



HAL
open science

Cartographie de l'aléa ruissellement. Inventaire des éléments de validation

S. Bonnet Carrier, Christine Poulard, Pascal Breil

► **To cite this version:**

S. Bonnet Carrier, Christine Poulard, Pascal Breil. Cartographie de l'aléa ruissellement. Inventaire des éléments de validation. irstea. 2013, pp.127. hal-02599053

HAL Id: hal-02599053

<https://hal.inrae.fr/hal-02599053>

Submitted on 16 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.



Cartographie de l'aléa ruissellement

Inventaire des éléments de validation

DECEMBRE 2013

BONNET-CARRIER STANISLAS

POULARD CHRISTINE, BREIL PASCAL

IRSTEA

5 rue de la Doua

CS 70077

69626 Villeurbanne Cedex

Pour mieux affirmer
ses missions,
le Cemagref devient Irstea



Table des matières

TABLE DES MATIERES	III
LISTE DES FIGURES.....	V
LISTE DES TABLEAUX	VII
INTRODUCTION.....	2
1.1 CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE	2
1.2 CONTEXTE REGLEMENTAIRE	5
1.3 OBJECTIF DE L'ETUDE	7
II. IRIP : OUTIL DE CARTOGRAPHIE DU RUISSELLEMENT.....	10
2.1 DEFINITION DU RUISSELLEMENT POUR LA METHODE IRIP	10
2.1.1 <i>Le phénomène du ruissellement</i>	<i>10</i>
2.1.2 <i>Le phénomène d'inondation par ruissellement</i>	<i>12</i>
2.1.3 <i>La cartographie de l'aléa ruissellement.....</i>	<i>15</i>
2.2 LE CHOIX DE L'OUTIL IRIP	18
2.2.1 <i>L'utilisation d'un outil pour la cartographie du ruissellement.....</i>	<i>18</i>
2.2.2 <i>L'indicateur du ruissellement intense pluvial IRIP.....</i>	<i>19</i>
2.3 METHODE DE VALIDATION DES CARTES IRIP	27
2.3.1 <i>Validation spatiale des zones de production du ruissellement.....</i>	<i>27</i>
2.3.2 <i>Validation spatiale des zones de transfert du ruissellement</i>	<i>29</i>
2.3.3 <i>Validation spatiale des zones d'accumulation du ruissellement</i>	<i>31</i>
2.3.4 <i>La validation temporelle</i>	<i>33</i>
III. APPLICATION ET VALIDATION DETAILLEES DE LA METHODE IRIP AU BASSIN VERSANT DE L'AZERGUES.....	36
3.1 LE BASSIN VERSANT DE L'AZERGUES.....	36
3.1.1 <i>La rivière Azergues.....</i>	<i>36</i>
3.1.2 <i>Géologie et pédologie du bassin versant de l'Azergues.....</i>	<i>38</i>
3.1.3 <i>Occupation des sols sur le bassin versant de l'Azergues.....</i>	<i>39</i>
3.2 DIAGNOSTIC DU RUISSELLEMENT SUR LE BASSIN VERSANT DE L'AZERGUES.....	42
3.2.1 <i>Les données utilisées dans la méthode IRIP.....</i>	<i>42</i>
3.2.2 <i>Les cartes intermédiaires produites par la méthode</i>	<i>44</i>
3.2.3 <i>Les cartes d'aptitude au ruissellement</i>	<i>46</i>
3.3 VALIDATION IN SITU DE LA METHODE IRIP	54
3.3.1 <i>Validation des cartes de production du ruissellement.....</i>	<i>54</i>
3.3.2 <i>Validation des cartes de transfert du ruissellement</i>	<i>57</i>
3.3.3 <i>Validation des cartes d'accumulation du ruissellement</i>	<i>58</i>
IV. ELEMENTS DE VALIDATION DE LA METHODE IRIP SUR LE BASSIN VERSANT DU GARDON ET DE LA NARTUBY	60
4.1 PRESENTATION DES BASSINS VERSANT DU GARD ET DE LA NARTUBY.....	60
4.1.1 <i>Le bassin versant du Gardon.....</i>	<i>60</i>
4.1.2 <i>Le bassin versant de la Nartuby.....</i>	<i>62</i>

4.2	DIAGNOSTIC DU RUISSELLEMENT ET METHODE DE VALIDATION SUR LE BASSIN VERSANT DU GARDON.....	64
4.2.1	<i>Application d'IRIP sur le bassin versant du Gardon</i>	<i>64</i>
4.2.2	<i>Éléments de validation de la méthode IRIP sur le bassin versant du Gardon</i>	<i>68</i>
4.3	DIAGNOSTIC DU RUISSELLEMENT ET METHODE DE VALIDATION SUR LE BASSIN VERSANT DE LA NARTUBY.....	72
4.3.1	<i>Application d'IRIP sur le bassin versant de la Nartuby.....</i>	<i>72</i>
4.3.2	<i>Intégration d'une notion de dynamique des écoulements dans la méthode IRIP.....</i>	<i>76</i>
V.	DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES	78
5.1	APPROCHE D'IRIP ET APPROCHES NATURALISTES DES PPRIS	78
5.1.1	<i>Les Plans de Prévention des Risques d'Inondation.....</i>	<i>78</i>
5.1.2	<i>L'approche naturaliste des PPRIS.....</i>	<i>78</i>
5.1.3	<i>L'utilisation d'approches naturalistes par la méthode IRIP</i>	<i>80</i>
5.2	INCERTITUDES DES CARTES PRODUITES PAR LA METHODE IRIP	82
5.2.1	<i>Limites liées à l'échelle cartographique d'application</i>	<i>82</i>
5.2.2	<i>Limites liées aux problèmes des frontières cartographiques</i>	<i>83</i>
5.2.3	<i>Limites liées aux classes des niveaux de sensibilité de la méthode IRIP.....</i>	<i>83</i>
5.3	PERSPECTIVES DE COUPLAGE AVEC DES MODELES PLUIE-DEBIT	86
5.3.1	<i>Définition d'un modèle hydrologique.....</i>	<i>86</i>
5.3.2	<i>Approche du couplage entre un modèle et IRIP.....</i>	<i>87</i>
5.3.3	<i>Quantification du ruissellement fournit par IRIP</i>	<i>90</i>
5.3.4	<i>Incorporation d'une période de retour à la méthode IRIP</i>	<i>95</i>
CONCLUSION	98
1.	<i>Le phénomène du ruissellement :.....</i>	<i>98</i>
2.	<i>La méthode IRIP, objectifs et validation :.....</i>	<i>98</i>
3.	<i>Perspectives :.....</i>	<i>100</i>
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	101
ANNEXES	106

Liste des figures

FIGURE 1 : REPRESENTATION DE L'ALEA, DES ENJEUX VULNERABLES ET DU RISQUE (MINISTERE CHARGE DE L'ECOLOGIE)	3
FIGURE 2 : PART DES INONDATIONS DANS LES ARRETES DE CATASTROPHES NATURELLES EN FRANCE (BD GASPARD 1982-2010)	3
FIGURE 3 : PART DES INONDATIONS PAR RUISSELLEMENT DANS LES INONDATIONS DECLAREES CATASTROPHES NATURELLES EN FRANCE (BD GASPARD 1982-2010)	4
FIGURE 4 : REPARTITION DES DIFFERENTS PPRIS EXISTANTS EN FRANCE EN 2008.....	6
FIGURE 5 : SCHEMA DE LA GENESE DU RUISSELLEMENT A L'ECHELLE PARCELLAIRE.....	10
FIGURE 6 : ILLUSTRATION DES ZONES DE PRODUCTION, DE TRANSFERT ET D'ACCUMULATION DU RUISSELLEMENT A L'ECHELLE D'UN BASSIN VERSANT.....	12
FIGURE 7 : ILLUSTRATION DE PHENOMENE D'INONDATION PAR RUISSELLEMENT CONCENTRE EN AMONT (A) ET EN AVAL (B) ET (C) DU BASSIN VERSANT	13
FIGURE 8 : REPRESENTATION DES OBJECTIFS DE LA CARTOGRAPHIE DE LA METHODE IRIP	16
FIGURE 9 : DIVISION DE L'ETUDE DU RUISSELLEMENT POUR L'OUTIL IRIP (DEHOTIN ET BREIL, 2011)	20
FIGURE 10 : MECANISME DE CARTOGRAPHIE DE L'APTITUDE A LA PRODUCTION DU RUISSELLEMENT PAR IRIP (DEHOTIN ET BREIL, 2011).....	23
FIGURE 11 : EXEMPLE DE CARTE D'APTITUDE A LA PRODUCTION DU RUISSELLEMENT PRODUITE PAR IRIP (DEHOTIN ET BREIL, 2011).....	23
FIGURE 12 : MECANISME DE CARTOGRAPHIE DE L'APTITUDE AU TRANSFERT DU RUISSELLEMENT PAR IRIP (DEHOTIN ET BREIL, 2011).....	24
FIGURE 13 : EXEMPLE DE CARTE D'APTITUDE AU TRANSFERT DU RUISSELLEMENT PRODUITE PAR IRIP (DEHOTIN ET BREIL, 2011).....	24
FIGURE 14 : EXEMPLE DE CARTE D'APTITUDE A L'ACCUMULATION DU RUISSELLEMENT PRODUITE PAR IRIP (DEHOTIN ET BREIL, 2011).....	25
FIGURE 15 : EXEMPLE DE CARTE D'APTITUDE A L'ACCUMULATION DU RUISSELLEMENT PRODUITE PAR IRIP (DEHOTIN ET BREIL, 2011).....	26
FIGURE 16 : VALIDATION DES CARTES IRIP PAR ANALYSE CHRONOLOGIQUES DES INTERVENTIONS DES SECURITES CIVILES.....	34
FIGURE 17 : LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'AZERGUES (SOURCE : SMRPCA 2013).....	36
FIGURE 18 : OCCUPATION DES SOLS DU BASSIN VERSANT DE L'AZERGUES SELON LA BASE DE DONNEES CORINE LAND COVER 2006 (IFEN, 2006)	40
FIGURE 19 : MNT DU BASSIN VERSANT DE L'AZERGUES (HORS BREVENNE-TURDINE) INTEGRE DANS LA METHODE IRIP.....	43
FIGURE 20 : CARTE D'OCCUPATION DES SOLS DU BASSIN VERSANT DE L'AZERGUES UTILISE DANS LA METHODE IRIP.....	43
FIGURE 21 : CARTE DES UNITES DE SOLS (SMU) SUR LE BASSIN VERSANT DE L'AZERGUES.....	44
FIGURE 22 : TRANSCRIPTION DE LA CARTE D'OCCUPATION DES SOLS PAR LA METHODE IRIP.....	45
FIGURE 23 : TRANSCRIPTION DES DONNEES PEDOLOGIQUES PAR LA METHODE IRIP	45

FIGURE 24 : HISTOGRAMME RASTER DE LA FREQUENCE DES INDICES IRIP POUR LA CARTE DE PRODUCTION	46
FIGURE 25 : CARTE D’APTITUDE A LA PRODUCTION DU RUISSELLEMENT SUR LE BASSIN VERSANT DE L’AZERGUES	48
FIGURE 26 : HISTOGRAMME RASTER DE LA FREQUENCE DES INDICES IRIP POUR LA CARTE DE TRANSFERT DU RUISSELLEMENT	49
FIGURE 27 : CARTE D’APTITUDE A LA PRODUCTION DU RUISSELLEMENT SUR LE BASSIN VERSANT DE L’AZERGUES	51
FIGURE 28 : HISTOGRAMME RASTER DE LA FREQUENCE DES INDICES IRIP POUR LA CARTE D’ACCUMULATION	52
FIGURE 29 : CARTE D’APTITUDE A LA PRODUCTION DU RUISSELLEMENT SUR LE BASSIN VERSANT DE L’AZERGUES	53
FIGURE 30 : COMPARAISON DE LA CARTE SENSIBILITE A LA PRODUCTION DU RUISSELLEMENT ET LA LOCALISATION DES BASSINS DE RETENTION SUR LE BASSIN VERSANT DE L’AZERGUES	54
FIGURE 31 : GRAPHIQUE DU NOMBRE DE BASSINS DE RETENTION EN FONCTION DES INDICES IRIP.....	55
FIGURE 32 : MISE EN CORRELATION DU VOLUME DES BASSINS DE RETENTION AVEC LA CARTE DE PRODUCTION DU RUISSELLEMENT	56
FIGURE 33 : VOLUME DES BASSINS DE RETENTION EN FONCTION DU NIVEAU DE SENSIBILITE IRIP	57
FIGURE 34 : LOCALISATION DU BASSIN VERSANT DU GARDON SUR UNE CARTE IGN A 1/1 000 000	60
FIGURE 35 : LOCALISATION DU BASSIN VERSANT DE LA NARTUBY SUR UNE CARTE IGN A 1/1 000 000	62
FIGURE 36 : CARTE DE PRODUCTION IRIP DU BASSIN VERSANT DU GARDON	65
FIGURE 37 : CARTE DE TRANSFERT IRIP DU BASSIN VERSANT DU GARDON.....	66
FIGURE 38 : CARTE D’ACCUMULATION DU RUISSELLEMENT DU BASSIN VERSANT DU GARDON.....	67
FIGURE 39 : LOCALISATION DES DEBORDEMENTS DE LA BASE PICH SUR LA CARTE DE PRODUCTION DE RUISSELLEMENT	69
FIGURE 40 : ANALYSE DE LA FREQUENCE DE SUBMERSION DES ROUTES DANS LE GARD EN FONCTION DE L’INDICATEUR IRIP	69
FIGURE 41 : CARTE IRIP DE LA SENSIBILITE A LA PRODUCTION DU BASSIN VERSANT DE LA NARTUBY	73
FIGURE 42 : CARTE IRIP DE L’APTITUDE AU TRANSFERT DU RUISSELLEMENT SUR LE BASSIN VERSANT DE LA NARTUBY	74
FIGURE 43 : CARTE IRIP DE L’APTITUDE A L’ACCUMULATION DU RUISSELLEMENT SUR LE BASSIN VERSANT DE LA NARTUBY	75
FIGURE 44 : TABLEAU RECAPITULATIF DES SURFACE DE PRODUCTION ET DES COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT EN SORTIE DE LA METHODE IRIP (SOURCE : HASNAOUI, 2012)	84
FIGURE 45 : SYNTHESE DES FORMULES UTILISEES PAR LA SNCF (HASNAOUI 2013)	93
FIGURE 46 : TABLEAU RECAPITULATIF DES RESIDUS DES DIFFERENTES METHODES D’ESTIMATION DE DEBIT (HASNAOUI 2013).....	94
FIGURE 47 : REPRESENTATION DE LA NOTION DE PERIODE DE RETOUR PAR LA METHODE IRIP	96
FIGURE 48 : COMPARAISON DE LA NOTION DE RUISSELLEMENT EN FONCTION DU PHENOMENE ET DE LA PERCEPTION DE CELUI-CI.	98

