



HAL
open science

Rapport technique du projet IRIP : Cartographie de l'aléa ruissellement

J. Dehotin, Pascal Breil

► **To cite this version:**

J. Dehotin, Pascal Breil. Rapport technique du projet IRIP : Cartographie de l'aléa ruissellement. [Rapport Technique] irstea. 2011, pp.76. hal-02595951

HAL Id: hal-02595951

<https://hal.inrae.fr/hal-02595951v1>

Submitted on 15 May 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.



Rhône-Alpes Région

Projet IRIP : Rapport technique

Cartographie de l'aléa ruissellement

Note méthodologique

Juillet 2011

DEHOTIN J., BREIL P.

Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique

Cemagref – centre de Lyon, 3 bis quai Chauveau
CP 220, 69336 LYON cedex 09 FRANCE
Tél : (+33) 4 72 20 87 87
Fax : (+33) 4 78 47 78 75



Avant propos

Le besoin pour une méthode de cartographie des inondations par ruissellement intense pluvial a été identifié en 2009 au sein d'un groupe de travail animé par le GRAIE¹ et portant sur la prise en compte des eaux pluviales dans les documents de planification et d'urbanisme. Il est apparu lors de l'élaboration du Guide² édité par ce groupe de travail, un manque méthodologique sur le diagnostic territorial du risque d'inondation par ruissellement, les approches développées par les bureaux d'études relevant le plus souvent d'une expertise locale.

Le projet a été monté par le Cemagref de Lyon sur une durée de 21 mois avec le soutien financier de la Région Rhône-Alpes (Le montant total de la subvention accordée est de 61402) ainsi que celui de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse (Montant de la subvention de 15.240 euros).

Le comité de pilotage qui s'est réuni 3 fois a regroupé les financeurs, des représentants de services opérationnels comme le GRAND-LYON, la DREAL, des bureaux d'étude comme la SAFEGE et REALITES-Environnement qui nous a rejoint en fin de projet, des experts scientifiques des ruissellements rural et urbain de l'INSA de Lyon, de l'INRA de Thonon-les-Bains et le GRAIE comme acteur important du transfert méthodologique dans le domaine de l'Eau. Nous tenons ici à remercier tous les participants à ce comité pour leurs remarques et contributions efficaces tout au long du projet.

Le pari a été pris de coupler l'analyse géomatique à une vérification des processus physiques sur le terrain via une campagne d'observation. La validation des prédictions cartographiques sur de grands territoires a été réalisée par confrontation avec des études disponibles, conduites par des collectivités locales (sur des territoires du Grand Lyon, d'un bassin de la commune de Vienne, Le bassin de la Loire Amont, le bassin du Garon) ainsi que par croisement avec les déclarations de la base de données des arrêtés de Catastrophes Naturelles³ connues à l'échelle communale. Les résultats sont prometteurs et une confrontation de méthodes est d'ores et déjà engagée dans le cadre des travaux menés au niveau national par le Bureau des Risques Majeurs⁴ sur le risque d'inondation par ruissellement. La méthode cartographique proposée offre aussi des perspectives intéressantes en matière d'impact des aménagements futurs et donc de prévention.

L'ambition finale du projet qui est de fournir une méthode de référence aux collectivités pour accéder à un diagnostic de leur territoire en matière de ruissellement intense devrait se poursuivre via un partenariat avec des Assistants à Maître d'Ouvrage dans l'élaboration de PPRI par ruissellement.

¹ www.graie.org

² www.graie.org/graie/graiedoc/doc_telech/guidepurba.pdf

³ www.pim.net

⁴ Ministère chargé de l'écologie/DGPR

SOMMAIRE

<i>I- Contexte, enjeux et objectifs</i> _____	7
I-1- Contexte et enjeux _____	7
I-2- Problématique de cartographie du ruissellement intense _____	8
I-3- Démarche générale adoptée dans le cadre du projet _____	10
<i>II- Cartographie de l'aléa spatial du ruissellement : L'analyse ANSETR</i> _____	12
II-1 L'ANalyse de la SEnsibilité d'un TErritoire au Ruissellement (ANSETR) _____	12
II-1-1 Rappel des facteurs de prédisposition du milieu qui influencent le ruissellement _____	12
II-1-2 Les différentes étapes de l'analyse ANSETR. _____	16
II-1-3 ANSETR : Une analyse de complexité progressive. _____	26
II-2 Précision des données et usage des cartes issues de l'analyse ANSETR. _____	30
II-2-1 Approche globale adoptée _____	31
II-2-2 Quels usages potentiels des cartes selon la précision des données d'entrée ? _____	32
II-2-3 La question des incertitudes sur les cartes issues de l'analyse ANSETR _____	37
II-3 Evaluation de la méthodologie ANSETR _____	38
II-3-1 Evaluation sur de grands territoires _____	39
II-3-2 Évaluation sur de petits territoires – données précises _____	41
II-3-3 Analyse de sensibilité selon la précision des données d'entrée _____	51
II-4 Données requises et algorithme pour réaliser l'analyse ANSETR _____	53
II-4-1 Point sur le pré-traitement des données _____	53
II-4-3 Description de l'algorithme de cartographie _____	54
II-4-2 Mise en œuvre de l'analyse avec les solutions SIG existants _____	55
<i>III- Quelques cas d'applications</i> _____	56
III-1 Cas du bassin versant de la Loire Amont _____	56
III-2 Cas du bassin versant du Garon _____	62
III-3 Cas de la commune de Genay _____	66
III-4 Cas de Saint Marcel (Vienne) _____	69
III-5 Cas du bassin de la Merdari (Givors) _____	71
IV- Discussions _____	73
<i>Références bibliographiques</i> _____	74

I- Contexte, enjeux et objectifs

I-1- Contexte et enjeux

D'après la base de données des arrêtés de catastrophe naturelle en France (BD Gaspar⁵ de 1982-2010), 85% des sinistres déclarés catastrophes naturelles sont liés aux inondations (Figure 1). **Les inondations par ruissellement et coulée de boues représentent 43% des inondations**, contre 42% pour les inondations par débordement de rivières (Figure 2). Au-delà des réserves qu'on peut émettre sur cette base de données, notamment celles liées aux évolutions de terminologies utilisées pour distinguer des inondations par ruissellement dans ladite base de données (Douvinet 2006), ces chiffres montrent clairement son importance par rapport aux autres causes d'inondation en France.

La Directive Inondation de l'Union Européenne de 2007 impose aux états membres de l'union la prise en compte du volet ruissellement dans les plans de prévention des risques naturels, aujourd'hui absent des divers documents de prévention français. Cela tient au fait qu'il n'existe pas aujourd'hui de méthodologie robuste et spécifique pour identifier les zones où peut se produire des inondations et coulées de boues par ruissellement intense.

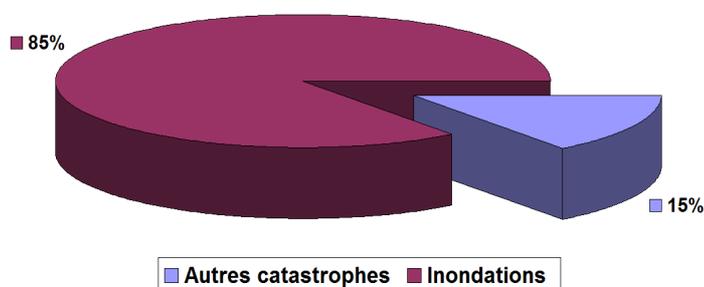


Figure 1 : Part des inondations dans les arrêtés de catastrophes naturelles en France (1982-2010).

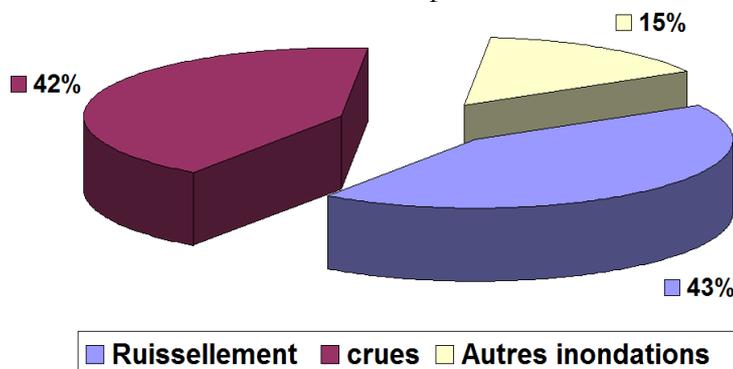


Figure 2 : Part des inondations par ruissellement dans les inondations déclarées catastrophes naturelles en France (1982-2010).

Le diagnostic proposé aujourd'hui pour les inondations par ruissellement repose sur des méthodes d'analyses hydrologiques qui ont été développées pour étudier les débits dans des cours d'eau, et ne permettent souvent pas de détecter les zones sensibles aux inondations par ruissellement, ni les axes de ruissellement qui sont parfois éloignés de tout cours d'eau ou talweg. **L'inexistence de méthodes spécifiques liées aux inondations par ruissellement** a été soulevée récemment par un groupe d'étude du Graie sur les eaux pluviales (Brelot et al. 2009). Ce groupe de travail qui rassemble plusieurs acteurs de l'agglomération lyonnaise avait insisté sur la nécessité de développer une réponse scientifique globale aux problèmes rencontrés dans le diagnostic du ruissellement.

⁵ Source : www.prim.net

I-2- Problématique de cartographie du ruissellement intense

Le caractère intense qualifie le ruissellement et non la pluie, car des pluies soutenues et non intenses peuvent provoquer du ruissellement intense. Le ruissellement peut être figuré par la notion de lame d'eau visuellement appréciable et constituée en surface d'un sol situé hors d'un cours d'eau. Souvent masqué par la végétation il peut atteindre quelques centimètres dans les zones plates de genèse du ruissellement. Le terme intense sera donc implicite par la suite.

A la suite d'un événement pluvieux, une lame d'eau peut se constituer depuis une aire de collecte (*zones contributives ou zones de production*) en surface sur un bassin versant. Cette lame d'eau générée est *transférée* vers l'aval sous l'impulsion de la pente et orientée par la micro-topographie. Tout ou partie de cette lame d'eau peut s'infiltrer au cours de son transfert dans le versant. Elle peut être aussi restituée à la rivière ou encore *s'accumuler* dans des points bas ou derrière une barrière à l'écoulement, qu'elle soit naturelle ou artificielle. Il faut aussi noter qu'il peut y avoir production suivie d'accumulation, sans axe de transfert. Selon les enjeux situés sur les chemins d'écoulement (axes de transfert) ou les zones d'accumulation, cette dynamique peut occasionner des dégâts par transport de matériaux, sape de fondations ou créer des inondations par ruissellement. La figure (3) illustre parfaitement cette dynamique d'amont vers l'aval d'un versant pouvant conduire à une inondation par ruissellement.

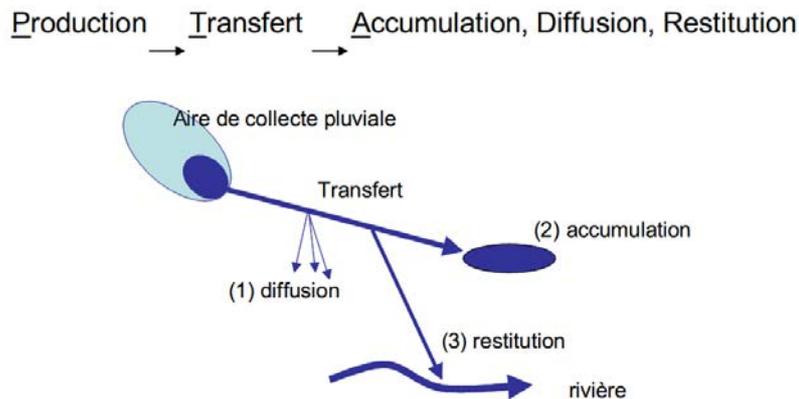


Figure 3 : Mécanisme d'écoulements en surface à la base des inondations par ruissellement.

Expression du risque

La démarche habituelle d'analyse du risque d'inondation repose sur le principe du croisement de l'aléa et de la vulnérabilité (figure 4). Chaque composante peut contribuer à créer un risque important : une zone à vulnérabilité modérée, et inondée fréquemment, peut représenter un risque équivalent à celui d'une inondation rare affectant une zone très vulnérable, si l'on raisonne en coût annualisé de dégâts. Sur un plan mathématique l'aléa est quantifié en terme d'occurrence soit sous la forme d'une fréquence moyenne ou d'une période de retour moyenne.

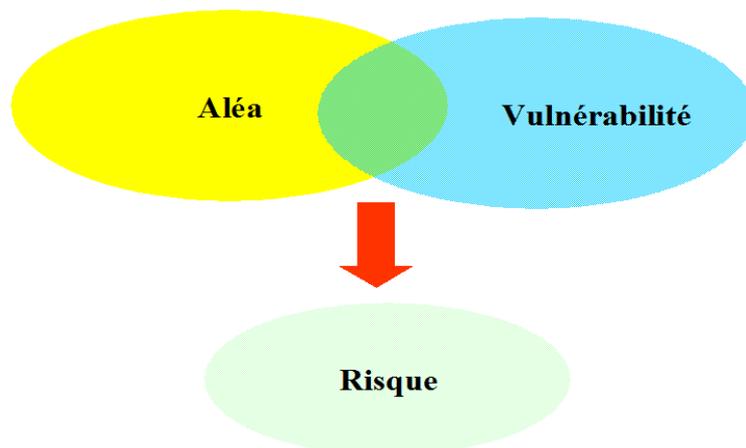


Figure 4 : Méthode habituelle utilisée pour la cartographie du risque d'inondation

La détermination de **la vulnérabilité** peut relever de deux approches. La première, que l'on qualifie ici de vulnérabilité relative, compare sur une échelle d'appréciation locale les enjeux du secteur d'étude. Il s'agit alors d'enclencher un processus itératif de négociation entre les collectivités responsables, les personnes et les propriétaires de biens et exposés pour atteindre un niveau d'accord. Ce processus inclut le résultat de simulations de l'effet de différents aménagements et coûts afférents. La seconde, que l'on qualifiera de vulnérabilité absolue, repose sur une quantification aussi exhaustive que possible des coûts directs et indirects pour les biens et activités ainsi que d'un critère de densité humaine. Cette deuxième méthode est encore du domaine de la recherche et dans la pratique la question se pose souvent en sens inverse : « avec un budget donné, quel niveau de protection peut-on espérer ? ». Le niveau de protection est classiquement exprimé en occurrence moyenne d'événements météorologiques.

L'aléa dans le cas du débordement d'un cours d'eau exprime une notion temporelle qui est l'occurrence moyenne du débit de pointe de la crue contre laquelle on souhaite se protéger. Cet aléa résulte en grande partie de l'aléa de la pluie. Les inondations importantes sont rares alors que les petites inondations sont fréquentes. Les chroniques de débits ou encore les modèles pluie-débit et les modèles de quantiles de crues, permettent une expression quantifiée de cet aléa. **Cet aléa temporel détermine un « aléa spatial », lié à la topographie du lit majeur.** Plus la crue est importante plus la zone inondée est étendue et l'emprise spatiale de cette zone constitue une donnée nécessaire à l'évaluation de l'aménagement de protection. L'aléa spatial reste circonscrit au lit majeur d'où son caractère « prévisible ». La zone inondée est alors déterminée soit par des simulations hydrauliques soit à partir d'une reconnaissance géomorphologique du lit majeur. Cette deuxième méthode implique que le lit majeur soit encore assez naturel. Elle permet une cartographie assez étendue par rapport à la modélisation hydraulique qui requiert des données complémentaires et coûteuses.

Les inondations par ruissellement ne se manifestent pas forcément à proximité de cours d'eau et sont souvent accompagnées de coulées de boues. L'aléa inondation par ruissellement est donc plus difficile à caractériser, puisqu'il n'existe pas de données historiques spécifiques comme pour les crues (chroniques de débit ou de hauteur d'eau). **La détermination de l'aléa inondation par ruissellement nécessite donc une mise au point méthodologique, spécifique** et différente de celle utilisée pour la caractérisation de l'aléa inondation par débordement de rivière. Nous avons travaillé dans le cadre du projet IRIP sur une **nouvelle méthode pour caractériser l'aléa inondation par ruissellement.**

Pour caractériser l'aléa inondation par ruissellement, il paraît nécessaire de bien distinguer les aléas spatiaux et temporels. Tout le territoire hors du lit mineur est concerné et c'est **l'occurrence spatiale des situations favorables au ruissellement qui constitue l'aléa spatial ruissellement.** Cette occurrence est liée pour chaque situation locale à la combinaison de facteurs topographiques, pédologiques, géologiques, surfaciques favorables. La dynamique amont-aval permet d'introduire un facteur supplémentaire qui est le rapport de la surface de production à celle de l'accumulation, sous-entendu que la connexion entre ces deux surfaces existe. Plus le rapport sera grand, plus la situation sera favorable à l'inondation (et réciproquement). Le risque peut être étudié dès la réalisation de la cartographie de l'aléa spatial de ruissellement afin de hiérarchiser les priorités d'action. Il s'agit alors de caractériser la vulnérabilité dans les zones de transfert et d'accumulation.

L'expression du risque d'inondation lié au débordement d'un cours d'eau est, dans la plupart des cas, peu comparable d'une situation à une autre, les enjeux locaux n'étant pas forcément les mêmes. Il résulte d'une négociation plus ou moins poussée. Il en ira de même pour le risque d'inondation par ruissellement avec sans doute une plus grande difficulté sur les choix d'aménagement en cas de péril avéré du fait d'un aléa spatial plus grand et donc moins bien circonscrit dans l'espace. La contre-partie devrait en être une plus grande capacité de prévention, en agissant sur les choix d'aménagement du territoire, si l'on dispose d'un outil de prédétermination robuste de cet aléa spatial. On peut effectivement penser qu'une plus grande liberté d'action existe sur les versants par rapport au lit majeur contraint d'un cours d'eau.

L'objectif de cette recherche/étude est donc **d'élaborer une méthode de cartographie de l'aléa d'inondation par ruissellement sur un territoire.** Cette méthode repose sur l'analyse de couches

d'informations géographiques facilement accessibles, afin de développer un algorithme de cartographie de l'aléa ruissellement. Cet algorithme devra être clairement décrit, reproductible (sur une plate forme d'analyse SIG), robuste et générique, pour la détection des zones d'un territoire présentant une certaine sensibilité aux inondations par ruissellement. La méthodologie sera évaluée par une confrontation avec des cas avérés d'inondations par ruissellement ainsi qu'avec un dispositif d'observations terrain mis en place spécifiquement dans le cadre du projet. L'étape de caractérisation de l'aléa (Hauteur-Débit/vitesse) n'est pas prévue à cette étape du projet car on se focalise essentiellement sur la description de l'aléa spatial qui dépend des caractéristiques à la surface du sol, que l'on distingue de l'aléa temporel qui est quant à lui lié aux événements météorologiques (pluies, neige etc.). Comme précisé plus haut, la prise en compte de l'aléa temporel n'intervient qu'au stade de projets d'aménagement. Il s'agit donc de construire une méthode d'analyse qui permettra la détection des situations où un ensemble de facteurs concourt à l'établissement de la dynamique décrite dans la figure 3.

I-3- Démarche générale adoptée dans le cadre du projet

Compte tenu de la difficulté évoquée dans le chapitre précédent pour évaluer l'aléa inondation par ruissellement, la méthodologie développée (méthode **IRIP**) est basée sur l'analyse d'informations géographiques et sur les connaissances disponibles sur la dynamique amont/aval des écoulements de surface. Dans cette analyse, la cartographie de l'aléa ruissellement a été scindée en deux étapes (Figure 5). La première étape consiste à caractériser l'aléa pluie en terme de durée, de fréquence, d'intensité mais aussi d'extension spatiale. La deuxième étape repose sur l'ANalyse de la SEnsibilité d'un TErritoire au Ruissellement, ce que nous appelons par la suite méthode **ANSETR**. La caractérisation de l'aléa inondation par ruissellement proprement dite est réalisée par le croisement entre l'aléa pluie et les cartes de l'aléa spatial de l'analyse ANSETR (figure 5a).

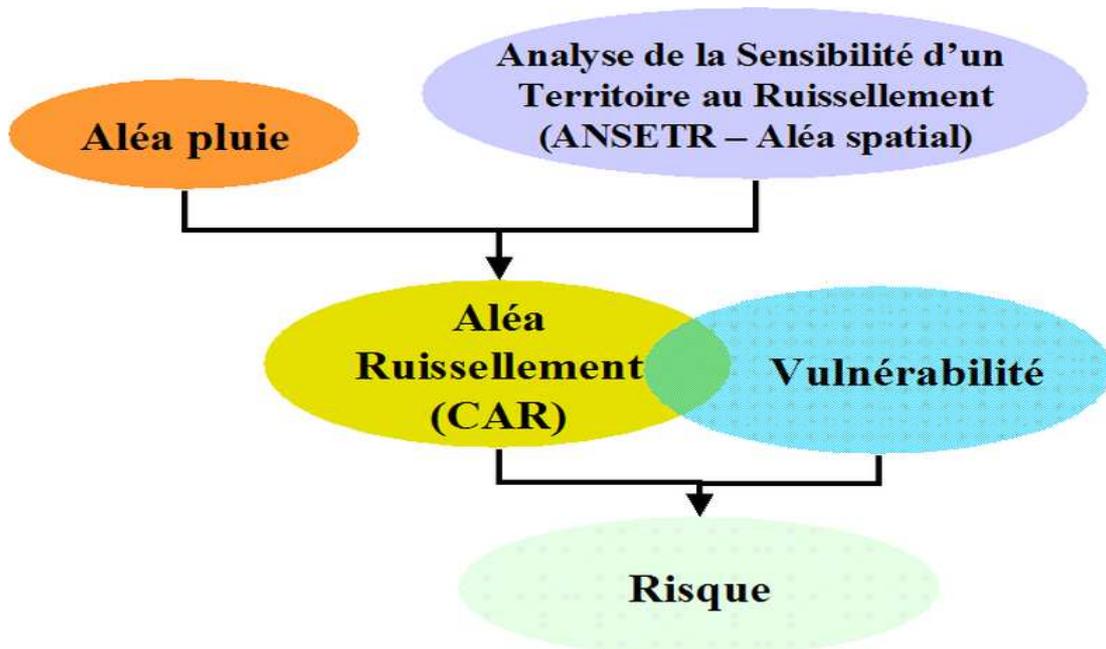


Figure 5a: Démarche générale de cartographie du risque de la méthode **IRIP**.

L'originalité de cette démarche tient aussi au fait qu'il est possible d'étudier le risque à partir de l'aléa spatial ruissellement, indépendamment de l'aléa pluie (figure 5b). Dans ce cas de figure le croisement entre l'aléa spatial et la vulnérabilité permet de caractériser dans l'espace, l'exposition potentielle aux sinistres de différentes zones du territoire comportant des enjeux. Ces cartes peuvent s'avérer très utiles dans le cadre notamment de politiques de prévention ou pour hiérarchiser un territoire dans le cadre de la définition de priorités d'action.

Sur de grands territoires, ce type de cartographie peut également s'avérer particulièrement pertinent car sur de telles étendues spatiales, la caractérisation de l'hétérogénéité spatio-temporelle des événements pluvieux, qui sont pertinents pour les études du ruissellement, reste difficile.

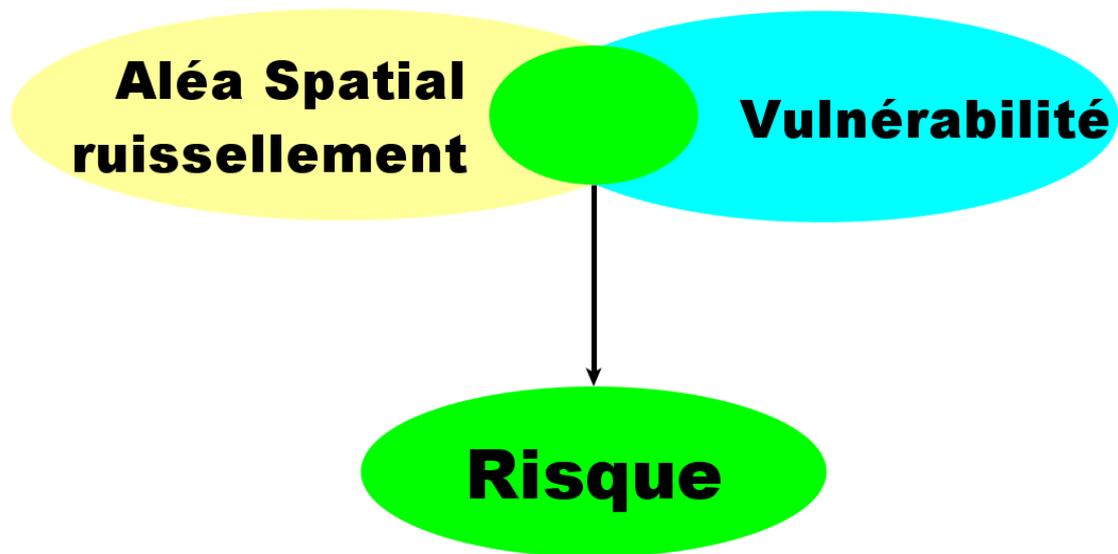


Figure 5b : Cartographie du risque de ruissellement indépendamment de la pluie

La méthode ANSETR exploite les données sur les caractéristiques du milieu à la surface du sol qui favorisent les processus de constitution d'une lame d'eau en surface. Des entités naturelles et artificielles peuvent servir au transfert de cette lame d'eau et des configurations topographiques et artificielles vont favoriser son accumulation. Les données de base sont constituées par des couches d'information géographiques disponibles facilement accessibles. Le traitement de ces données conduit à une carte d'aléa spatial. Comme indiqué au paragraphe précédent, la prise en compte de l'aléa temporel n'est pas réaliste sur de grands territoires dans le cadre de l'étude du ruissellement et doit être réservée aux études locales pour lesquelles les données nécessaires pourront être acquises. Le cas échéant, la caractérisation de l'aléa ruissellement proprement dit est réalisée par le croisement entre l'aléa spatial et l'aléa temporel pour créer une Carte d'Aptitude au Ruissellement (CAR). Le croisement de cette carte avec les niveaux de vulnérabilité exposés au transfert et à l'accumulation permet de créer une carte de risque d'inondation par ruissellement.

Pour introduire la dynamique des écoulements sur les versants (figure 3), la méthode ANSETR a été divisée en trois étapes successives selon une logique de connexion amont/aval :

- La cartographie des aires de production ou des zones contributives au ruissellement
- La cartographie des axes de transfert ou zones d'écoulement depuis les aires de production
- La cartographie des aires d'accumulation potentielle des eaux de ruissellement.

Il faut noter que cette logique d'analyse amont/aval est souvent absente des méthodes présentées dans les rapports techniques.

II- Cartographie de l'aléa spatial du ruissellement : L'analyse ANSETR

II-1 L'ANalyse de la SEnsibilité d'un Territoire au Ruissellement (ANSETR)

Dans les différentes étapes de la genèse du ruissellement jusqu'aux inondations et en dehors des considérations météorologiques, il existe dans le milieu naturel une forte hétérogénéité spatiale de la sensibilité qu'a un territoire à créer, à transférer et accumuler le ruissellement. Par exemple, différents types d'occupation des sols correspondent à des capacités ou aptitudes très variables à la production, au transfert et à l'accumulation du ruissellement. Dans l'analyse ANSETR, **les différents facteurs favorables au ruissellement sont combinés pour définir la carte d'aptitude au ruissellement** (respectivement à la production, au transfert et à l'accumulation). **Les cartes d'aptitudes au ruissellement sont donc présentées sous la forme d'une image dont les nuances représentent différentes valeurs (niveaux) de sensibilités au ruissellement.** Plus il y a de facteurs favorables plus la sensibilité résultante est grande.

La notion de niveaux de sensibilité sur un territoire donné est une notion relative dans l'analyse proposée. Les territoires du Nord et du Sud de la France pourraient présenter des niveaux de sensibilité différents du fait de facteurs de causalité de ruissellement eux-mêmes différents comme l'intensité des pluies dans le sud et les sols hydromorphes dans le nord. Pour cette raison, la sensibilité d'un territoire est normée par sa valeur maximale et son étendue divisée en plusieurs niveaux. Seule l'expérience accumulée sur plusieurs territoires permettra de décider de la représentation la plus pertinente entre sensibilité absolue et relative.

II-1-1 Rappel des facteurs de prédisposition du milieu qui influencent le ruissellement

Tout d'abord, il convient de préciser qu'il existe dans le milieu naturel deux mécanismes de production des eaux de ruissellement. Le premier mécanisme, nommé *ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration*, correspond au fait que l'intensité de la pluie est supérieure à la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol. On a constitution d'une lame d'eau à la surface du sol. Le deuxième mécanisme est appelé *ruissellement sur surfaces saturées*. Dans ce cas, la création de lame d'eau en surface intervient après saturation du sol, lorsqu'il continue de pleuvoir. **La notion de facteurs de prédisposition renvoie au rôle joué par diverses caractéristiques intrinsèques du milieu dans l'apparition d'une lame d'eau en surface dans son transfert et son accumulation.**

Dans la littérature, plusieurs facteurs sont souvent cités. C'est le cas de la topographie, de l'occupation des sols et de la nature ou type de sol. Ces facteurs jouent un rôle plus ou moins important dans l'apparition des différents types de ruissellement décrits ci-dessus. Ils n'agissent pas toujours selon le même degré d'importance dans les différents cas d'inondation par ruissellement observés. Bien souvent, des combinaisons défavorables de ces facteurs sont à l'origine des sinistres liés au ruissellement.

Dans les paragraphes qui suivent nous allons présenter un aperçu des principaux facteurs du milieu qui influencent le processus du ruissellement. Les facteurs favorables au ruissellement ont été déterminés à partir d'une analyse bibliographique des connaissances disponibles sur le ruissellement et ils se trouvent dans le document du projet IRIP consacré à la bibliographique (Dehotin et Breil 2011) ou encore dans le rapport d'un stage réalisé dans le cadre du projet (de Lavenne 2010).

a- La topographie et les variables issues du relief

La *topographie* est un facteur souvent cité dans la littérature dans la genèse et l'accumulation des eaux de ruissellement. La *pente* est la variable topographique la plus citée dans la littérature (Esteves et De Rosa 1989; Fox et al. 1997; Le Bissonnais et al. 1998; Chaplot et Bissonnais 2000). Elle accentue la vitesse des écoulements de surface. Les zones ayant de fortes pentes ont tendance à favoriser la production et le transfert du ruissellement. A l'inverse, l'accumulation d'eau est favorisée par de faibles pentes, par l'existence de cuvettes (ou dépressions locales) ou encore de ruptures de pente forte à faible. La pente agit donc, selon ses caractéristiques locales, aussi bien sur la production que sur le transfert et l'accumulation de l'eau. Ainsi, selon les zones d'études, les auteurs n'observent pas les mêmes effets de la pente sur le ruissellement. Ces éléments confortent l'idée selon laquelle d'autres facteurs du milieu interviennent dans le processus.

La *forme des aires drainées* influence la rapidité de la réponse des versants. Pour une même pluie, une forme ramassée favorise une concentration rapide des écoulements de surface, contrairement aux formes allongées. Il existe différents indices morphologiques permettant de caractériser le milieu, mais aussi de comparer les bassins versants entre eux. Citons à titre d'exemple l'indice de compacité de Gravelius K_G . Cet indice est défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface. Il est déterminé à partir des données topographiques qui permettent de définir les limites du bassin. Il est proche de un (1) pour un bassin versant de forme quasiment circulaire et supérieur à un (1) lorsque le bassin est de forme allongée.

L'*indice topographique* (Beven et Kirkby 1979) utilise la pente moyenne de l'aire drainée en amont d'un point et la pente locale à ce point. Il exprime de manière simplifiée le rapport entre le flux d'eau qui arrive de l'amont et la capacité d'évacuation au point de calcul. Il permet de produire des cartes où l'engorgement des sols est le plus probable. Initialement construit pour modéliser le fonctionnement hydrologique des surfaces qui contribuent au ruissellement par remontée du niveau des nappes, cet indice a aussi été utilisé avec succès pour localiser les zones humides (Mérot et al. 2003). Cela confirme qu'il transcrit bien les phénomènes de saturation durable et non fugace comme ceux auxquels on peut s'attendre en présence de fortes intensités pluvieuses. Dans ce cas, la topographie seule n'est pas suffisante pour détecter les zones de ruissellement.

Certains auteurs ont montré le rôle de la *micro-topographie* sur le ruissellement (Esteves et De Rosa 1989). Elle jouerait un rôle dans le stockage superficiel et la distribution spatiale des écoulements de surface. La rugosité du sol est une variable permettant de caractériser la micro-topographie. Elle peut être estimée à partir de la variance d'altitude. Toutefois, pour être réellement pertinente pour la problématique du ruissellement il est nécessaire de disposer d'une topographie précise en altitude et à haute résolution spatiale. Ce type de données n'est actuellement accessible qu'à partir des données LIDAR (altimétrie laser à grande densité de points) encore fort coûteuses.

Les principales variables issues de la topographie utilisée dans l'analyse ANSETR sont la pente, la forme des surfaces drainées (indice de compacité), les ruptures de pente et l'indice topographique.

b- L'occupation des sols

L'occupation des sols peut favoriser ou retarder l'apparition du ruissellement. Ainsi, les *zones urbaines* sont connues pour générer du ruissellement dès les faibles pluies. En effet l'urbanisation se traduit par un fort taux d'imperméabilisation des sols et donc une réduction importante des capacités d'infiltration des eaux de pluie. Les zones urbaines constituent de ce fait des zones ayant une forte capacité de production y compris pour les pluies courantes.

Les parcelles *agricoles* peuvent favoriser le ruissellement. Plusieurs travaux ont ainsi démontré le rôle de l'organisation spatiale des parcelles agricoles et de certaines pratiques culturales dans la production du ruissellement (Le Bissonnais et al. 1998; Le Gouée et Delahaye 2008). Ainsi, la battance des sols (limons), les durées des inter-cultures (sols laissés nus), le travail des sols, les aménagements linéaires (haies, fossés etc.) sont les principaux facteurs souvent considérés dans les études de ruissellement. Certaines pratiques agricoles liées à la gestion de l'inter-culture, au sens de labour et les aménagements à la parcelle peuvent néanmoins diminuer la production du ruissellement sur les parcelles. Il faut préciser par ailleurs qu'il existe au niveau scientifique des controverses sur le rôle de ces facteurs. Concrètement, certaines pratiques jugées efficaces dans certains contextes pour lutter contre le ruissellement (exemple sens de labour par rapport à la pente) peuvent dans d'autres contextes météorologiques aggraver les problèmes de coulées de boue et d'érosion.

Contrairement aux types d'occupation des sols ci-dessus, la présence de *végétation* augmenterait les capacités d'absorption des sols (matière organique, porosité liées aux racines etc.). On estime qu'un sol forestier par exemple peut absorber d'importantes quantités d'eau. Par cet effet, la saturation du sol nécessite des volumes d'eau plus importants. Le phénomène de ruissellement par saturation du profil de sol est donc atténué. De plus la végétation intercepte une partie de la pluie et en diminue donc l'intensité au sol. Les phénomènes de ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration sont donc aussi atténués. La végétation joue donc un rôle d'atténuation à la fois sur la production et le transfert du ruissellement, quel que soit le mécanisme de génération du ruissellement. Cependant, le rôle de la végétation dépend de la capacité d'absorption des sols et de l'importance des événements pluvieux comme en témoignent les catastrophes de Vaison-La-Romaine en 1982 : les eaux du bassin versant de l'Ouvèze, pourtant classé bassin boisé à 88%, se sont littéralement déversées sur la ville. Il semble donc que la capacité de rétention soit efficace jusqu'à un certain niveau d'engorgement au-delà duquel les transferts latéraux, via la macro-porosité (bioturbation, vides racinaires, fracturation, arénisation) pourraient devenir importants sous l'effet des pentes et viendraient alors renforcer les écoulements de surface.

Dans la méthode ANSETR, les zones urbaines et agricoles sont considérées comme facteurs favorables au ruissellement. Les zones couvertes de végétaux couvrants (forêts, cultures couvrantes et pluriannuelles) sont des facteurs non favorables au ruissellement. Toutefois le rôle des zones agricoles peut être nuancé sur de petits territoires où on dispose d'informations suffisantes sur les pratiques agricoles.

c- Le type de sol et la géologie

Le type de sol et la lithologie sont également des éléments importants dans la genèse, le transfert, mais aussi dans la persistance de la submersion dans les zones où les eaux de ruissellement s'accumulent.

Les *affleurements rocheux* sont souvent peu perméables et ils constituent donc un facteur favorable à l'apparition du ruissellement. Certaines formations géologiques sont aussi réputées très peu perméables.

