisons permettent d'atteindre de très bon niveaux de détection des 615 incidents hors EAIP sur le bassin de l'Austreberthe, cela avec des surfaces contributives au ruissellement représentant environ 15 % du bassin versant.</p> <p>L'amélioration des facteurs dans IRIP en 2017 a tiré profit de ces similitudes entre un modèle à « grand rendement » simple à mettre en œuvre (Irip) et un modèle proche de la physique des processus (WaterSed). Une proposition d'avenir consiste à utiliser WaterSed sur les secteurs identifiés à risque avec Irip (aléas ruissellement intense IRIP X vulnérabilités) pour développer des études de faisabilité d'ouvrages.</p>
---------------------	---



## Résumé

L'évaluation de la méthode IRIP de cartographie des aléas liés au ruissellement intense pluvial a été poursuivie en 2017.

L'analyse de la signification physique des 3 cartes IRIP de Production, Transfert et Accumulation a montré des taux de similitudes cohérents avec les 7 cartes thématiques quantitatives du modèle WaterSed calé sur 3 bassins tests. Ainsi la carte de Production IRIP présente-t-elle des similitudes avec les cartes des volumes ruisselés, infiltrés et d'érosion diffuse. La carte de Transfert est aussi liée aux volumes ruisselés et érodés, diffus et concentrés. Enfin la carte d'accumulation indique des correspondances avec les volumes ruisselés, infiltrés et les érosions/dépôts au pixel. La correspondance avec l'infiltration est liée aux faibles valeurs de Production et d'Accumulation des cartes IRIP.

La capacité de détection des quelques 1300 incidents d'inondation, répertoriés sur l'Austreberthe a été testée avec les modèles IRIP et WaterSed ainsi qu'au travers d'une gamme de combinaisons basées sur leurs similitudes et complémentarités. Pour un tampon de 50m autour des mailles à forts aléas le taux de détection avoisine 70% pour 30% de territoire en aléas forts. Pour un tampon de 100m il est possible d'atteindre 88% de détection avec 15% de territoire en combinant une carte IRIP avec une carte WaterSed. Enfin, une version améliorée d'IRIP (IRIP+) permet d'atteindre 93% de détection avec 18% de territoire.

En complément de l'étude réalisée sur l'Austreberthe, il est mis à profit les résultats de la thèse de L.R. Lagadec (soutenue le 5/12/2017) qui a évalué IRIP dans le contexte ferroviaire. La détection de 93% des 64 incidents sur 80 km de ligne est atteinte, avec 28% de fausses alarmes, en intégrant les aspects de vulnérabilité et de protection. Une application du modèle IRIP sur une autre ligne de 20 km, résolution de 5m, planifiée pour une opération de régénération, permet de retrouver les 16 tronçons pré-ciblés sur 61 que comporte cette ligne, avec 26% de fausses alarmes.

La cartographie France entière des quantiles de pluie fortes a été entamée. Elle a permis dans un tout premier test en 2017 d'améliorer le taux de prédiction des incidents dans la zone d'enjeux de l'Austreberthe. Des applications plus poussées sont attendues comme la définition des grandes zones croisant la pédologie et régionalisation des pluies intenses à longues, ceci afin de définir les zones de test de la méthode IRIP à l'échelle nationale. De même, ces données vont permettre de revisiter des événements extrêmes passés pour vérifier les cartes IRIP.

Au global, les tests réalisés en 2017 sur des jeux de données à valeur statistique montrent que le modèle IRIP sans calage, mais en intégrant des informations locales sur la vulnérabilité des enjeux, permet de retrouver plus de 90% des incidents recensés avec un peu moins de 30% de fausses alarmes. Ces dernières devraient être contrôlées a posteriori sur le terrain pour les situations à risque.

Le modèle IRIP sans calage confirme donc son applicabilité en mode de diagnostic du territoire pour les aléas liés au ruissellement intense.