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : RECAPITULATIF DES DONNEES UTILISABLES ET DE LEUR PERTINENCE POUR LA VALIDATION DES ZONES DE PRODUCTION DU RUISSELLEMENT	29
TABLEAU 2 : RECAPITULATIF DES DONNEES UTILISABLES ET DE LEUR PERTINENCE POUR LA VALIDATION DES ZONES DE TRANSFERT DU RUISSELLEMENT	31
TABLEAU 3 : RECAPITULATIF DES DONNEES UTILISABLES ET DE LEUR PERTINENCE POUR LA VALIDATION DES ZONES D'ACCUMULATION DU RUISSELLEMENT	33
TABLEAU 4 : RECAPITULATIF DES PRINCIPAUX AFFLUENTS DE L'AZERGUES (SMRPCA 2013).....	38
TABLEAU 5 : RECAPITULATIF DES DONNEES UTILISEES DANS LA METHODE IRIP POUR LE BASSIN VERSANT DE L'AZERGUES	42
TABLEAU 6 : RECAPITULATIF DES FACTEURS IRIP POUR CHAQUE SMU	44
TABLEAU 7 : NIVEAU DE SENSIBILITE DE PRODUCTION DES BASSINS DE RETENTION SUR LE BASSIN VERSANT DE L'AZERGUES	55
TABLEAU 8 : NIVEAU DE SENSIBILITE DE TRANSFERT DES BASSINS DE RETENTION SUR LE BASSIN VERSANT DE L'AZERGUES	58
TABLEAU 9 : RECAPITULATIF DES DONNEES UTILISEES DANS LA METHODE IRIP POUR LE BASSIN VERSANT DU GARDON.....	64
TABLEAU 10 : RECAPITULATIF DES FACTEURS IRIP POUR CHAQUE SMU SUR LE BASSIN VERSANT DU GARDON	64
TABLEAU 11 : RECAPITULATIF DES DONNEES UTILISEES DANS LA METHODE IRIP POUR LE BASSIN VERSANT DE LA NARTUBY	72
TABLEAU 12 : RECAPITULATIF DES FACTEURS IRIP POUR CHAQUE SMU SUR LE BASSIN VERSANT DE LA NARTUBY	72

Introduction

1.1 Contexte général de l'étude

L'un des risques majeurs pour nos sociétés actuelles est le risque d'inondation. Pour ce risque, l'aléa est constitué des précipitations torrentielles ayant pour conséquences les plus connues des cours d'eau en crues et des inondations. Les enjeux sont les biens et les activités humaines, les infrastructures, les populations et l'environnement touchés par l'aléa de façon directe (routes inondées, dommages aux biens...) ou indirecte (pollutions entraînées à l'aval, pertes d'exploitation...).

Afin de faciliter la compréhension de l'étude mais aussi pour harmoniser l'ensemble des notions d'enjeu, d'aléa, de vulnérabilité et de risque, il est important de définir le plus précisément possible ces termes (selon Veyret 2004 et Veyret *et al.*, 2003) :

- **Les enjeux** : Les enjeux sont les intérêts menacés par un ou plusieurs phénomènes physiques et vulnérables à ces phénomènes. L'enjeu le plus important est la vie humaine. Cet enjeu se qualifie en fonction du nombre de personnes menacées par un phénomène naturel ainsi que par la vulnérabilité de ceux-ci (école, hôpital, maison de retraite...). Un autre type d'enjeu est celui des biens humains. On peut qualifier de biens humains les habitations, les cultures, les centres d'activités, les équipements, les réseaux routiers...
- **L'aléa** : L'aléa est un évènement physique naturel caractérisé par son amplitude et une périodicité incertaine (figure 1). La connaissance de l'aléa passe par une analyse spatiale de ses spécificités, de sa dynamique, de sa fréquence et de son intensité. La modélisation de l'aléa nécessite donc une large collecte de donnée qui peut ne pas être toujours efficace (données inexistantes, inexploitable...).
- **La vulnérabilité** : Dans le langage courant, il y a souvent une confusion entre enjeux et vulnérabilité. D'où l'importance de bien définir ce terme. La vulnérabilité est la mesure des conséquences dommageables consécutives à un évènement sur les enjeux en présence (figure 1). Elle peut être physique, fonctionnelle, humaine, socio-économique et/ou environnemental. La vulnérabilité se doit d'être étudiée spatialement et temporellement. En effet, dans un espace donné, la vulnérabilité peut varier selon la situation (effets de sites) et selon la période retenue (époque de l'année ou période de la journée).
- **Le risque** : le risque est l'exposition à un danger potentiel et à la mesure de ce danger. On ne parle de risque que si les dommages sont probables, c'est-à-dire s'il y a présence d'enjeux vulnérables (figure 1). L'aléa répond aux questions *où, quand, comment* de la définition du risque, les enjeux aux questions *qui ou quoi* et la vulnérabilité à *quelles conséquences*. **Le risque peut donc être défini comme le croisement entre l'aléa et la vulnérabilité** (Circulaire n° DPPR/SEI2/MM-05-0316 du 7 octobre 2005)



Figure 1 : Représentation de l'aléa, des enjeux vulnérables et du risque (Ministère chargé de l'écologie)

Face aux aléas naturels, la société doit répondre à deux questions fondamentales : « Quel degré de protection est souhaité ? », et « quel niveau de risque peut être accepté ? ». L'acceptabilité est une notion fondamentale du risque naturel. Celle-ci dépend uniquement des sociétés exposées aux risques et des enjeux qu'elles représentent.

De nos jours, la notion de risque est corrélée à la notion de dommages. En effet, il est difficile d'évaluer le risque engendré par une catastrophe naturelle sinon par les conséquences et l'impact de celle-ci sur la société. De par sa position géographique et géomorphologique, la France est essentiellement exposée à l'aléa « inondation ». Cet aléa est non seulement l'un des plus fréquents (figure 2) mais aussi celui qui concerne la plus grande population exposée (18,5 millions d'habitants exposés en France en 2011, source : EPRI 2011). La BD Gaspard de 1982 à 2010 (source : www.prim.net) présente l'aléa d'inondation en quatre types d'inondations bien distinctes: Les inondations par débordement de cours d'eau, par ruissellement, par remontée de nappe et par submersion marine. Bien que les inondations de cours d'eau soient plus étudiées par la communauté scientifique depuis les années 70, la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) met en évidence **le fait que les inondations par débordements de cours d'eau sont à l'origine de la moitié des montants des sinistres** (figure 3). **L'autre moitié est essentiellement la conséquence des inondations par ruissellement** (Moncoulon *et al.*, 2013).

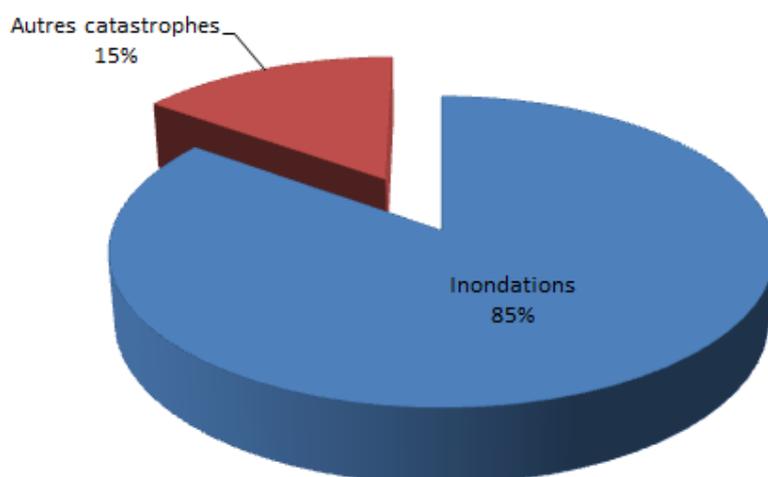


Figure 2 : Part des inondations dans les arrêtés de catastrophes naturelles en France (BD Gaspard 1982-2010)

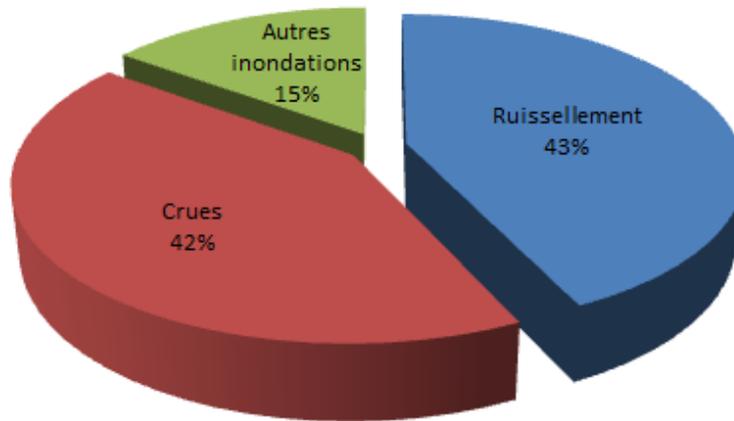


Figure 3 : Part des inondations par ruissellement dans les inondations déclarées catastrophes naturelles en France (BD Gaspard 1982-2010)

Afin de réduire les dommages causés par l'aléa inondation, la Commission européenne couplée avec le Parlement européen ont souhaité légiférer en droit européen sur l'évaluation et la gestion des risques d'inondations à travers la Directive 2007/60/CE en date du 23 octobre 2007. Bien que, comme nous l'avons montré précédemment, l'aléa inondation par ruissellement soit responsable d'une part importante d'arrêts catastrophes naturelles, il n'a pas été explicitement cité et encadré dans la directive inondation, contrairement à d'autres causes (débordement de cours d'eau, remontée de nappes, submersion marine...).

Avant cette directive européenne, les cartes officielles d'aléa inondation étaient en France publiées dans les Plans de Prévention des RISques Naturels (PPRI), à l'échelle communale.

Pour l'heure, 16939 communes sont concernées en France par un risque d'inondation. Près de 25 % (4381 communes) disposent de PPRI Inondation prescrit et moins de 40 % (6600 communes) ont un PPRI Inondation approuvé (DPPR/MEEDDAT, février 2008). **Sur l'ensemble des communes, à peine 10 % (1779 communes) possèdent un PPRI Ruissellement.** Cette forte inégalité met bien en lumière le fait que la notion d'inondation par ruissellement n'est pas forcément distincte de la notion de débordement de cours d'eau. Certains PPRI font mention de ces risques sans toutefois y consacrer une partie des plans de préventions. Les processus de ruissellement sont éventuellement étudiés et quantifiés dans d'autres documents, les schémas directeurs d'assainissement pluvial, pour des périodes de retour plus courantes que les études PPRI.

La raison de cette si grande inégalité entre les PPRI de débordement de cours d'eau et ceux du ruissellement est peut-être la difficulté de ce type d'étude, où contrairement au débordement de cours d'eau il n'existe pas de consensus sur les méthodes à appliquer (Brelot *et al.*, 2009). Le chapitre 2 montrera d'ailleurs que selon les études et les objectifs, ce ne sont pas toujours exactement les mêmes phénomènes qui sont appelés sous le terme de « ruissellement ». La création d'une méthode validée et applicable en tout point géographique français nécessite une homogénéisation des notions et des besoins nécessaires à sa création. Cette contrainte met déjà bien en évidence la difficulté de mesure et de quantification du ruissellement de par son caractère diffus et non homogène. De plus de nombreuses lacunes existent au sein de la communauté scientifique concernant les méthodes d'analyse hydrologique du ruissellement. En effet, ces méthodes ont surtout été développées dans le cadre des débordements de cours d'eau, et ne permettent donc pas la

détection des zones impactées par les inondations dues au ruissellement, ni les axes de transferts de celui-ci parfois éloigné de tout cours d'eau ou talweg (Dehotin *et al.*, 2011).