L'*épaisseur du sol* va conditionner sa capacité de stockage même avec des sols à fortes perméabilités. Elle peut donc jouer un rôle important dans l'apparition du ruissellement sur surface saturée. En effet, le réservoir que constitue le sol est susceptible de se remplir plus vite avec des sols de faibles épaisseurs ; ce qui peut conduire à saturer le sol par remontée de nappe. L'infiltration devient alors impossible et le surplus d'eau ruisselle. Cette situation peut également survenir lorsque le profil de sol est formé d'horizons moins perméables qui vont contrôler la vitesse de l'infiltration.

Les sols à faible *perméabilité* ont des capacités d'infiltration faibles et sont plus propices à la production de lame d'eau de ruissellement par le mécanisme dit de Horton. Selon ce mécanisme, dès que l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration, il se forme une lame d'eau à la surface du sol, donc une ébauche du mécanisme de ruissellement. Woolhiser (Woolhiser et al. 1990) a montré que la variabilité spatiale de l'imperméabilité des sols avait un effet sur le ruissellement.

Les sols ayant de forts indices *d'érodibilité* sont considérés comme favorisant le ruissellement et les coulées de boue. Plusieurs auteurs intègrent l'indice d'érodibilité des sols comme facteur de sensibilité au ruissellement (Le Bissonnais et al. 1998; Dautrebande et Colard 2003; Le Gouée et Delahaye 2008) parce que les mécanismes de ruissellement s'accompagnent très souvent de coulées de boue.

Dans les zones agricoles, les *sols riches en limons* sont parfois sujets au phénomène de 'battance'. Il se traduit par la formation d'une couche imperméable à la surface des sols nus qui réduit les capacités d'infiltration des sols et favorise le ruissellement. Certains auteurs intègrent le taux de limon comme facteur de sensibilité au ruissellement.

Enfin, en lien avec le sol, l'humidité initiale du sol conditionne le temps d'apparition du ruissellement. Certains auteurs ont intégré cette influence de la teneur en eau initiale du sol dans des modèles d'infiltration (Green et Ampt 1911). Concrètement, la teneur en eau initiale influencerait la vitesse de saturation du sol et le temps d'apparition du ruissellement (Nicolas 2010).

Dans l'analyse ANSETR, la perméabilité, l'épaisseur des sols, l'érodibilité et les affleurements rocheux ont été intégrés dans l'analyse.

II-1-2 Les différentes étapes de l'analyse ANSETR.

L'analyse ANSETR consiste à intégrer dans une démarche globale de cartographie l'ensemble de facteurs du milieu qui prédisposent un territoire à produire, transférer ou accumuler du ruissellement. Le découpage de la démarche en trois étapes successives, production, transfert et accumulation du ruissellement, permet d'introduire dans l'analyse la dynamique amont-aval des écoulements sur les versants. Il faut noter que cette dynamique amont-aval est souvent absente dans les méthodes habituelles de caractérisation d'aléa, basées sur des croisements de couches d'informations géographiques. La démarche proposée pour réaliser l'analyse ANSETR est présentée sur la figure (6).

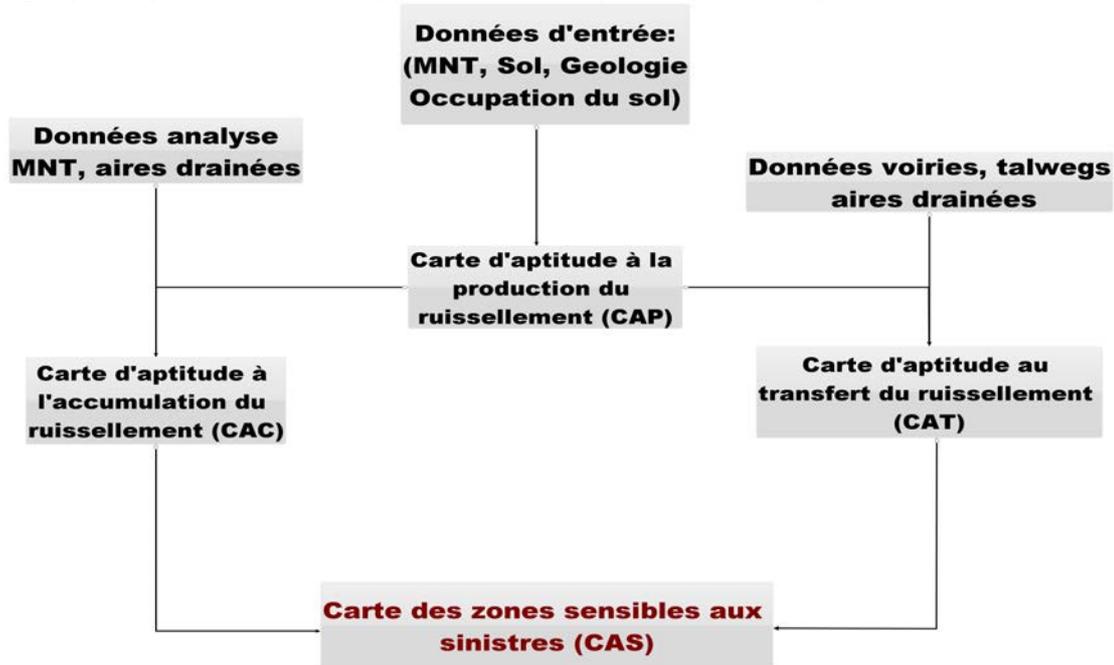


Figure 6: Analyse ANSETR - Démarche globale de cartographie de l'aptitude aux sinistres

Les cartes d'aptitude à la production du ruissellement (**CAP**) sont réalisées à partir d'un ensemble de facteurs qui prédisposent un milieu donné à l'apparition en surface de lames d'eau susceptibles de s'écouler vers l'aval. **Les CAP sont des cartes des zones contributives au ruissellement.** Ces cartes peuvent être utiles pour orienter des politiques de prévention des inondations par ruissellement, par une augmentation de l'infiltration, la lutte contre l'imperméabilisation et la rétention des eaux pluviales.

Les cartes d'aptitude aux transferts du ruissellement (**CAT**) sont déduites des cartes d'aptitude à la production CAP, des informations sur la voirie, des talwegs et d'une analyse du relief. **Les CAT sont des cartes des zones d'écoulement** qui relient l'amont à l'aval d'un versant. L'ensemble des axes linéaires (artificiels ou naturels) pouvant servir à transférer les eaux de ruissellement est intégré dans la détermination des zones d'écoulements. Ces zones de transfert du ruissellement peuvent subir temporairement des dommages (coulées de boue, érosion, dégâts aux aménagements...). Ces cartes peuvent donc servir dans les politiques de prévention (stratégies d'aménagements de voiries, exposition d'axes de communication etc.), mais aussi pour soutenir des politiques de vigilance en situation de crise (ex : fermeture de voies d'accès).

Les cartes d'aptitude à l'accumulation du ruissellement (CAC) représentent les zones potentiellement submersibles par les eaux de ruissellement. L'aptitude à la submersion résulte de plusieurs facteurs comme l'importance des zones contributives, mais aussi la forme de l'aire contributive, sa pente, des ralentissements et accumulations transitoires liés aux ruptures de pentes et de la capacité d'engorgement des sols. Les CAC peuvent avoir des applications dans la prévention (politiques de relocalisation d'enjeux et d'aménagement) mais aussi dans la gestion de crise (message à la population et évacuations) selon la finesse des données utilisées et des connaissances des axes de transfert sur lesquels la vigilance doit porter.

Les cartes d'aptitude à l'accumulation du ruissellement peuvent être combinées avec les cartes d'aptitude au transfert pour obtenir des 'cartes d'aptitude aux sinistres' (CAS). **Les CAS représentent l'ensemble des zones potentiellement exposées à des sinistres ; aussi bien les zones submersibles que celles qui sont exposées grâce aux transferts des eaux de ruissellement.** Ces cartes peuvent être combinées avec l'aléa pluviométrique pour obtenir les cartes d'aléa du ruissellement (CAR) où figureraient non seulement les zones submersibles, mais aussi les axes de transferts exposés au ruissellement. Ce croisement avec l'aléa pluie est réellement pertinent à l'échelle locale, avec des informations fines sur les sols et l'hétérogénéité de la pluie.

La réalisation des différentes cartes se fait par le biais d'une chaîne d'analyse géomatique de données rasterisées, c'est à dire représentées par des mailles carrées, appelées « pixels », aussi petites que possible. La notion de « finesse » du découpage de l'espace sera évoquée au paragraphe II-2-2. Dans le paragraphe II-2, nous allons détailler les bases de l'analyse de sensibilité d'un territoire au ruissellement (ANSETR).

A partir de l'ensemble des données relatives aux facteurs cités dans le paragraphe précédent (données de base ou calculées à partir de ces dernières), il est réalisé dans un premier temps des Cartes d'Aptitude à la Production du ruissellement (CAP). Dans une première version de l'analyse, les poids des différents facteurs sont équivalents et sont donc simplement additionnés. Les cartes d'aptitude à la production servent ensuite à l'élaboration des Cartes d'Aptitude au Transfert (CAT) et aux Cartes d'Aptitude à l'accumulation du ruissellement (CAC). Chaque facteur est analysé selon son influence sur chacun des processus de production, de transfert et d'accumulation du ruissellement. **La réalisation des CAT et des CAC constitue la principale nouveauté de la méthode proposée** par rapport aux méthodes actuelles proposées dans des études techniques et qui traitent de cartographie du ruissellement.

Dans les paragraphes suivants, nous allons détailler les différentes étapes de l'analyse et proposer des illustrations à partir d'un cas test. Pour ces tests nous avons utilisé le bassin versant du Mercier (6km²) où nous disposons de données fines issues du programme de recherche AVUPUR (Braud et al. 2010) et d'un dispositif d'observation spécialement dédié. Nous disposons notamment sur ce bassin d'un modèle numérique de terrain 'lidar' (re-échantillonné à 2m), d'une occupation des sols à partir d'images satellites à très haute résolution et des données précises de sol issues d'une campagne de mesure de paramètres hydrodynamiques sur le bassin (Gonzalez-Sosa et al. 2010). Le bassin versant de l'Yzeron (140 km²) servira à illustrer la démarche de l'analyse ANSETR avec des données plus grossières et sur un territoire plus grand. Les données utilisées sont des données topographique à 25m, les données d'occupation des sols à 100m et les données sols IGCS au 1/100000.

Deux hypothèses de travail sont faites dans l'analyse ANSETR:

- Plus un territoire comporte de facteurs de prédisposition aux écoulements de surface et plus il présente une aptitude élevée au ruissellement. Selon cette hypothèse, la conjonction de facteurs favorables confère au territoire son aptitude au ruissellement. Il est théoriquement possible d'établir une valeur de sensibilité maximale mais sa réalisation n'est pas certaine, en raison d'effets antagonistes possibles, non systématiques, de certains facteurs (exemple la pente et l'épaisseur du sol).

- Il n'y a pas de hiérarchie entre les facteurs de prédisposition du milieu. Ils ont tous le même poids dans la valeur de sensibilité calculée. Chaque facteur agit comme un élément de sensibilité (il n'y pas de pondération du rôle des différents facteurs).

Toutefois, ces hypothèses comportent des faiblesses, notamment dans des zones imperméabilisées ou d'affleurements rocheux où un seul facteur favorable suffit à rendre une zone très apte à ruisseler. Dans la littérature, plusieurs auteurs ont proposé des mécanismes de hiérarchisation des facteurs, basés cependant sur des expertises locales de chaque cas d'étude. Ces techniques sont difficilement généralisables à d'autres contextes. Dans le paragraphe, II-1-3 nous allons proposer des améliorations aux limites des hypothèses utilisées.

Dans la version de base de la méthodologie, nous avons fait le choix d'utiliser, pour chaque facteur favorable, une classification en deux classes (0 – 1). Les cartes d'aptitude comportent 5 valeurs possibles ou 5 niveaux de sensibilité (0-Relativement Insignifiant ; 1-Très faible ; 2-Faible ; 3-Moyenne ; 4-Forte ; 5-Très forte). Ce choix a été inspiré par des motivations de simplicité et de lisibilité du résultat de l'analyse dans une première version de la méthode. Il est toujours possible, dans une perspective d'amélioration de la méthode, d'envisager plus de niveaux pour apporter si nécessaire des améliorations.

a- Les cartes d'aptitude à la production du ruissellement (CAP).

L'approche utilisée pour cette étape est globalement la même que celle utilisée dans les méthodes de cartographie de l'aléa érosion (Le Bissonnais et al. 1998; Le Gouée et Delahaye 2008). Les outils comme SCALES et STREAM développés respectivement par l'Université de Caen et l'INRA intègrent les mêmes facteurs que ceux retenus dans ANSETR comme facteurs favorables à la production du ruissellement.

Dans la méthode ANSETR ***l'occupation des sols est classée en fonction de son aptitude à favoriser la production du ruissellement.*** Les zones imperméabilisées sont des zones de forte aptitude à la produire du ruissellement. Ces zones prennent donc la valeur maximale (1) dans la carte de prédisposition (carte des facteurs favorables) au ruissellement liée à l'occupation des sols. Les zones ayant des couverts végétaux (végétation plus ou moins pérenne) prennent au contraire la valeur minimale (0). Les zones agricoles peuvent augmenter la prédisposition d'une zone à la production du ruissellement (selon les pratiques agricoles, les types de culture etc.). Sur de grands territoires les informations permettant de différencier différentes parcelles agricoles sont soit imprécises soit indisponibles. Par défaut dans la méthode ANSETR les zones agricoles sont considérées comme ruisselantes (principe de précaution à vérifier sur les zones à risque). De ce fait nous allons considérer par défaut les zones agricoles comme prédisposant à la production du ruissellement. Sur de petits territoires, il convient de nuancer ce choix car il sera recherché des informations plus précises (durées et modes d'inter-culture, pratiques agricoles). Ainsi les données sur l'occupation des sols et les pratiques associées sont disponibles à l'échelle de la parcelle cadastrale.

La nature des sols et la géologie sont utilisées pour calculer les cartes relatives à l'érodibilité des sols, à l'épaisseur et à l'imperméabilité des sols. Les sols ayant de forts indices d'érodibilité sont favorables à la production des coulées de boue et du ruissellement. De même, les sols ayant de faibles perméabilités produiront facilement des lames d'eau à la surface du sol. Enfin, les sols ayant de faibles épaisseurs sont prédisposés à se gorger rapidement en eau et à produire des lames d'eau par le mécanisme de ruissellement sur surface saturée.

Le relief a été pris en compte à travers la pente et l'indice topographique. Les pentes fortes favorisent la production du ruissellement. Les contextes où l'indice topographique est élevé sont favorables à la production du ruissellement par le mécanisme de ruissellement sur surface saturée.

Au total ces cinq facteurs ont été retenus pour cartographier l'aptitude à la production du ruissellement : l'occupation des sols, l'épaisseur des sols, l'imperméabilité des sols, l'érodibilité des sols et le relief. La combinaison de ces 5 facteurs permet de définir une CAP avec 5 niveaux de sensibilité (figure 7). En pratique, ces niveaux de sensibilité correspondent au nombre de facteurs défavorables rencontrés dans un espace géographique donné. Les pixels ayant une note égale à zéro (0) n'interviennent pas dans la production du ruissellement tandis que les pixels ayant une note égale à cinq (5) présentent une aptitude maximale. Un exemple de cartographie des zones contributives au ruissellement sur le bassin test versant du Mercier (Yzeron – ouest-lyonnais) est présenté sur la figure (8). On note l'existence sur ce bassin de plusieurs zones de forte aptitude à la production du ruissellement qui s'identifient clairement par rapport aux autres zones du bassin.

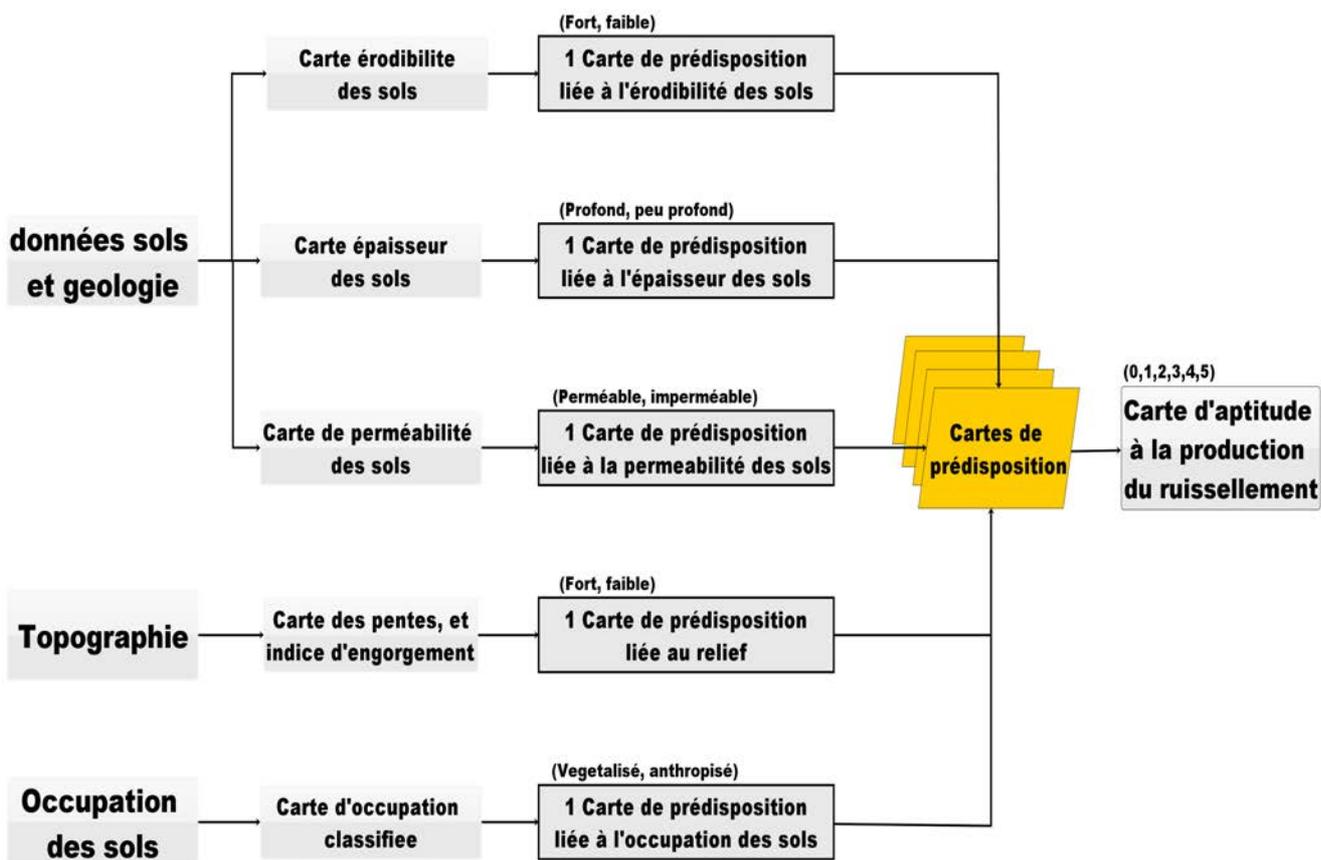


Figure 7 : Cartographie de l'aptitude à la production du ruissellement (CAP)

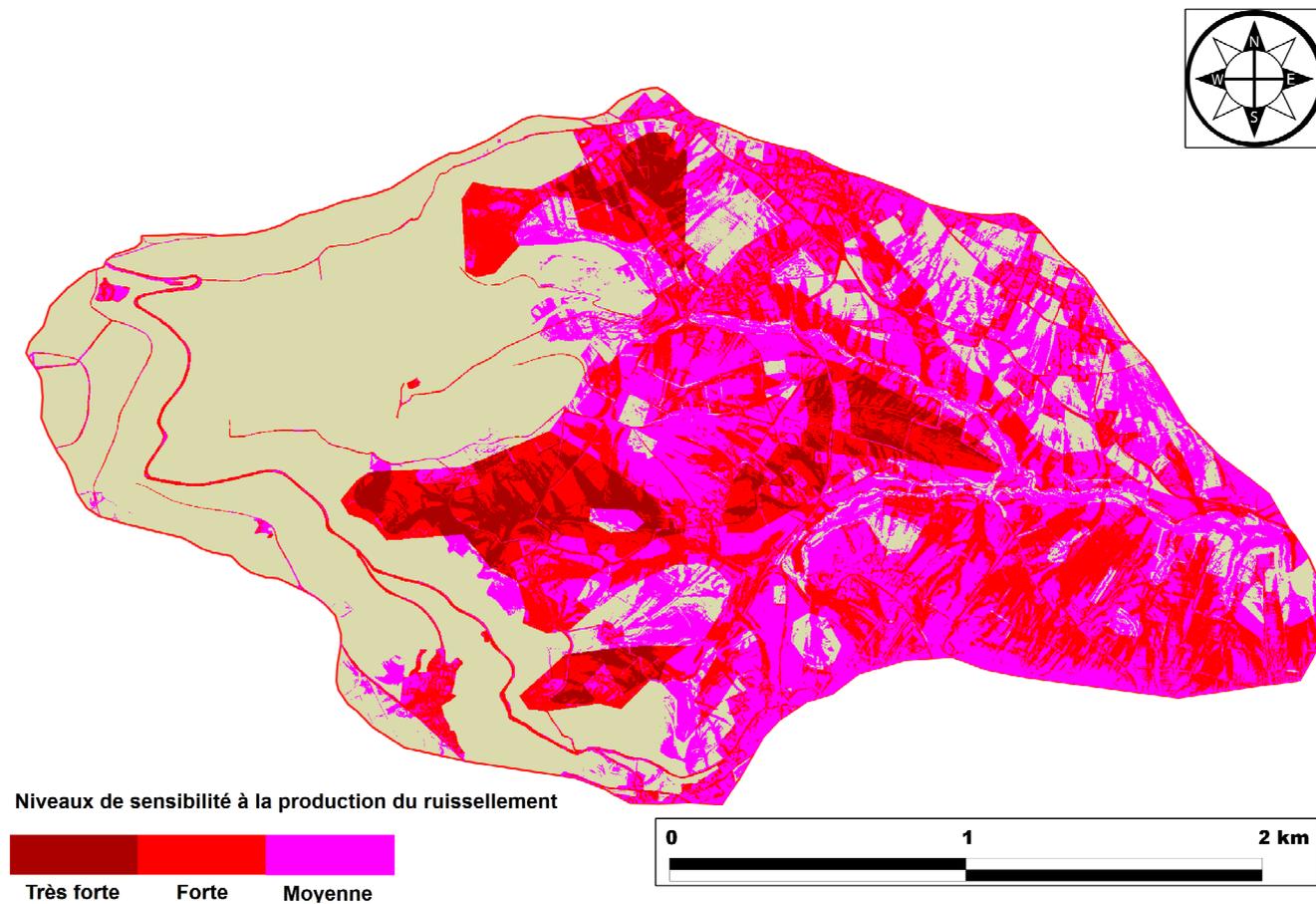


Figure 8 : Exemple de CAP - Zones les plus sensibles à la production du ruissellement sur le bassin du Mercier.

b- Les cartes d'aptitude au transfert du ruissellement (CAT)

Les zones d'écoulements ou axes de transfert regroupent tous les éléments naturels ou artificiels permettant un transfert des eaux de ruissellement depuis les zones de production vers l'aval d'un versant. Ainsi, et toujours par principe de précaution faute d'avoir des données assez précises, les routes et voies ferrées sont considérées comme chemins préférentiels des écoulements. Les voies de communication et les talwegs constituent donc les données de base de cette analyse qu'il convient d'extraire de la topographie ou de couches d'informations dédiées. Les éléments de la voirie peuvent constituer des exutoires qui mettent fin au transfert lorsqu'elles sont érigées en travers d'axes naturels d'écoulement.

Pour cette analyse nous avons introduit ici le principe de *l'analyse des zones drainées*. Les aires drainées à l'amont de chaque pixel sont utilisées pour évaluer les ruptures de pentes, mais aussi la production de ruissellement à l'amont de chaque pixel.

Les CAP présentées dans le paragraphe précédent, servent à situer les points de départ du calcul des axes et zones de transfert. *Les axes de transfert ayant une forte superficie de zones de production dans leur surface drainée auront une plus grande aptitude à servir d'axes de transfert* (connectivités possibles entre zones contributives/axes de transfert).

La forme des aires drainées amont à chaque pixel de transfert va influencer le temps de transfert. Son calcul par *l'indice de Gravelius* constitue un indicateur d'efficacité du transfert. Les surfaces drainées ayant une forme arrondie concentrent plus rapidement les écoulements que celles ayant des surfaces drainées avec une forme allongée.

Les éléments de voiries et de talwegs sont empruntés par les écoulements de surface qui sont transférés plus ou moins rapidement vers des zones réceptrices de flux d'eau vers l'aval. *La voirie et les talwegs sont donc des données de base de cette analyse*, il convient d'extraire cette information de sources ou de bases de données précises. L'importance des surfaces drainées par ces axes est aussi importante dans le rôle qu'ils joueront dans le transfert des écoulements de surface.

Les éléments de voirie ayant de fortes pentes constituent des axes de transfert très favorables (note maximale). *La pente locale est donc un facteur qui favorise le transfert du ruissellement. De même les ruptures de pentes (pentes faibles/pentes fortes) peuvent dans certains cas accélérer les écoulements.* Nous avons testé deux descripteurs de la rupture de pente : le rapport entre la pente moyenne de l'aire drainée et la pente locale et le rapport entre la valeur modale de la pente dans l'aire drainée et la pente locale. La valeur modale a donné les meilleurs résultats et a donc été retenue par la suite.

La figure (9) résume la démarche de création d'une CAT. En pratique, l'analyse consiste à générer pour chaque pixel situé sur des éléments de voirie ou de talweg les descripteurs de la sensibilité liés à la production du ruissellement, plus ceux relatifs à la forme et la pente des surfaces drainées. Ici aussi, comme pour la carte de sensibilité à la production du ruissellement, *cinq facteurs de prédisposition sont retenus et la carte d'aptitude au transfert présente cinq niveaux de sensibilité.*

Comme pour les cartes d'aptitude à la production du ruissellement, les pixels avec un niveau de sensibilité égal à zéro (0) représentent les pixels qui auront une faible aptitude à transférer le ruissellement tandis que les pixels de niveau de sensibilité égal à cinq (5) auront une très forte aptitude à jouer efficacement ce rôle.



Figure 9 : Cartographie de l'aptitude au transfert du ruissellement (CAT)

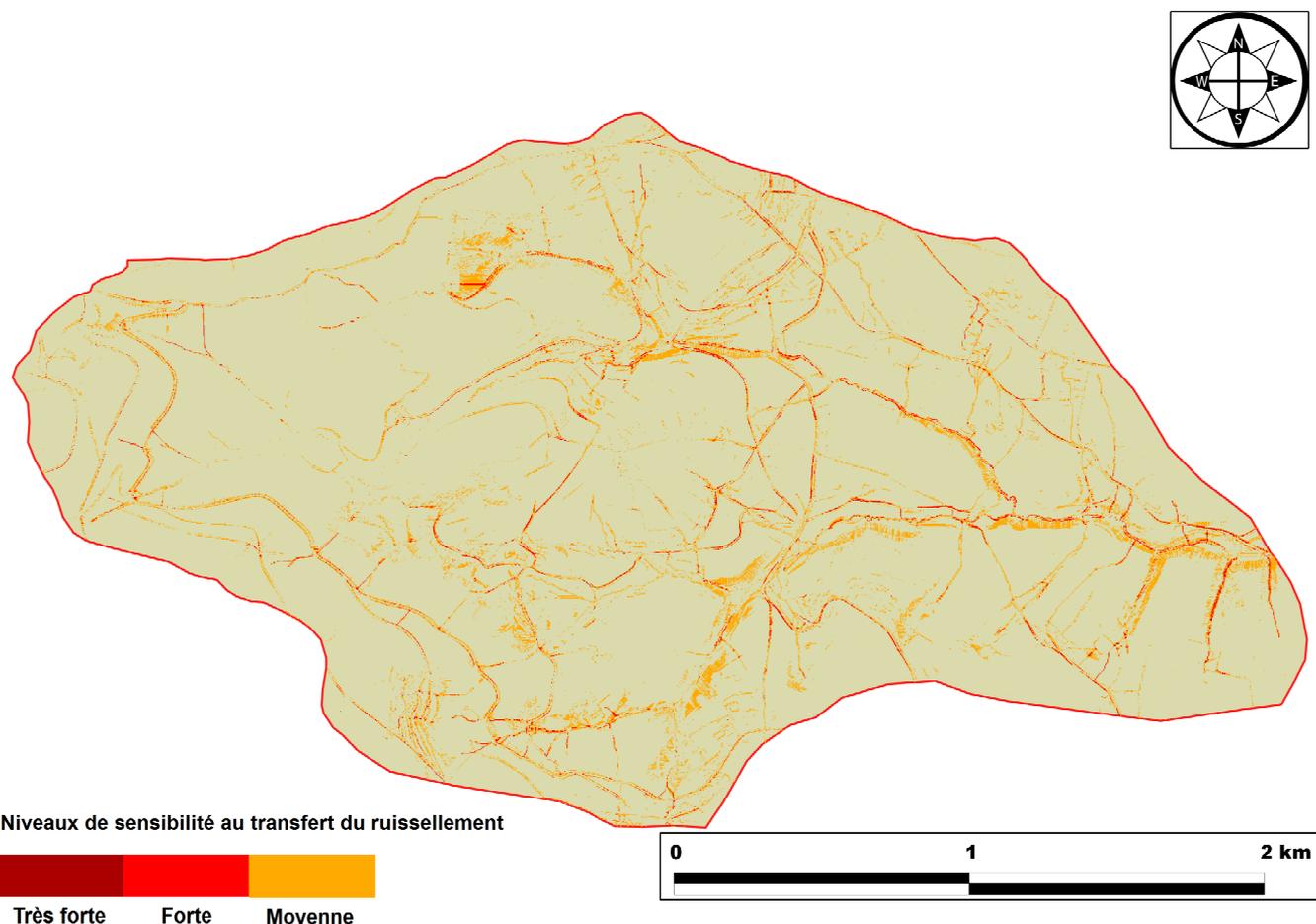


Figure 10 : Exemple de CAT - Zones les plus sensibles au transfert du ruissellement sur le bassin du Mercier

c- Les cartes d'aptitude à l'accumulation du ruissellement (CAC)

Les zones d'accumulation sont réputées inondables. ***Ce sont des zones submersibles par les eaux de ruissellement.*** Leur existence est conditionnée à minima à celle d'une zone de production connectée via un/des axe(s) de transfert à la zone d'accumulation.

Cette condition remplie, on considère la note de la zone de production qui alimente la zone d'accumulation car elle détermine la probabilité que cela se réalise plus ou moins facilement.

De même que pour les CAT, ***la forme des aires drainées est calculée à l'amont de chaque pixel qui marque le transfert entre la zone de production et d'accumulation. Elle constitue ici un facteur d'aptitude au remplissage de la zone d'accumulation.***

Contrairement aux zones d'écoulement (ou zones de transfert), ***les ruptures de pentes de type pentes fortes /pentes faibles sont propices à l'accumulation des écoulements de surface.***

Les zones ayant des pentes faibles freinent les écoulements vers l'aval et créent des conditions d'accumulation plus ou moins importantes. ***Les pentes locales faibles sont alors considérés comme facteur favorable à l'accumulation du ruissellement.*** Les zones à pente faible et longues sont des zones où l'eau peut s'accumuler.

Enfin, nous avons intégré ***l'indicateur de la capacité d'engorgement des sols comme indicateur de l'humidité des sols.*** Ainsi, les zones dont l'indice topographique (indice de Beven-Kirkby) est élevé sont des zones ayant de fortes prédispositions à se saturer mais aussi à accumuler de l'eau.

Au total, cinq (5) facteurs correspondant à cinq niveaux de sensibilité ont été retenus pour la carte d'aptitude à l'accumulation du ruissellement. Ici aussi, les pixels avec un niveau de sensibilité égal à zéro (0) ne sont pas propices à l'accumulation tandis alors que la note de cinq (5) exprime un fort potentiel à accumuler de l'eau.

La figure (11) illustre la démarche de création des CAC. La figure 12 présente un exemple d'application sur le bassin test du Mercier.

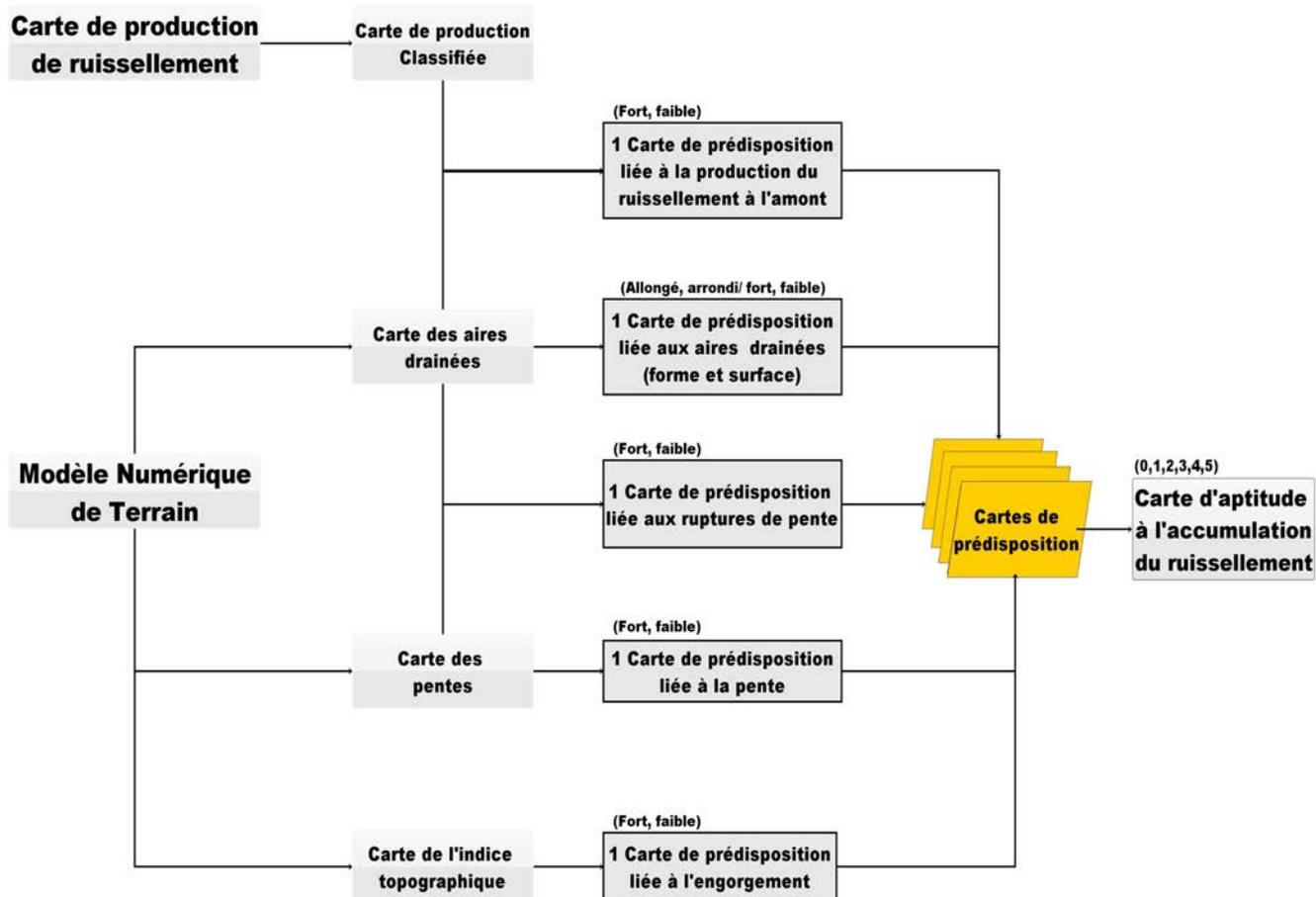


Figure 11 : Cartographie de l'aptitude à l'accumulation du ruissellement (CAC)

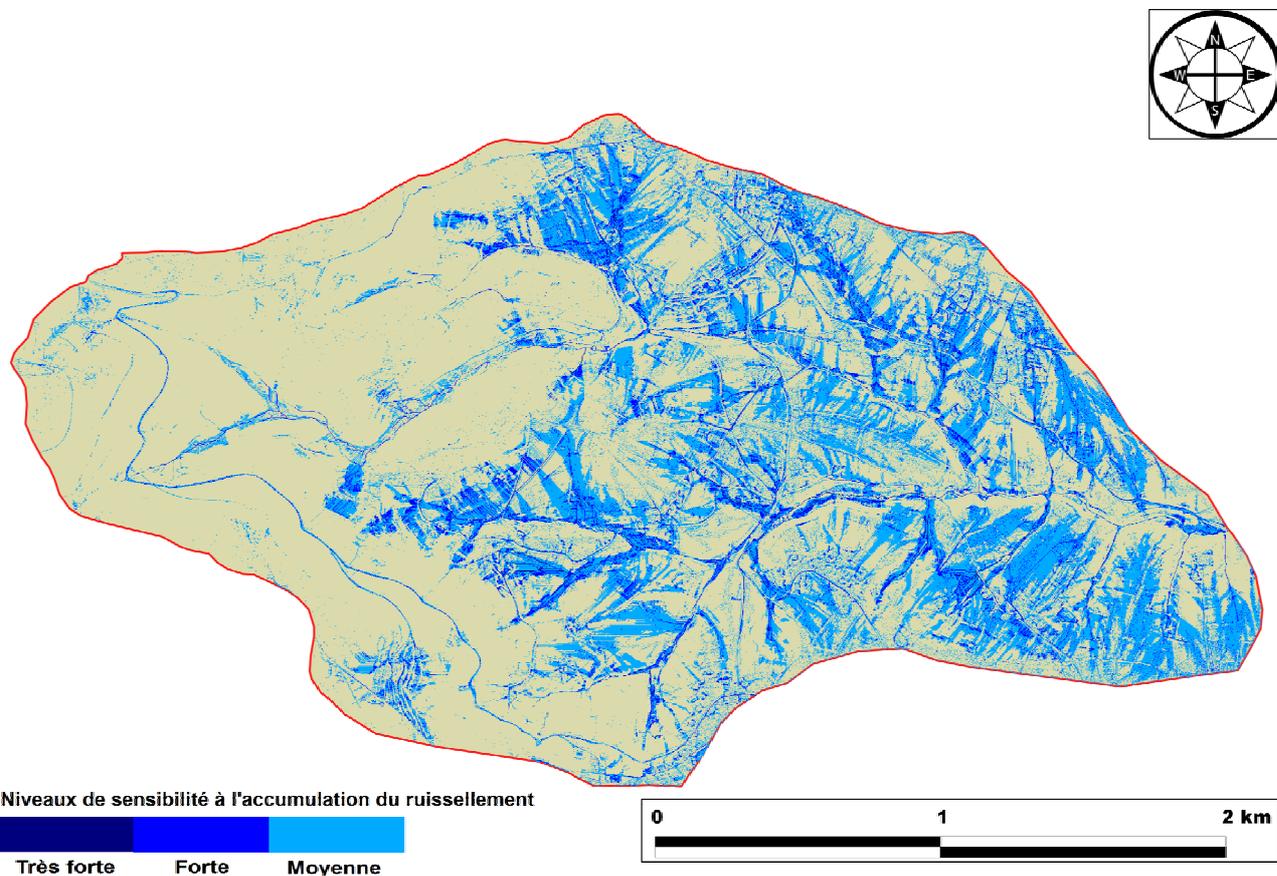


Figure 12 : Exemple de CAC - Zones les plus sensibles à l'accumulation (submersible) du ruissellement sur le bassin du Mercier.

d- Les cartes d'aptitude aux sinistres (les zones sinistrables)

Il existe **deux types de zones cartographiées où il peut y avoir des sinistres** avec la méthode ANSETR. Les zones d'aptitude au transfert et les zones d'aptitude à l'accumulation. Les zones de transfert, malgré leur rôle de transit des eaux sont également soumises aux conséquences des écoulements (exemple : dommage aux voiries, les équipements en zones de transfert peuvent être endommagés par les coulées de boue, les phénomènes de 'vagues' liés aux ruptures d'embâcles, etc.). Les zones sensibles à l'accumulation sont par définition les zones les plus exposées aux inondations. Elles se situent aussi bien en dans les zones d'expansion des crues (débordement de rivière) que dans des zones éloignées des cours d'eau, en versant.