1.2 Contexte réglementaire

1.2.1 Historique

Les risques naturels majeurs en France, dont le risque d'inondation, ont fait très tôt l'objet de mesures réglementaires, puisque dès le Moyen âge des édits royaux prévoyaient des mesures comme la construction de digues.

C'est au cours du XXème siècle, et face à l'augmentation de la vulnérabilité des populations aux risques d'inondation, que plusieurs lois ont vu le jour. Ainsi, la loi du 30 octobre 1935, première loi de protection des populations au risque d'inondation, prévoyait l'instauration de Plans de Surfaces Submersibles (PSS). Il faudra attendre le milieu des années 90, faisant suite aux inondations du 22 septembre 1992 (46 morts, source : AFP) et celles du 22 et 30 septembre 1993 (10 morts, source : AFP), et la loi du 2 février 1995 (dite loi Barnier) Créant les Plans de Préventions de Risques (PPR). De cette loi, il découle aussi la création d'un fonds pour la prévention des risques naturels majeurs (ou fonds Barnier).

Il faudra attendre d'autres inondations importantes, et notamment celles du Gard du 8 au 10 septembre 2002 (24 morts, source : AFP), pour une réforme de l'annonce des crues avec la création des Services de Prévisions des Crues par la loi du 30 juillet 2003 (dite loi Bachelot).

1.2.2 En Droit Français

Actuellement en droit Français, les territoires les plus exposés aux aléas naturels disposent d'un outil de veille réglementaire pour la protection des populations et des biens : les PPRIs. Ces PPRIs sont une procédure qui régit l'utilisation des sols en tenant compte des aléas naturels identifiés sur le territoire. Cette réglementation a un impact fort sur l'urbanisme puisqu'elle peut conditionner la construction d'un bâtiment jusqu'à l'interdiction de construire pour certains cas où l'aléa peut avoir des conséquences importantes pour les enjeux présents. Les PPRIs ont donc pour objectif d'orienter les choix d'aménagement du territoire pour exposer le moins possible les personnes et les biens aux aléas naturels.

Les PPRIs ont été institués par les articles 40-1 à 40-7 de la loi n°87-565 du 22 juillet 1987 relative à l'organisation de la sécurité civile à la prévention des risques majeurs (source : AIDA). Les PPRIs ont alors une valeur de servitude d'utilité publique. Le texte a été complété par la loi n° 95-101 du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement (dite loi Barnier) : à compter de cette date, chaque commune doit être dotée d'un PPRi. Différents décrets et textes de loi ont complétés le cadre réglementaire des PPRIs (Le décret n° 95-1089 du 5 octobre 1995, l'ordonnance n° 2000-914 du 18 février 2000 et La loi n° 2004-811 du 13 août 2004 concernant la modernisation de la sécurité civile a complété le dispositif légal). Actuellement, **les PPRIs ont été intégrés au code de l'environnement par les articles L. 562-1 à L. 562-8 et L. 210-1 à L. 211-1 du code de l'environnement.**

Les PPRIs concernent le plus souvent les inondations par débordement de cours d'eau (Jaillet *et al.*, 2012). En effet, la population et le territoire touchés sont beaucoup plus importants lors d'un débordement de cours d'eau (de l'échelle communale à l'échelle départementale voire régionale) que pour les inondations par ruissellement intense (échelle locale à communale). Comme le montre la figure 4, **le faible nombre de PPRi**

ruissellement existant (1779 en 2008, Jaillet et *al.*, 2012) est à mettre en comparaison avec les PPRI concernant les cours d'eau en débordement (4381 PPRI prescrit et 6660 PPRI approuvés en 2008) sur près de 16939 communes concernées en France.

Nombre et nature des PPRI existant en France en 2008 (Source : DPPR/MEEDDAT, 2008)

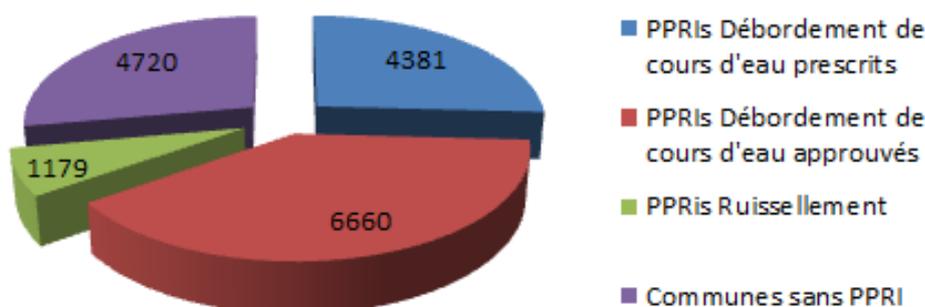


Figure 4 : Répartition des différents PPRI existants en France en 2008

1.2.3 En Droit Européen

C'est afin d'homogénéiser les approches et les systèmes de prévention et de gestion des autres pays membres de l'Union Européenne, que la Commission européenne s'est mobilisée pour lutter contre ce risque. A l'échelle européenne plus de 100 événements de grande importance ont été répertoriés entre 1998 et 2004, et toujours selon la Commission européenne ces épisodes ont causé plus de 700 morts, un déplacement d'un demi-million de personnes et la perte économique de 25 milliards d'euros couverte par les assurances (source : Direction Générale de la Prévention des Risques).

C'est la **Directive 2007/60/CE du 23 octobre 2007, dite « Directive Inondation »** qui va être la contribution européenne à la gestion du risque d'inondation et à la limitation de l'impact sur la santé humaine, l'environnement et l'activité économique. La directive demande aux états membres de délimiter les bassins hydrographiques qui sont exposés à un risque d'inondation. Pour chaque état il devient alors nécessaire d'établir sa propre carte des risques d'inondation ainsi qu'un plan de gestion des zones concernées (source AIDA).

Afin d'encadrer la législation des états membres, il a fallu que la Commission européenne définisse les différents termes pour un fonctionnement uniforme. Ainsi, la directive européenne détermine, dans son article 10, quatre types d'aléa inondation :

- **Inondations par débordement direct de cours d'eau**
- **Inondations par crues subites** (crues éclair)
- **Inondations urbaines**
- **Inondations par intrusion marine** (zones côtières)

A la vue des définitions fournies par la Directive Inondation, deux sources principales d'inondations semblent négligées. Il s'agit des inondations par ruissellement intense et les

inondations par ruptures d'ouvrages. **L'aléa inondation par ruissellement n'est donc pas inclus au sens propre dans la directive 2007/60/CE.** En effet, celle-ci n'a pour but que l'établissement d'un cadre pour des mesures visant à réduire les dommages provoqués par les inondations. Il est vrai que les inondations par débordement de cours d'eau sont beaucoup plus importantes en termes de dommages causés, néanmoins l'aléa inondation par ruissellement reste un phénomène important pour les petits bassins versant et joue aussi un rôle dans le cadre des crues éclaircies.

Afin de respecter la législation européenne, la « Directive Inondation » a dû être transposée en droit français, et cela avant novembre 2009. Cette transposition s'est réalisée en **juillet 2010 par la Loi portant Engagement National pour l'Environnement (LENE) dite « Grenelle II »**. C'est l'article 221 de cette loi qui a conduit à la création du chapitre IV dans le Code de l'Environnement contenant les articles L.566-1 à L.566-13, intitulé « Evolution et gestion des risques ». Cette disposition législative est complétée par le décret n°2011-227 du 3 mars 2011 page 4130 texte n°5, à application immédiate, pour achever la transposition de la directive en droit français (source : AIDA).

Pour aider à l'application de la loi, deux circulaires et une instruction ont vu le jour : **La Circulaire du 5 juillet 2011 relative à la mise en œuvre de la politique de gestion des risques d'inondation, l'Instruction du 22 février 2012 relative aux thèmes prioritaires d'actions nationales en matière de risques naturels et hydrauliques pour 2012-2013 et la Circulaire du 16 juillet 2012 relative à la mise en œuvre de la phase « cartographie » de la directive européenne relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation** (source : AIDA).

1.3 Objectif de l'étude

C'est tout d'abord **dans un objectif de progression dans la connaissance et la compréhension du phénomène du ruissellement, et pour à terme, améliorer l'information et la protection des populations que le projet IRIP (Indicateur du Ruissellement Intense Pluvial) a été lancé.** Ce programme permet de combiner une analyse géomatique et une vérification des processus physiques sur le terrain via une campagne d'observation. Il s'articule autour de deux méthodes de validation : Par confrontation avec les études disponibles, et par croisement avec les déclarations de la base de données des arrêtés de Catastrophes Naturelles (Base GASPAR, source : www.prim.net). Ce projet, financé par la région Rhône-Alpes ainsi que l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse a été monté par P.Breil et J.Dehotin en 2011 au sein de l'Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA). Il rassemblait divers laboratoires de recherche, bureaux d'études et organismes publics (GRAND-LYON, IRSTEA, DREAL, REALITES-Environnement, INSA-Lyon, INRA-Thonon-les-Bains, GRAIE). Le développement de l'outil IRIP se poursuit en parallèle au sein de la SNCF pour ses besoins propres (IRIP-Rail).

Ensuite, d'un point de vue réglementaire, la méthode IRIP s'inscrit dans un objectif de mise en œuvre d'une cartographie de l'aléa ruissellement prévue par la circulaire du 16 juillet 2012. En effet, la méthode IRIP (Dehotin *et al.*, 2011) va permettre l'identification cartographique des risques d'inondation par ruissellement et ainsi permettre l'identification des zones exposées à cet aléa pour pouvoir, par la suite, développer un plan d'action et de gestion du territoire. La directive n'ayant pas proposée de modèle « type » à suivre pour l'aléa inondation, la méthode IRIP a pour objectif secondaire d'uniformiser la méthodologie de la cartographie de l'aléa du ruissellement et de pouvoir s'adapter à tous les bassins versants, à toute échelle, de France métropolitaine.

Ce travail fait suite à une première étude bibliographique préliminaire effectuée en 2012 sur les Plans de Préventions des Risques français réalisée par Jaillet *et al.*, 2012. Ce travail préalable met bien en évidence la difficulté rencontrée pour le calcul d'un aléa ruissellement probabiliste, notamment à échelles fines (cartographie sur un versant). A quelques exceptions près, les cartographies réalisées dans le cadre des PPRIs suivent une démarche hydrogéomorphologique, en s'appuyant sur des connaissances de terrains par des experts locaux.

Ces études naturalistes admettent, tout comme la méthode IRIP, l'existence et l'identification de zones de production, de transfert et d'accumulation du ruissellement. Alors qu'IRIP se fonde sur une formulation algorithmique, les méthodes utilisées dans les PPRIs sont peu formalisées, puisque délimitées à dire d'expert, et applicables uniquement dans le bassin versant étudié. En effet, le mode de création ainsi que les valeurs utilisées pour définir les classes de dangers réalisées pour les PPRIs varient grandement d'un bassin versant à l'autre.

Le travail réalisé lors de cette étude poursuit donc la contribution bibliographique réalisée en 2012 à IRSTEA-Lyon (Jaillet *et al.*, 2012) ainsi que le développement de la méthode IRIP en s'intégrant dans la phase de cartographie de l'aléa voulue par la Directive Inondation de 2007. Ainsi le travail réalisé à un triple objectif :

- **L'application d'un diagnostic de ruissellement intense au sein de bassins versants à travers la méthode IRIP.** Le travail réalisé pour cet objectif va contribuer à une meilleure connaissance du phénomène de ruissellement intense via un outil géomatique sur un bassin versant donné. De plus, il permettra d'avoir une meilleure connaissance terrain du bassin versant testé par la récolte de données géologique, pédologique, hydrologique et topographique nécessaire au fonctionnement d'IRIP.
- **La réalisation d'une analyse permettant la validation, selon divers approches, de la méthode IRIP sur des bassins versants tests.** Cette analyse de la validation de l'outil IRIP est une nécessité dans la confirmation et l'exploitabilité de la méthode pour la cartographie du ruissellement. Elle permet de confronter les approches théoriques rigoureuses et pragmatiques pour une meilleure délimitation du champ d'action de la méthode. La question de la validation est une question primordiale. En effet, il est important de savoir si le ruissellement est systématique lorsqu'il a été observé, pour tous les événements et en tous points.
- **L'approche comparée de la méthode IRIP avec des approches hydrogéomorphologiques dites naturalistes (cf. partie 5.1).** Habituellement le ruissellement est soit globalement à la sortie d'un sous-bassin (méthode rationnelle, CIA ou Socose) soit évalué à l'intérieur de ce sous-bassin par des approches naturalistes ; les approches pluie-débit distribuées sont exigeantes en données et complexes à mettre en œuvre, donc rares (Jaillet *et al.*, 2012). Les approches naturalistes comprennent une analyse hydrogéomorphologique du territoire, ainsi qu'une étude des phénomènes historiques et des enquêtes auprès des riverains et acteurs locaux.