Plusieurs utilisations peuvent donc être faites des cartes issues de l'analyse. On peut ne s'intéresser qu'aux zones de sensibilité à l'accumulation du ruissellement permettent d'identifier les zones inondables par ruissellement et dans ce cas, seules les zones sensibles à l'accumulation du ruissellement seront cartographiées. On peut aussi déterminer les zones de croisement ou d'emprunt des voiries susceptibles d'être rendues temporairement impraticables. La carte devient un outil de réflexion pour la gestion des axes de communication en cas d'inondation par ruissellement. Si la problématique de la voirie est privilégiée, la carte d'aptitude au transfert du ruissellement sera utile. Il est possible enfin de s'intéresser à l'ensemble des zones où il y a un potentiel de sinistre. C'est la carte d'aptitude au sinistre qui sera utilisée et croisée avec la vulnérabilité.

La notion de zones 'sinistrables' permet d'identifier des lieux pouvant être impactés par le ruissellement ; aussi bien les zones inondables, que les axes de communication pouvant servir d'axes d'écoulement. Les cartes d'aptitude au transfert et à l'accumulation du ruissellement sont fusionnées pour créer la carte d'aptitude aux sinistres (figure 13). La figure 14 montre un exemple de Carte d'Aptitude au Sinistres (CAS) sur le bassin du Mercier.

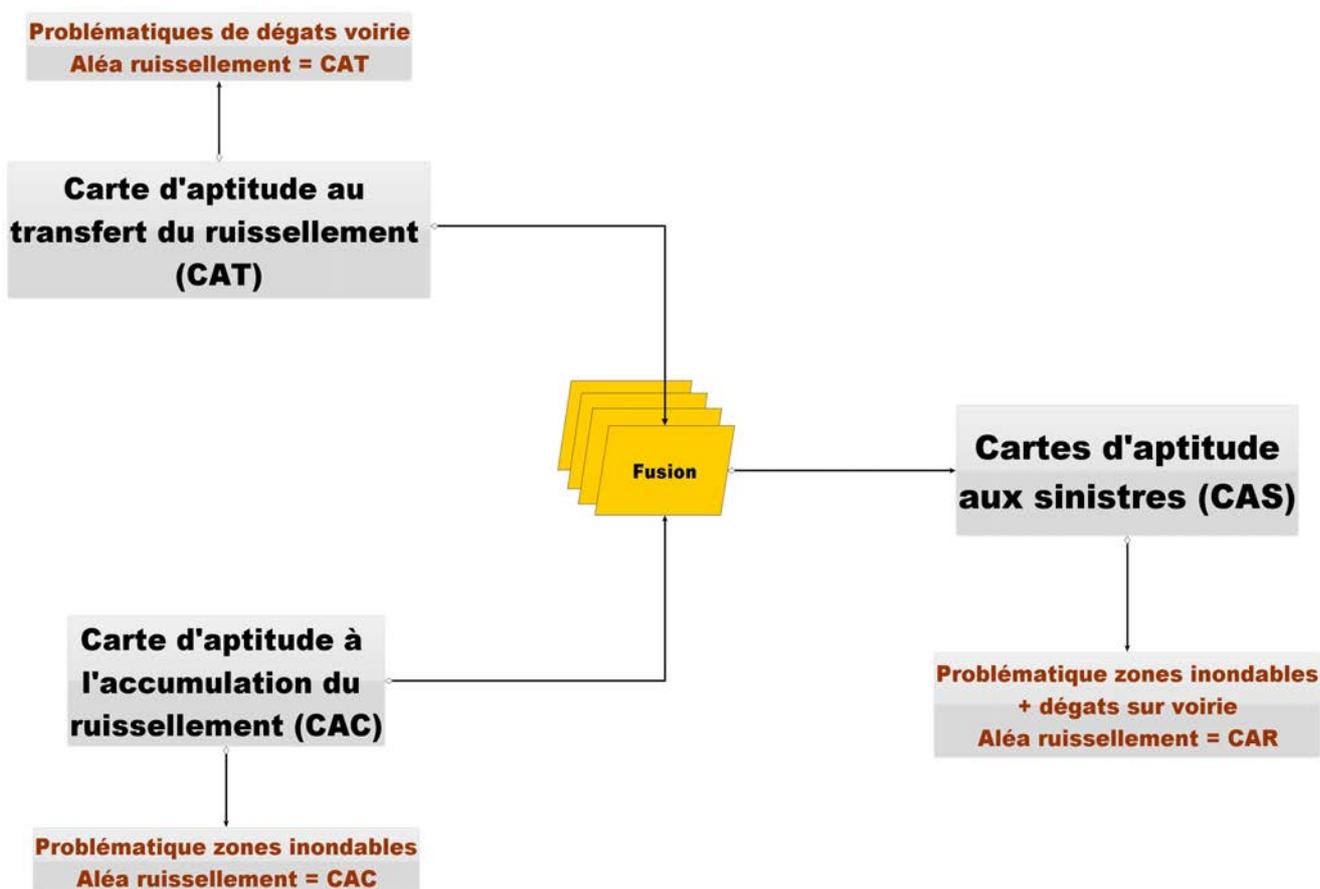


Figure 13 : Détermination des cartes de sensibilité aux sinistres

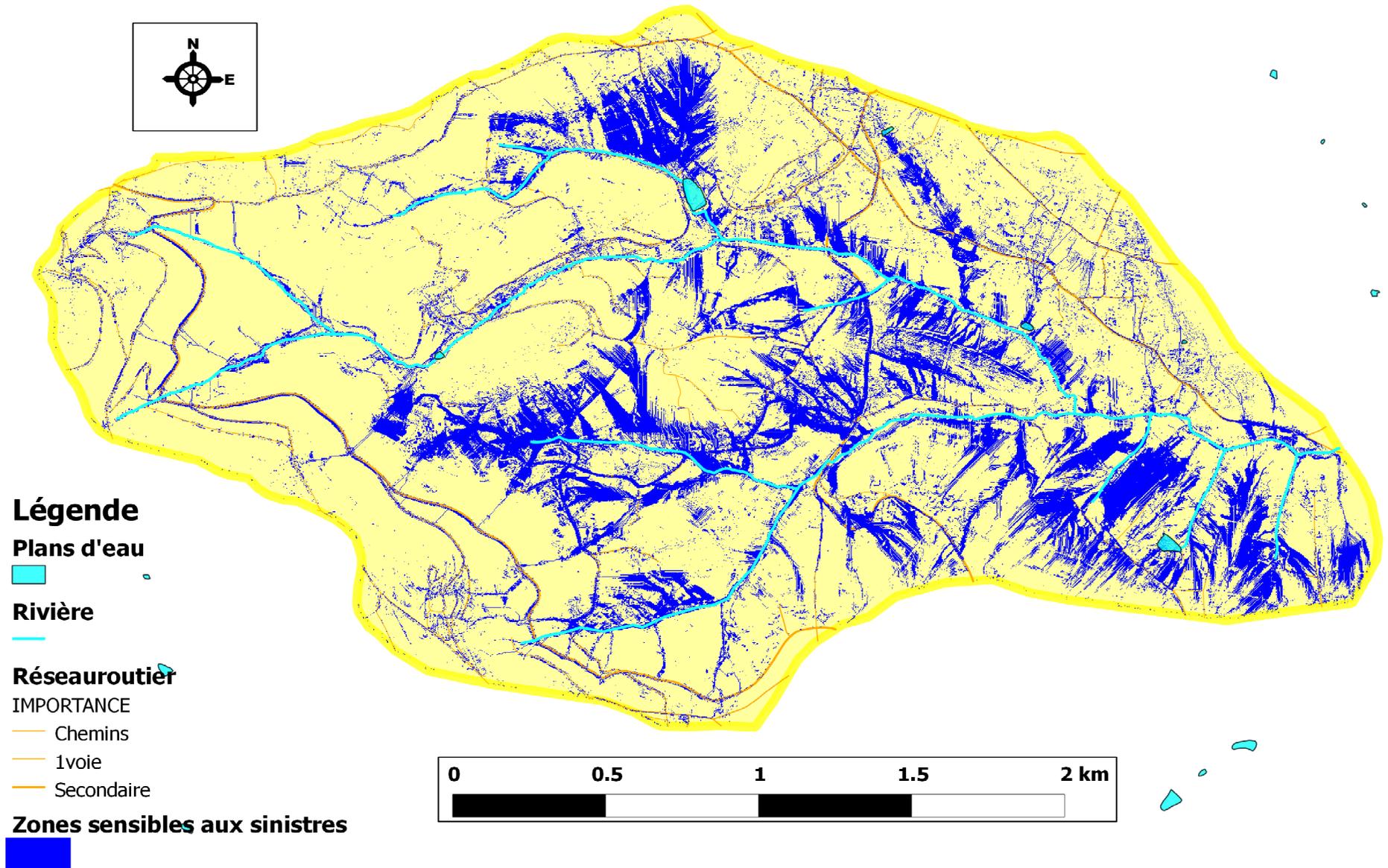


Figure 14 : Exemple de CAS : Carte d'aptitude aux 'sinistres' sur le bassin du Mercier

II-1-3 ANSETR : Une analyse de complexité progressive.

Les différentes étapes présentées ci-dessus constituent la base de la méthodologie ANSETR qui permet d'obtenir une première génération de cartes d'aptitude du milieu au ruissellement. (CAP, CAT et CAC). Comme annoncé au début du paragraphe II-1-2, la méthode est basée sur deux hypothèses de travail : la sensibilité d'un milieu est proportionnelle au nombre de facteurs de prédisposition au ruissellement. Tous les facteurs sont considérés comme ayant le même poids dans la valeur globale du niveau de sensibilité.

Ces hypothèses de départ comportent un certain nombre de faiblesses, dont la sous-estimation de l'aptitude au ruissellement dans les zones imperméabilisées ou d'affleurements rocheux où un seul facteur de prédisposition suffit à rendre une zone très sensible. D'autres incertitudes existent dans la version de base, et sont relatives aux problèmes posés par la classification de l'épaisseur du sol et la caractérisation des zones agricoles.

- l'épaisseur des sols est toujours classée sur un bassin de façon relative sans valeur seuil permettant de qualifier le niveau de sensibilité des bassins ayant par exemple seulement des valeurs faibles (ou fortes) d'épaisseur des sols.

- par ailleurs, lorsqu'il n'existe pas de données précises sur les pratiques culturales, nous avons choisi de considérer ces zones comme prédisposant au ruissellement. Le problème de ce choix, réside dans le fait que la méthode donnerait de moins bons résultats dans les zones essentiellement agricoles.

Dans ce paragraphe, nous proposons des améliorations aux limites liées aux hypothèses dans le cas où l'analyse se révélerait peu pertinente sur un territoire donné. Ces analyses supplémentaires consistent en un processus itératif permettant d'intégrer différentes améliorations des cartes issues de l'analyse de base (figure 15).

Ainsi, il est possible d'aller plus loin dans la méthode avec des cartes d'aptitudes de 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} génération. A chaque génération de cartes correspond une amélioration, par rapport à l'une ou l'autre des limites exposées, mais aussi un besoin supplémentaire en informations sans lesquelles il ne sera pas possible d'affiner les cartographies.

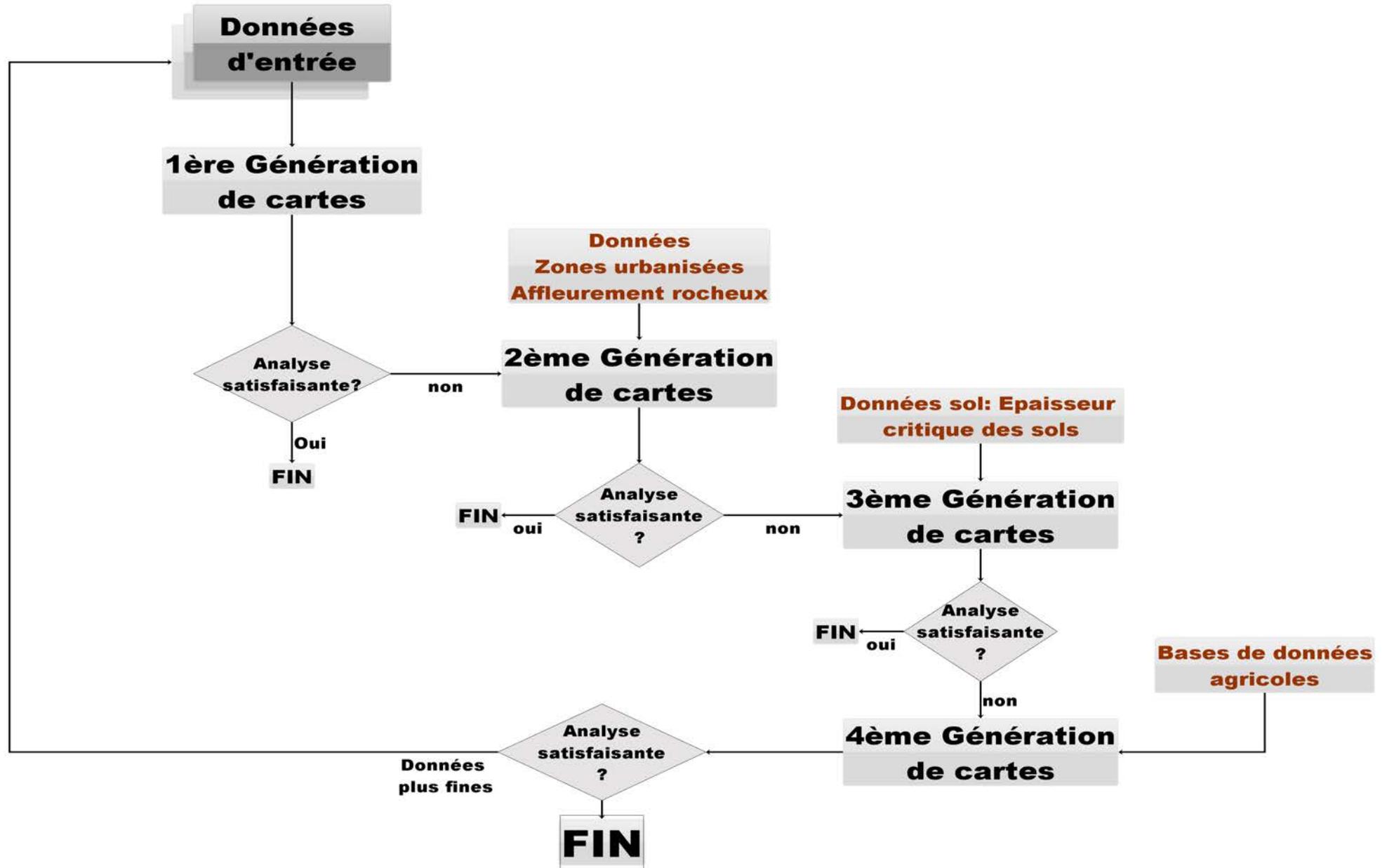


Figure 15 : Démarche progressive et itérative pour l'amélioration de la méthode ANSETR.

La première amélioration consiste à intégrer les zones urbanisées et les affleurements rocheux comme facteurs qui confèrent un niveau de sensibilité maximal à la production du ruissellement. Les étapes de cartographie des zones sensibles au transfert et à l'accumulation du ruissellement sont réalisées à partir de cette nouvelle carte. Cela permet d'obtenir des cartes dites de 2^{ème} génération (exemple figure 16).

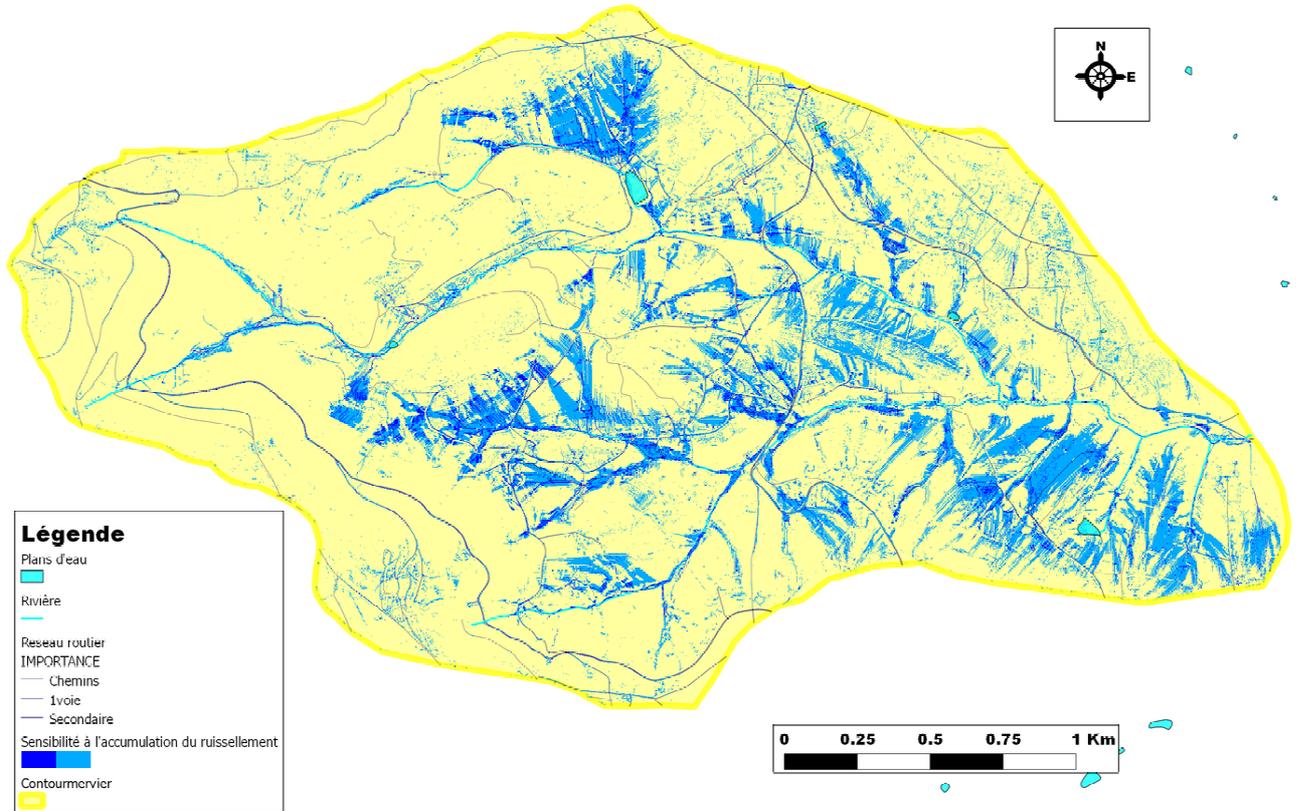


Figure 16 a: Carte d'aptitude aux sinistres de la version de base.

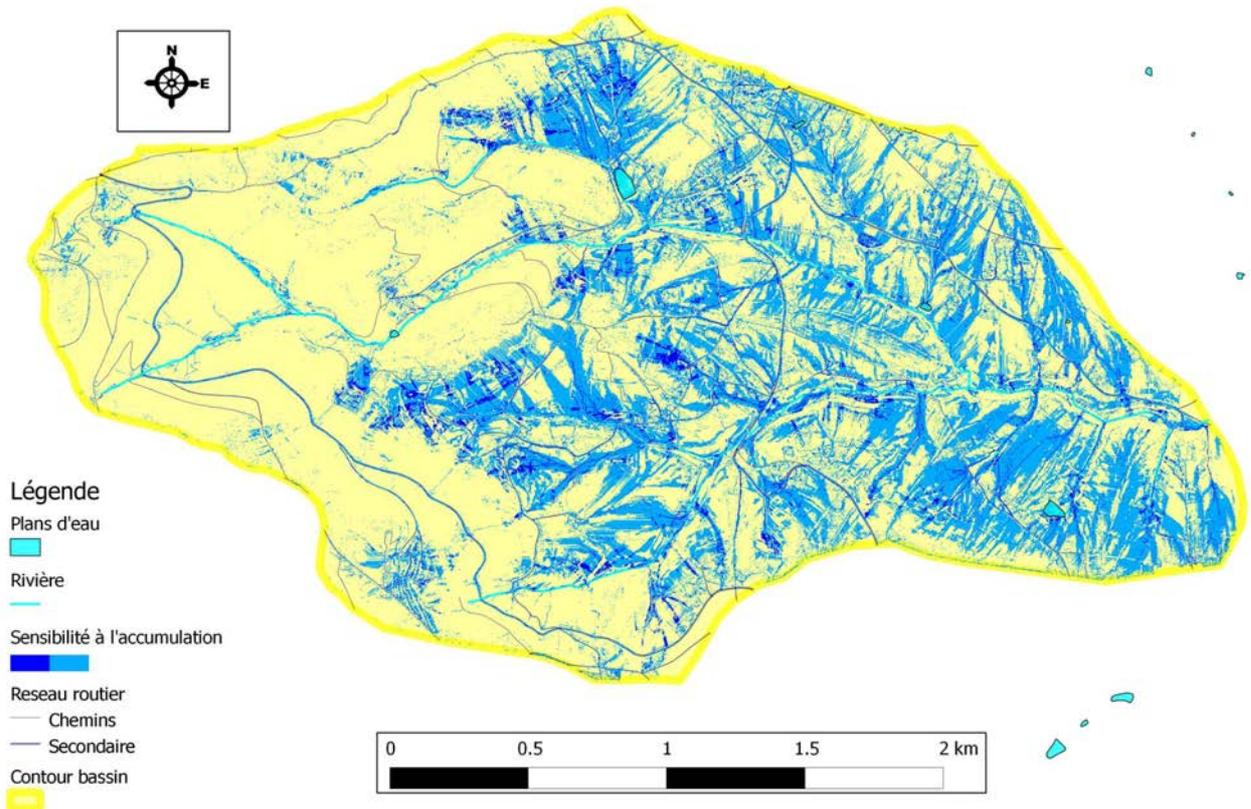


Figure 16 b: Carte d'aptitude aux sinistres de 2^{ème} génération.

Ici toutes les zones urbaines sont considérées d'emblée comme des zones de production du ruissellement. Ceci a pour conséquence d'affiner les chemins de transfert et de détecter de nouvelles zones de sensibilité à l'accumulation du ruissellement. Globalement les zones identifiées restent les mêmes, mais il y a dans les cartes de 2^{ème} génération un renforcement des emprises identifiées dans la version de base. On note une plus grande détection liée au scénario pessimiste de cette génération de cartes. En effet, les eaux issues des zones urbaines sont souvent évacuées à travers un réseau de drainage d'eaux pluviales qui débouche directement dans les cours d'eau, et donc ne suit pas les chemins de la micro-topographie. Toutefois, ces cartes peuvent se révéler très utiles en cas de débordement ou de saturation du réseau urbain car les zones d'accumulation potentielle détectées uniquement par la carte de 2^{ème} génération pourraient devenir sensibles.

La deuxième étape d'amélioration proposée consiste à intégrer des seuils sur les épaisseurs de sol afin de mieux caractériser les zones ayant exclusivement les zones à faible épaisseur et les zones à sol profond. Cette amélioration permettra de générer des cartes de 3^{ème} génération.

Une troisième étape consiste à intégrer les bases de données agricoles pour améliorer la description de ces zones. Les données nécessaires sont les données sur la durée et la nature des inter-cultures (sols laissés nus ou pas), les données sur les pratiques agricoles. Cette information est nécessaire au moins à l'échelle des parcelles cadastrales. Après intégration de ces informations, l'analyse ANSETR permet d'obtenir une *des cartes de 4^{ème} génération*. Ces cartes améliorent les cartes de base dans des zones essentiellement agricoles où les informations plus précises nuancent la sensibilité à la production du ruissellement.

Enfin, il faut préciser que dans la réalité, selon la zone d'étude il ne sera pas forcément utile de réaliser toutes les améliorations proposées. La version de base utilise des données faciles à acquérir et pertinente pour procéder à une détection des zones de production, transfert et accumulation. Le recours à des données plus précises avec reconnaissance de terrain ne se justifie qu'en cas d'étude locale visant à mettre en place des aménagements ou des plans de gestion du risque pour les zones vulnérables ou en devenir.

II-2 Précision des données et usage des cartes issues de l'analyse ANSETR.

Il convient, avant d'aller plus loin, de préciser la signification de quelques termes.

La précision de la donnée de base fait référence dans notre contexte à sa capacité à reproduire de façon plus ou moins fiable la variabilité réelle. Dans le cas par exemple des données topographiques, les valeurs mesurées peuvent être plus ou moins espacées (1 km, 50m, 25m, 3m) selon la couche d'information utilisée. Il va de soi que la représentativité spatiale des valeurs croît avec la densité spatiale de l'information pour la majorité des facteurs naturels représentés par les couches d'information. Le calcul de pentes pour une maille 1 km sera beaucoup moins près de la réalité qu'avec une maille de 3m si cette pente varie réellement tous les 100 m. La meilleure précision n'est cependant pas toujours nécessaire. Tout dépend donc de la variabilité spatiale des objets que l'on étudie. De façon générale, il sera souvent difficile d'obtenir sur de grands territoires toutes les données nécessaires à l'analyse proposée avec une grande précision.

L'échelle n'est pas à confondre avec la précision de la donnée. Ce n'est qu'un choix de réduction de la taille réelle des objets. Elle doit cependant être adaptée pour restituer le niveau de détail que l'on veut conserver sur sa représentation réduite. Les termes de grande et petite échelle sont équivoques car pas forcément interprétés de la même façon par tous. Un facteur de réduction de 1 :250000 permet de représenter un plus grand territoire sur une même surface qu'un facteur de réduction de 1 :10000 qui lui permettra de figurer plus de détails. L'échelle influence donc la précision de la représentation et non celle de la donnée. Par contre le choix de l'échelle peut être guidé par la précision de la donnée spatiale : pour une valeur d'altitude par maille d'un kilomètre de résolution, il est inutile de choisir une échelle permettant de conserver du détail décimétrique. La valeur ne fera que se répéter 10000 fois dans une maille kilométrique de la carte sans apporter plus de détail. En analyse géomatique il est nécessaire d'évaluer la cohérence entre l'analyse proposée et la précision des données utilisées. Cela implique de connaître l'étendue spatiale des variations que l'on souhaite détecter.

La taille de la maille élémentaire qui représente un découpage de l'espace en petits carrés (le plus souvent) est choisie en fonction de la précision spatiale des données utilisées. Si l'information de base est peu précise, la maille sera grande et vice versa. Il est possible de tester l'effet de la « dégradation » de la précision de l'information en moyennant par exemple l'altitude connue dans des mailles de 10mX10m dans des mailles de 100mX100m. L'intérêt de la démarche est d'évaluer par exemple la capacité de détection des zones de production par la méthode ANSETR à partir de données altimétriques peu précises. La méthode ANSETR fournit des résultats cartographiques dont l'usage dépend de la précision de l'information utilisée.

Dans la méthodologie présentée, il y a deux questions qui se posent sur la cohérence entre l'analyse proposée par rapport à la précision des données pouvant être utilisées. Tout d'abord la première interrogation est relative à la pertinence des analyses proposées lorsque les données utilisées sont trop grossières. Ensuite on peut aussi se demander quels usages sont possibles avec les résultats de l'analyse, sachant que les données disponibles auront sans doute différentes précisions.

II-2-1 Approche globale adoptée

Il faut préciser que dans le domaine de la gestion des risques liés au ruissellement, différents acteurs travaillent à différentes échelles avec des objectifs et des besoins d'informations de précision aussi différentes.

Au niveau national, le ministère chargé de l'environnement développe une politique de prévention des risques d'inondation au niveau du territoire français. L'état a pour principale mission la mise en œuvre de plans de prévention des risques d'inondation (PPRI). Selon les actions menées au niveau national il peut y avoir besoin de fixer des priorités par région, département ou encore choisir sur l'étendue du territoire nationale des communes prioritaires dans le cadre de programme de partenariat ponctuel et précis. Mais l'état ne se substitue pas aux collectivités locales et n'a donc pas besoin (sauf cas particulier) d'informations à la parcelle par exemple.

A l'échelle des départements et des régions, il existe des acteurs qui ont besoin d'informations sur les communes ou les territoires à risque. Les départements ont la responsabilité de fournir des informations aux acquéreurs et loueurs (IAL – la loi de 2003, entrée en vigueur en 2006). Elles doivent aussi disposer à l'échelle départementale d'un dossier d'information sur les risques majeurs (DDRM) à destination du grand public. Les départements ont parfois pour responsabilité la gestion de certains réseaux routiers pouvant être impactés. Les acteurs ont donc besoin d'une part de cibler les priorités et d'autre part de prendre des décisions en cas de crise. La précision des informations nécessaires n'est pas la même pour ces différentes missions.

Au niveau local, les communes sont en première ligne dans la prévention des inondations et la gestion des crises. Elles ont comme les départements la responsabilité de fournir des données sur les risques aux acquéreurs et loueurs de biens immobiliers (IAL). Elles ont aussi besoin d'informations relativement précises pour constituer des dossiers d'information sur les risques naturels (DCRIM). Elles doivent développer des actions de prévention et produire des plans communaux de sauvegarde (PCS) dans le cadre de la gestion de crise. Le niveau communal est donc celui des données précises où la réglementation et la décision s'appliquent à la parcelle cadastrale.

Cette diversité des acteurs nous a amenée à choisir dans l'analyse proposée deux niveaux de précision pour représenter les résultats de la méthode ANSETR. La faible précision (spatiale) où les informations d'entrée sont plus ou moins grossières et la grande précision où l'information doit permettre la prise de décision des acteurs locaux. Avant l'analyse, les utilisateurs devront inévitablement répondre à la question de l'usage qui sera fait de la carte. Cette séparation de la méthode selon les niveaux de précision confère à la méthode proposée un caractère multi-échelle.

A faible précision, les cartes produites pourront trouver des applications au niveau départemental par exemple ou au niveau des bassins versants de plusieurs dizaines à quelques milliers de km². A grande précision, les cartes produites auront des applications depuis les politiques de prévention jusqu'à la gestion de crise.

Quelle sera la pertinence des données grossières étant donné que la variabilité des processus liés au ruissellement peut concerner des distances de l'ordre du mètre. Pour répondre à cette question, le chapitre ci-dessous détaille le sens de l'analyse cartographique à faible et forte précision spatiale des données, ainsi que les usages qui peuvent être faits de ces cartes selon les niveaux de précision.

II-2-2 Quels usages potentiels des cartes selon la précision des données d'entrée ?

Le phénomène de ruissellement est indiscutablement un processus très influencé par des facteurs locaux (micro-topographie, pratiques à la parcelle agricole etc.). Les données d'entrée requises sont globalement de très grande précision. Plus les informations d'entrée seront précises, et plus les cartes issues de l'analyse pourront être utilisées efficacement à des fins de décisions locales. Ces applications incluent par exemple les politiques communales de prévention du ruissellement (occupation des sols, pratiques agricoles et aménagements, politiques de re-localisation d'enjeux etc.), l'appui à des actions dans le cadre de la vigilance et de la gestion de crise en cas de sinistre (fermeture de voies d'accès, message à la population, voire évacuation).

Les cartes issues de données peu précises peuvent avoir des applications dans la détermination de territoires à risque de ruissellement, ou dans le diagnostic visant à cibler des priorités sur un grand territoire. Dans ces cas, l'information disponible peut servir à définir des zones où une étude plus fine sera nécessaire pour délimiter précisément l'aléa. Elles peuvent aussi servir à définir des politiques régionales, départementales en matière de gestion du ruissellement.

Il est recommandé dans le cadre de l'exploitation des résultats de l'analyse, de considérer les zones de sensibilité identifiées non pas au niveau du pixel, mais à celui de zones où on note une certaine persistance spatiale des informations de sensibilité. En effet, les incertitudes au niveau du pixel sont liées aux différentes sources de données. La prise en compte de l'information du voisinage des pixels permet de minimiser ces incertitudes. Concrètement, les actions éventuelles (prévention, gestion de crise etc.) doivent se faire non pas en regardant la maille élémentaire mais la zone dominée par un niveau de sensibilité.

Dans les cartes issues de l'analyse, la précision des informations aux limites des différentes zones sera contrôlée par la couche de données la moins précise. Une carte d'aléa ayant été obtenue avec des données d'une précision minimale de 200m permettra de produire une carte d'aléa avec une précision de contour de 200m.

a- Données à grande précision spatiale (petits territoires – quelques km²)

Il est nécessaire d'avoir une description fine de *l'occupation des sols*. Des possibilités existent à partir des images satellites ou autres images issues des technologies aéroportées (satellites, imageries aériennes etc.). Une distinction des types d'occupation des sols doit être faite au moins à l'échelle des parcelles cadastrales. En zone urbaine, une description fine doit être réalisée afin de séparer les zones réellement imperméables des autres types d'occupation des sols. Les zones agricoles devront idéalement être classées selon les critères liés aux pratiques agricoles afin d'affiner l'analyse, notamment sur des bassins essentiellement agricoles (cultures couvrantes ou pas, etc.).