L'objectif de l'étude réalisée sur IRIP est donc de contribuer d'une part au développement et au paramétrage de l'outil ainsi que sa validation après application de la méthode sur des zones tests et d'autre part de pouvoir affiner le type d'approche, en fonction des données nécessaires et des données réellement collectables, afin de comparer

IRIP à ce qui existe déjà en terme de localisation des zones de ruissellement présentes dans certains PPRIs.

Au-delà de ces objectifs, cette étude permet de mettre en évidence des questions et des pistes de réflexion quant aux perspectives à la méthode IRIP. En effet, lors de nos travaux, diverses problématiques nous sont apparues, et même si une réponse précise n'est pas donnée, à l'heure actuelle, il est important d'avoir un esprit critique et une analyse complète sur l'ensemble des problèmes et des perspectives évoquées dans ce travail.

En résumé :

- **Les inondations par ruissellement représentent une part importante des inondations recensées. En revanche les mesures de protections réglementaires contre ces inondations sont presque inexistantes.**
- **La directive européenne 2007/60/CE et sa transcription en droit Français ne prennent pas en compte le ruissellement comme source d'inondation.**
- **La méthode IRIP propose un diagnostic de l'aléa ruissellement intense pluvial, à base géomatique, à partir de l'identification de zones contributives, d'accumulation et d'axes de transfert naturels ou on reliant ces deux zones. Cette méthode a été développée pour un diagnostic multi-échelle. Elle peut donc être utilisée pour des études fines, très locales ou de taille régionale en fonction des données d'entrées utilisées.**

II. IRIP : Outil de cartographie du ruissellement

2.1 Définition du ruissellement pour la méthode IRIP

2.1.1 Le phénomène du ruissellement

Il n'existe pas de définition standard pour le phénomène de ruissellement. **Selon le domaine d'expertise touché, le ruissellement n'est pas défini similairement car il n'a pas la même action.** Ainsi pour les géologues, le ruissellement se définit comme « l'écoulement superficiel des eaux pluviales, se rendant aux thalwegs sans passer par l'intermédiaire des sources » (Traité de Géologie de Lapparent (1885) tome 1, p.188). Pour les hydrologues, il s'agit « de la partie des précipitations qui s'écoule à la surface du sol » (Glossaire international d'Hydrologie, 1992).

On remarque des lacunes dans chacune des définitions ci-dessus. Dans beaucoup d'ouvrage, il fait état d'un « ruissellement de surface ». Le besoin qu'ont les auteurs de préciser « ruissellement de surface » prouve l'ambiguïté du terme, mal défini à cause de l'assimilation avec le terme anglais « runoff » qui se traduit effectivement par écoulement avec un sens très large, puisqu'il concerne toute circulation de l'eau en surface, aussi bien sur les versants que dans le lit de cours d'eau.

Or le terme de « ruissellement de surface » est un pléonasme puisque le ruissellement suppose une circulation superficielle de l'eau. Mais cette ambiguïté du terme ne se limite pas à cette confusion avec l'anglais. La raison vient de ce qu'à l'origine, les crues ont été attribuées au ruissellement sur les versants. Il y avait alors assimilation entre un processus de transfert sur les versants (le ruissellement) et un volume de crue, qui s'observait dans le cours d'eau (Dictionnaire Français d'hydrologie, 2006). C'est pourquoi, dans le cadre de notre travail il est primordial de définir précisément le terme de ruissellement au sens de la méthode IRIP.

Ainsi, **le ruissellement** (figure 5) se définit dans le cadre de la méthode IRIP comme « **une circulation d'eau à la surface du sol, qui prend un aspect diffus sur des terrains ayant une topographie homogène et qui se concentre lorsqu'elle rencontre des dépressions topographiques** » (Jaillet *et al.*, 2012).

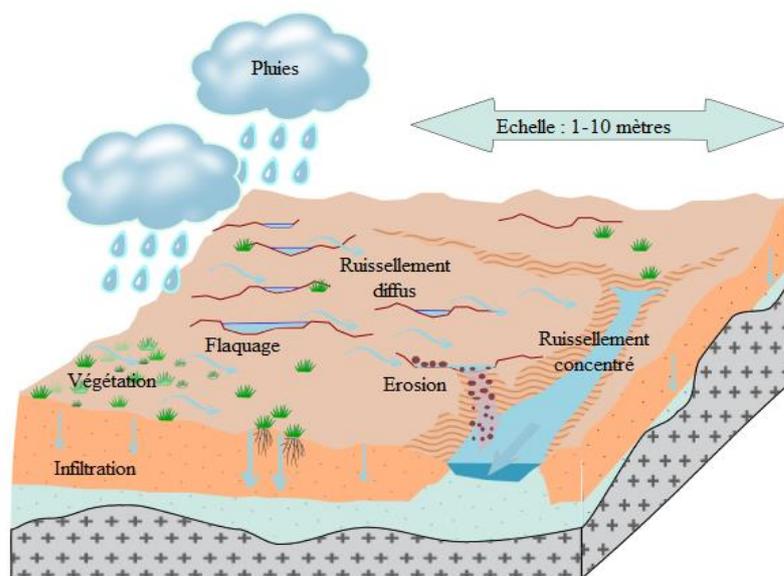


Figure 5 : Schéma de la genèse du ruissellement à l'échelle parcelle

Le ruissellement peut être défini de façon plus générale comme la fraction d'eau pluviale qui ne pouvant s'infiltrer (ou s'évaporer) va ruisseler le long des versant par effet gravitaire, se concentrer de plus en plus vers l'aval jusqu'à la conjoncture avec le réseau hydrographique existant. Le fait qu'une fraction d'eau issue des précipitations va ruisseler ou non est fonction de paramètres géo-physico-pédo-morphologiques qui vont faciliter ou au contraire diminuer la propension d'un sol à ruisseler (Dehotin *et al.*, 2011). Du point de vue de la dynamique des écoulements, on peut observer des distinctions notables concernant le ruissellement.

Ainsi on peut mettre en évidence **une division du ruissellement selon trois zones ayant des dynamiques hydrauliques différentes** :

- **Les zones de production du ruissellement (Figure 6)** : Lors d'un événement pluvieux, ces zones vont, du fait de leurs nature physico-géo-pédo-morphologique, limiter la lame d'eau infiltrée et favoriser une dynamique d'écoulement gravitaire en surface. Au début de l'épisode météorologique, les aspérités du sol vont retenir une fine lame d'eau. C'est ce que l'on appelle le flaquage (figure 5). Si l'événement pluvieux s'intensifie ou se maintient dans la durée, la lame d'eau retenue par les aspérités du sol va s'écouler vers l'aval par débordement. La lame d'eau va, par effet gravitaire, se déplacer d'amont en aval de manière diffuse et à de faibles vitesses.
- **Les zones de transfert du ruissellement (Figure 6)** : Lorsque les zones de production s'actionnent suite à un événement pluvieux, la lame d'eau produite va s'écouler vers l'aval de façon diffuse et désordonnée. Lors de son écoulement, cette lame d'eau va rencontrer et agglomérer d'autres lames d'eau. Suite à cela la dynamique d'écoulement devient plus linéaire, avec une vitesse de transfert et une hauteur de lame d'eau croissante avec l'aire amont drainée. Le ruissellement est alors concentré dans les points bas (thalwegs secs, fossés...) où il va prendre la direction de la plus grande pente qu'elle soit naturelle ou artificielle (figure 5). La dimension des axes de transfert varie en fonction de la distance entre les zones drainées (zones de production) et les zones où le ruissellement sera collecté (zones d'accumulations) ou restitué au cours d'eau.
- **Les zones d'accumulation du ruissellement (Figure 6)** : Les zones d'accumulations vont collectées les eaux issus du ruissellement si celles-ci n'ont pas été restituées au cours d'eau. Ces zones ont une dynamique de stockage des lames d'eau ruisselées. Encaissées, ou situées dans des dépressions naturelles ou artificielles (bassins de rétention) les zones d'accumulation du ruissellement sont caractérisées par de faibles vitesses d'écoulement et d'importantes lames d'eau.

Les zones de transfert et d'accumulation du ruissellement sont facilement identifiables par une expertise sur le terrain que ce soit pendant l'épisode pluvieux ou *a posteriori* : stigmates d'érosion (créations de ravines, déplacements de matières solides...), arrachage de végétation pour les zones de transfert ou sols détremés, encore inondés, dépôts de sédiments fins pour les zones d'accumulations.

En revanche il est beaucoup plus complexe de pouvoir identifier les zones de production du ruissellement. En effet, celles-ci cessent de fonctionner lors de l'arrêt des précipitations et la lame d'eau produite est évacuée rapidement sans laisser de traces « réelles » à petite ou à grande échelle. Il se pose donc une vraie problématique de mise en

évidence de ces zones à forts enjeux (Figure 6). En effet, ces zones productrices de ruissellement ont un grand intérêt dans le cadre de la gestion d'un bassin versant par les autorités compétentes puisque c'est sur ces zones qu'une action, visant à réduire le ruissellement et ses conséquences en aval, peut être effectuée.

On remarquera aussi que des écoulements de surface peuvent s'infiltrer en cours de chemin, à l'occasion de passages sur des zones plus perméables ou plus plates, et que au contraire des écoulements de subsurface peuvent alimenter des petites sources temporaires créées par des ruptures de pente et/ou des remontées du substratum imperméable.

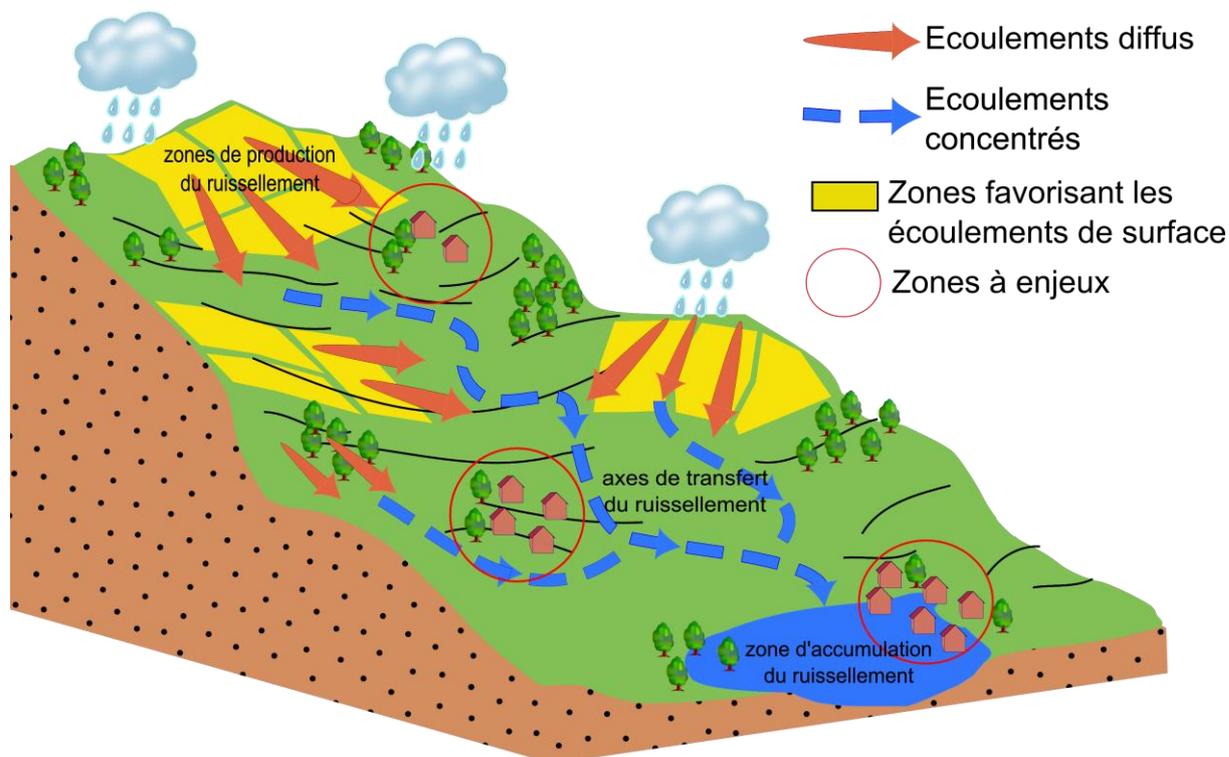


Figure 6 : Illustration des zones de production, de transfert et d'accumulation du ruissellement à l'échelle d'un bassin versant.

2.1.2 Le phénomène d'inondation par ruissellement

Une inondation est définie comme une submersion, plus ou moins rapide, d'une zone habituellement hors d'eau. L'inondation et le risque qu'elle peut engendrer est la conséquence de deux choses, l'aléa et la vulnérabilité :

- De l'eau, qui s'écoule d'amont en aval, intégrée naturellement dans le cycle de l'eau (aléa, le phénomène physique).
- De l'action de l'homme qui d'une part construit dans les « chemins de l'eau » (implantation d'activités anthropiques dans le bassin versant, donc création de vulnérabilité), et d'autre part imperméabilise le milieu et provoque du ruissellement (modification des processus donc de l'aléa).