Il est souvent difficile d'avoir des données spatiales fines et représentatives sur les caractéristiques hydrodynamiques des *sols et la géologie*. Il existe parfois des données au niveau local dans les chambres d'agriculture, mais elles sont souvent ponctuelles et rarement sous forme numérique. Des cartographies précises des sols existent dans certaines zones, mais il peut être nécessaire de faire des campagnes de mesures pour estimer les paramètres de perméabilité et l'épaisseur des premiers horizons de sol.

Des données très précises sur la *topographie* sont nécessaires. Les modèles numériques de terrain permettent d'obtenir une carte des pentes. Ici la pente permet de décrire correctement les caractéristiques locales du relief qui sont impliquées dans les processus physiques d'écoulement de surface (ce que les données grossières ne sont pas capables de représenter). De plus, les axes de transferts impliqués dans les dynamiques de surface étudiées n'ont que de faibles dimensions (quelques mètres voire quelques dizaines de centimètre). L'extraction de ces éléments nécessite des données topographiques d'une grande précision spatiale et altitudinale.

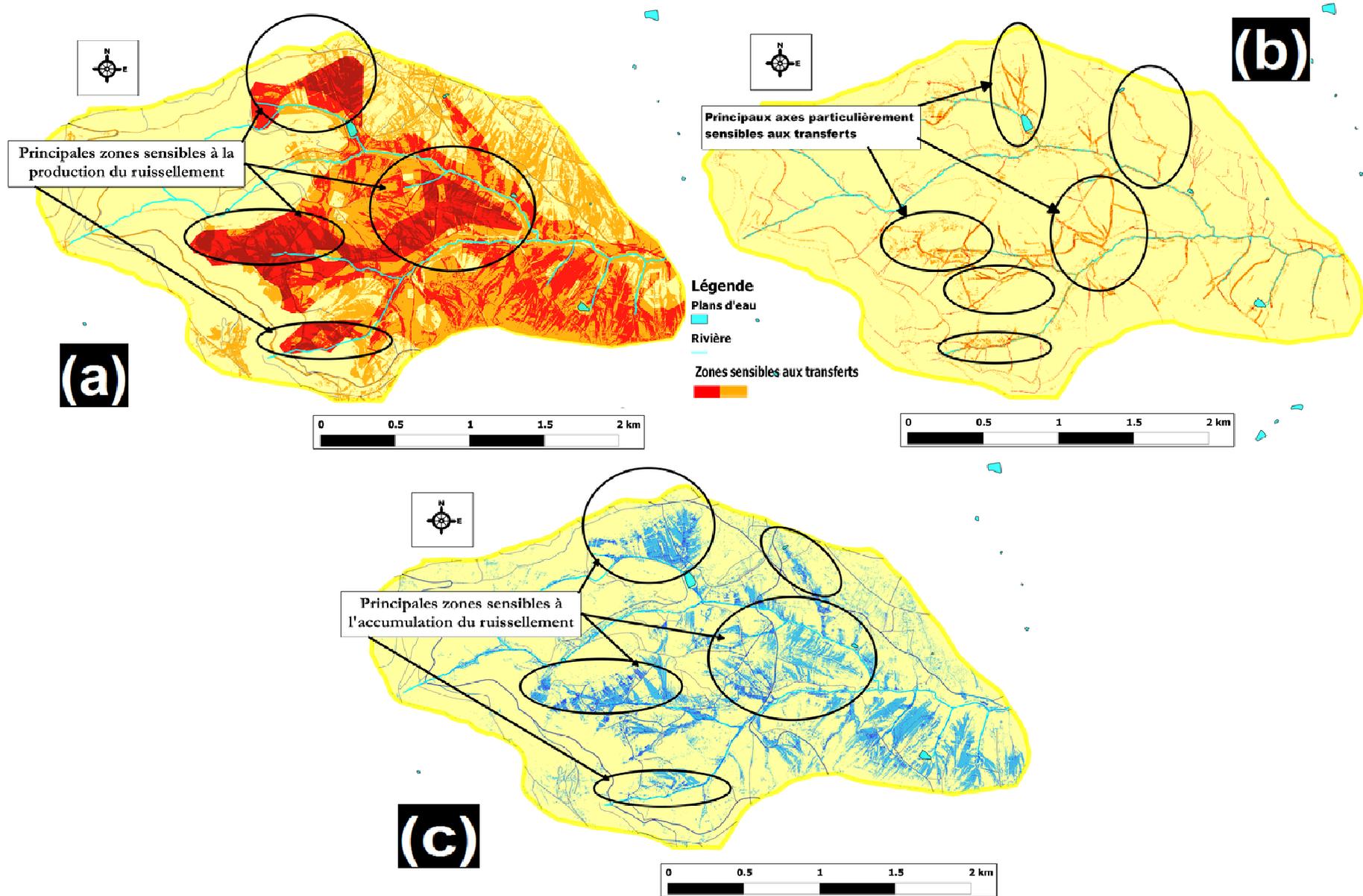


Figure 17: Cartes d'aptitude à la production (a), au transfert (b) et à l'accumulation (c) du ruissellement sur le bassin du Mercier à partir de données précises.

Les différentes cartes de la figure (17) sont utilisables pour des décisions au niveau local. Comme annoncé au début de ce paragraphe, les valeurs de sensibilité au niveau de la parcelle ne doivent pas être utilisées pour définir des politiques ni pour déterminer des limites. L'intérêt de ces cartes réside dans leur capacité à faire émerger des zones entières (secteurs encerclés sur les cartes) où il existe une certaine persistance spatiale de l'information sur la sensibilité. Ces zones devraient constituer les échelles de décision. Plus l'information d'entrée sera précise et plus ces zones seront fiables.

La carte de la figure 17-a (aptitude à la production du ruissellement) peut être utilisée dans le cadre de politiques d'infiltration et de limitation d'imperméabilisation. Les zones mentionnées sur cette carte devraient être prioritaires dans le cadre de telles politiques. La carte de la figure 17-b (aptitude au transfert du ruissellement) peut être utile dans le cadre de programmes d'aménagement de voirie afin d'éviter que ces aménagements ne s'érigent en frein aux écoulements naturels des eaux de surface. Elle peut aussi servir dans le cadre de la gestion de crise par exemple pour diffuser des informations de vigilance ou pour la fermeture des voies d'accès particulièrement exposées. La carte de la figure 17-c (aptitude à l'accumulation du ruissellement) peut être utilisée dans le cadre de politiques de préventions (re-localisation d'enjeux, politiques d'aménagements adaptés...) ou dans le cadre de la gestion de crise (messages aux populations, évacuation...).

Enfin les cartes des figures (17b et 17c) peuvent être particulièrement utiles dans le cadre de la mise en place de plans de secours (par exemple l'identification de voies d'accès peu exposées pour l'organisation des secours, l'identification de zones peu sensibles à la submersion pour accueillir des sinistrés en cas de crise etc.). Elles peuvent aussi servir dans les politiques de gestion de crise en 'mode dégradé', particulièrement dans les contextes où le temps de réaction en cas de sinistre est particulièrement court.

b- Données à faible précision spatiale – à partir de quelques dizaines de km² à quelques milliers de km².

Les facteurs de prédisposition n'ont plus un rôle direct sur la physique des phénomènes du ruissellement. Ces données grossières vont caractériser des bassins, des versants et les dynamiques de surfaces pouvant se mettre en place sur ces surfaces.

Les données topographiques disponibles dans les bases de données habituelles sont suffisantes à ce niveau d'investigation. On peut citer en exemple la BD Topo de l'IGN (25m – 1000m), les données SRTM de la NASA (1km, 90m) ou encore les données ASTER (30m) etc. Ici, la notion de pente par exemple désigne plus des pentes moyennes de versants de vallées etc. avec une forte variabilité sous-maille. Les pentes fortes avec des données grossières peuvent servir à caractériser de façon globale la rapidité des dynamiques de surface sur des versants et dans les thalwegs par exemple.

Il existe des données sur les sols à l'échelle 1/1000000 sur l'étendue du territoire national, proposées par l'INRA. Dans le cadre des programmes IGCS (Inventaires Gestion et Conservation des Sols) des données sur les sols sont produites dans certaines régions de France à l'échelle de 1/ 250000. C'est la source d'information disponible couvrant de grands territoires. Sur de grandes étendues spatiales, les données sur les sols permettent de décrire des 'massifs' avec une forte variabilité des propriétés hydrodynamiques sous-maille. On ne peut en tirer que des caractérisations globales sur leur lien avec les écoulements en surface, avec de fortes incertitudes sur les limites et à l'intérieur des types de sols.

Les informations sur l'occupation des sols dans les bases de données comme Corine Land cover (100m et 200m) peuvent être utilisées à ce niveau de précision. En raison de non-disponibilité d'informations précises sur les pratiques agricoles, ces zones sont considérées par défaut comme pouvant produire du ruissellement. Pour les applications grands territoires, les types d'occupation identifiés dans la Corine Land Cover permettent de cartographier la sensibilité au ruissellement liée à l'occupation des sols.

Dans l'exemple ci-dessous (figure 18) du bassin versant de l'Yzeron (Ouest-Lyonnais), nous avons utilisé un modèle numérique de terrain de 25m, une base de données d'occupation des sols de Corine Land Cover (100m) et de la base de donnée des sols du programme IGCS (1/250000). Sur cet exemple, les zones encerclées sont les zones les plus sensibles du bassin versant.

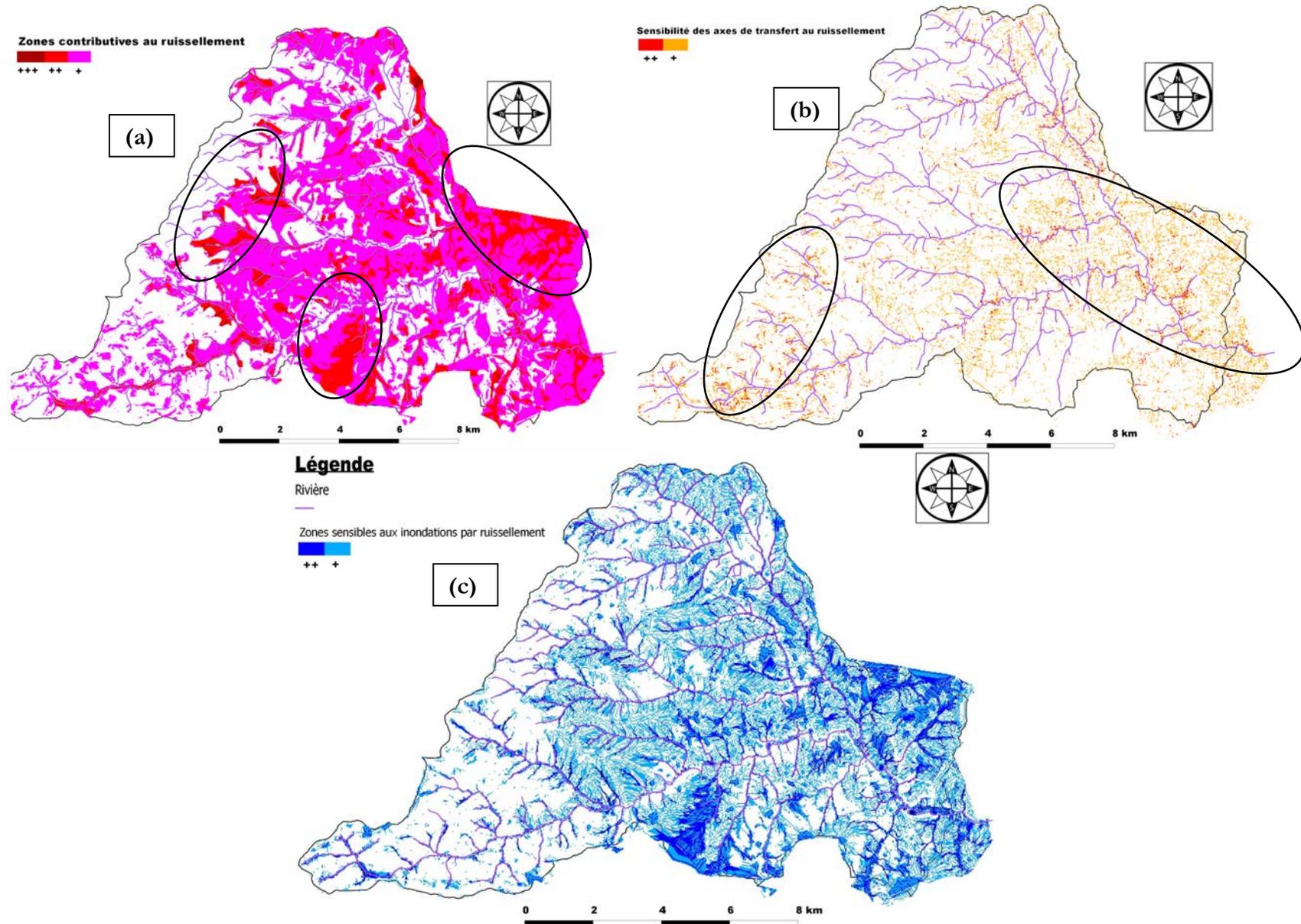


Figure 18 : Cartes d'aptitude à la production (a) au transfert (b) et à l'accumulation (c) du ruissellement du bassin versant de l'Yzeron.

Dans les zones de production, encerclées sur la figure 18-a, des politiques globales d'infiltration, de lutte contre l'imperméabilisation devraient contribuer efficacement à diminuer les sinistres liés au ruissellement, à l'échelle du bassin de l'Yzeron. La carte de la figure 18-b montre les axes de transferts potentiellement concernés par des sinistres liés au ruissellement. Des politiques globales d'aménagement de voiries adaptées, en priorité dans ces zones pourraient améliorer les transferts naturels des eaux et diminuer la vulnérabilité des axes de circulation. Enfin, la carte de la figure 18-c montre des zones potentiellement submersibles par des eaux de ruissellement. Ces zones devraient avoir la priorité à l'échelle du bassin pour des politiques de prévention accrues, des politiques d'occupation des sols visant à minimiser l'exposition aux sinistres etc.

La carte (figure 19) du bassin du Mercier (encarté à gauche) montre qu'il est malgré tout possible de cibler à partir d'étude sur de grandes zones avec des données grossières, des zones où des études détaillées seraient nécessaires. On s'aperçoit que l'emprise identifiée avec les données fines n'est pas tout à fait identique, même si les zones sensibles restent globalement les mêmes qu'avec des données grossières.

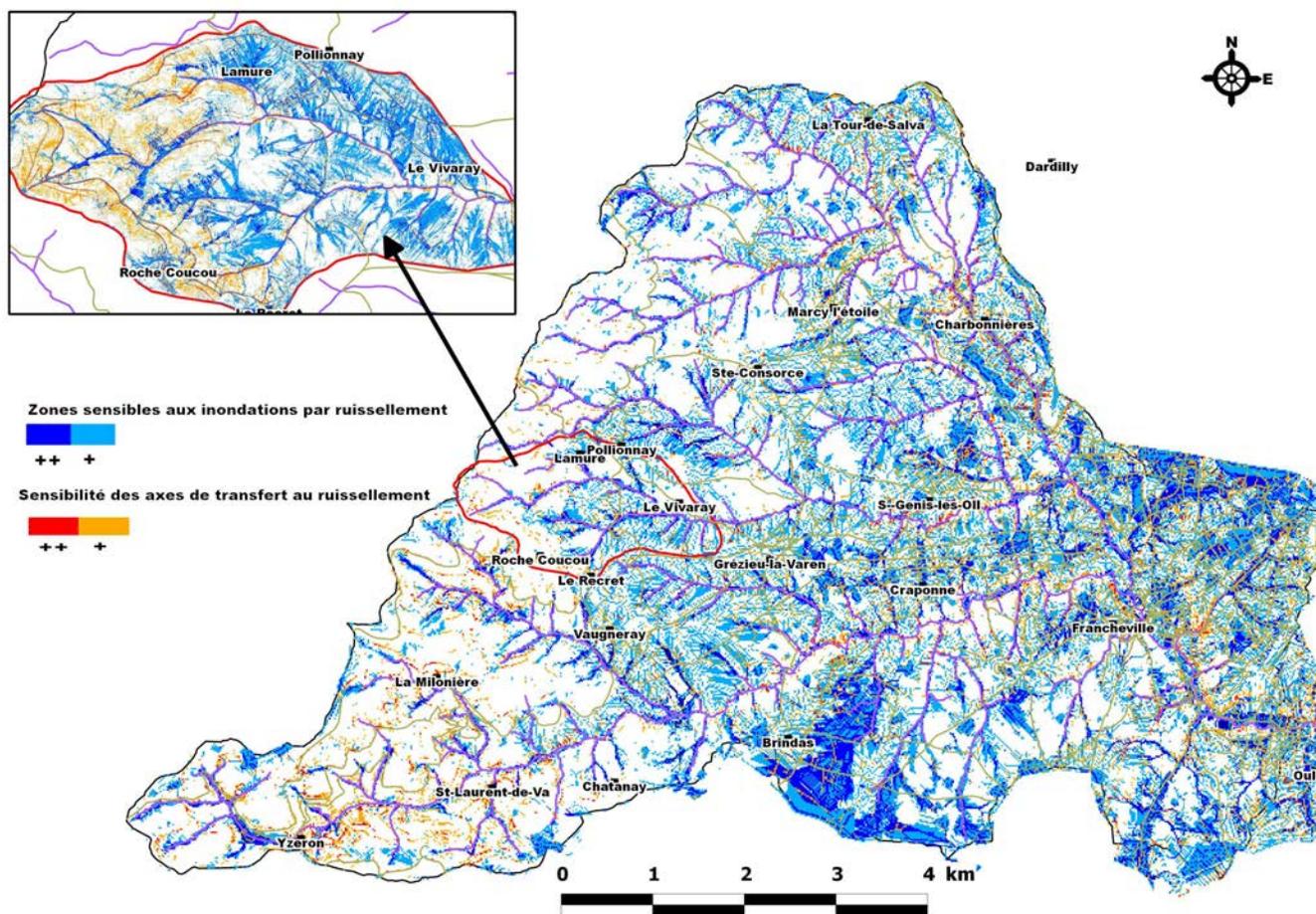


Figure 19 : Utilisation potentielle de cartographies sur de grandes étendues spatiales de la sensibilité aux sinistres liés au ruissellement sur le bassin de l'Yzeron (cibler des zones).

II-2-3 La question des incertitudes sur les cartes issues de l'analyse ANSETR

Les incertitudes sur les zones de sensibilité identifiées sont directement liées aux incertitudes sur les données d'entrée. Elles se traduisent soit par des incertitudes sur les limites des zones identifiées, soit par une incertitude sur l'homogénéité de la sensibilité à l'intérieur des emprises identifiées.

Dans le cas des incertitudes à l'intérieur de l'emprise des zones sensibles identifiées, la proposition de la démarche IRIP est d'appliquer le principe de précaution en considérant la situation la plus défavorable à l'intérieur des emprises des zones de sensibilité identifiées par l'analyse.

Dans le cas des incertitudes sur les limites des zones de sensibilité, nous avons proposé dans le cadre de la méthode IRIP de matérialiser la zone d'incertitude en créant une bande d'incertitude (bande de sécurité) autour des zones sensibles identifiées. La taille de cette bande de sécurité sera liée directement à la précision des données d'entrée les moins précises (exemple figure 20).

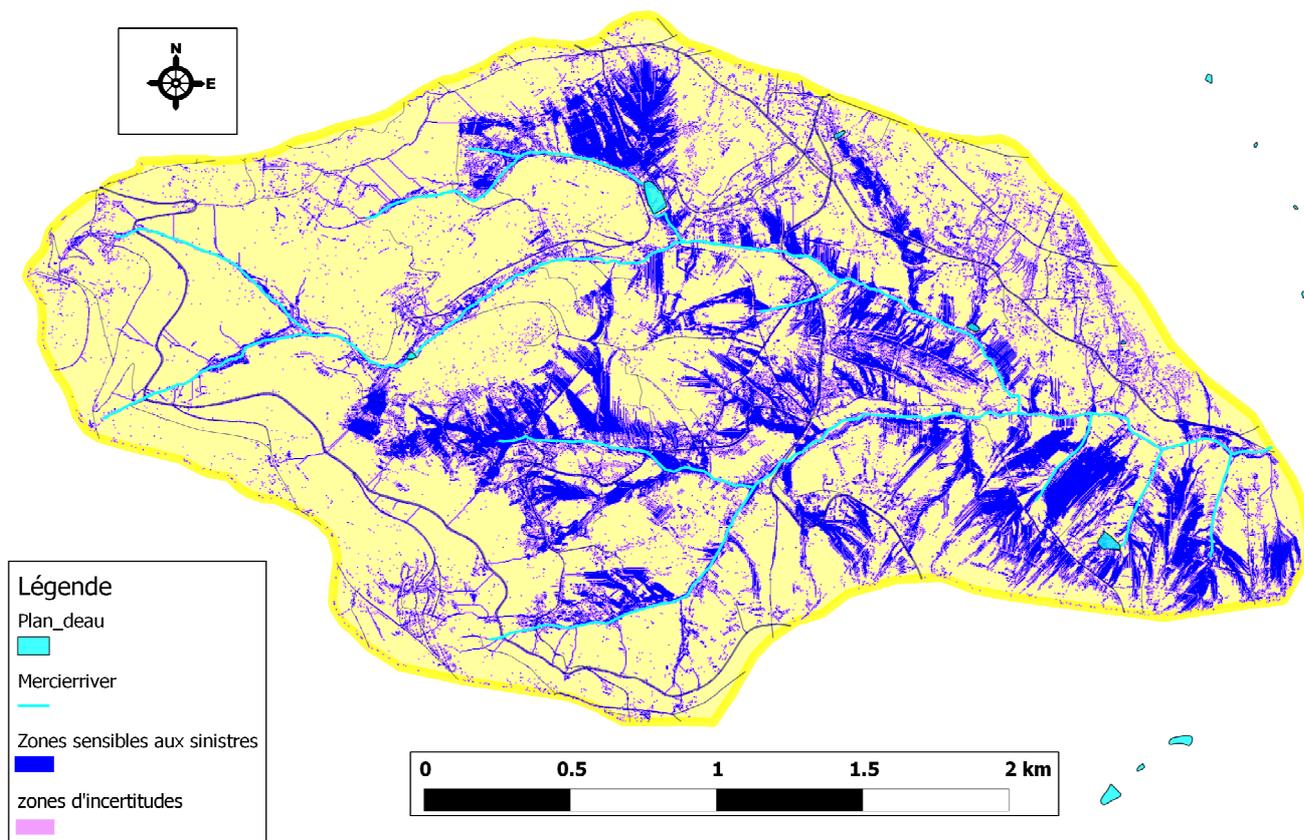


Figure 20 : Intégration des incertitudes sur les limites des zones sensibles aux sinistres

II-3 Evaluation de la méthodologie ANSETR

Les indicateurs du ruissellement proposés étant différents selon la précision spatiale des données d'entrée, il a été adopté une stratégie d'évaluation spécifique et adaptée aux deux niveaux d'investigation. Il s'agit de confronter sur les deux bassins tests les résultats de la cartographie avec diverses sources de données sur des cas observés.

Sur de grands territoires et avec des données grossières, nous avons exploité les bases de données nationales existantes sur les sinistres liés au ruissellement. Il existe aussi les données sur les atlas des zones inondables qui fournissent une information historique sur les zones situées à proximité des zones d'expansion des crues.

Sur de petites zones et avec des données de grande précision, les résultats de la cartographie sont comparés avec des données issues d'un dispositif d'observation spécialement mis en place dans le cadre du projet IRIP sur le bassin test du Mercier (dispositif DEVERSE). Les résultats de la cartographie sont aussi comparés à une base de données des sinistres observés sur le territoire du Grand Lyon (sinistres déclarés catastrophe naturelle ou pas). Cette base de données recense des informations précieuses sur les lieux (rues dégâts) au niveau des communes appartenant à la communauté de communes. Au total 164 sinistres ont été répertoriés dans cette base. Elle a été utilisée pour des confrontations avec les cas d'application de Givors (69) et de Genay (69). De même il a été utilisé en validation des observations directes de terrain après une inondation par ruissellement (Juin 2010) du village de Givors (69) .

Il a aussi été réalisé une analyse de la persistance spatiale des zones sensibles aux inondations par ruissellement. Une absence de persistance montrerait le caractère aléatoire des choix réalisés soit au niveau de la méthode de combinaison des informations spatiales, soit au niveau des modalités retenues pour chacun des facteurs « aggravants » selon leurs valeurs. Cette analyse permet aussi de répondre à la question de la pertinence de l'analyse lorsque les données d'entrée sont grossières.

- La méthode d'évaluation *a posteriori* consiste à croiser la cartographie *a priori* avec des cas avérés. Plusieurs cas se présenteront alors :

- La prévision recoupe l'observation
- La prévision ne recoupe pas l'observation
- Cas non réalisés mais potentiels
- Cas non déclarés en raison d'une vulnérabilité faible
- Cas irréalistes en raison de critères « pessimistes »

La phénoménologie du ruissellement intense a été peu étudiée en condition réelle (sur le terrain). Nous avons travaillé sur des « cas frais » en Région Rhône Alpes. Ceci consiste à de visiter des sites impactés juste après un événement de ruissellement intense en se concentrant sur les causes et non les conséquences qui alimentent les médias. Nous avons réalisé des observations post-événement dans le cadre du projet notamment sur la commune de Givors où un sinistre a eu lieu en Juin 2010, en rapport avec le ruissellement. Cela a permis de faire un diagnostic in-situ sur le petit bassin du Merdari. Nous allons exploiter ces observations dans le cadre des cas d'application prévus.

II-3-1 Evaluation sur de grands territoires

a- Stratégie adoptée

Au niveau régional, la source d'information retenue est la base de déclaration des catastrophes naturelles liées aux inondations par ruissellement. La base de données sur les catastrophes naturelles (CATNAT) identifie le nombre d'événements par communes. Cette base de données sera confrontée avec les résultats de la cartographie sur grand territoire.

Les limites de la source d'information sur les catastrophes naturelles résident dans le fait que ces déclarations ne sont pas spatialisées à l'intérieur des communes. Les comparaisons avec cette source d'information nécessitent donc de rapporter les résultats des cartographies qui résultent de ANSTRE à l'échelle des communes. Par ailleurs, ces données n'existent que dans des zones où une vulnérabilité est présente. Donc l'ensemble des inondations par ruissellement n'est pas présent dans cette base. Toutefois il s'agit d'une source d'information précieuse permettant de confronter la méthode proposée avec des cas avérés.

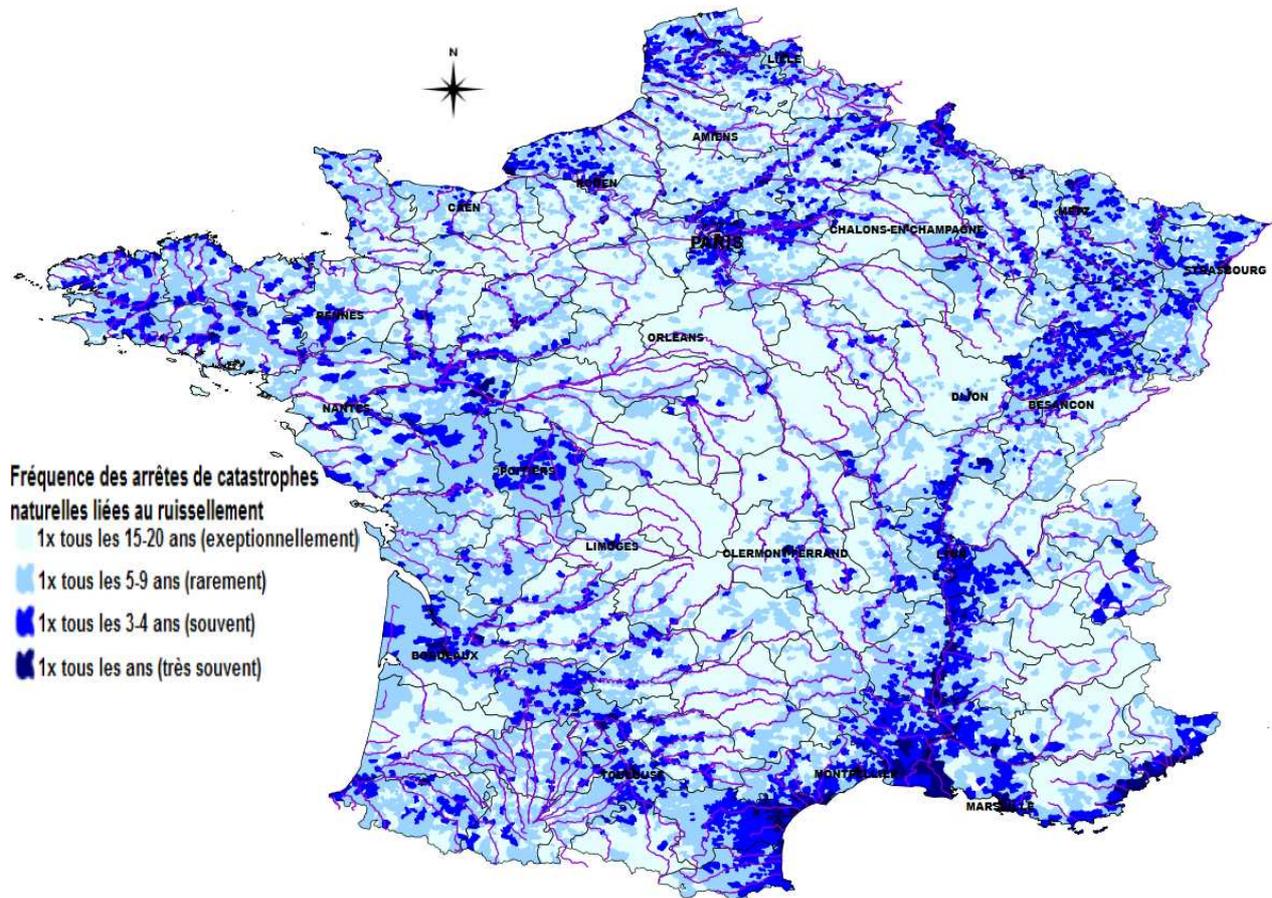


Figure 21 : Cartographie du nombre d'arrêtes de catastrophes naturelles liés au ruissellement et coulées de boue depuis 1982 (à partir des données prim.net- Déc 2010 et de la BD Geofla IGN).

Au niveau national, on se rend compte qu'il y a des régions ou territoires qui semblent plus souvent impactés que d'autres. Les vallées du Rhône, de la Moselle, de la Garonne, de l'Oise et de la Seine, ainsi que les départements du Var, de la Seine-Maritime, de la Haute-Saône et du Calvados sont les régions les plus souvent touchées. La région Rhône-Alpes fait partie des territoires les plus impactés en France.

Nous avons confronté les données de cette cartographie avec les résultats de la cartographie des zones sensibles aux sinistres identifiées avec l'analyse ANSETR, sur le bassin de l'Yzeron. Cette comparaison est faite à l'échelle communale (l'échelle des déclarations de catastrophes naturelles).

b- Résultats obtenus sur le bassin de l'Yzeron.

La confrontation entre la carte des zones sensibles aux sinistres et la carte du nombre d'arrêtés de catastrophes naturelles déclarées pour les communes couvrant le bassin versant de l'Yzeron est présentée ci-dessous (figure 22). Sur la figure 22, en nuance de rouge apparaissent les communes selon le nombre d'arrêtés de catastrophes naturelles liées au ruissellement. Les nuances de bleu représentent la sensibilité aux sinistres liés au ruissellement.

Malgré la non-exhaustivité des données de la base de données des arrêtés sur les phénomènes de ruissellement, on note que les communes où la méthode ANSETR identifie des zones de sensibilité sont globalement les communes les plus touchées par les sinistres déclarés catastrophes naturelles. Cette tendance est confirmée par la figure 23 qui représente la fréquence des déclarations CATNAT de chaque commune en fonction de la proportion de zones sensibles détectées sur les communes. Les communes ayant de fortes proportions de zones sensibles ont les fréquences les plus élevées d'arrêtés de catastrophes naturelles, et inversement. Il est nécessaire de faire cette comparaison sur de plus grands bassins afin de valider réellement cette tendance observée sur l'Yzeron (voir chapitre III cas d'application).

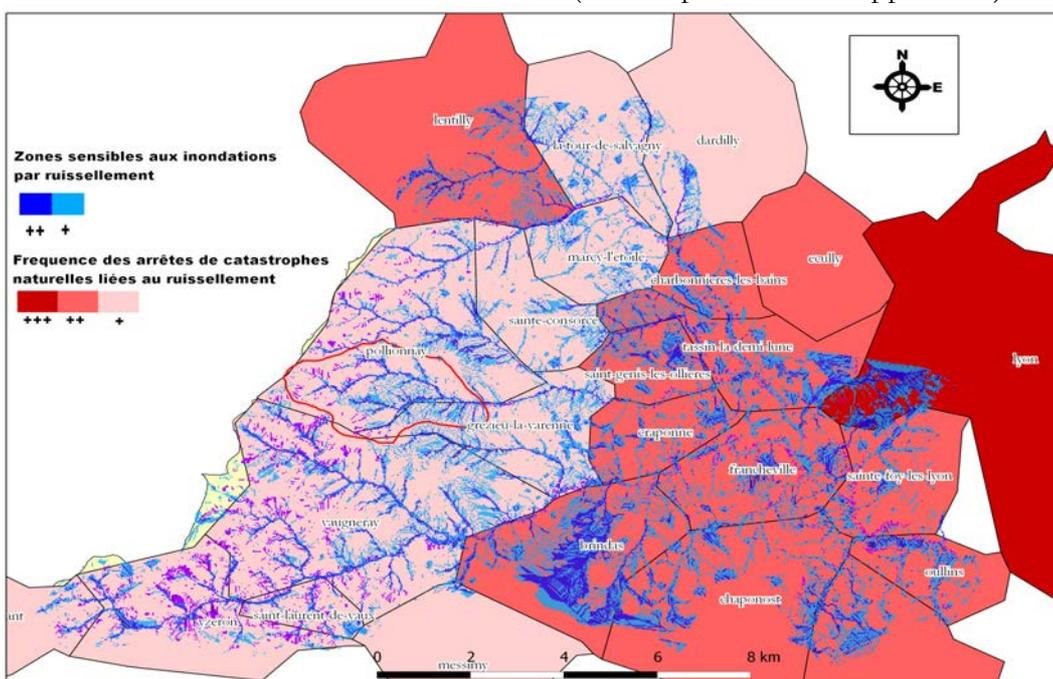


Figure 22 : Comparaison des zones sensibles aux sinistres (nuances de bleu) et fréquence d'arrêtés CATNAT (nuances de rouge) sur le bassin de l'Yzeron.

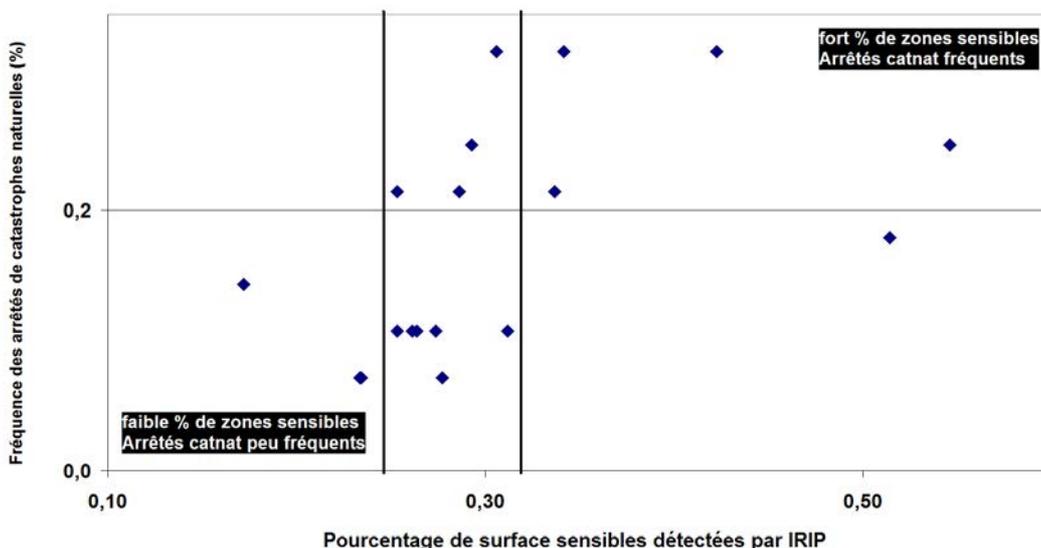


Figure 23 : Comparaison proportion de zones sensibles par commune et fréquence des arrêtés CATNAT.

II-3-2 Évaluation sur de petits territoires – données précises

a- Stratégie adoptée

La phénoménologie du ruissellement intense a été peu étudiée sur le terrain. La stratégie d'évaluation est basée sur 2 axes : une comparaison des résultats de la cartographie avec des observations terrain, et une comparaison avec des bases de données détaillées sur les sinistres observés.

Les observations *in-situ* ont consisté à mettre en place un dispositif d'observation spatialisé (DEVERSE : DEtection en VERSant des Écoulements de Surface) sur le petit bassin du Mercier dans le bassin versant de l'Yzeron. Le dispositif a été conçu pour détecter des écoulements de surface. Ce dispositif a été mis en place et exploité pendant 12 mois. Une dizaine de sites de mesure ont été répartis sur les zones de production, de transfert et d'accumulation. Le dispositif comportait des mesures continues (humidité du sol, pluie) couplées avec des observations post-événements (visites de terrain après des pluies). La figure 22 présente le dispositif de mesure, installé dans les premiers centimètres du sol. Ce dispositif constitué d'un capteur d'humidité type SM100, et d'un pluviomètre, couplés avec une mini station d'enregistrement de données permet de détecter la mise en place des deux types de ruissellement : le mécanisme hortonien et le mécanisme de ruissellement par surface saturée. Le fonctionnement du dispositif de détection est détaillé sur la figure (25).

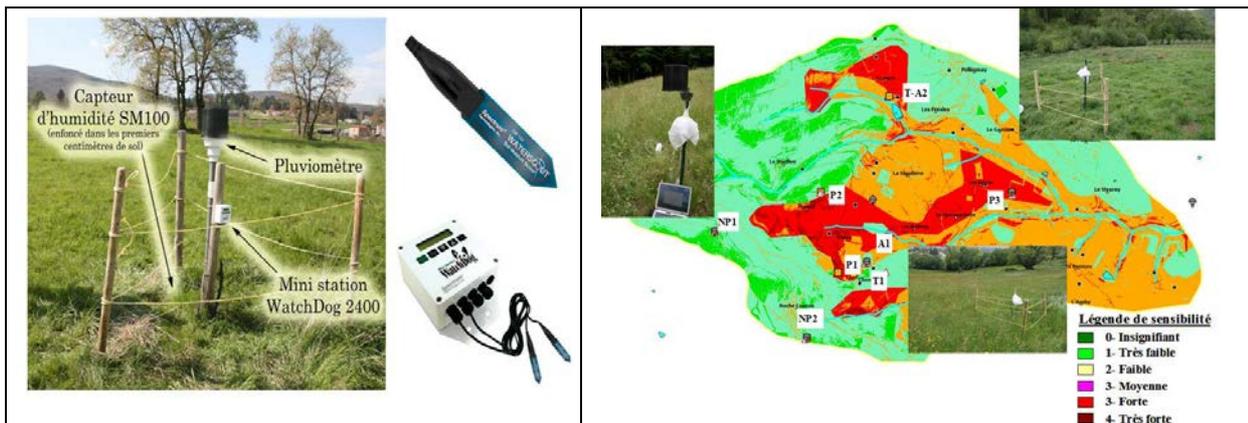


Figure 24 : Le dispositif DEVERSE implanté sur le bassin du Mercier

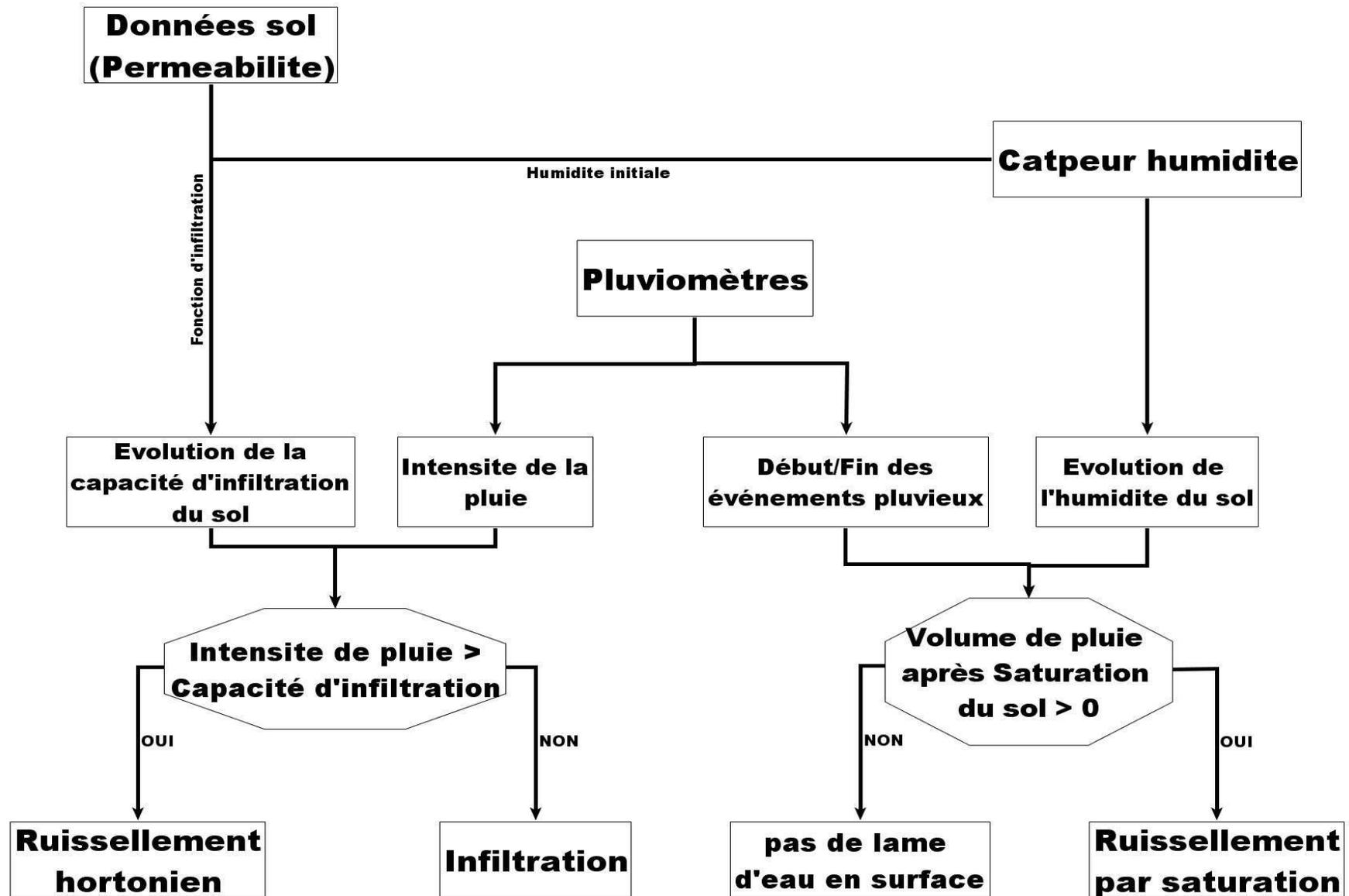


Figure 25 : Mécanisme de détection du ruissellement du dispositif DEVERSES.

Les capteurs d'humidité mesurent en continu l'évolution de la saturation à la surface du sol. Une confrontation avec les données de pluie (pluviomètres à auget) permet de détecter l'apparition du ruissellement par saturation. Les données d'humidité, couplées avec des paramètres hydrodynamiques du sol permettent aussi d'alimenter un modèle simplifié de suivi de l'évolution de la capacité d'infiltration du sol lors d'un événement pluvieux. Une confrontation entre l'évolution de la capacité d'infiltration du sol et l'évolution de l'intensité de la pluie au cours d'un événement pluvieux permet de détecter la mise en place de ruissellement par le mécanisme hortonien.

Le dispositif d'observation en continu est complété par un dispositif d'observation post événement in-situ, afin de confirmer/infirmier les observations révélées par les mesures continues. Ce dispositif est constitué d'un piège à eau pour la récupération des eaux de surface. Le piège à eau (figure 24) est constitué d'un tube en PVC de 30cm crépiné et enfoncé dans les premiers centimètres du sol. Les visites de terrain ont lieu juste après les événements pluvieux afin de vider les pièges à eau de surface, car des écoulements de sub-surface peuvent également remplir les tubes.



Figure 26 : Illustration des pièges à eau, installés sur le bassin du Mercier.

Les différentes chroniques mesurées et observations réalisées sur le site du Mercier ont été exploitées dans le cadre de l'évaluation de la démarche de cartographie ANSETR. Au total sur les 7 km² du bassin, nous disposons sur un an, de 9 chroniques d'humidité au pas de temps de 15 minutes, de 5 chroniques de pluie au pas de temps de 5 minutes, et de nombreuses observations après des événements pluvieux. L'objectif de cette analyse de donnée a été de vérifier la pertinence de la cartographie par rapport aux observations terrain. Elles permettront aussi de vérifier si les facteurs de prédisposition, intégrés dans l'analyse, sont pertinents sur le bassin d'observation. Les résultats ne sont pas forcément transposables à d'autres bassins sans réaliser ces observations sur un nombre important de bassins. Toutefois, le bassin test du Mercier n'étant pas un bassin particulièrement impacté par les problèmes liés au ruissellement, une validation dans ce contexte permettra de tirer des conclusions sur la pertinence de la méthode même en zones faiblement impactées.

b- Résultats des mesures en continu :

Le premier résultat significatif issu des observations concerne la pertinence du découpage de la cartographie par zones de production, de transfert et d'accumulation. Les observations sur un même site, d'amont en aval montrent un régime d'humidité très différent lors des événements pluvieux. Le régime d'humidité du sol est très lié à la dynamique des eaux à la surface du sol et conditionne fortement l'apparition du ruissellement. La figure 27 montre qu'à l'amont (courbe en rouge) il y a un ressuyage rapide du sol. Ceci se traduit par une diminution rapide de l'humidité après la pluie. A l'opposé, en zone d'accumulation (courbe en bleu), l'humidité du sol ne diminue pas rapidement après les événements pluvieux. Ceci traduit un ressuyage très lent dans ces zones. En cas de pluies consécutives (même avec de faibles intensités ou de faible cumul) ces zones sont donc les plus prédisposées à générer des écoulements de surfaces par le mécanisme de ruissellement sur surface saturée. Dans ces zones d'écoulements (courbe en vert sur la figure 27) le régime d'humidité avant pendant et après un événement pluvieux est intermédiaire aux zones amont et aval. On note un ressuyage plus rapide qu'en zone d'accumulation, mais plus lent qu'en zone de production amont. Ces résultats montrent qu'il y a une nuance à faire dans les liens entre l'humidité initiale et le ruissellement. Concrètement, ce lien est moins évident en zone amont en raison du fort ressuyage, qu'à l'aval où le ressuyage est lent. Ce lien sera d'avantage abordé à la fin de ce paragraphe.

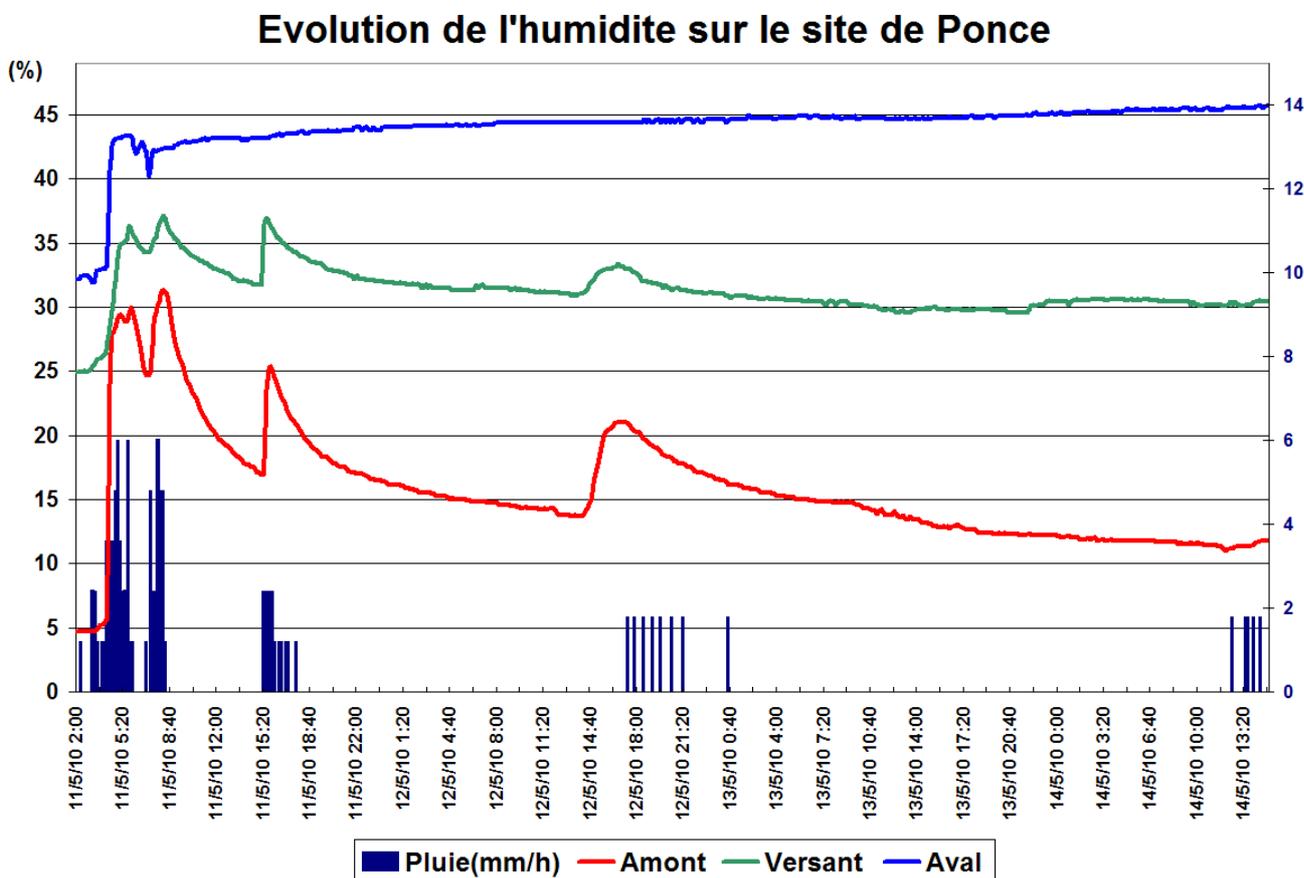


Figure 27 : Évolution de l'humidité du sol d'amont en aval lors d'un événement pluvieux.

L'un des objectifs de la campagne d'observation était aussi de vérifier, sur le bassin test, l'apparition du ruissellement dans les différentes zones issues de l'analyse cartographique, afin de vérifier la pertinence *in-situ* de l'analyse proposée. Le dispositif d'observation mis en place a permis d'analyser plusieurs événements pluvieux intervenus sur les différents sites et de déterminer la fréquence d'apparition des écoulements de surface sur ces sites. La figure 28 résume les observations réalisées. Les zones sensibles à la production et l'accumulation du ruissellement ont été globalement les zones où nous avons détecté les fréquences d'apparition de lame d'eau en surface les plus importantes.

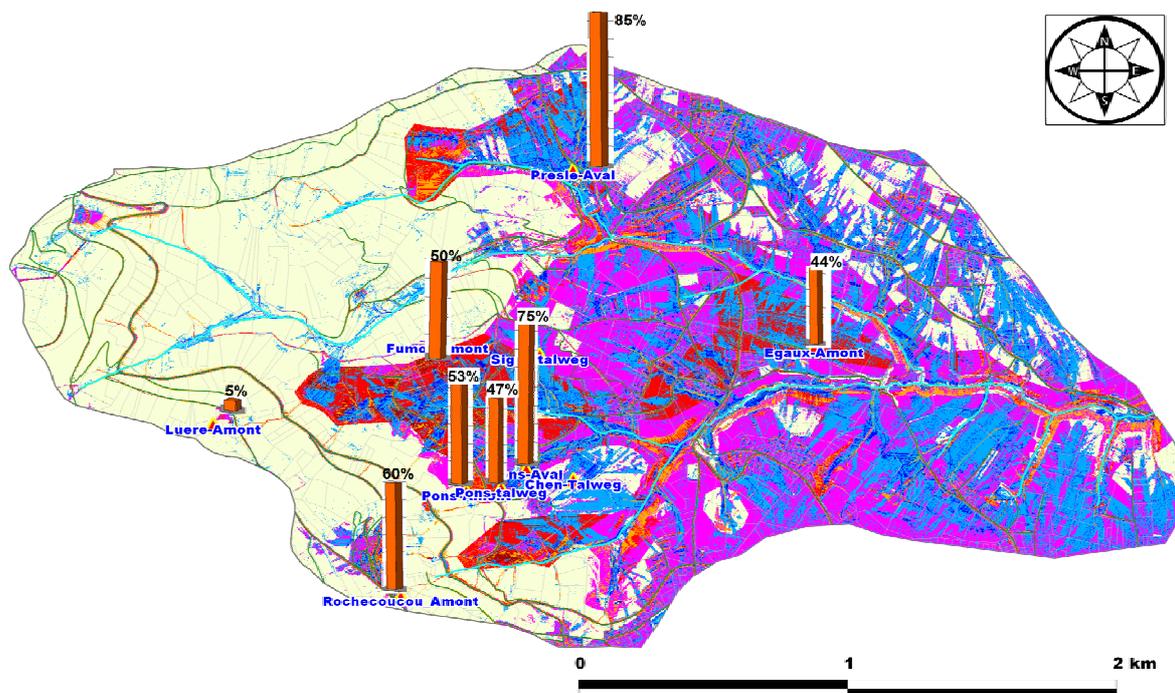


Figure 28 : Détection du ruissellement sur les zones sensibles issues de la cartographie.

La figure 29 résume les observations réalisées sur le bassin du Mercier. Globalement 34% des événements pluvieux ont donné lieu à une observation de ruissellement. Le type de ruissellement le plus détecté est le ruissellement sur surface saturée (70% des observations)

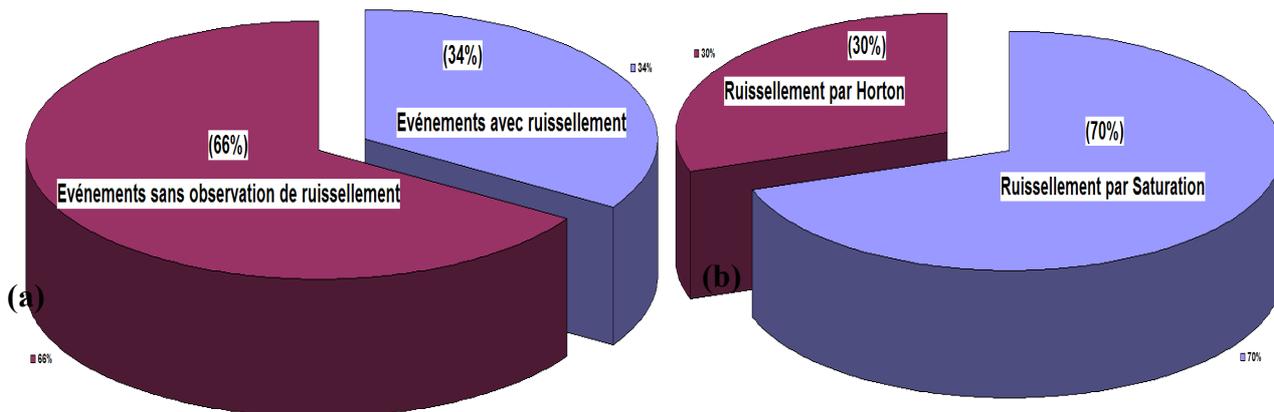


Figure 29 (a) Taux de détection du ruissellement sur les événements pluvieux significatifs (b) Proportion des différents types de ruissellement sur le bassin du Mercier.

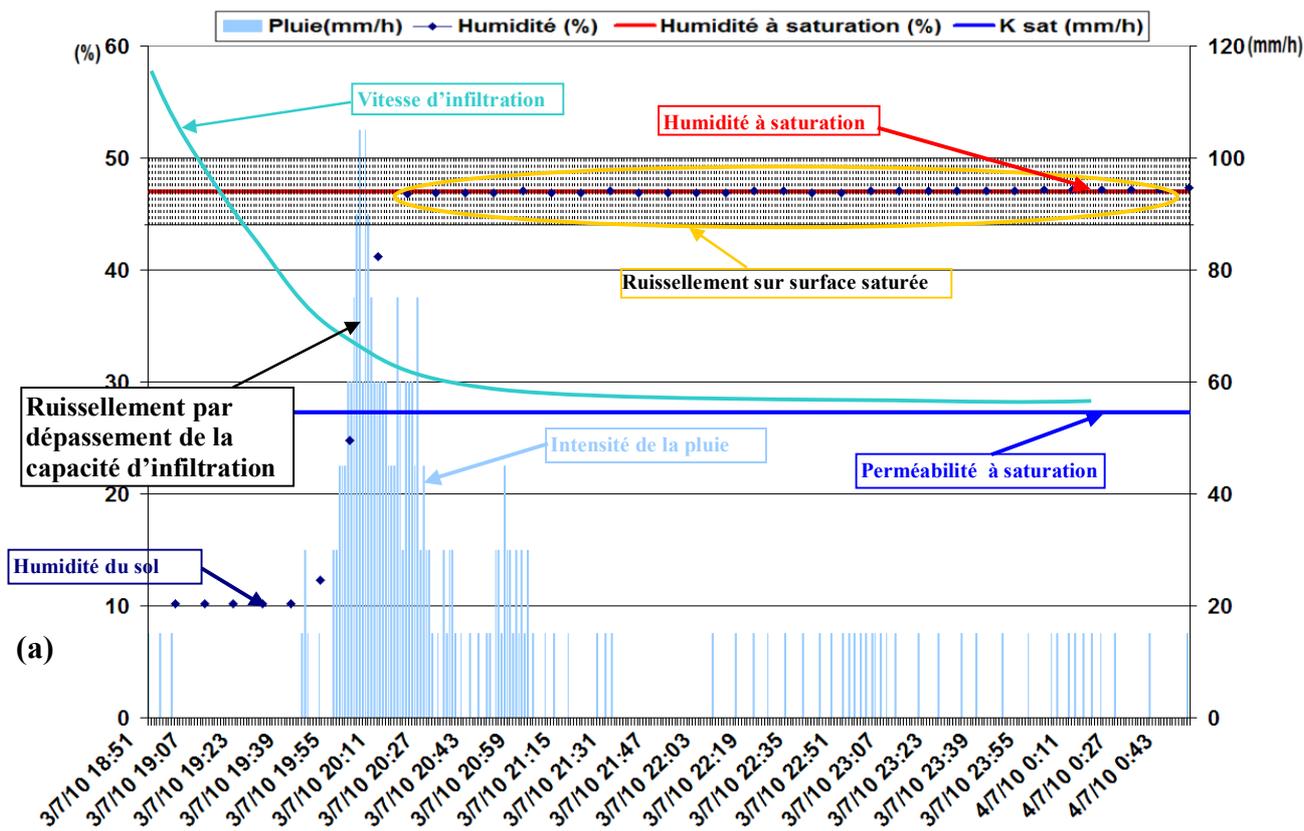


Figure 30a : Détection du ruissellement (a) Exemple de courbes de détection du ruissellement

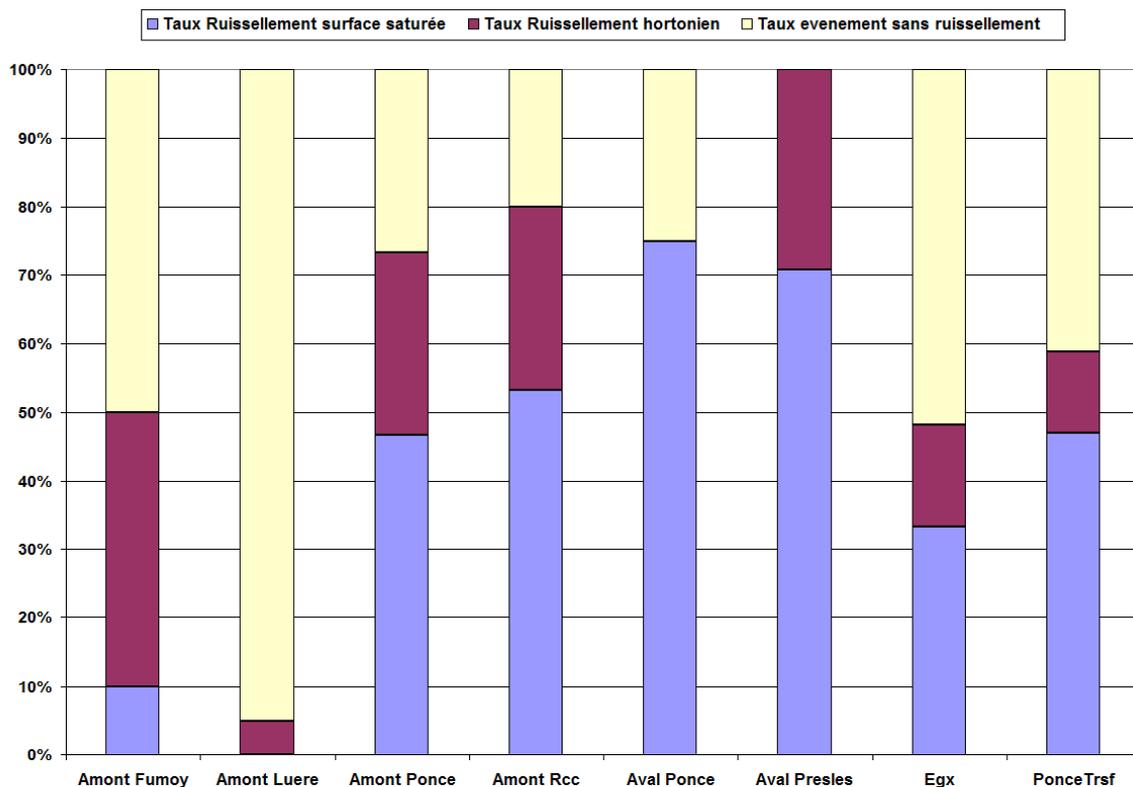


Figure 30b : Détection du ruissellement - type de ruissellement observé selon la localisation des sites.

La figure 30a illustre un exemple de détection des différents type de ruissellement à partir des données enregistrées sur le terrain. La figure 30b illustre la répartition des différents type de ruissellement sur les sites d'observation. La tendance est que le ruissellement par dépassement de capacité d'infiltration s'observe proportionnellement plus à l'amont dans les zones de production alors que le ruissellement sur surface saturée est plus observé en aval dans les zones d'accumulation.

Nous avons aussi utilisé le dispositif d'observation pour évaluer le rôle des différents facteurs de prédisposition au ruissellement sur les dynamiques impliquées dans le ruissellement. La figure 31a illustre le lien observé entre la pluie (l'intensité et le cumul de pluie) et la fréquence de détection du ruissellement sur la période d'observation. La figure montre tout d'abord une augmentation de la fréquence de détection du ruissellement avec l'intensité et le cumul pluviométrique. On note également une augmentation des mécanismes de ruissellement par saturation avec l'augmentation des cumuls de pluie. Un autre résultat important de cette figure est que, même pour les faibles intensités et des cumuls de pluie assez faibles, le dispositif a détecté l'apparition de lames d'eau en surface. Ceci confirme le fait que les processus en jeu ne soient pas seulement liés aux forts cumuls et/ou aux fortes intensités de pluie, mais aussi aux états et caractéristiques de surface des zones réceptrices des eaux.

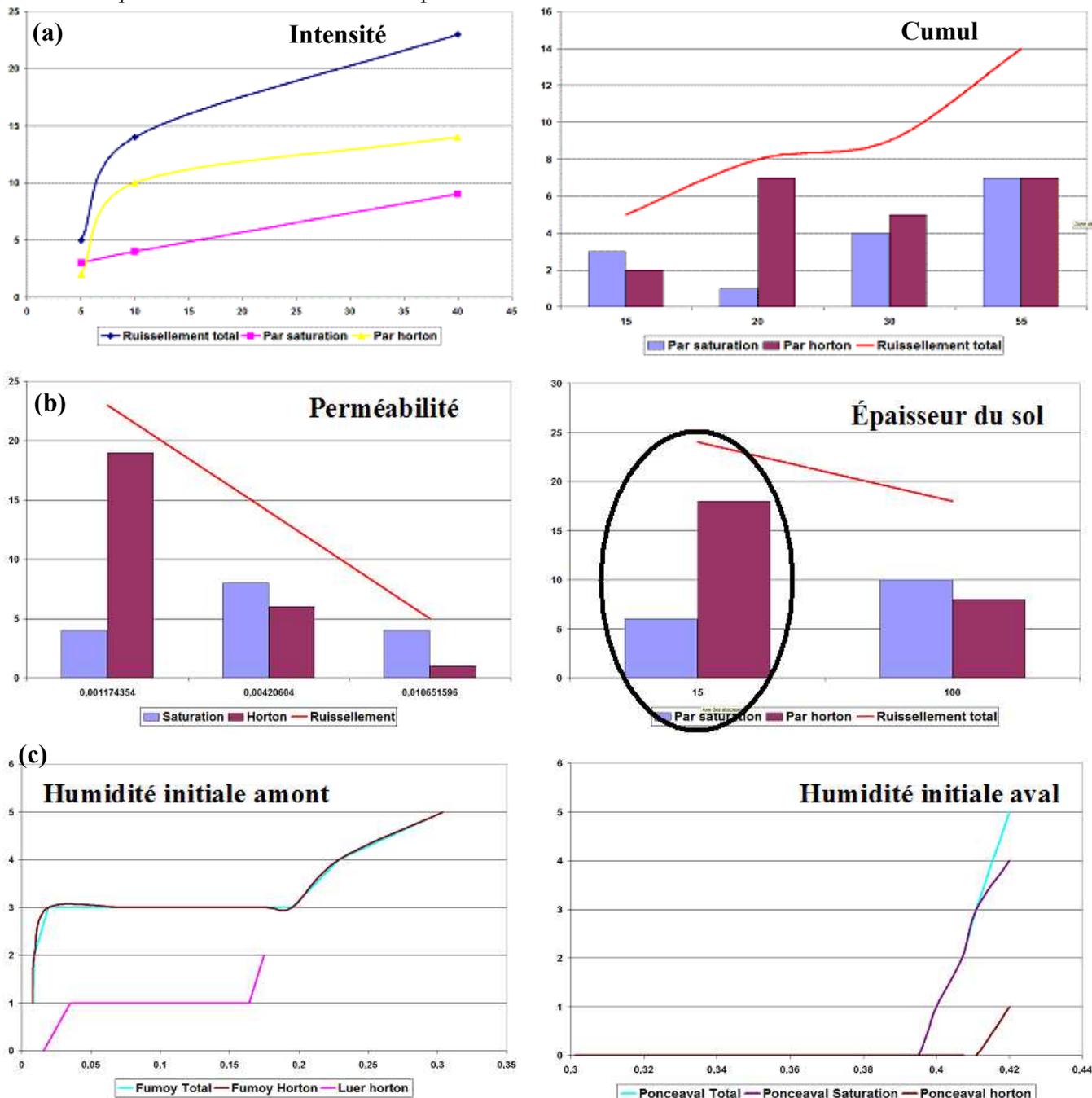


Figure 31: a- Fréquence de détection du ruissellement en fonction de l'intensité de la pluie (à gauche) et cumul(à droite) (b)Fréquence de détection du ruissellement en fonction du type sol et de l'épaisseur du sol

Sur la figure 31b, les graphiques présentés illustrent le rôle des paramètres de sol dans la détection du ruissellement. On observe sur la figure une diminution de la fréquence de détection sur les sols avec de fortes perméabilités. Cette tendance est surtout très nette pour le mécanisme de ruissellement de type Horton. Ce résultat confirme bien le fait que les sols imperméables soient les plus prédisposés à générer du ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration.

Comme évoqué au début de ce paragraphe, le rôle de l'humidité initiale dans la fréquence des ruissellements observés a été analysé à partir des observations. On note sur la figure 31c-a la non-linéarité entre la fréquence d'apparition de lames d'eau et l'humidité initiale avant les événements pluvieux considérés. Les graphes semblent montrer une relation croissante pour des valeurs d'humidité faibles et pour des valeurs d'humidité fortes dans la partie amont. A l'aval, la situation est différente. Il semblerait qu'il y ait un effet de seuil au-delà duquel on note une relation croissante entre la fréquence de détection du ruissellement et l'humidité initiale du sol.

c- Résultats des observations post-événements :

Chaque visite de terrain, dans le cadre de l'acquisition des données collectées sur le bassin du Mercier a été l'occasion de faire des observations dont une synthèse se trouve sur la figure 32. Ces observations concernent d'abord les pièges à eau installés pour récupérer les eaux de surface.

De façon globale nous avons observé une bonne cohérence entre les zones sensibles aux écoulements de surface et les observations faites sur le terrain. Notamment, les zones sensibles à l'accumulation sont des zones où nous avons relevé des manifestations d'hydromorphie les plus importantes sur le bassin. Sur les axes de voiries identifiés comme zones sensibles au transfert nous avons souvent observé des écoulements concentrés après des épisodes pluvieux. Nous avons relevé pour certains événements pluvieux et pour certains sites, la présence d'eau de surface piégée par le dispositif. Malheureusement, il n'a pas toujours été possible de faire des observations sur les pièges à eau pour tous les événements pluvieux où le dispositif de détection indique l'apparition de ruissellement. En effet, pour des raisons pratiques et de logistique il n'a pas toujours été possible d'organiser des missions de terrain pour relever les pièges à eau.

Les observations ont été faites dans les zones sensibles à différentes périodes de l'année. Nous avons pu voir comme l'atteste les figures 32 et 33, que les témoins d'écoulements de surface (concentrés ou diffus) ou de création de lame d'eau ont été observés à différentes périodes de l'année.