Ainsi, dans le cadre du suivi des inondations sur le territoire français, une typologie des différents types d'inondation a vu le jour. Cette typologie, développée par le Ministère de

l'Écologie et du développement durable en 2006 distingue cinq catégories d'inondation (MEDD/DPPR 2006) :

- **par une crue** (débordement de cours d'eau)
- **par ruissellement et coulée de boue**
- **par lave torrentielle** (torrent et talweg)
- **par remontées de nappes naturelles**
- **par submersion marine**

Le projet IRIP s'inscrit dans le cadre de l'étude de l'inondation par ruissellement (Figure 7). Une inondation par ruissellement pluvial intense est provoquée par les seules précipitations sur le bassin versant collecteur. **Elle est définie comme « un phénomène localisé dans l'espace et le temps, consécutif à des précipitations violentes sur des unités hydrographiques de faible taille (quelques dizaines de km²) comportant un système de drainage plus ou moins apparent, au fonctionnement occasionnel, voire des ruisseaux de faible importance, intégrés ou non dans le système d'assainissement du secteur. De tels phénomènes peuvent conduire à des dégâts très lourds dans les zones urbanisées »** (d'après « ruissellement pluvial urbain. Guide de prévention, évaluation du risque, élément de méthodologie », Ministère de l'environnement. p 1. Edition Documentation Française. mai 1994)



Figure 7 : Illustration de phénomène d'inondation par ruissellement concentré en amont (A) et en aval (B) et (C) du bassin versant – Photographie Hors secteur d'étude

Là encore, on peut opérer une distinction vis-à-vis de la perception du ruissellement (la première distinction se faisant par comparaison des dynamiques d'écoulement observées citée précédemment en 2.1.1) mais cette fois en analysant les aléas liés au ruissellement. **Cette distinction est donc basée sur les possibles dommages causés par le ruissellement sur des zones anthropisées.** En revanche, elle ne prend pas en compte le ruissellement dans les versants totalement naturels ou du moins non peuplés. La distinction par aléa ruissellement est fonction de la nature du domaine touché :

- **Aléa ruissellement situé sur la parcelle** : cet aléa est faiblement dommageable puisque très localisé. Les mécanismes rencontrés sont de l'érosion et du transport de matière solides. Le mécanisme de ruissellement érosif est très variable spatialement en fonction de la nature du sol, de son travail, de la pente... Cet aléa parcellaire concerne essentiellement les agriculteurs et les propriétaires terriens.
- **Aléa ruissellement en sortie de parcelle** : l'aléa ruissellement en sortie de parcelle est dommageable à l'échelle communale. Le transport de matière solide (colmatages des réseaux d'assainissement...), l'érosion (effondrements d'accotements..) et le risque de contamination par transport de polluant (produits phytosanitaires...) sont les principaux facteurs liés au ruissellement.
- **Aléa ruissellement sur les axes routiers** : le ruissellement (notamment les zones de transfert et d'accumulations) peut être une source de dommage importante à l'échelle d'une commune ou d'un ensemble de communes. Il s'agit généralement de coulées boueuses (donc du transport de matière solide) qui sont dommageables à cette échelle. Néanmoins, lors d'un évènement pluvieux, cet aléa représente un risque important sur les réseaux routier puis qu'il peut empêcher le transit de marchandise ou de secours et isoler certaines zones à enjeux humains et matériels importantes.
- **Aléa ruissellement comme contribution au débordement de cours d'eau** : le ruissellement peut enfin être considéré, dans le cadre d'une gestion intégrée des bassins versants, comme un flux d'inondation latéral alimentant les cours d'eau de façon concentrée ou diffuse provoquant une montée des eaux rapide. Le ruissellement joue donc aussi un rôle non négligeable dans le cas des crues rapides (flash floods). Cet aléa contributif du ruissellement est très dommageable même si les enjeux sont faibles. En effet, les dégâts causés sont important même dans les zones isolées (routes coupées, transformateurs électriques endommagés, maisons inondées...).

Cette définition des inondations par ruissellement et ses différentes composantes sont en pratique beaucoup plus complexe à délimiter. En effet, en cas d'occurrence simultanée d'un débordement de cours d'eau et de ruissellements, **il est souvent difficile de déterminer après l'évènement ce qui est dû à du débordement de cours d'eau de ce qui est dû au ruissellement.** La déclaration CatNat ne retient d'ailleurs qu'une cause. En ne citant pas le ruissellement, la Directive Inondation ne contribue pas à clarifier la situation, par contre la circulaire française introduit bien cette notion, en la distinguant du débordement de cours d'eau. L'ambigüité résiduelle concernera la définition du cours d'eau : les écoulements concentrés en tête de bassin, dans les fossés ou en thalwegs secs naturels, sont-ils du ruissellement ou des « crues éclairs » ?...

2.1.3 La cartographie de l'aléa ruissellement

Comme défini précédemment, l'aléa ruissellement peut représenter un risque majeur en fonction des enjeux concernés. Il y a donc, de par la nature du phénomène, un réel besoin de compréhension et d'action pour une gestion intégrée des bassins versants concernés.

Par souci de compréhension, de diffusion et d'information, **l'outil principalement utilisé pour la mise en évidence des aléas naturels et des enjeux vulnérables est la cartographie.**

La cartographie de l'aléa et des enjeux, souvent appelée « cartographie du risque » (source : prim.net) va permettre la caractérisation, mais aussi la localisation des phénomènes naturels, nécessaires à la protection des infrastructures et des populations qui en dépendent. Avant de pouvoir construire une carte, il est important de garder en tête les objectifs de celle-ci. La problématique entrouverte ici est alors de se demander pourquoi la création d'une carte d'aléa est nécessaire ? Il existe une grande variabilité de réponses plus ou moins liées entre elles par leurs objectifs, mais quatre principales peuvent être mises en avant :

- **Pour porter une information à connaissance** : la carte a donc un but pédagogique (informations sur la connaissance du territoire) et de diffusion du savoir. C'est pourquoi l'information transcrite par la carte se doit de rester claire, précise, et facilement identifiable par un large public.
- **Pour répondre à un objectif réglementaire** : la carte peut découler de la portée d'une loi. Ainsi son objectif se devra d'être le plus précis possible (ex : carte cadastrale) et compréhensible par tous.
- **Pour mettre en évidence un diagnostic** : la cartographie s'intègre alors dans un projet. Ce type de carte a une importance capitale pour la gestion de la vulnérabilité, puisqu'elle va permettre la corrélation des aléas et des enjeux. Ce type de carte est notamment utilisé par les services de secours publics lors des campagnes d'évacuations ou en période de crise.
- **Pour permettre une gestion économique du milieu** : la carte a ici un objectif pécuniaire. Elle permettra par exemple la réalisation de diagnostics de risques financiers nécessaire à l'installation et au développement des zones anthropiques (ex : concernant les assurances ou d'investissement à long termes).

L'objectif d'une carte n'est pas la seule contrainte à la réalisation de celle-ci. En effet, par définition, une carte géographique est une représentation. Elle s'inscrit dans une démarche de communication et par conséquent, **les conventions graphiques utilisées doivent être adaptées au lectorat ciblé et ne sont pas universelles.**

La cartographie de l'aléa ruissellement intense pluvial par la méthode IRIP n'échappe pas à ces objectifs. Celle-ci a pour objectif principal de porter à connaissance les zones géographiques pouvant présenter du ruissellement, contrairement aux cartes établies pour les EPRI et dans les TRI, ce ne sont pas des enveloppes de zones susceptibles d'être submergées. Ainsi **la méthode veut permettre l'identification de l'aléa (mais aussi indirectement des enjeux) et cela quel que soit l'échelle d'utilisation (Figure 8).**

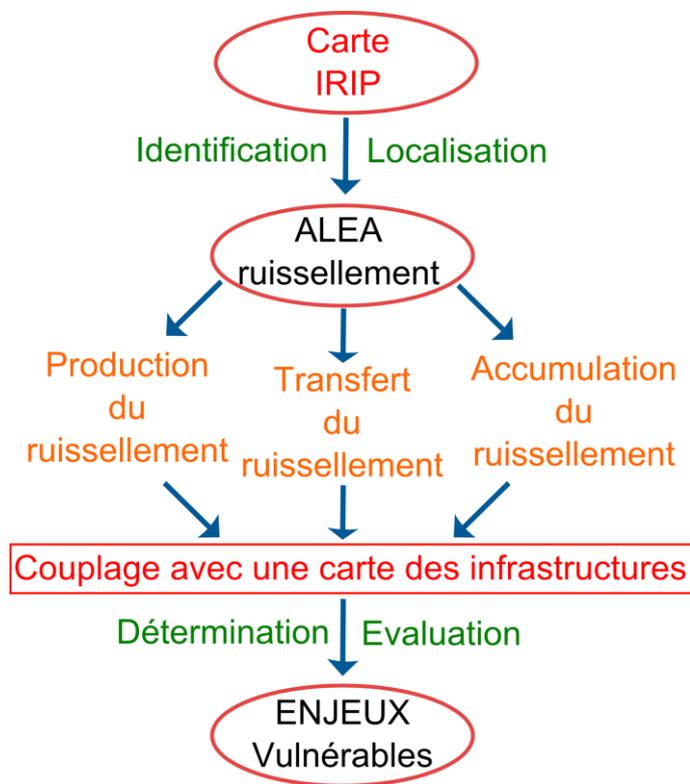


Figure 8 : Représentation des objectifs de la cartographie de la méthode IRIP

A l'heure actuelle, cette cartographie ne peut servir ni de diagnostic, ni d'aide à la gestion économique. En effet, l'objectif d'IRIP n'a pas, pour le moment, vocation à être utilisé comme outil de gestion à la sécurité civile ou outil de diagnostic de risque financier.

Il est aussi important de conserver un esprit critique à l'égard des cartes produites. En effet, une zone qui n'aurait pas été identifiées comme « ruisselante » ne signifie pas l'absence de ce phénomène. Il peut arriver que les bassins versants concernés n'aient jamais subi d'inondations par ruissellement connues, même modérées, et qu'ils soient subitement affectés par une inondation par ruissellement exceptionnelle. Cette perspective accroît la vulnérabilité des habitants exposés, puisqu'ils n'ont pas conscience de l'existence du phénomène sur une localisation donnée (Problématique d'aléa de référence décrite plus précisément en fin de ce travail et par Cadet *et al.*, 2010).

La cartographie par la méthode IRIP ne répond pas directement, dans sa forme actuelle, au cadre de la Directive Inondation, pour laquelle l'étude de l'aléa dans les T.R.I. (Territoire à Risques Important d'inondation) se fait pour des périodes de retour. IRIP ne propose pas d'associer une période de retour aux zones cartographiées. (Circulaire du 16 juillet 2012 relative à la mise en œuvre de la phase « cartographie » de la directive européenne relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation). Par contre, les résultats sous leur forme présente peuvent satisfaire les besoins d'un PPRI, pour lesquels l'identification de l'aléa ruissellement semble facultative.

A l'échelle européenne, le besoin de cartographier le ruissellement dans le cadre la Directive Inondation est encore rarement évoqué. D'après les informations collectées et analysées en 2012 (Poulard *et al.*, 2012), certains pays ont commencé l'évaluation et la cartographie du ruissellement, voire même ont déjà publié des cartes concernant l'ensemble d'une région :

- Pour l'Allemagne, le document méthodologique du LAWA sur les cartographies de l'aléa inondation (LAWA 2010) évoque la nécessité de cartographier les inondations par ruissellement, mais ne les traite pas.
- En revanche, les autorités du Royaume Uni se sont attaquées au problème de la cartographie des inondations par ruissellement dès 2009. L'Environment Agency (EA) a réalisé une première cartographie du ruissellement pour l'Angleterre et le Pays de Galles (EA 2010)¹ et (EA 2010)². Une cartographie nationale du ruissellement a été réalisée sur l'ensemble du territoire anglais et gallois. Ces cartes résultent d'un calcul pluie-débit sur l'ensemble du territoire, avec des hypothèses supposées homogènes et pertinentes pour tout le territoire.
- Un autre exemple du traitement cartographique du ruissellement est celui de la Belgique en région Wallonne. Dans le cadre du projet ERRUISOL (éROsion-RUISsellement-SOL), une cartographie du territoire wallon a été entreprise. La cartographie de la production de ruissellement se base ici sur une méthode de type Socose (Demarcin *et al.*, 2009)

Il existe donc **une grande variabilité dans l'analyse et la réalisation des cartes** par les autorités des différents pays européens. Cette grande variabilité de méthode résulte d'une part de l'absence de définition consensus précises sur le ruissellement ainsi que de la pluralité de ses conséquences et d'autre part d'un problème de méthodologie (puisque'il existe différentes manières d'aborder le problème : de manière hydraulique, hydrologique ou géomatique...).