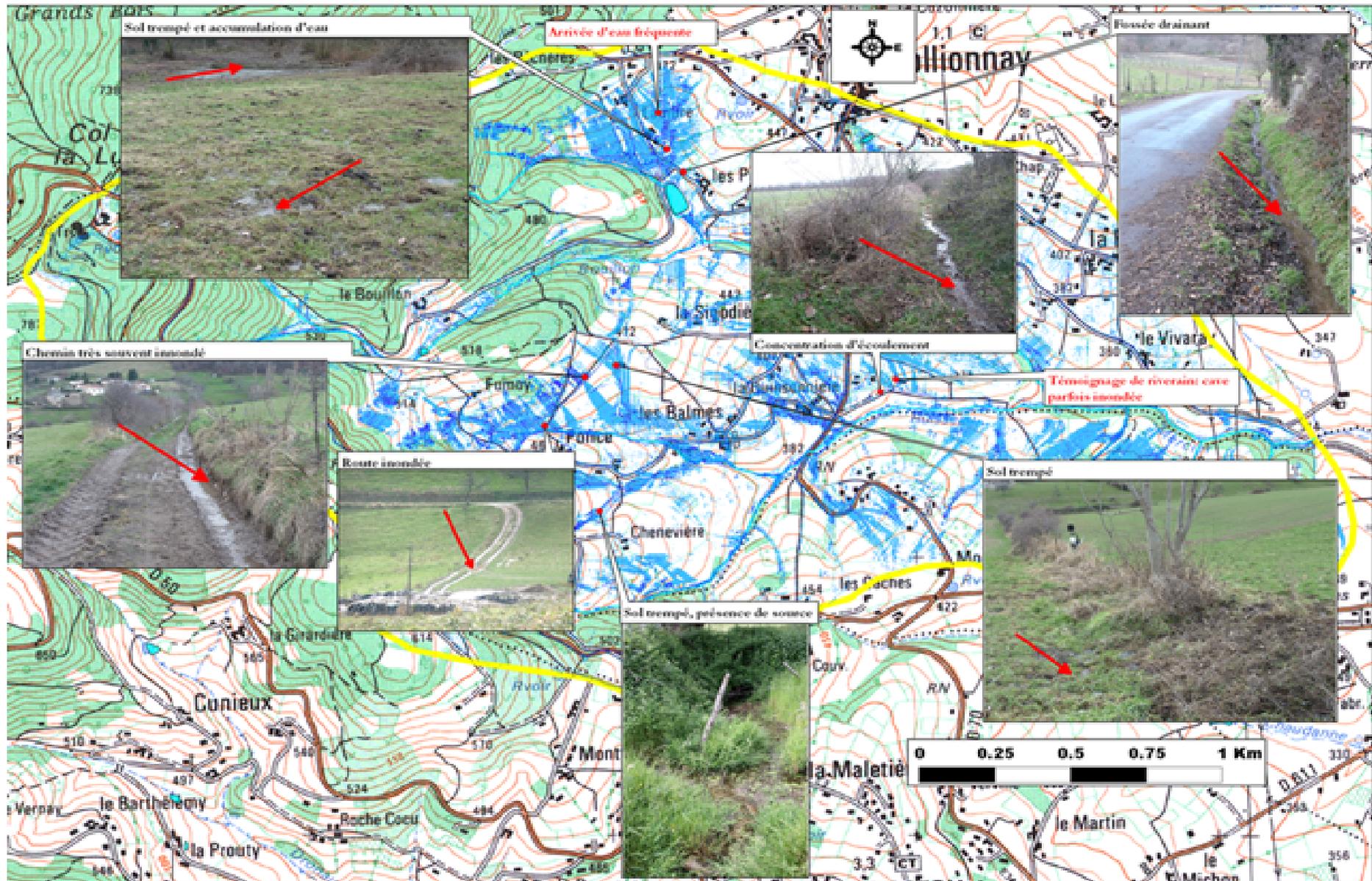


Figure 32: Observations d'écoulement de surface sur des sites à forte sensibilité au ruissellement

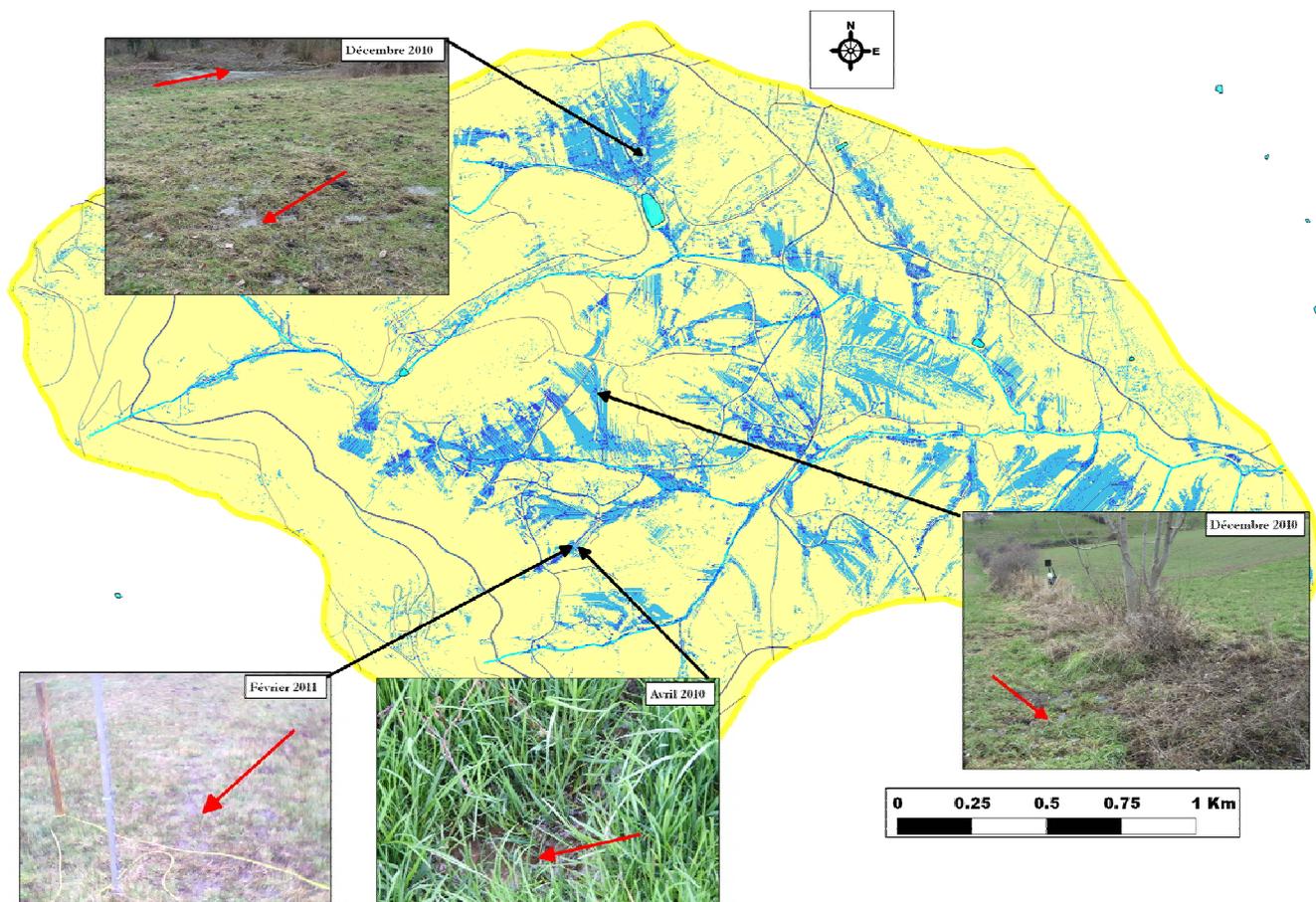


Figure 33: Observations d'écoulements diffus à plusieurs périodes de l'année sur les sites à forte sensibilité au ruissellement

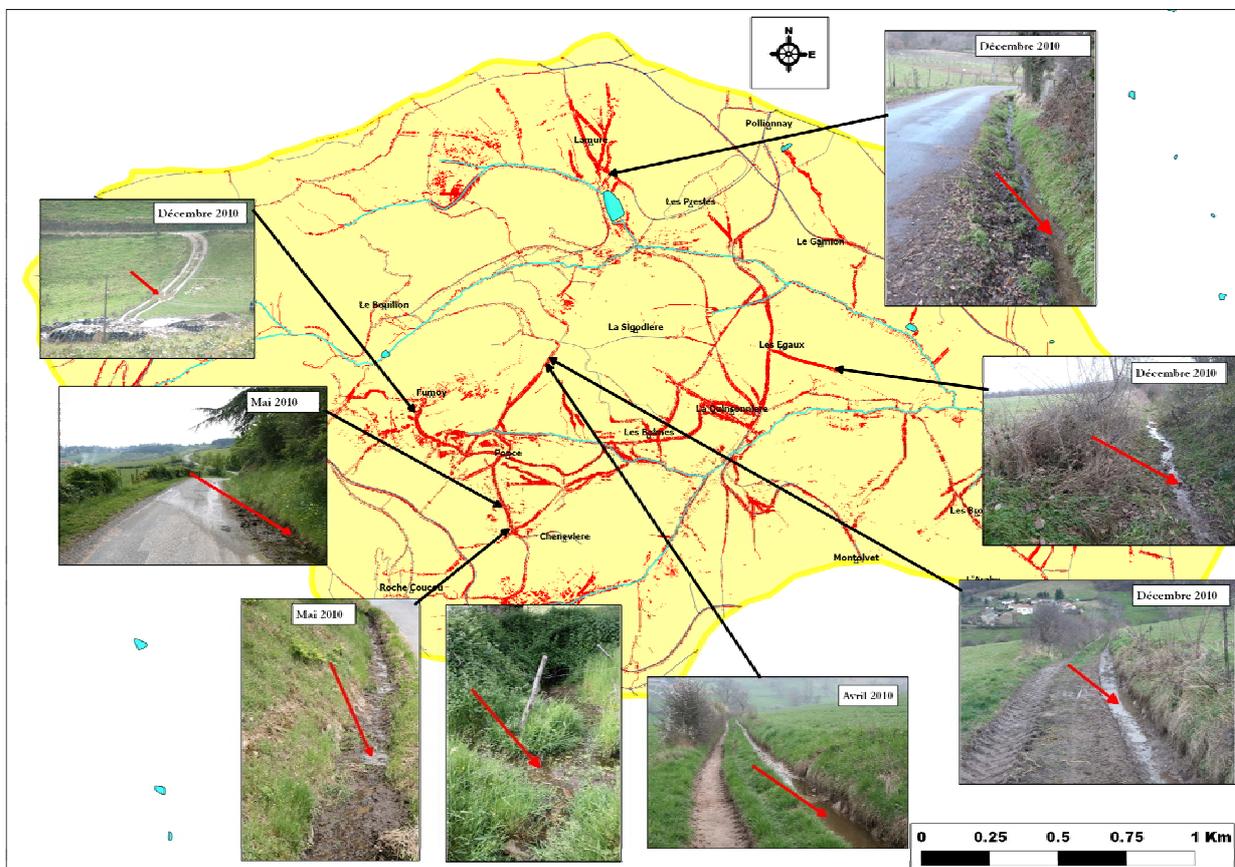


Figure 34: Observations d'écoulements concentrés observés à plusieurs périodes de l'année sur les sites à forte sensibilité au ruissellement

II-3-3 Analyse de sensibilité selon la précision des données d'entrée

L'objectif de cette analyse de sensibilité est de tester la robustesse de la méthode proposée et d'évaluer la dégradation des résultats de l'analyse compte tenu de la précision des données d'entrée. Pour cela, nous avons utilisé le cas d'application du bassin du Mercier pour cette étude. Une comparaison entre les résultats de l'analyse avec des données fines et ceux de l'analyse avec les données grossières correspondantes, sur le bassin du Mercier a été réalisée. Les données topographiques grossières utilisées pour cette analyse sont respectivement à 25m et 50m. Les données Corine Land Cover à 100m et les données sols IGCS au 1/100000 ont été utilisées.

Sur la figure 35 on note une grande persistance de la sensibilité à la production du ruissellement malgré des données de moindre précision. Les données grossières de résolution 25m et de 50m conservent les emprises des principales zones de production identifiées avec des données lidar. L'identification des zones sensible à la production du ruissellement semble possible avec des données disponibles dans les bases de données courantes, sans avoir besoin d'informations de très grande précision.

La figure 36 montre les limites de l'identification des zones de transfert avec des données grossières. En effet on note une faible persistance des zones identifiées avec des données fines lorsque l'analyse est réalisée avec des données grossières. Il faut noter toutefois une persistance de l'information de sensibilité sur les zones les plus exposées identifiées dans l'analyse avec des données fines. L'utilisation des cartes d'aptitude au transfert du ruissellement réalisées avec des données grossières pour des décisions au niveau local est donc déconseillée. Par contre cette carte donne des indications sur la hiérarchisation des axes de transfert et les linéaires de voiries selon leur sensibilité au transfert du ruissellement. Il est toutefois possible d'intégrer des données vectorielles d'axes existants afin d'évaluer la sensibilité de ces axes de façon relative sur un bassin donné.

Sur la figure 37 on note une bonne persistance des zones sensibles à l'accumulation du ruissellement avec des données grossières. On voit sur ces images que l'emprise des zones d'accumulation persistantes n'a pas les mêmes niveaux de détail pour les données fines que pour les données grossières. Les données grossières semblent surestimer l'emprise des zones sensibles.

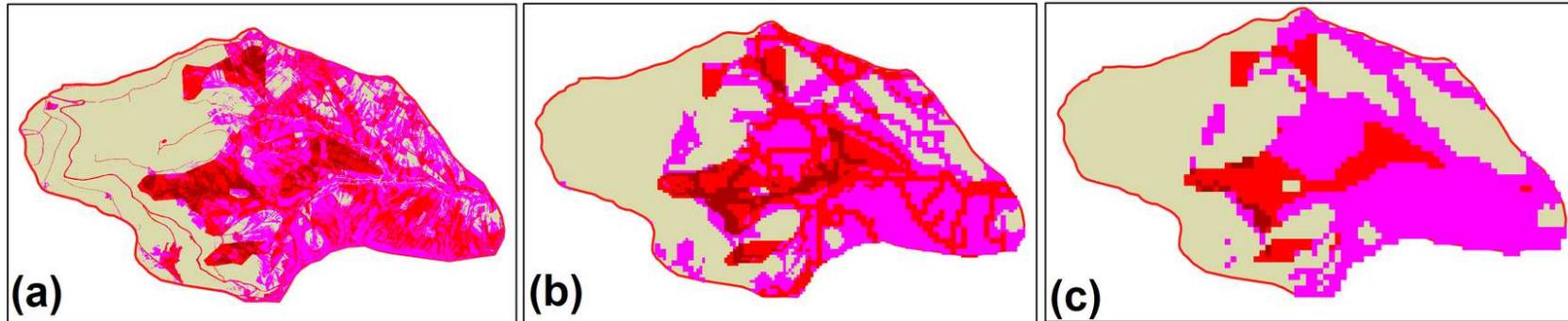


Figure 35 : Sensibilité à la production du ruissellement (a) - avec des données fines. (b) – avec des données à 25m et (c) – avec des données à 50m

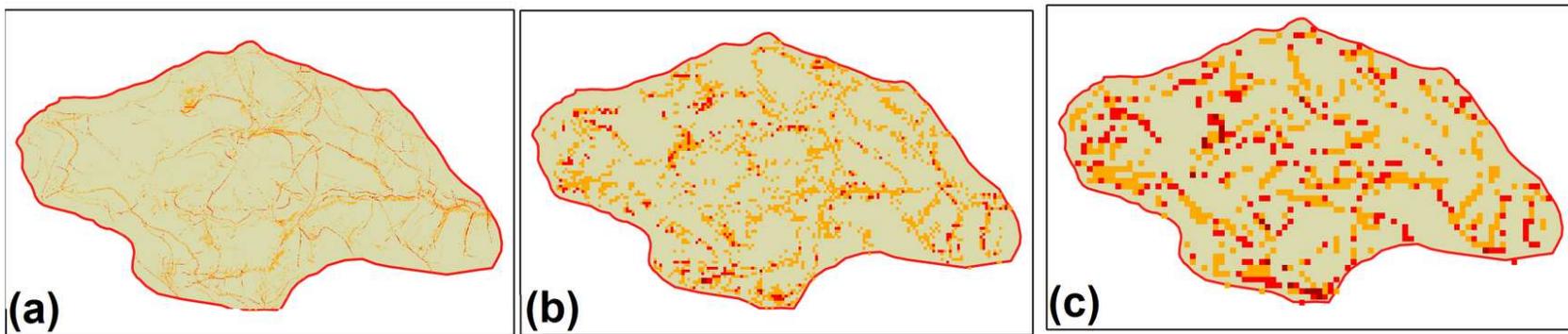


Figure 36 : Sensibilité au transfert du ruissellement (a) - avec des données fines. (b) – avec des données à 25m et (c) – avec des données à 50m

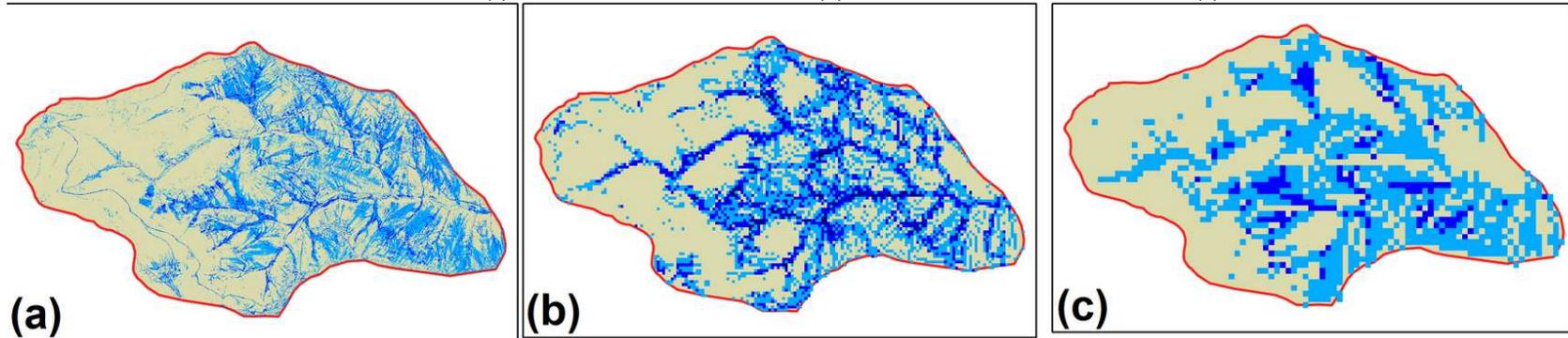


Figure 37 : Sensibilité à l'accumulation du ruissellement (a) - avec des données fines. (b) – avec des données à 25m et (c) – avec des données à 50m

II-4 Données requises et algorithme pour réaliser l'analyse ANSETR

II-4-1 Point sur le pré-traitement des données

Comme évoqué dans le paragraphe II-2-1, les données nécessaires à l'analyse ANSETR sont essentiellement les données topographiques, les données sur l'occupation des sols et sur les paramètres de sol. Ces données vont subir un pré-traitement dont l'objectif est de produire les cartes de facteurs de prédisposition (relatif par exemple à la pente, à l'épaisseur de sols...) nécessaires aux différentes cartographies des zones de sensibilité au ruissellement. Ces traitements intègrent l'analyse du modèle numérique de terrain, des opérations de classification de données raster et enfin une opération d'analyse par pixel des zones drainées. La réalisation des différentes étapes se fait par le biais d'une chaîne d'analyses spatiales de données sous forme de pixels.

Les données topographiques permettent de calculer à partir d'une analyse du relief, les indicateurs sur l'inclinaison (pente), la surface drainée, l'indice de compacité (forme des surfaces drainées) et l'indice topographique. Ces indicateurs vont permettre de cartographier la prédisposition de chaque pixel au ruissellement, lié à la pente, aux ruptures de pentes, aux aires drainées (forme et surface). Les directions locales d'écoulement issues du modèle numérique de terrain servent de base à l'analyse des zones drainées.

Les données sur l'occupation du sol permettent de cartographier la prédisposition de chaque pixel au ruissellement, lié à l'occupation des sols. Globalement, les classes d'occupation de sol sont les zones urbaines, les zones agricoles, les zones de prairies (classes d'occupation des sols ayant de fortes prédispositions) et les zones forestières ou avec une végétation permanente (classes d'occupation des sols ayant de faibles prédispositions).

Les données sur la nature du sol permettent de cartographier la prédisposition de chaque pixel au ruissellement, lié à l'épaisseur des sols, à la perméabilité des sols et à l'érodibilité des sols. Il est nécessaire de disposer les données sur les unités cartographiques de sol, ainsi que la caractérisation des unités de sols correspondantes (ou dominante) en terme d'épaisseur des sols, de perméabilité et si possible d'érodibilité. Dans la plupart des bases de données existantes sur le sol, l'information sur l'érodibilité des sols est à estimer à partir de la texture des sols et du taux de matière organique. Cette étape de traduction des facteurs de sol en niveau de prédisposition est particulièrement importante et requiert souvent du temps.

II-4-3 Description de l'algorithme de cartographie

La figure 38 décrit de façon détaillée les traitements nécessaires à la création des cartes d'aptitude à la production, au transfert et à l'accumulation du ruissellement.

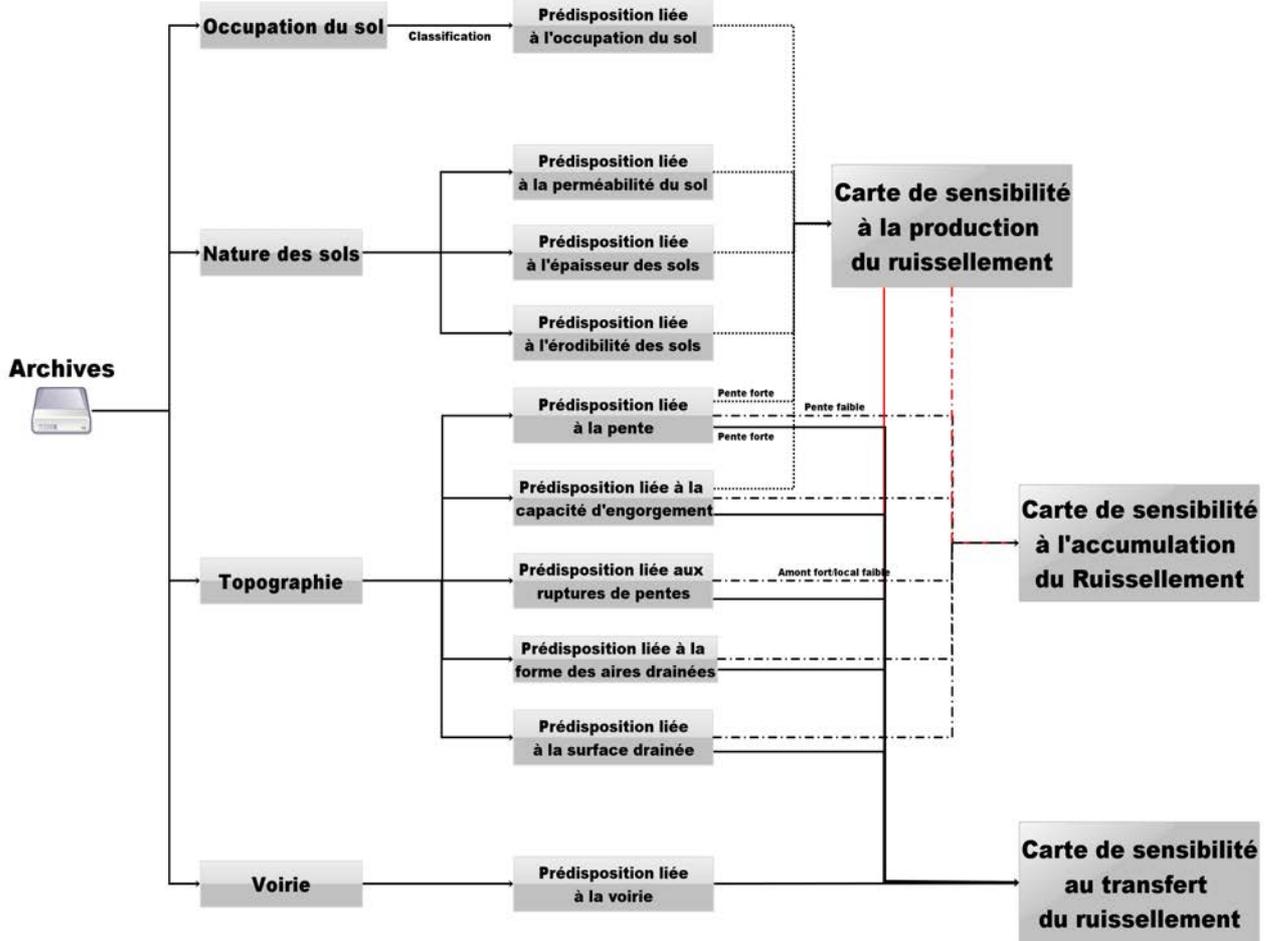


Figure 38 : Synthèse de l'algorithme de cartographie des cartes de sensibilité au ruissellement

II-4-2 Mise en œuvre de l'analyse avec les solutions SIG existantes

Si l'analyse proposée pour la détermination des zones sensibles à la production du ruissellement est réalisable au moyen d'une succession d'opérations avec les logiciels SIG existants sur le marché, la détermination des zones sensibles au transfert et à l'accumulation du ruissellement fait intervenir la notion d'analyse des zones drainées. Cette notion n'est pas implémentée dans les outils existants. Un développement algorithmique, basé sur les bibliothèques de systèmes d'information géographique existants, a été nécessaire pour mettre en œuvre la méthode. Cette notion d'analyse de zones drainées permet d'établir pour pixel donné, des indicateurs non pas de pixel à pixel, mais d'intégrer une analyse des informations issues de la partie amont du pixel considéré. Nous avons pu établir ainsi un indicateur de la rupture de pente et de la sensibilité à la production de la zone drainée.

Les différentes solutions SIG testées avec succès sont présentées sur la figure 39. Les bibliothèques SIG testées sont : La bibliothèque *Arcobject* de Arcgis (intégrée dans un programme Java). Cette solution payante offre la possibilité de réaliser toute la chaîne de traitement de l'analyse ANSETR.

La bibliothèque libre Landserf (intégrée dans un programme Java) a été aussi testée avec succès. Le seul inconvénient de cette solution est la nécessité de développer dans son programme les algorithmes de création d'arbre de drainage.

La solution basée sur les applications GRASS dans un programme python a aussi été testée et offre la possibilité de réaliser l'analyse. Toutefois l'intégration de GRASS dans un programme python s'est révélée très gourmand en temps de calcul pour réaliser l'analyse ANSETR.

La solution basée sur les applications SAGA GIS dans un programme python a été testée avec succès.

Enfin l'utilisation de la bibliothèque gratuite PCRaster dans un programme python a aussi été concluante et nous semble une bonne solution ayant permis de réaliser l'ensemble de la chaîne de traitement.

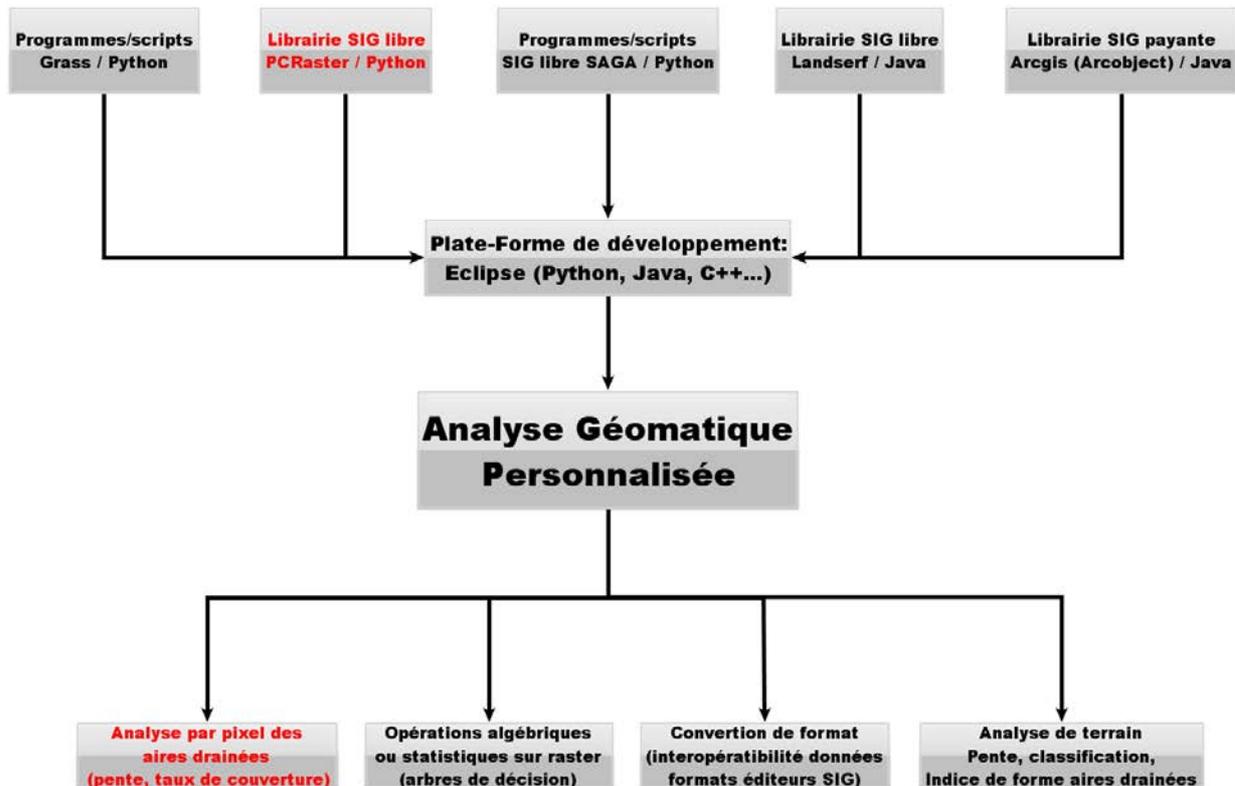


Figure 39 : Tests de solutions SIG pour la mise en œuvre de l'analyse ANSETR.

III- Quelques cas d'applications

La démarche ANSETR a été appliquée sur 5 bassins à tailles différentes. Un bassin de très grande taille (Loire amont – 7000 km²), un bassin de taille moyenne (Le Garon – 200 km²) et trois bassins petits bassins (Genay - 29 km², Vienne – 4 km² et Givors –1,5 km²).

L'objectif de ces cartographie n'est pas de fournir des cartes validées, mais d'illustrer la démarche proposée et de confronter les résultats de la cartographie avec des données issues d'observations et/ou diagnostics réalisés dans le cadre d'études fines ou d'observations pour les petits bassins et des données plus grossière de la base de données des catastrophes naturelles pour les bassins de grandes tailles. Ces exemples permettront donc d'illustrer les utilisations possibles qui peuvent être faites de façon opérationnelle des cartes en fonction de la précision des données d'entrée.

III-1 Cas du bassin versant de la Loire Amont

Les données utilisées pour le bassin de la Loire à l'amont de Roanne (7000 km²) sont composées de données topographique à 25m, des données d'occupation des sols Corine Land cover 2006 à 100m et des données sols de la BD INRA au 1/1000000. Sur cette étendue ces sources de données sont relativement accessibles, gratuites pour certaines.

La figure 40 illustre les résultats issus de l'analyse. A gauche les zones les plus contributives au ruissellement sur tout le bassin, et à droite la carte des zones sensibles aux sinistres (accumulation et transfert). Au niveau de ce grand bassin, 3 principales zones de fortes sensibilité ont été détectées (figure 41). La zone de Roanne, la plaine du Forez et le secteur stéphanois. Plus à l'amont, le secteur du Puy-en-velay semble également sensible. La persistance spatiale de l'information de sensibilité dans ces zones est un indicateur sur le fait que ces zones sont les plus exposées du bassin. En outre, on note dans plusieurs secteurs du bassin une certaine persistance, moins importantes de l'information de sensibilité (Yssigneux, Bas-en-Basset, Retournac, Goudet, La Fouillouse etc.). Des données plus précises sont nécessaires pour préciser la sensibilité de ces secteurs.

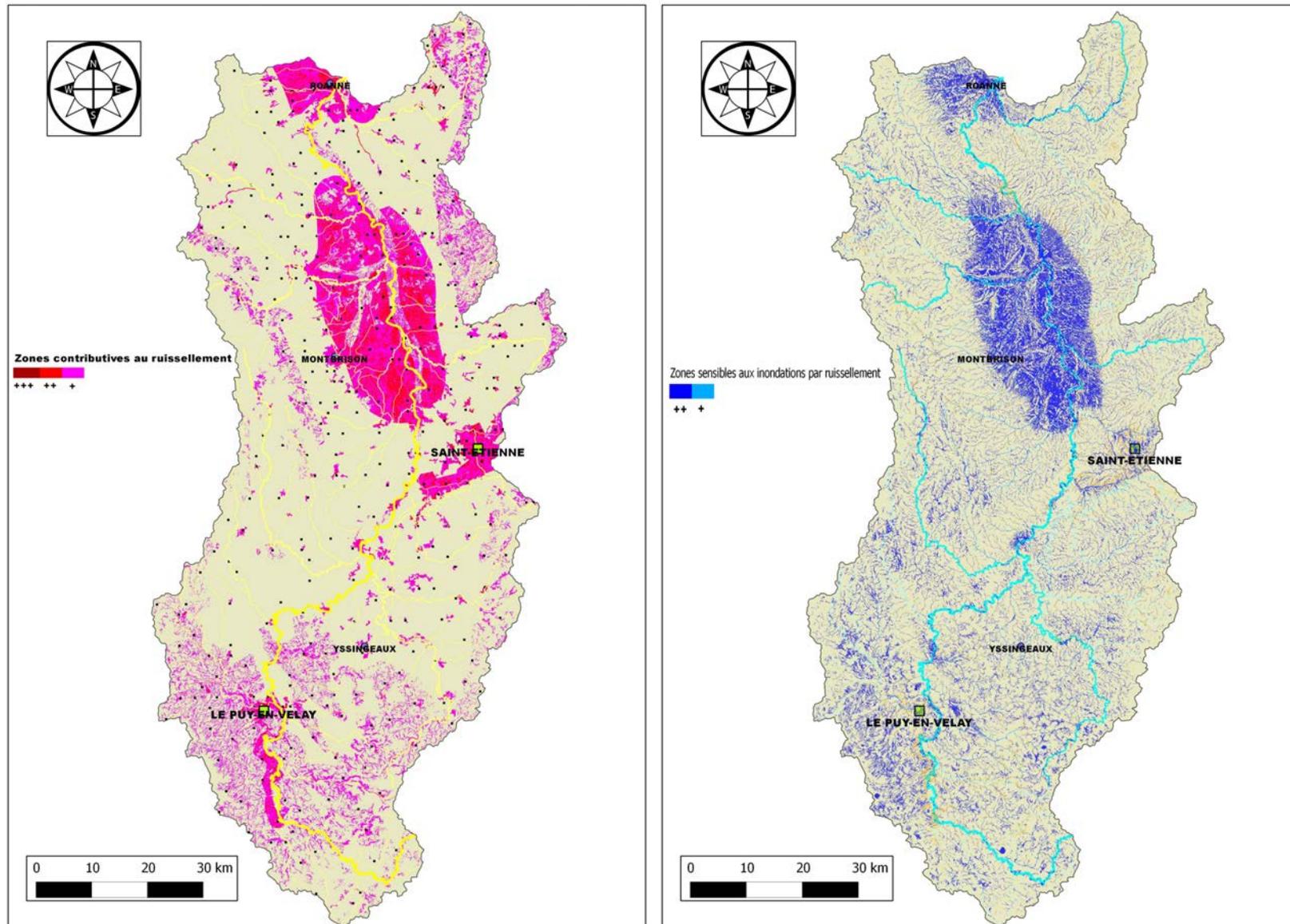


Figure 40: Cartes des zones contributives et des zones sensibles aux sinistres liés au ruissellement du bassin de la Loire à l'amont de Roanne.

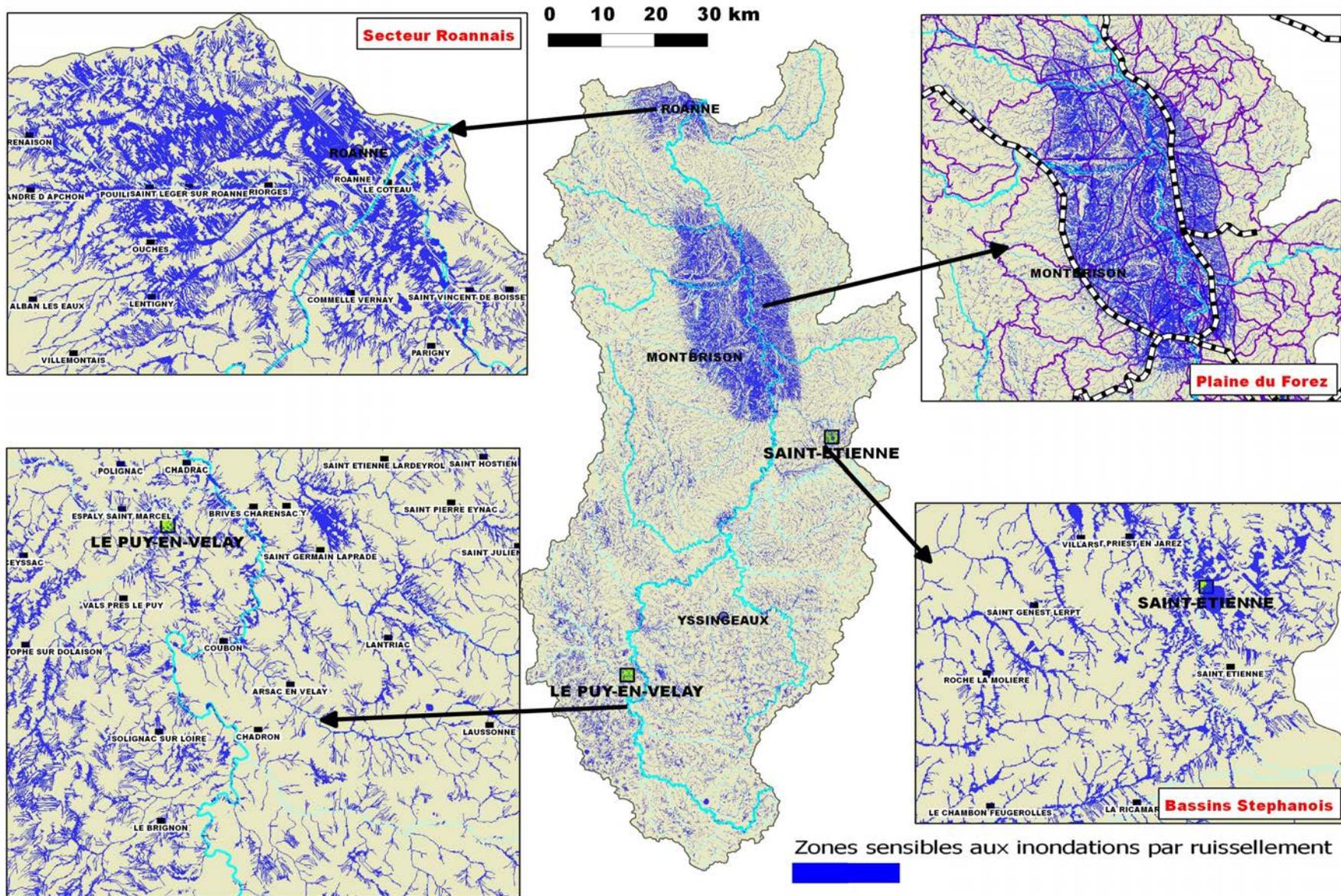


Figure 41 : Principales zones sensibles au ruissellement détectées par l'analyse ANSETR

L'évaluation de ces cartes se heurte à la disponibilité d'information de validation. Néanmoins, il faut signaler que le diagnostic réalisé dans le SAGE de la Loire en Rhône-Alpes mentionne les secteurs Roannais, la plaine de Forez et le secteur Stéphanois comme zones sensibles aux inondations.

En dehors de la base de données sur les catastrophes naturelles, il n'existe pas d'autres sources d'informations pertinentes et sur de grands territoires par exemple sur les incidents liés au ruissellement. La base de données sur les catastrophes naturelles n'intègre pas l'ensemble des sinistres (que ceux déclarés catastrophe naturelle), ni les sinistres situés hors des zones où sont situés des enjeux. L'analyse ANSETR étant faite sur tout un bassin, la comparaison avec la BD CatNat n'est pertinente qu'après croisement avec la vulnérabilité. Sur la figure (42) la cartographie de la fréquence des arrêtés de catastrophes naturelles liées au ruissellement (nuance de rouge) montre une certaine cohérence avec les zones les plus sensibles détectées par l'analyse ANSETR (nuance de bleu).

Cette tendance (visuelle) se confirme sur les courbes à droite de la figure qui montrent une tendance positive entre le taux de surfaces sensibles détectées et la fréquence des arrêtés de catastrophes naturelles liées au ruissellement. Ces graphiques ont été réalisés pour plus de 400 communes. On remarque aussi que cette relation s'améliore lorsqu'on croise le résultat de l'analyse ANSETR avec la vulnérabilité. A cette échelle, nous avons considéré comme zones vulnérables l'ensemble des zones urbanisées identifiées dans la base de données de Corine Land Cover. Nous avons considéré qu'à cette échelle les principales vulnérabilités se situent dans ces zones. La comparaison des taux de surfaces sensibles identifiés dans ces zones et la fréquence des arrêtés de catastrophes naturelles montre une tendance nettement positive.

On distingue deux cas de figures : Les zones ayant une forte proportion de surface sensibles détectées par la méthodes ANSETR sont des zones où les arrêtés de catastrophes naturelles liées au ruissellement sont les plus fréquents. Dans la même catégorie les zones ayant de faibles proportions de surfaces sensibles ont les fréquences les plus faibles d'arrêtés de catastrophe. C'est le cas de la majorité des communes du bassin de la Loire Amont, et c'est ce qui explique la tendance observée sur les graphes de la figure 43.

Le deuxième cas de figure concerne des zones où il y a beaucoup d'arrêtés de catastrophe naturelle, mais où la méthode détecte une exposition relativement faible. De même, il peut y avoir des zones où la méthode ANSETR détecte une forte exposition des communes mais où il y a très peu d'arrêtés de catastrophes naturelles. Ces cas de figures observées mettent en lumière les limites de la base de données des arrêtés Catnat pour valider les analyses. En effet, le manque d'information sur la localisation intra-communale des incidents ne permet pas dans certaines communes ayant théoriquement une faible exposition, de confronter les lieux des sinistres et la localisation des zones sensibles.

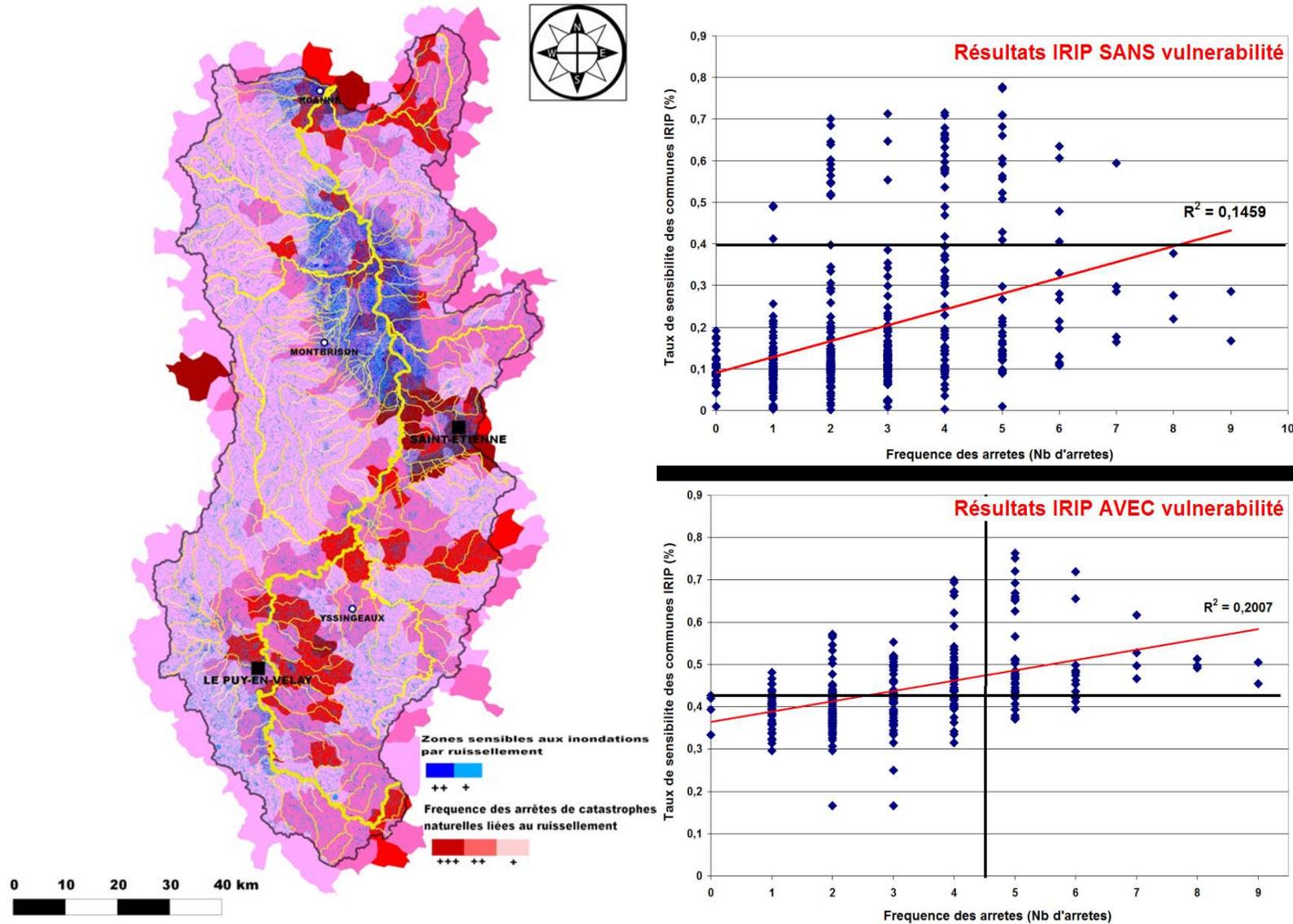


Figure 43 : Comparaison entre la fréquence des arrêtes CATNAT pour ruissellement et taux de surface sensibles détecté par l'analyse ANSETR sur le bassin de la Loire.

Comme le montre la figure 44, il y a des communes (à forte exposition) où les zones sensibles aux sinistres sont hors de l'aire urbaine où est concentré l'essentiel des vulnérabilités. Dans ces cas, même en cas de sinistres, il n'y a pas souvent de déclarations en catastrophe naturelle.

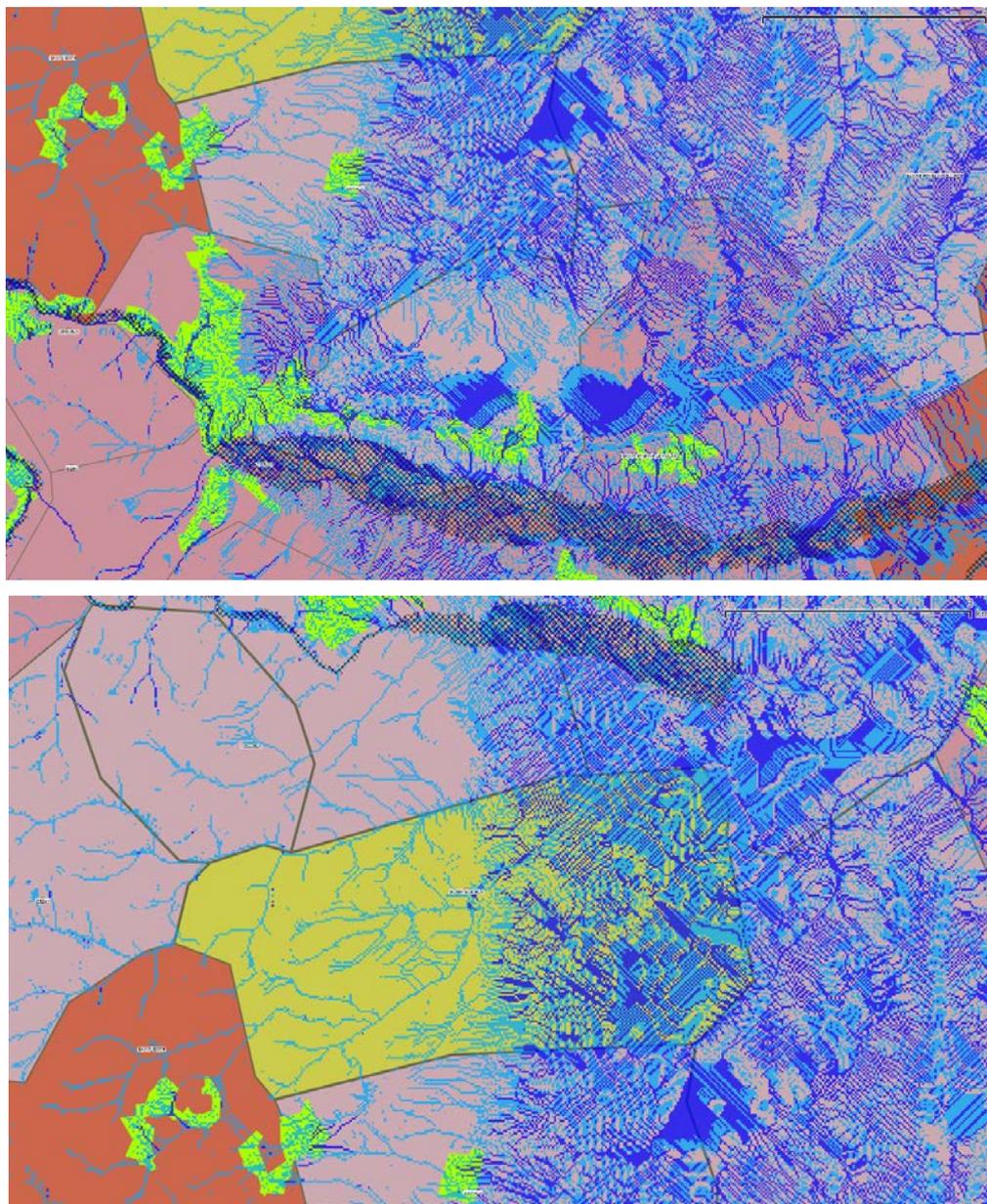


Figure 44: Exemples de communes de la Loire sensibles au ruissellement, mais ayant une faible exposition d'enjeux (zones urbaines en vert, zones sensibles en bleu)

III-2 Cas du bassin versant du Garon

La bassin du Garon est un bassin de 200 km² environ situé à l'ouest de Lyon, où toutes les communes ont été touchées au moins deux fois depuis 1982 par des sinistres liés au ruissellement, classés catastrophes naturelles. Nous avons appliqué la méthode ANSETR sur ce bassin de taille moyenne avec des données topographiques de la BD Topo à 25m, des données d'occupation des sols Corine Land cover 2006 à 100m et des données sols de la BD sol IGCS au 1/100.000.

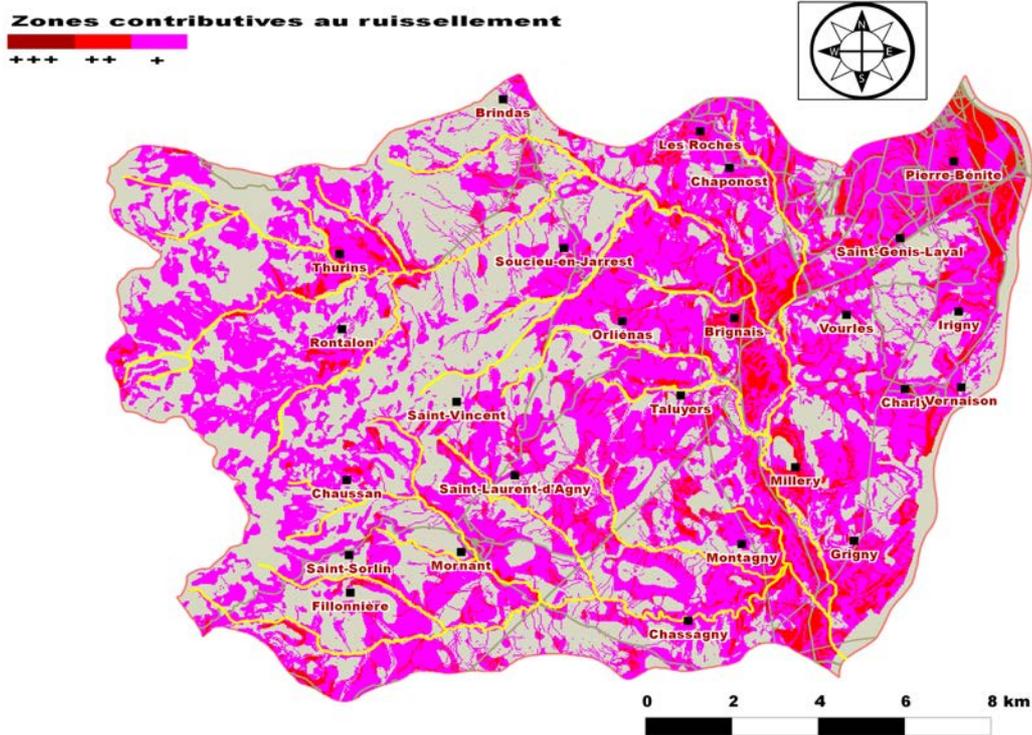


Figure 45 a: Carte d'aptitude à la production du ruissellement du bassin du Garon.

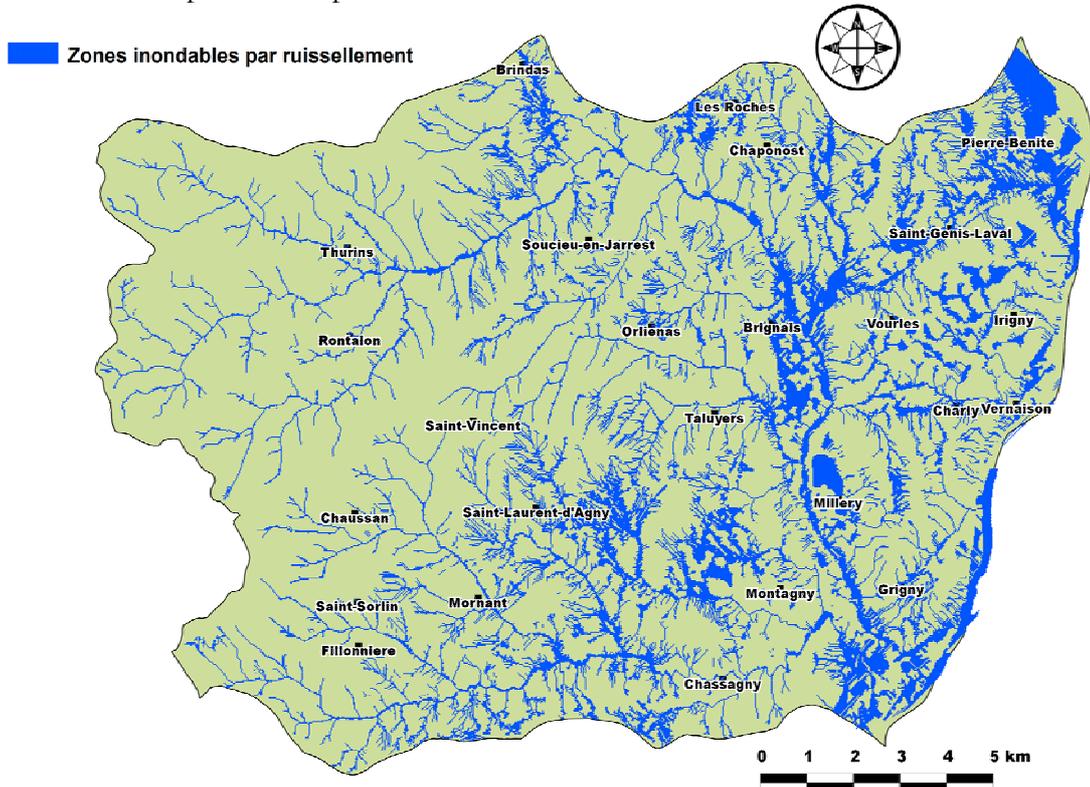


Figure 45 b: Carte des zones sensibles aux sinistres liés au ruissellement du bassin du Garon.

Sur la figure (45a) l'analyse révèle qu'une grande partie de la surface du bassin est potentiellement productrice de flux de ruissellement. Les zones les plus sensibles à l'accumulation des eaux de ruissellement semblent se situer à l'est du bassin (figure 45b), notamment sur le corridor formé par les villes de Montagny, Grigny, Millery, Brignais. Plus à l'amont, l'analyse révèle que les secteurs de Thurins, de Messimy et de Saint-Laurent d'Agny sont aussi sensibles aux sinistres liés au ruissellement.

L'évaluation de ces résultats a été réalisée par une confrontation avec les données de la BD Catnat. Sur la Figure 46 (gauche), on note visuellement que les zones (nuances de rouge foncé) souvent déclarées en catastrophe naturelle pour ruissellement et coulée de boue sont globalement les zones où l'analyse ANSETR identifie une forte persistance spatiale de la sensibilité au ruissellement. La courbe à droite de la même figure montre comme sur le Loire, une relation croissante entre le taux de zones sensibles détectées (ordonnée) et la fréquence des arrêtés de catastrophe naturelle pour ruissellement et coulées de boue.

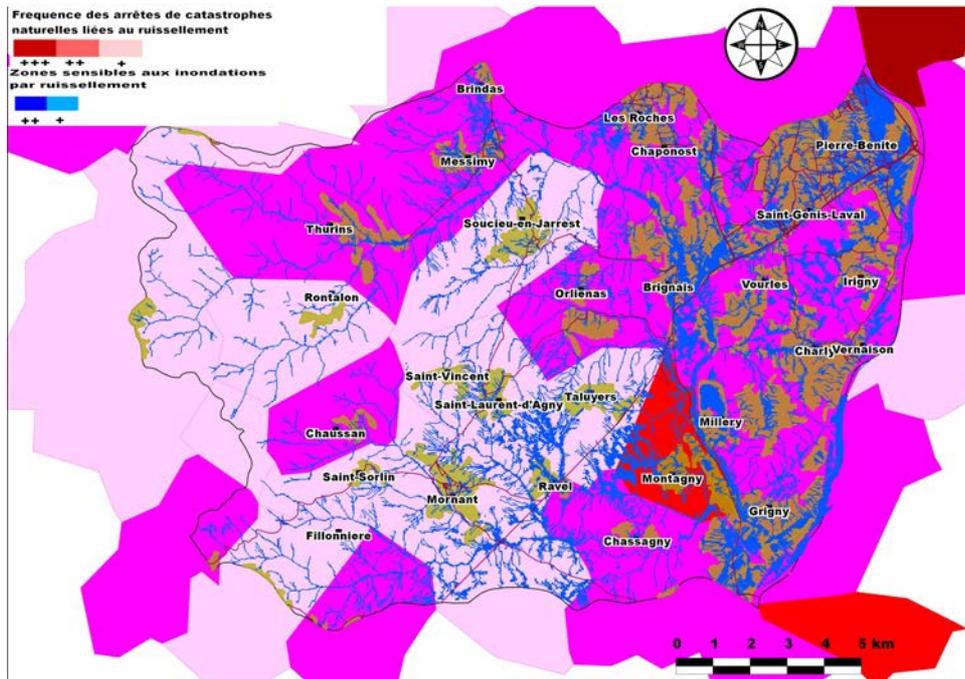


Figure 46 a: Comparaison cartographique entre la fréquence des arrêtés CATNAT pour ruissellement et taux de surface sensibles de ANSETR sur le bassin du Garon

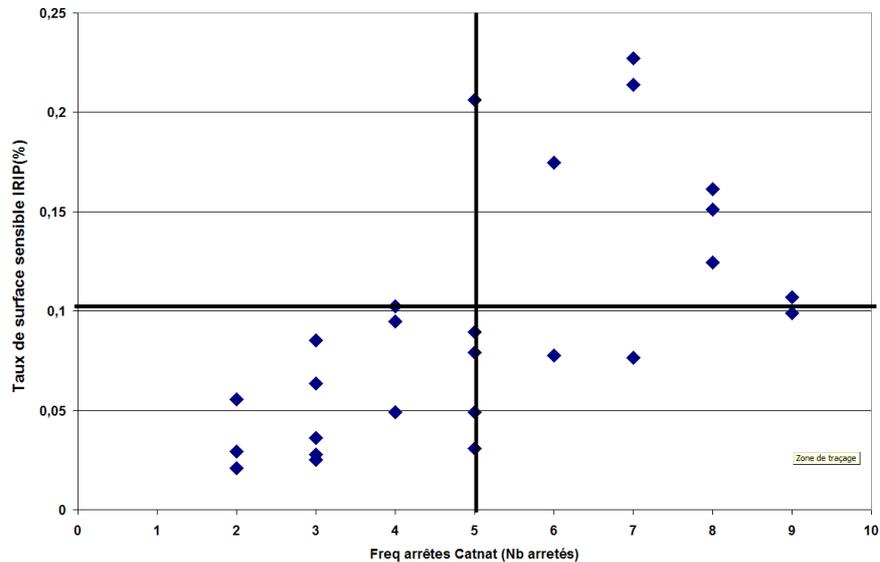


Figure 46 b: Comparaison entre la fréquence des arrêtés CATNAT pour ruissellement et taux de surface sensibles de ANSETR sur le bassin du Garon

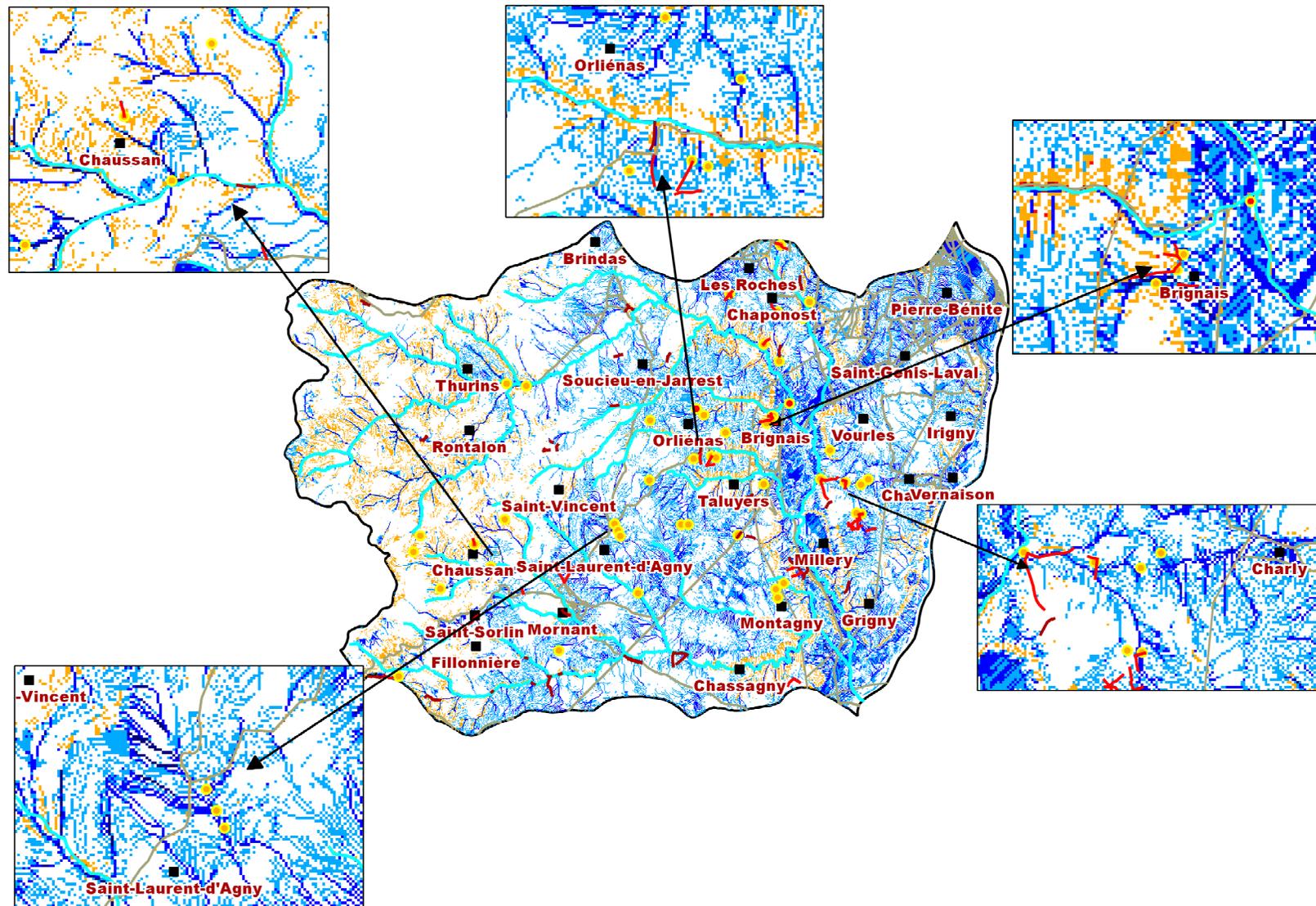


Figure 47 : Comparaison des cartes d'aptitude aux sinistres avec les données d'incidents du Syndicat du contrat de rivière du Garon (SMAGGA)

La figure 47 présente une confrontation avec la Base de données des Incidents liés au ruissellement (Erosion et Inondation) relevés par le Syndicat de la SMAGGA avec le Bureau d'étude REALITES Environnement. Sur cette figure, on peut s'apercevoir que les zones où il a été relevé des incidents sont pratiquement toutes situées en zones sensibles à l'accumulation ou au transfert du ruissellement. Toutefois, il convient de préciser que les données utilisées sont trop grossières pour permettre une analyse de ces incidents, à l'échelle des ouvrages. A l'échelle du Garon cette analyse pourrait avoir comme utilité de définir les zones les plus exposées : celles qui sont déjà connues, mais aussi celles où il ne s'est pas encore produit d'incidents majeurs.

Une analyse à l'échelle d'ouvrages nécessite au moins des données topographiques de grande précision. Nous avons réalisé une analyse plus fine avec des données topographiques de 3m dans le secteur de Montagny (commune la plus touchée par les sinistres liés au ruissellement dans la base CatNat). La figure 48 Montre une comparaison du même secteur avec un MNT de 25m et un MNT de 3m. De manière globale on note une persistance du signal de sensibilité dans les deux cas. On peut aussi remarquer la finesse des contours des zones détectées, et le renforcement du signal dans certaines zones. Enfin, il faut noter que l'analyse ne prend pas en compte les aménagements et autres éléments locaux du paysage pouvant influencer la sensibilité d'un secteur donné. L'étape de terrain et de croisement avec des sources d'information est nécessaire pour avoir une cartographie de la sensibilité au ruissellement directement utile pour des politiques ou aménagements au niveau local.

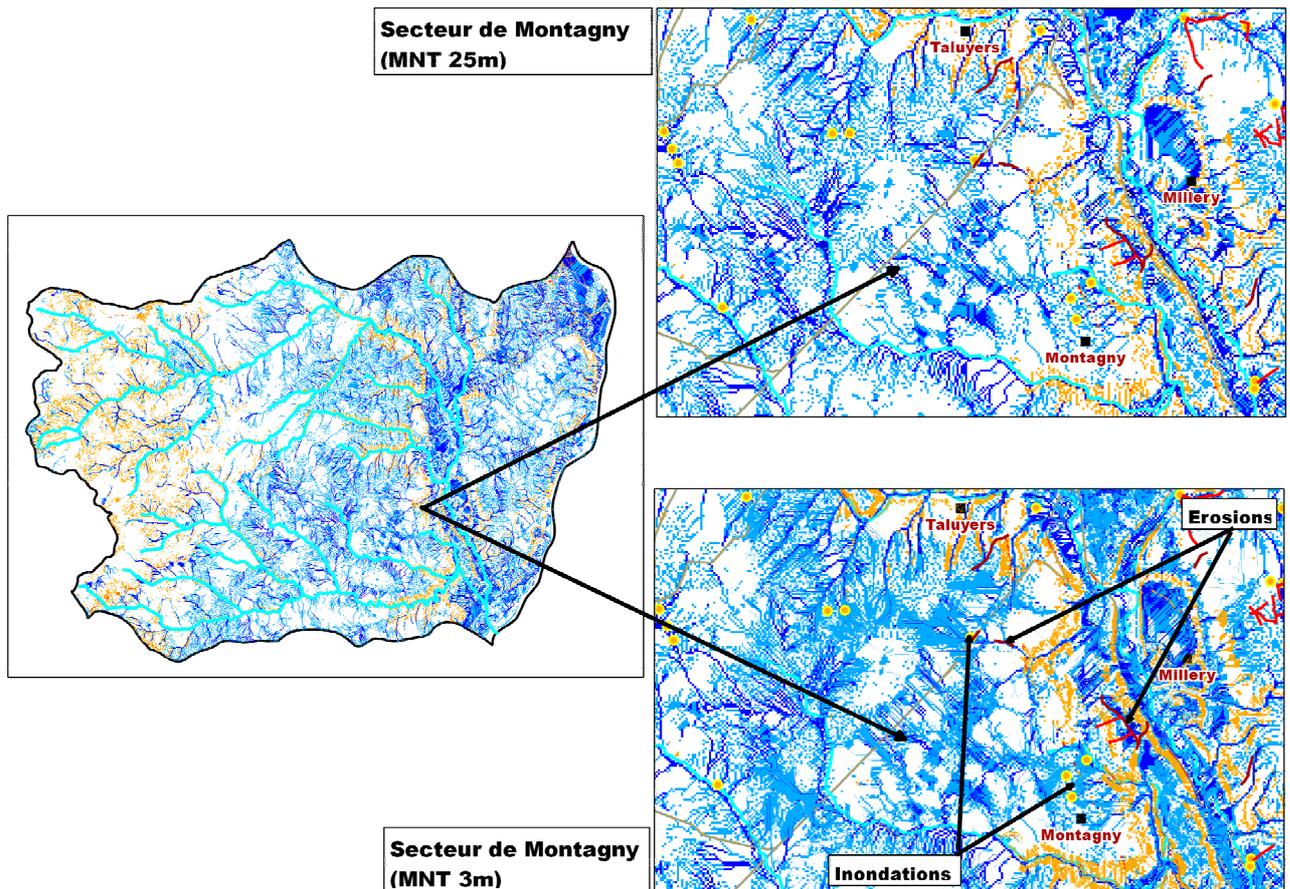


Figure 48 : Sensibilité au ruissellement de Montagny à la précision des données d'entrée.

III-3 Cas de la commune de Genay

Dans la même logique que le cas d'application sur le secteur de Montagny (Garon), nous avons réalisé une série d'applications avec des données fines pour discuter de l'utilité potentielle des cartes issues de l'analyse ANSETR.

Dans le cas de Genay, très impactée par les sinistres liés au ruissellement, et où la Communauté urbaine du Grand Lyon dispose d'un PLU (Programme Local d'Urbanisme) où un zonage ruissellement, nous avons réalisé un cas d'application avec des données topographiques à la résolution de 1m, des données d'occupation des sols issues de la digitalisation d'images satellites et des données sol de la BD INRA au kilomètre. Les données sols sont, à priori, particulièrement grossières pour l'analyse qu'on souhaite faire. Faute de mieux, nous avons quand même fait l'analyse afin d'évaluer la pertinence de l'analyse pour ces données sol grossières.

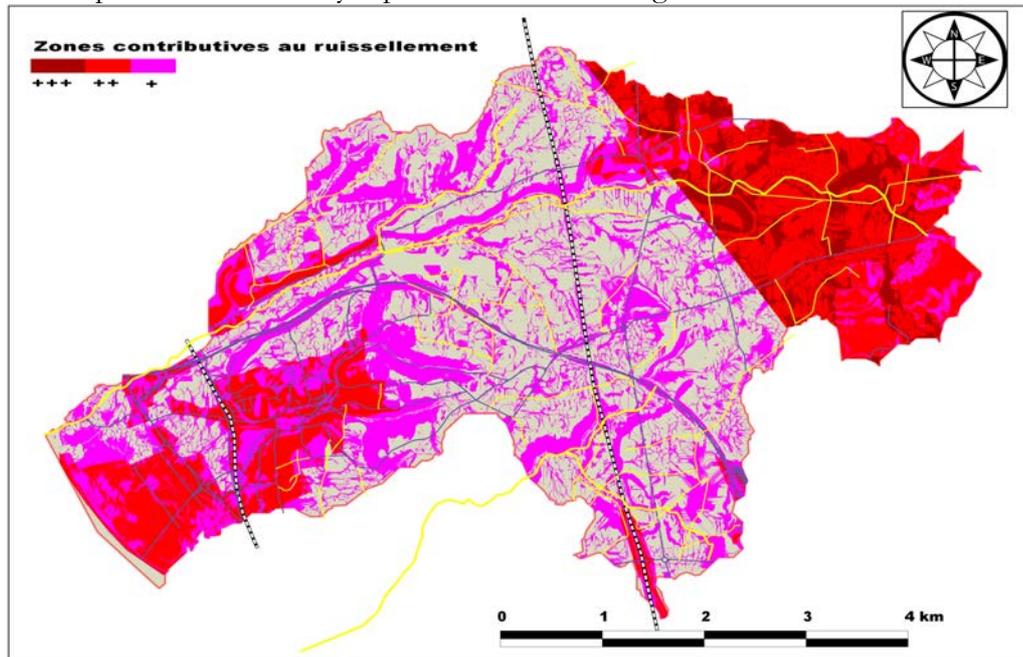


Figure 49 a: Carte des zones sensibles à la production du ruissellement du bassin d'apport de la commune de Genay.

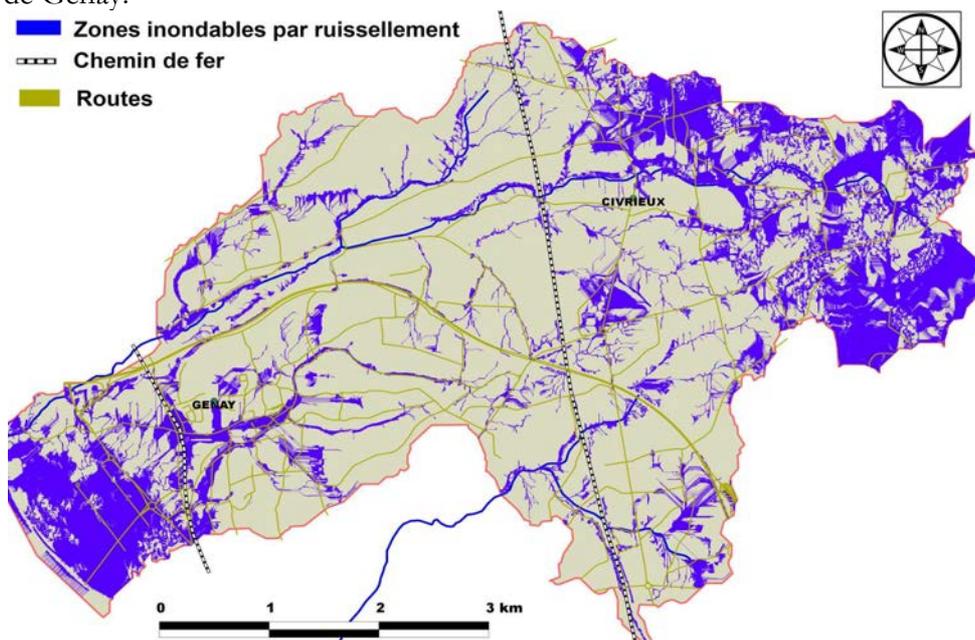


Figure 49 b: Carte des zones sensibles à l'accumulation du ruissellement du bassin d'apport de la commune de Genay.