Il est toutefois important de noter que **la méthode choisie, par les différents états membres, pour traiter la problématique du ruissellement dépend des données disponibles, de l'objectif (y compris pour l'échelle d'utilisation) mais aussi des moyens financiers mis à disposition pour la réalisation des études (temps de réalisation et outils disponibles).**

En France, bien qu'il existe quelques outils pour la cartographie du ruissellement, il n'existe pas de méthodologie cartographique permettant une intercomparaison des cartes de ruissellement (Jaillet *et al.*, 2012). C'est donc dans le but de rattraper le retard avec nos voisins européens dans le domaine de la cartographie du ruissellement, mais aussi pour avoir une méthode consensuelle applicable à l'ensemble du territoire français que la méthode IRIP a été implémentée.

En résumé :

- **Le ruissellement est un phénomène physique possédant une définition ambiguë selon le domaine d'application.**
- **La méthode IRIP distingue trois types de zones ruisselantes : productrices, de transfert et accumulatrices.**
- **A l'échelle européenne, la cartographie de l'aléa ruissellement est aussi une préoccupation d'actualité. Il existe une grande variabilité de méthodes cartographiques de cet aléa expliqué par l'absence d'une méthode consensuelle.**

2.2 Le choix de l'outil IRIP

2.2.1 L'utilisation d'un outil pour la cartographie du ruissellement

Les forçages principaux à l'utilisation d'un outil pour la cartographie du ruissellement sont la qualité des informations d'entrée et de sortie. Ce sont ces données d'entrées et de sortie (objectifs) qui vont permettre le choix de l'outil.

Il est possible de distinguer deux principaux types d'outils permettant la caractérisation du ruissellement (Regazzoni *et al.*, 2010). **Les indicateurs** qui permettent une analyse qualitative de la relation pluie-débit sur des unités hydrologiques supposées homogènes à petites ou grandes échelles. Et **Les modèles** qui travaillent à l'échelle d'un bassin versant pour produire une estimation quantitative de la relation pluie-débit.

Un indicateur se définit comme « une variable qui fournit des informations sur d'autres variables qui sont difficiles à acquérir ou à mesurer (...) et peut être utilisé comme référence pour prendre une décision » (Gras *et al.*, 1989). Un indicateur a pour donc but la compréhension d'un système complexe dans l'optique d'une gestion efficace et une atteinte des objectifs fixés (Mitchell *et al.*, 1995). D'après l'étude du choix d'un outil pour l'évaluation du ruissellement (Devillers *et al.*, 2005), on peut distinguer 3 types d'indicateurs en fonction de leur mode d'agrégation des variables pour l'évaluation du ruissellement :

- **Les indicateurs de type mécaniste** : Ces indicateurs **agrègent les variables quantitatives choisies en intégrant directement leurs valeurs dans le calcul de l'indicateur**. Il n'y a donc pas de classification des variables, et les résultats sont facilement comparable aux variables observées (ex : volume ruisselés, coefficient de ruissellement...).
- **Les indicateurs à notation** : A l'inverse, ces indicateurs **vont transformer les valeurs des variables choisies en scores** avant de les intégrer au calcul de l'indicateur. Une note est alors attribuée pour chaque classe de variable dont les limites sont définies par l'utilisateur. Ce type d'indicateur est facilement compréhensible et modulable, mais reste fragile quant à la détermination des seuils utilisés pour la création des classes, même si certaines approches arrivent à pallier ce défaut (Van Der Werf *et al.*, 1998).
- **Les indicateurs hybrides** : ces indicateurs combinent les deux types d'agrégations définies précédemment. On peut les diviser en deux groupes. Le premier intègre des notes à partir de la transformation de certaines variables et le second transforme les résultats obtenus en notes. Ce type d'indicateur conserve les limites d'utilisation liées à la création des classes tout comme les indicateurs de notation.

Dans la bibliographie scientifique, il existe un grand nombre d'indicateurs exprimant l'aptitude d'une zone d'étude au ruissellement. Les plus utilisés sont les indices SUGAR (Footprint, 2008), IDPR (Mardhel *et al.*, 2005), la méthode CORPEN (CORPEN, 2001), les méthodes par télédétection (Esteves *et al.*, 1999) et la méthode de cartographie du BRGM (Jauffret *et al.*, 2001) dont les principales caractéristiques sont répertoriées dans le tableau en Annexe 1.

Dans le domaine du ruissellement, les indicateurs sont utilisés lors d'études qualitatives et non quantitatives. En effet, par définition, le ruissellement est un phénomène difficilement

chiffable en termes de volume et de débit. C'est pourquoi **les résultats obtenus sont retranscrits sous forme de notes ou de cartes de sensibilité d'aptitude au ruissellement**, comme c'est le cas pour la méthode IRIP (Dehotin *et al.*, 2011). Ces outils offrent l'avantage d'avoir une vision d'ensemble du phénomène et les données nécessaires à ces indicateurs sont disponibles à petite comme à grande échelle. Seule la qualité des données pourra être un frein à la pertinence de l'indicateur.

2.2.2 L'indicateur du ruissellement intense pluvial IRIP

a) Les hypothèses posées par la méthode IRIP

L'outil géomatique **IRIP (Indicateur du Ruissellement Intense Pluvial)** est un indicateur cartographique de l'aléa ruissellement développée par Dehotin et Breil (2011) au sein d'IRSTEA-Lyon. Cet indicateur repose sur l'analyse spatiale de facteurs favorisant le ruissellement. Il s'agit donc d'une **méthode purement géomatique**, basée sur les données physique de la zone étudiée. L'indicateur IRIP peut se définir par :

- **Sa nature d'indicateur :** Afin de faciliter l'approche cartographique, la méthode IRIP repose sur l'analyse spatiale de facteurs favorisant ou non le ruissellement. Il s'agit donc **d'une méthode géomatique de type SCORE (Indicateur à notation)**. Comme vu précédemment, cette méthode score se base sur des paramètres physiques (pente, occupation du sol, type de sol...) qui vont, en fonction ou non de leur impact sur le ruissellement (production, transfert ou accumulation du ruissellement) avoir un poids cartographique positif (facteur favorisant) ou nul (facteur non favorisant). Ainsi, on aura par principe un score élevé lorsqu'il y aura beaucoup de facteurs favorisant le ruissellement, soit un aléa plus fort sur ces zones.
- **Son objectif en terme cartographique :** La méthode IRIP a pour objectif la production de carte d'aptitude au ruissellement. Les cartes produites ne traitant d'aucune façon les données pluviométriques ou débitométriques, vont produire des cartes **totalemt indépendantes de l'intensité, et donc de la période de retour d'un évènement climatique**. En effet, IRIP a pour seul but la mise en évidence de la « nature » ruisselante ou non d'une zone étudiée en fonction de ses caractéristiques physiques intrinsèques.
- **La nature des données qu'IRIP utilise pour la production de carte :** Par volonté de simplification d'utilisation mais aussi pour permettre l'étude du ruissellement dans son ensemble, le choix de ne pas intégrer de données pluviométrique a été fait. Cette absence de donnée météorologique, pour permettre de concentrer l'indicateur sur les facteurs géo-morpho-pédologiques, permet de **classifier IRIP dans les méthodes dites « sèches » ou « dry methods »**, par opposition aux méthodes pluie-débit.
- **La distinction opérée concernant le ruissellement (Figure 9) :** La particularité d'IRIP est l'intégration d'une distinction du ruissellement. En effet, IRIP va produire des cartes pour l'aptitude à produire, transférer ou accumuler le ruissellement. **La méthode IRIP intègre donc la distinction de la dynamique hydrologique et hydraulique à sa cartographie**. C'est cette spécificité qui fait qu'IRIP est unique dans le domaine des indicateurs de cartographie du ruissellement.

- La robustesse de la méthode :** L'objectif de la méthode IRIP est son application sur de petits comme de grands territoires. La robustesse de la méthode va donc se baser sur la qualité des données d'entrée. Une comparaison entre les résultats d'une analyse avec des données fines et ceux de l'analyse avec les données grossières correspondantes a été réalisé (Dehotin *et al.*, 2011). Seule la précision des données MNT ont été utilisées (données lidar, à 25m et 50m sur le bassin versant du Mercier, Annexe 2), puisque ce sont ces données qui vont définir la taille des mailles pour les cartes produites. **La méthode reste robuste pour l'identification des zones de production puisque l'on conserve toujours les zones principales de production quel que soit la précision des données d'entrées. En revanche, l'identification des zones de transfert et d'accumulation ont besoins d'informations plus précises** puisque les données grossières semblent surestimer l'emprise des zones sensibles à ces deux phénomènes (Annexe 2).

La méthode IRIP définit donc la sensibilité au ruissellement d'un territoire de taille donnée et permet en outre de diviser l'approche de l'aléa ruissellement en trois phases (production, transfert, accumulation) en fonction de la distinction des zones ayant une dynamique hydraulique différente (figure 9).

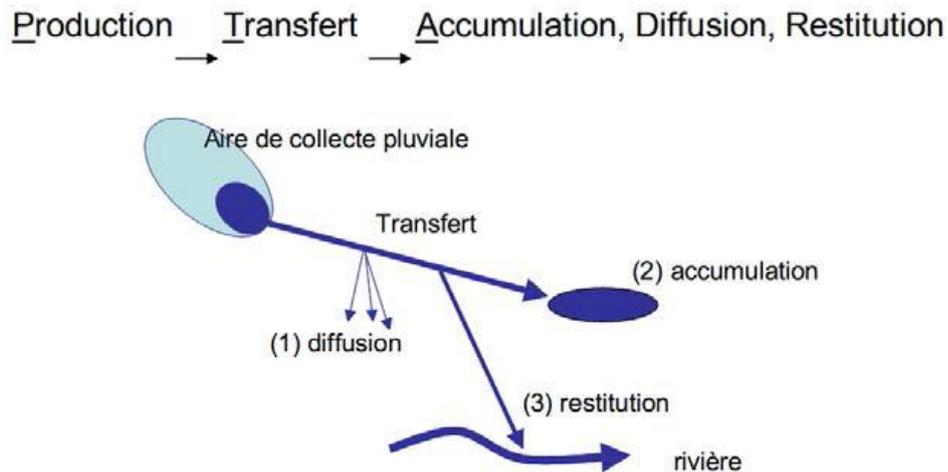


Figure 9 : Division de l'étude du ruissellement pour l'outil IRIP (Dehotin et Breil, 2011)

b) Les données nécessaires à la méthode IRIP

Un avantage à l'utilisation de l'indicateur de notation IRIP est le fait que pour ces trois phases de l'aléa ruissellement, **les données en entrées sont toujours les mêmes**. Seul le calcul cartographique au sein du module interne d'IRIP va varier en fonction de la carte que l'on veut produire. Pour pouvoir exécuter IRIP, celui-ci a besoin :

- De données topographiques.**

Ces données sont issues d'un modèle numérique de terrain (MNT). La topographie est un facteur important de la genèse et de l'accumulation du ruissellement (Fox *et al.*, 1997 ; Le Bissonnais *et al.*, 1998). En effet, ces études ont montrées son rôle dans l'accentuation des vitesses de surfaces et donc à la propension à produire et transférer le ruissellement dans les zones à fortes. **Ainsi les zones présentant des pentes fortes vont générer de**

la production et du transfert et à l'inverse les zones de faibles pentes (comme des dépressions locales) ou de ruptures de pentes (passage de pente fortes à pentes faibles) vont à l'inverse favoriser l'accumulation du ruissellement. La variable topographique agit donc, en fonction de ses caractéristiques locales aussi bien sur la production que sur le transfert ou l'accumulation du ruissellement.

Au facteur de pente, il est aussi important d'ajouter la forme des aires drainées (indice de compacité de Gravelius). L'indice de compacité va jouer sur la vitesse de réponse des versants. **Plus la forme du versant est ramassé plus le ruissellement va se concentrer rapidement, en opposition aux formes allongées** (Bendjoudi *et al.*, 2002).

La méthode IRIP prend aussi en compte l'utilisation de l'indice topographique (Beven et Kirkby, 1979). Cet indice va permettre l'expression du flux d'eau arrivant en amont et la capacité d'évacuation au pixel de calcul. IL va permettre la production de carte où l'engorgement des sols est le plus probable. **Plus l'indice sera fort et plus le sol se saturera rapidement et donc plus il sera apte à produire, transférer ou accumuler du ruissellement.** Enfin il est parfois admis l'existence d'un rôle des microtopographies sur le ruissellement (Esteves *et al.*, 1989). Mais l'étude de celles-ci via IRIP est difficilement intégrable puisqu'il faudrait disposer de données topographiques de très haute précision, peu utile et trop coûteuse pour l'étude des versants dans leur ensemble.