Les figure 49a et 49b présentent respectivement la cartographie de la sensibilité à la production et à l'accumulation du ruissellement sur Genay et sur son bassin d'apport. On note que les zones de production les plus importantes sont au niveau de la commune de Genay elle-même, mais aussi de la commune voisine de Civrieux, en amont. La carte de sensibilité au sinistre montre que les zones les plus exposées sont essentiellement situées dans le centre urbanisé de la commune.

Une confrontation de la carte figure 49b a été réalisée avec la base de données historique des incidents liés au ruissellement du Grand Lyon. Cette base de données a été réalisée en 2009 à partir d'un inventaire exhaustif à partir de sources de données nationales et locales de différents services de l'agglomération Lyonnaise. Une autre confrontation de la cartographie de la figure 49b a été réalisée avec le zonage ruissellement existant dans le PLU du Grand Lyon. Ce zonage a été réalisé à partir d'expertise terrain et d'une analyse topographique.

La figure 50a présente les résultats de cette confrontation. Il y a une très forte cohérence entre les zones où des sinistres ont été déclarés et les zones sensibles identifiées avec l'analyse ANSETR sur l'ensemble des sinistres observés dans la commune de Genay.

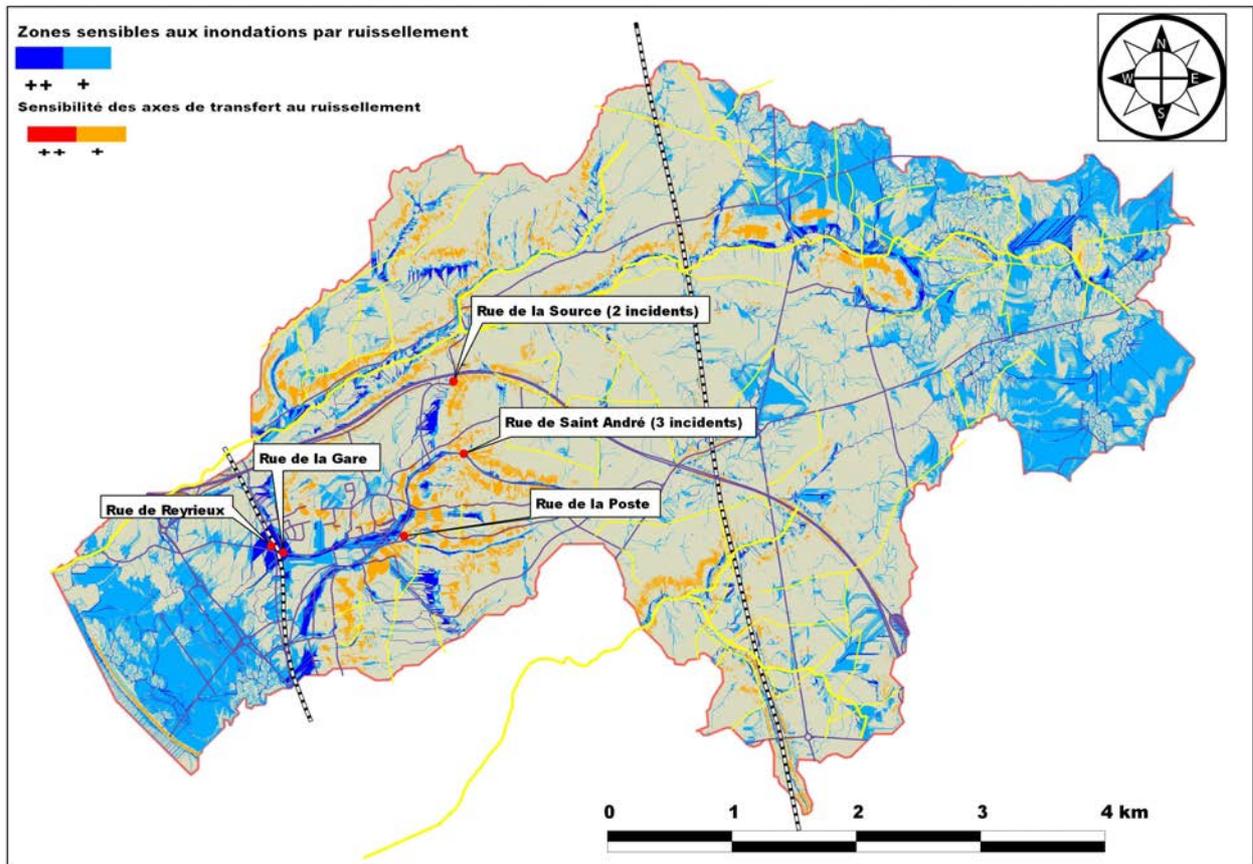


Figure 50 a: Confrontation base de données d'incidents et les zones sensibles au ruissellement

La figure 50b montre une certaine *convergence des emprises* identifiées dans le PLU et celles identifiées dans l'analyse ANSETR. Il y a toutefois plus de nuance dans le résultat de la cartographie ANSETR dans les différentes zones de production, de transfert et d'accumulation.

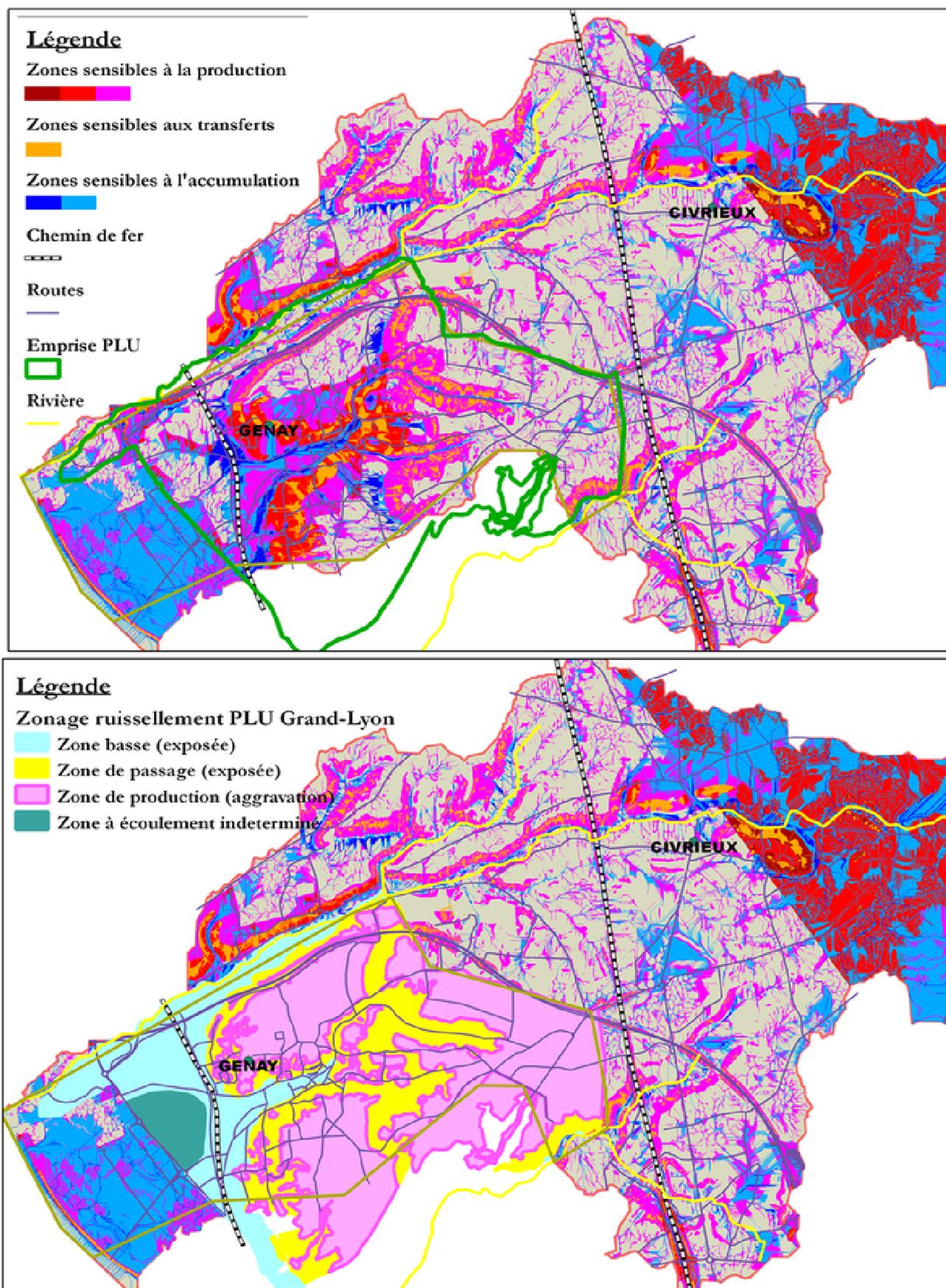


Figure 50 b: Confrontation entre le zonage ruissellement du PLU de Genay et des zones sensibles au ruissellement de l'analyse ANSETR

III-4 Cas de Saint Marcel (Vienne)

La commune de Vienne subit régulièrement des sinistres liés au ruissellement, entre autres par le petit ruisseau de Saint-Marcel. Depuis 1982 cette commune a été touchée par des sinistres déclarés catastrophes naturelles. Le bureau d'étude la Safège a réalisé des études et des travaux afin de réduire l'exposition de cette commune aux sinistres liés au ruissellement.

Nous avons réalisé une application sur ce petit bassin afin de confronter le diagnostic issu de l'analyse ANSETR avec les études réalisées par le bureau d'étude la Safège. Nous avons utilisé des données topographiques fines de 3m de résolution, des données d'occupation des sols issues de la digitalisation d'images satellites à haute résolution. Les données sur les sols utilisées sont celles de la BD INRA au kilomètre.

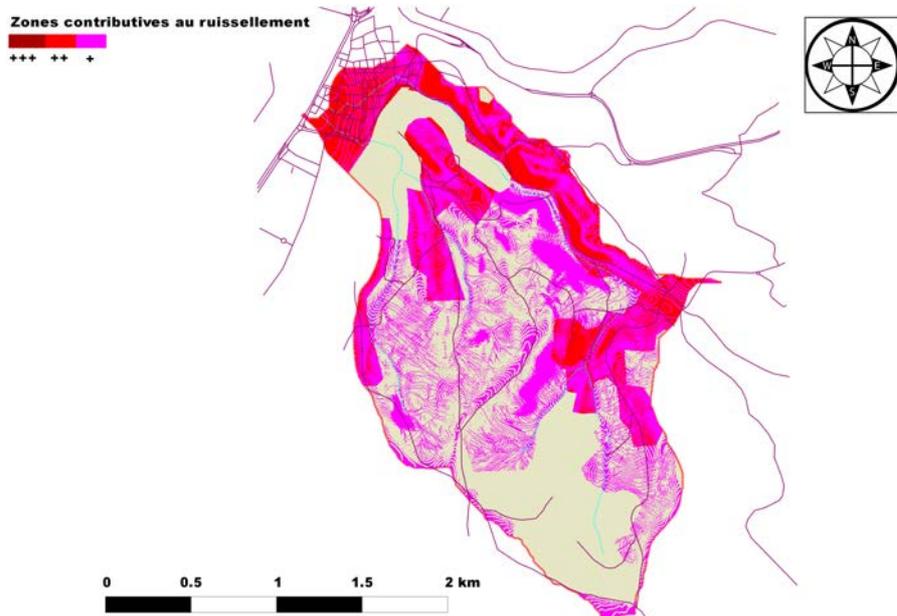


Figure 51 a: Carte des zones sensibles à la production du ruissellement du bassin de Saint-Marcel sur la commune de Vienne.

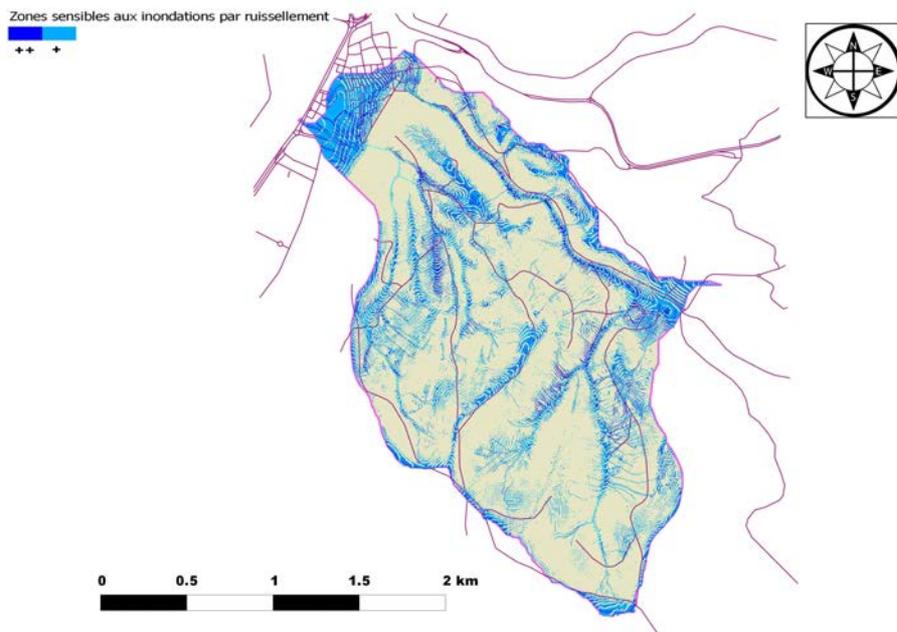


Figure 51 b: Carte des zones sensibles aux sinistres liés au ruissellement du bassin de Saint-Marcel sur la commune de Vienne.

Les figures 51a et 51b présentent respectivement la cartographie des zones contributives de ce bassin, ainsi que les zones sensibles aux sinistres (transfert ou accumulation) sur ce bassin. On remarque une forte sensibilité le long du ruisseau de Saint-Marcel et à l'aval dans l'agglomération de Vienne.

Une confrontation avec les diagnostics réalisés par le bureau d'étude la Safège montre une bonne cohérence entre les zones sensibles détectées et les zones où des travaux ont été réalisés dans le cadre de la lutte contre l'érosion et contre les inondations (figure 52). L'analyse révèle aussi la sensibilité d'autres zones où des travaux n'ont pas été engagés, et où nous ne disposons donc d'aucune information de validation.

Le long du ruisseau Saint Marcel, notamment sur la route départementale qui longe ce ruisseau, plusieurs travaux ont été réalisés suite à des dégâts causés par l'érosion par le bureau d'étude la Safège. Deux bassins de rétention ont été aménagés à l'amont du ruisseau pour limiter les apports des eaux de ruissellement vers l'agglomération de Vienne. Sur la figure 52, on voit bien que le diagnostic ANSETR a clairement identifié tout le secteur où les travaux de lutte contre l'érosion ont été réalisés comme sensible aux sinistres liés au ruissellement.

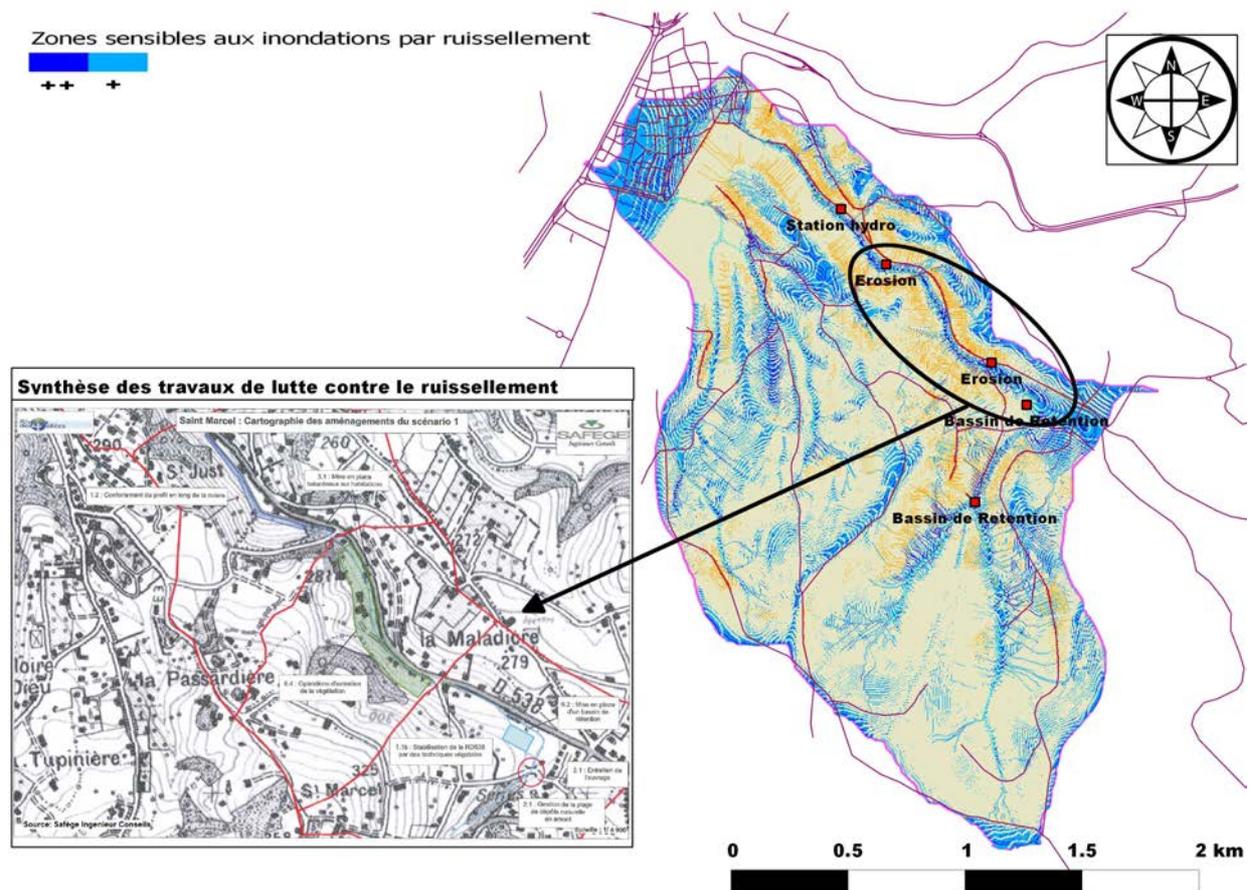


Figure 52 : Confrontation entre le diagnostic du bureau d'étude la Safège et les zones sensibles au ruissellement, détectés par l'analyse ANSETR.

III-5 Cas du bassin de la Merdari (Givors)

Le dernier cas d'application concerne le bassin du Merdari qui débouche sur l'agglomération de Givors. Le 16- Juin 2010, pendant nos travaux, un sinistre a eu lieu sur ce bassin versant. La rapidité de l'événement, son importance malgré une intensité de pluie pas exceptionnelle nous a amené à étudier ce cas. Nous avons donc entrepris sur le terrain une expertise deux jours après l'événement afin de comprendre la dynamique qui a conduit au sinistre. Cette mission nous a permis de confirmer le rôle du ruissellement dans ce sinistre. Notamment nous avons pu constater la faiblesse des capacités d'infiltration sur plusieurs parcelles à l'amont du versant où l'essentiel des eaux de pluie s'est déversé dans la vallée puis dans la partie sud de la ville de Givors.

Nous avons réalisé un diagnostic avec la méthode ANSETR à partir de données topographiques fines (3m), de données d'occupation des sols issues de la digitalisation d'images satellites à très haute résolution ainsi qu'avec des données de sol du programme IGCS au 1/100 000.

La figure 53a montre des cartographies des zones de production du ruissellement, la production du ruissellement semble située essentiellement à l'amont du bassin. Les zones de transfert et d'accumulation (Figure 53b) se situent essentiellement le long du ruisseau, et à l'aval à l'entrée sud de l'agglomération de Givors.

Une confrontation avec les observations faites dans le cadre du sinistre survenu le 16 Juin 2010 sur ce bassin est présentée sur la figure 54. Les rues inondées se situent entièrement dans la zone sensible identifiée par l'analyse ANSETR. De même le principal axe de transfert sensible (la rue Saint Gérald qui longe le ruisseau) identifié dans l'analyse a servi au cours du sinistre à conduire les eaux du bassin dans le centre ville. A l'amont du bassin nous avons aussi relevé de nombreuses traces d'érosion (figure 54 droite) essentiellement dans les secteurs sensibles détectés par l'analyse ANSETR.

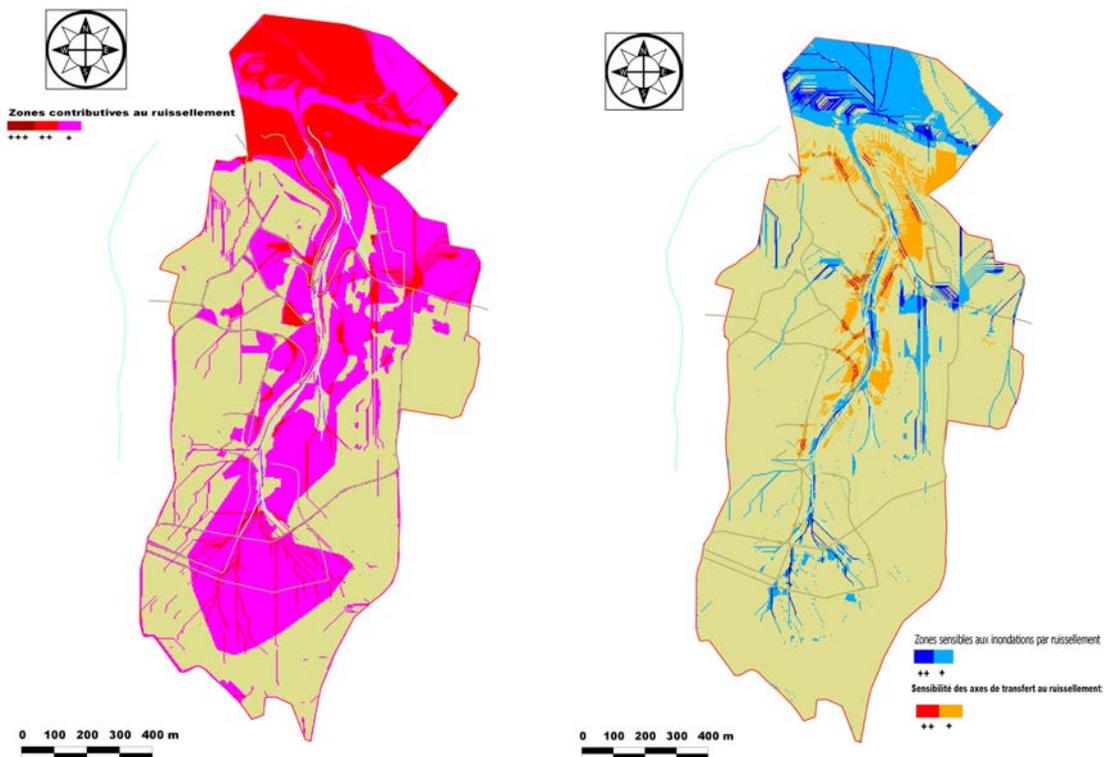


Figure 53 : Cartes des zones contributives et des zones sensibles aux sinistres liés au ruissellement du bassin du Merdari sur la commune de Givors.

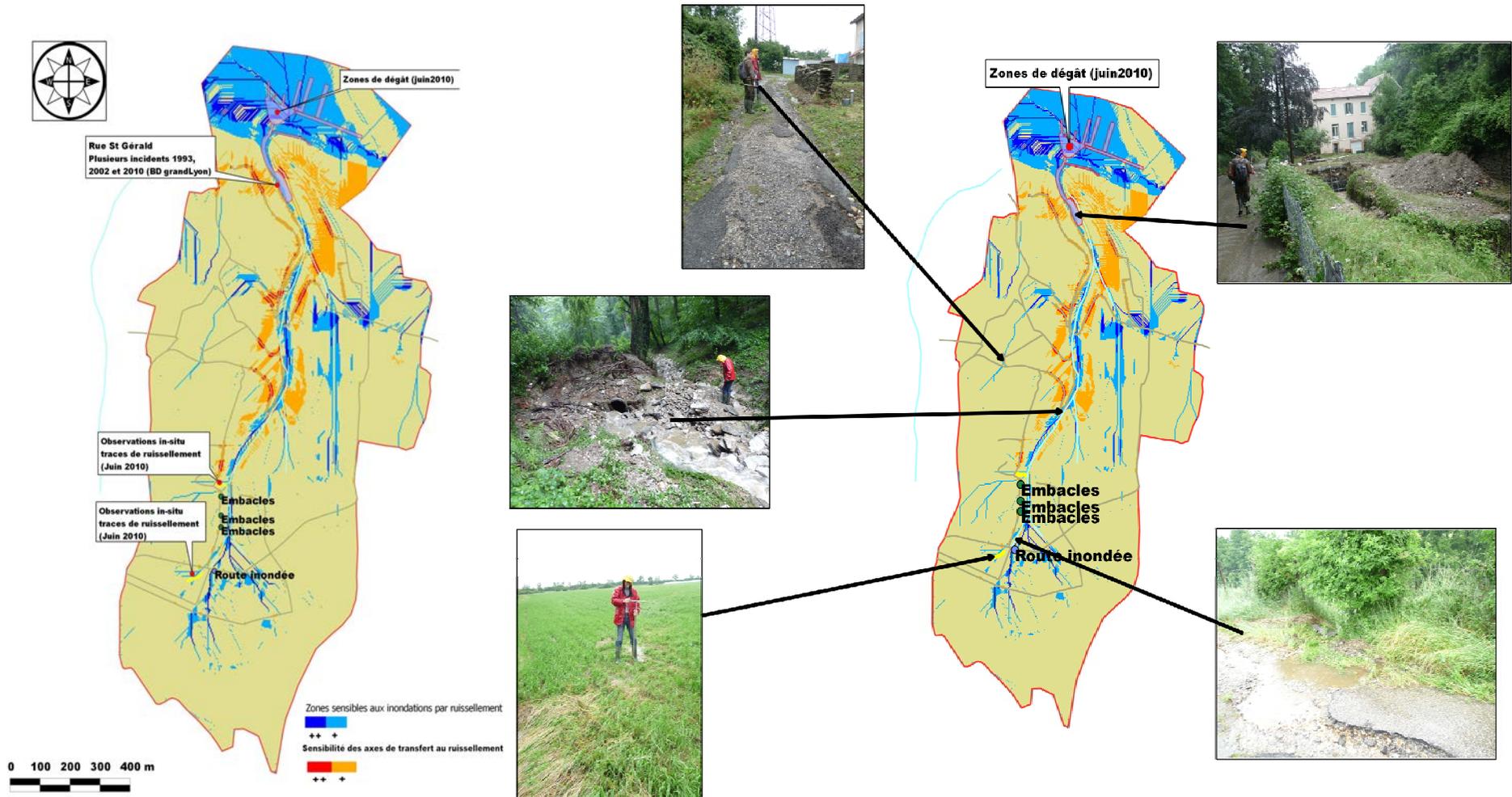


Figure 54 : Confrontation de la cartographie des zones sensibles avec les observations faites le lendemain du sinistre du 16 Juin 2010

IV- Discussions

La démarche de validation de la méthodologie proposée n'en est qu'à ses débuts. Il est nécessaire de poursuivre cette démarche, notamment pas l'application et l'évaluation de la méthode sur des territoires très contrastés. A l'échelle du territoire français, les régions du Sud (Cévennes – Rhône aval), du bassin Parisien (Seine/Normandie), le Bassin de la Garonne, de la Saône-Amont et de la Loire aval ont des territoires ayant de fortes occurrences du ruissellement (Figure 21) et représentent une diversité de situations contrastées où il faudrait sélectionner des bassins ou des secteurs test dans le cadre d'une validation globale de la méthode.

L'ensemble des cas d'application révèle une grande pertinence de l'analyse cartographique proposée par la méthode, sur de grands et petits territoires. Sur les grandes étendues spatiales, nous avons vu qu'il était possible de détecter même, avec des données grossières, les secteurs les plus sensibles d'un territoire à travers la notion de persistance spatiale du signal de sensibilité. Nous avons aussi vu que les cartographies réalisées avec des données grossières ne suffisaient pas pour prendre des décisions (aménagement, politiques à la parcelle etc.) au niveau local (ouvrages, parcelle cadastrale etc.). Avec des données fines, l'analyse semble être en mesure de fournir des informations utiles pour prendre des décisions au niveau local (aménagement, politiques de prévention etc.). Nous avons aussi vu que la précision de l'information topographique était un élément très important pour une analyse locale avec la méthode proposée. Les autres sources d'information (occupation du sol et paramètres de sol) permettent essentiellement d'affiner la détection des zones contributives. Plus ces informations sont précises et plus la cartographie des zones de transfert et d'accumulation des eaux de ruissellement sera fine, même si une information grossière sur ces sources permet, semble-t-il, d'obtenir des résultats pertinents.

Le projet IRIP a débouché sur une opportunité d'améliorer et de mieux orienter les actions/politiques opérationnelles dans le cadre de la lutte contre les sinistres liés au ruissellement. Au-delà des résultats cartographiques, il serait souhaitable d'initier une collaboration plus étroite avec des acteurs locaux en prise avec les problèmes de ruissellement et les aspects réglementaires (collectivités locales, bassin, organismes gouvernementaux etc.) afin d'explorer les usages et potentialités offerts par cette nouvelle méthode en terme de prévention, voire de prévision des sinistres.

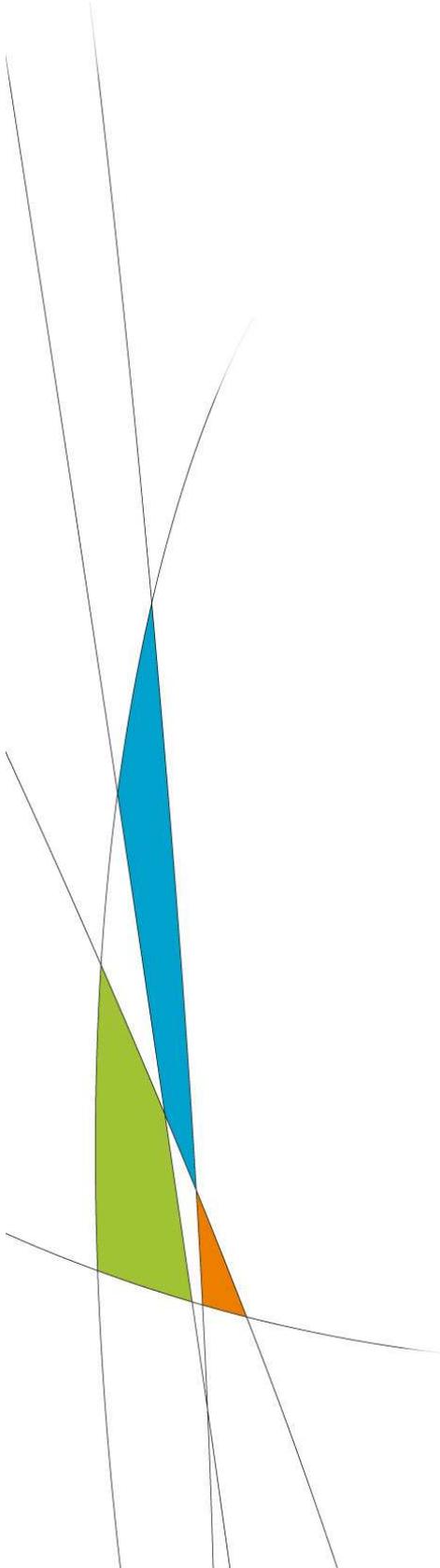
L'évaluation de la méthode a aussi soulevé le problème de l'inexistence de bases de données historiques suffisamment précises sur la localisation des sinistres. Ces observations sont pourtant cruciales pour valider la méthode dans des contextes très variés. Il est aussi souhaitable d'initier une base de données géographique sur l'information historique des sinistres liés au ruissellement. Ces sinistres à répertorier ne devraient pas forcément être déclarés catastrophe naturelle. Il s'agira là d'une base d'informations précieuse qui aiderait à améliorer les différents outils de diagnostic actuellement disponibles.

Références bibliographiques

- Beven, K. et M. J. Kirkby (1979). "A physically-based variable contributing area model of basin hydrology." Hydrol. Sci. Bull. **24**: 43-69.
- Braud, I., K. Chancibault, et al. (2010). The AVuPUR project (Assessing the Vulnerability of Peri-Urbans Rivers): experimental set up, modelling strategy and first results. 7th Novatech 2010 Conference.
- Brelot, E., J. Chappier, et al. (2009). "Guide pour la prise en compte des eaux pluviales dans les documents de planification et d'urbanisme." Graie, Groupe de travail régional sur la prise en compte des eaux pluviales à l'échelle des bassins versants. Villeurbanne-France V1.
- Chaplot, V. et Y. L. Bissonais (2000). "Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes." Earth Surface Processes and Landforms **25**(2): 145-153.
- Dautrebande, S. et F. Colard (2003). "Cartographie des zones à risque de ruissellement et d'érosion en région wallonne : Méthodologie et cas pilotes." Fascicule n°1 de la convention « érosion 243 », Gembloux : FUSAGx Convention réalisée au profit de la DGA (RW): 66.
- de Lavenne, A. (2010). "Risque d'inondation par ruissellement: Instrumentation terrain et analyse géomatique." Rapport de stage Ingénieur. Agroscampus Ouest/ ESA d'Angers: 95p.
- Dehotin, J. et P. Breil (2011). "Rapport bibliographique: Cartographie de l'aléa inondation par ruissellement." Document de synthèse Projet IRIP: 35p.
- Douvinet, J. (2006). "Intérêts et limites des données « CatNat » pour un inventaire des inondations. L'exemple des « crues rapides » liées à de violents orages (Bassin parisien, Nord de la France)." Norois, Presses Universitaires de Rennes (PUR). **201**(4): 17-30.
- Esteves, A. et C. De Rosa (1989). "A simple method for correcting the solar radiation readings of a Robitzsch-type pyranometer." Solar Energy **42**(1): 9-13.
- Fox, D., R. B. Bryan, et al. (1997). "The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions." Geoderma **80**(1-2): 181-194.
- Gonzalez-Sosa, E., I. Braud, et al. (2010). "Impact of land use on the hydraulic properties of the topsoil in a small French catchment." Hydrological Processes **24**(17): 2382-2399.
- Green, W. H. et G. Ampt (1911). "Studies of soil physics, Part I- The flow of air and water through soils." J. Ag. Sci. **4**: 1-24.
- Le Bissonais, Y., C. Montier, et al. (1998). "Cartographie de l'aléa Erosion des sols en France." IFEN Collection Etudes et Travaux **18**.
- Le Gouée, P. et D. Delahaye (2008). "Modélisation et cartographie de l'aléa érosion des sols et des espaces de ruissellement dans le Calvados." Rapport d'étude.
- Mérot, P., H. Squidant, et al. (2003). "Testing a climato-topographic index for predicting wetlands distribution along an European climate gradient." Ecological Modelling **163**(1-2): 51-71.

Nicolas, M. (2010). "Etude expérimentale et numérique du ruissellement de surface : effets des variations d'intensité de la pluie. Application à une parcelle de vigne en Cévennes-Vivarais." Thèse de doctorat, LTHE - Université Joseph Fourier. Grenoble.

Woolhiser, Smith RE, et al. (1990). "KINEROS, A kinematic runoff and erosion model: Documentation and User Manual." U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service ARS-77: 130.



Résumé

Le projet IRIP a permis de développer une méthodologie spécifique pour la cartographie d'un indicateur de l'aléa spatial inondation par ruissellement. Elle se base sur une première étape de caractérisation de l'aléa pluviométrique, suivi d'une étape de caractérisation de la prédisposition d'un territoire à produire, transférer et accumuler du ruissellement (ANSETR).

La méthodologie proposée a été testée et évaluée sur 2 bassins versant à deux échelles différentes. Les éléments d'évaluation intègrent pour les grandes étendues spatiales, l'utilisation de la base de données des arrêtés de catastrophes naturelles. A échelle fine, un dispositif d'observation spatialisé (DEVERSE) a été mis en place et exploité afin de confronter la réalité du ruissellement aux résultats cartographiques.

Une analyse de sensibilité a permis de tester la robustesse et les limites de la méthodologie proposée lorsque les données utilisées sont grossières.

Enfin, plusieurs cas d'application ont été réalisés sur différents bassins de tailles différentes : Loire amont (7000 Km²), les bassins de l'Yzeron (140 km²), du Garon (200 Km²), et les petits bassins d'apports de quelques kilomètres carrés sur les communes de Vienne, de Givors et de Genay.



Direction générale
Parc de Tourvoie
BP 44 - 92163 Antony cedex
Tél. 01 40 96 61 21
Fax 01 40 96 62 25
www.cemagref.fr