- **De données sur l'occupation des sols.**

L'occupation du sol joue un rôle important dans la formation mais aussi dans le transfert du ruissellement (pour les axes de transferts suivants les routes ou le réseau d'assainissement). Il est possible de distinguer trois grandes classes d'occupation des sols : les zones urbaines, agricoles et forestières :

Les zones urbaines sont considérées comme facteur favorisant la production de ruissellement de par l'imperméabilisation des sols et donc, une réduction importante de la capacité d'infiltration des eaux de pluies. **Ces zones urbaines seront alors considérées comme facteur aggravant le ruissellement pour l'indicateur IRIP.**

Les parcelles agricoles peuvent favorisées l'aptitude d'un sol à ruisseler (Le Bissonais *et al.*, 1998 ; Le Gouée *et al.*, 2008). Plusieurs paramètres peuvent être pris en compte comme le les pratiques culturales, l'organisation spatiale, la battance des sols (Cerdan *et al.*, 2006), le sens du labour.... Bien que des divergences existent au sein de la communauté scientifique concernant certains de ces facteurs, la méthode IRIP fait le choix de considérer l'occupation des sols par **les parcelles agricoles comme facteurs favorisant le ruissellement.**

Enfin les zones forestière, ou possédant un couvert végétal important, sont considérées comme facteur atténuant le ruissellement. En effet, la végétation va d'une part limiter l'apport d'eau météoritique par interception, et d'autre part faciliter l'absorption et l'infiltration des eaux en augmentant le seuil de saturation ainsi que les chemins d'écoulement d'infiltration de l'eau (porosité racinaire). Le phénomène de génération du ruissellement par saturation du sol est donc atténué par la végétation. La méthode IRIP considérera **les sols forestiers comme facteurs ne favorisant pas la production, le transfert ou l'accumulation du ruissellement.**

- **De données pédogéologiques.**

Les données sur le type de sol et la géologie vont aussi avoir un impact sur le ruissellement. Ces données vont conditionner la fraction infiltrable des eaux pluviales selon le

modèle de Green et Ampt (1911). La pédologie et la lithologie vont avoir une incidence importante sur la production, le transfert mais aussi sur l'accumulation du ruissellement. IRIP ne considère la géologie que lorsque celle-ci affleure. **Les affleurements rocheux sont considérés comme faiblement perméable et donc facteurs favorisant la genèse du ruissellement.** De plus certaines lithologies sont considérées par la littérature comme imperméable (argiles, granite...). Concernant la pédologie, divers caractéristiques des sols vont être des facteurs favorisant ou non le ruissellement :

L'épaisseur des sols, intrinsèquement liée à la capacité de stockage sera un facteur favorisant ou atténuant l'apparition du ruissellement. Plus un sol sera épais, plus le volume d'eau potentiellement stockable sera grand, et cela quel que soit la perméabilité du milieu.

La perméabilité de sols, qui va contrôler l'infiltration de l'eau précipitée et donc favoriser ou non la formation d'une lame d'eau en surface. La perméabilité est très variable dans l'espace, c'est pourquoi il est important de travailler avec des données les plus précises, en termes de résolution spatiale, possibles.

L'érodibilité des sols. Un sol très érodible est considéré comme favorisant les coulées de boues et donc la production du ruissellement (Le Bissonais *et al.*, 1998). Pour les zones riches en limons, il est possible d'utiliser un autre indice qui est celui de **la battance**. La battance est défini comme la formation d'une fine couche imperméable à la surface du sol réduisant la capacité d'infiltration de celui-ci (Cerdan *et al.*, 2006). Le facteur « taux de limons » peut donc possiblement être intégré à IRIP dans le cadre de la cartographie de la production du ruissellement en lieu et place de l'érodibilité.

Enfin, l'humidité du sol qui va établir les conditions initiales. Ce paramètre dépendant de la pluviométrie antérieure n'est pas prise en compte par IRIP qui se veut être un indicateur n'utilisant pas de données pluviométriques (« dry method »).

c) Les cartes produites par la méthode IRIP

La méthode de cartographie du ruissellement IRIP permet la création de trois cartes correspondant aux distinctions effectuées dans la définition du ruissellement (cf. partie 2.1.1) : Une carte d'aptitude à la production du ruissellement, une carte d'aptitude au transfert du ruissellement et une carte d'aptitude à l'accumulation du ruissellement.

- **La carte d'aptitude à la production du ruissellement :**

Au total, cinq facteurs ont été retenus pour cartographier l'aptitude à la production du ruissellement : L'occupation des sols, l'épaisseur des sols, la perméabilité des sols, l'érodibilité (ou la battance) des sols et le relief (Figure 10).

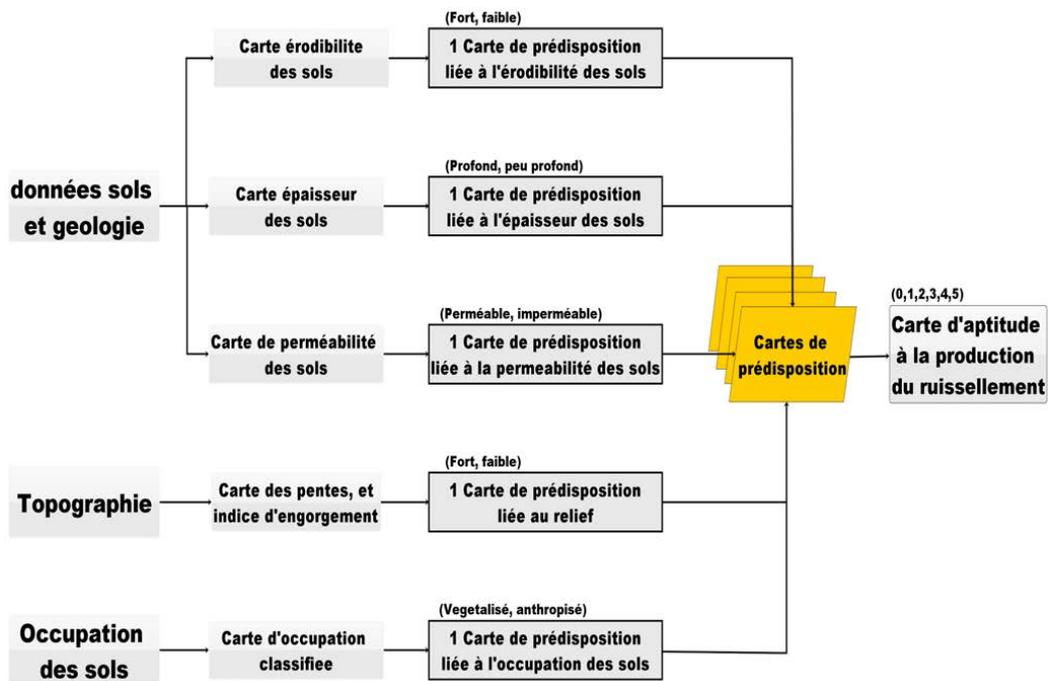


Figure 10 : Mécanisme de cartographie de l'aptitude à la production du ruissellement par IRIP (Dehotin et Breil, 2011)

Le but étant la création d'une carte de sensibilité à la production du ruissellement par combinaison de ces cinq facteurs (figure 11). Les niveaux de sensibilité vont alors correspondre au nombre de facteur favorables rencontré sur chaque pixel. Les pixels ayant une note faible voire nulle, n'interviennent pas ou peu dans la production du ruissellement et inversement, les pixels ayant un score important vont mettre en avant les zones favorisant la formation d'une lame d'eau ruisselante en surface.

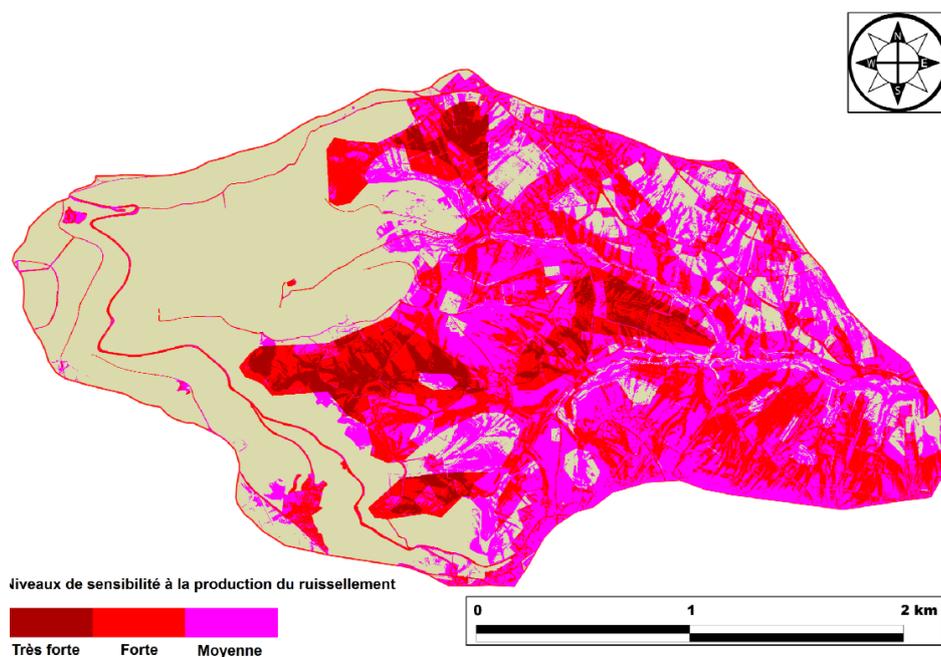


Figure 11 : Exemple de carte d'aptitude à la production du ruissellement produite par IRIP (Dehotin et Breil, 2011)

- **La carte d'aptitude au transfert du ruissellement :**

Concernant la carte d'aptitude au transfert du ruissellement, cinq facteurs sont retenus permettant la création d'une carte à cinq niveaux de sensibilité en fonction : de la carte de production, des aires amont drainées, de la topographie (ruptures de pentes et pentes), et des axes de transfert existants (Figure 12).

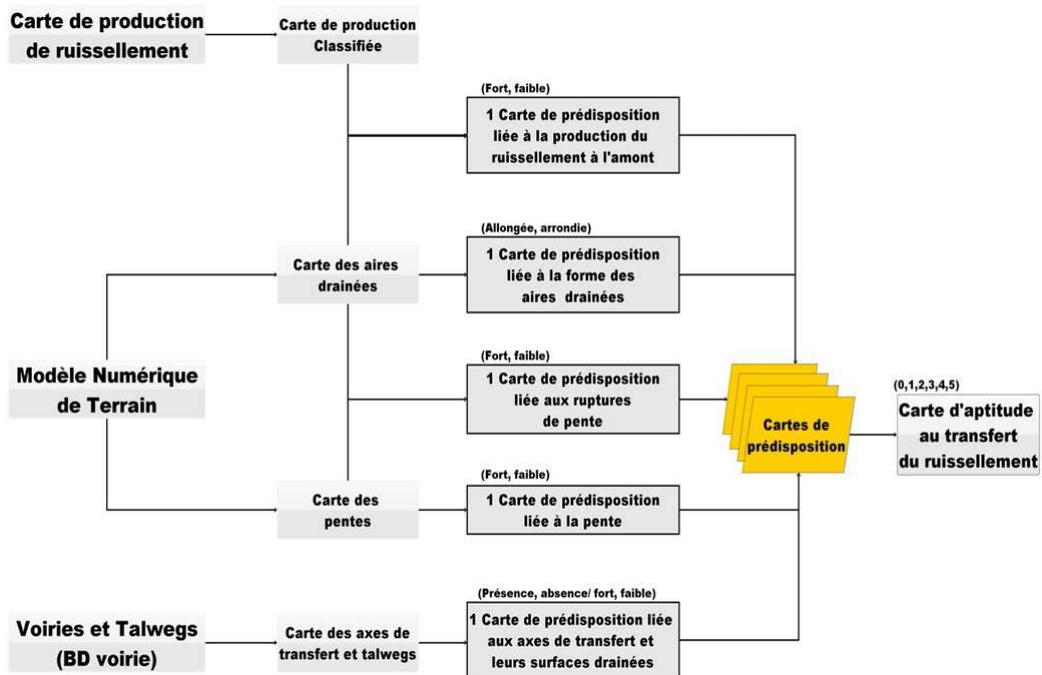


Figure 12 : Mécanisme de cartographie de l'aptitude au transfert du ruissellement par IRIP (Dehotin et Breil, 2011)

Le but étant la création d'une carte de sensibilité au transfert du ruissellement par combinaison de ces cinq facteurs (figure 13). Tout comme la carte d'aptitude à la production du ruissellement, les niveaux de sensibilité vont correspondre au nombre de facteur favorables rencontré sur chaque pixel. Les pixels ayant une note faible voire nulle, n'interviennent pas ou peu dans le transfert du ruissellement et inversement, les pixels ayant un score important pour les zones ayant une forte aptitude à jouer ce rôle.

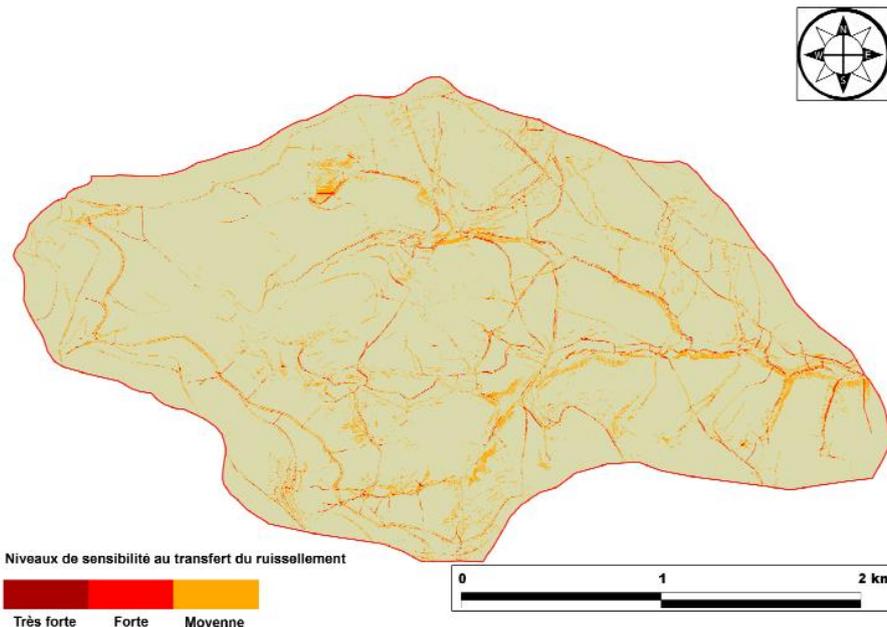


Figure 13 : Exemple de carte d'aptitude au transfert du ruissellement produite par IRIP (Dehotin et Breil, 2011)

- **La carte d'aptitude à l'accumulation du ruissellement :**

Enfin, la dernière carte produite est celle de l'aptitude à l'accumulation du ruissellement. Comme les deux cartes précédentes, celle-ci résulte de la combinaison de cinq facteurs donnant lieu à la création d'une carte de sensibilité à cinq niveaux en fonction : de la carte de production, des aires amont drainées, de la topographie (ruptures de pentes et pentes) et de l'indice topographique (figure 14).

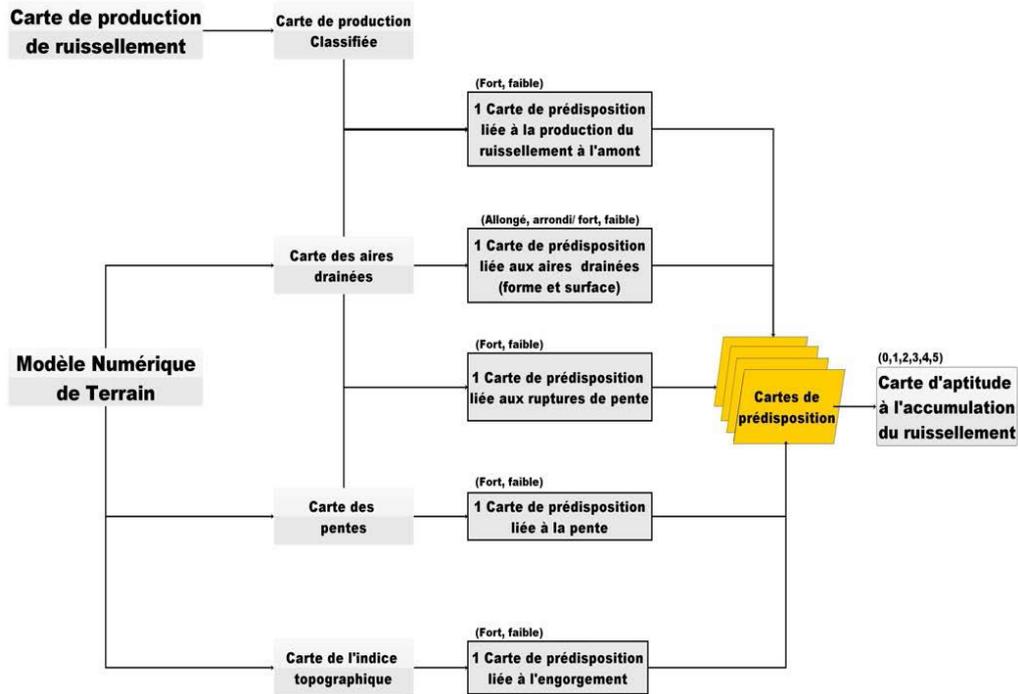


Figure 14 : Exemple de carte d'aptitude à l'accumulation du ruissellement produite par IRIP (Dehotin et Breil, 2011)

Le but étant la création d'une carte de sensibilité à l'accumulation du ruissellement par combinaison de ces cinq facteurs (figure 15). Tout comme la carte d'aptitude à la production et de transfert du ruissellement, les niveaux de sensibilité vont correspondre au nombre de facteur favorables rencontré sur chaque pixel. Les pixels ayant une note faible ne sont pas propices à une accumulation d'eau, alors que les pixels ayant une note de cinq ou proche montre un fort potentiel à accumuler l'eau issue du ruissellement.

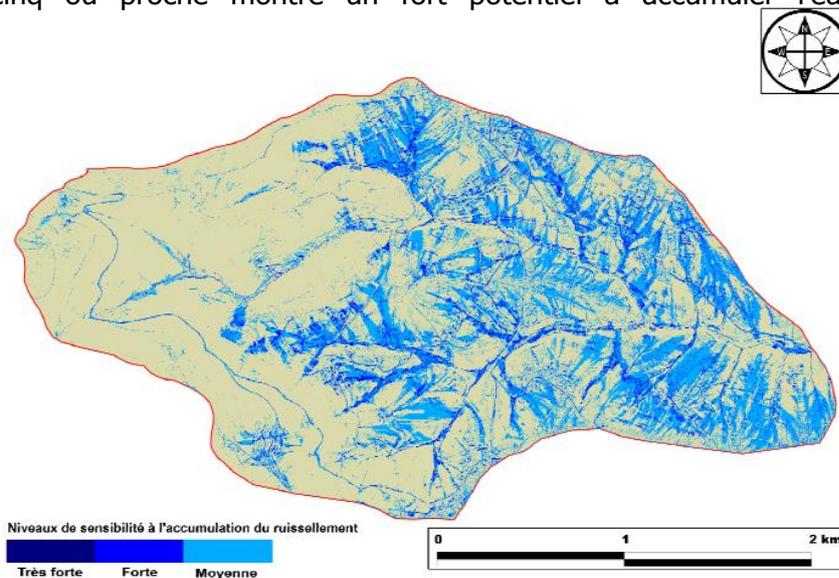


Figure 15 : Exemple de carte d'aptitude à l'accumulation du ruissellement produite par IRIP (Dehotin et Breil, 2011)

Si l'on compare avec une carte d'aléa issue d'une modélisation pluie-débit, on note que les cartes IRIP ont une ambition moins grande pour représenter les zones inondées, mais en revanche elles sont plus précises quant au phénomène : en effet, pour évaluer les conséquences, il peut être très utile de distinguer les zones de transfert, où l'on peut s'attendre à des vitesses fortes, des zones d'accumulation.

En résumé :

- **La méthode IRIP est un indicateur géomatique de type SCORE retranscrivant sous forme de notes (de 0 à 5) la sensibilité au ruissellement.**
- **Par définition, la méthode IRIP est une méthode robuste puisqu'elle s'applique sur de petits comme sur de grands territoires en fonction des données d'entrée.**
- **L'indicateur de ruissellement IRIP se calcule à partir de données topographiques, d'occupation des sols et pédogéologiques.**
- **La méthode IRIP prévoit la création de trois cartes : carte de production, de transfert et d'accumulation du ruissellement. Ces cartes sont liées entre elles puisque par définition, les cartes d'accumulation vont dépendre des zones de productions amont et des axes de transfert acheminant l'eau ruisselée des zones de production aux zones d'accumulation du ruissellement.**

2.3 Méthode de validation des cartes IRIP

L'outil de cartographie du ruissellement IRIP est encore à l'état de projet de recherche. **Afin de pouvoir le diffuser, il faut prouver la fiabilité des résultats obtenus par celui-ci. L'outil IRIP est déjà utilisé par l'ingénierie de la SNCF (depuis 2013)** et il tend à se développer pour toucher un plus grand nombre de bureaux d'études et d'ingénierie.

La validation de la méthode IRIP suit une démarche Itérative. En effet, afin de biaiser le moins possible les cartes de l'aléa ruissellement, aucune pondération n'est effectuée en première instance. La carte produite est ensuite confrontée aux méthodes de validations décrites ci-dessous afin de pouvoir réajuster les seuils. Cette subjectivité de création des cartes IRIP est alors corrigée par les méthodes de validation afin de coller au mieux aux observations.

A l'heure actuelle, par choix de simplification d'utilisation, mais aussi par absence de paramétrage, **aucun facteur n'a plus de poids qu'un autre.** En effet, la pondération des facteurs favorisant le ruissellement ne dépend que de la nature intrinsèque du bassin versant étudié. Il est donc nécessaire d'effectuer une étude plus approfondie et plus précise pour chaque zone d'étude. Seul un paramétrage avec des faits observés et des données locales pourrait permettre de privilégier un facteur à un autre sur un bassin versant donné.

De plus, et dans un but de confirmation de l'approche IRIP, l'étape consistant à vérifier les zones mises en avant par IRIP (production, accumulation et transfert) est une étape primordiale puisqu'elle va valider ou non la véracité des hypothèses posées par les cartes IRIP.

Deux pistes principales de validation ont été développées :

- D'une part une validation spatiale, basé sur l'identification et la localisation de stigmates ou d'évènement.
- D'autre part et contrairement à une validation d'outils hydrologiques classiques : une analyse chronologique des évènements.

2.3.1 Validation spatiale des zones de production du ruissellement

Les zones de production de ruissellement définie par IRIP sont difficilement mises en évidence avec des observations sur le terrain. En effet, ces zones sont le plus souvent situées en amont de versant sur des zones peu peuplées, correspondant souvent à des parcelles agricoles ou parfois l'accessibilité est difficile (exemple de versants à pentes fortes). De plus les zones de productions sont caractérisées par des écoulements diffus donc difficile à mesurer et à estimer et qui *a posteriori* ne laisse pas de stigmates. **L'unique validation des résultats d'IRIP repose donc sur les habitants ou les utilisateurs locaux pouvant être exposés et/ou impactés par ce ruissellement diffus au moment d'un évènement pluviométrique.**

Trois sources de validation ont pu être mises en évidence lors de cette étude. Chaque source fait intervenir un type d'utilisateur particulier avec qui est parfois difficile d'entrer en contact ou d'obtenir des indications :

- **Des données récoltables soi-même sur le terrain :**

Une première solution peu envisageable mais existante est de vérifier sur le terrain par sois même en se plaçant en aval des zones de production. Cette méthode de validation est à réserver aux bassins n'ayant aucunes autres données de validation citées ci-dessous observables. Outre le fait de se positionner en observateur l'utilisation de sonde d'humidité sur un versant par l'opérateur pourrait mettre en évidence ces zones de production du ruissellement. Outre le coût d'une telle expérimentation, l'utilisation de sondes ne peut se faire que sur de petits versants (Dehotin *et al.*, 2011).

- **Les collectivités locales, élus locaux et gestionnaires de bassin versant :**

Si l'aléa ruissellement a déjà été identifié par expérience des habitants locaux, il se peut que les communes et collectivités locales concernées se soient équipées de protection face à ces zones productrices du ruissellement. En effet, les ouvrages favorisant l'infiltration ou ralentissant l'écoulement de l'eau (bassins de rétentions, retenus collinaires...) sont facilement identifiables sur une carte. **Si l'on observe un de ces ouvrages en aval des zones de production définies par IRIP, il est probable que ces ouvrages aient été construits pour lutter contre le ruissellement local amont des zones de production de celui-ci.** En revanche il peut aussi s'agir de moyens de luttés contre les zones de transfert du ruissellement. C'est pourquoi une validation par ce simple biais n'est pas possible. Cette solution peut seulement conforter ou non les autres méthodes de validation.

- **Les agriculteurs et exploitants locaux :**

Cette autre source de validation est sans doute la plus fiable dans la caractérisation des zones de production. En effet, les agriculteurs connaissent les problèmes liés à l'érosion sur leurs parcelles agricoles. Il s'agit donc d'un public informé par la problématique du ruissellement mais très épars et difficilement mobilisable pour recueillir leurs informations. **Les zones de production pourraient être validées par les dires des agriculteurs réalisant un travail du sol pour lutter contre l'érosion diffuse (par exemple le labour effectué dans un sens parallèle à la pente, ou les zones d'enherbement pour favoriser l'infiltration).** Il faut nuancer cette dernière source par le fait que seules les zones d'érosion diffuse sont utiles à la validation des zones de production mise en évidence par IRIP. Ainsi les zones dites de transfert du ruissellement, donc les zones les plus érodées (entailles des sols dû à une augmentation de la vitesse et à la concentration des écoulements formant des ravines ou au niveau des thalwegs secs), sont la résultante des zones de transfert et non pas de production du ruissellement.

- **Les bureaux d'études :**

Une dernière source pouvant permettre la validation d'une carte de production du ruissellement issue d'IRIP est **l'utilisation d'études fines des coefficients de ruissellement réalisées par les bureaux d'études.** Un coefficient de ruissellement fort correspond à un sol facilitant le ruissellement suite à un évènement pluvieux. On peut donc faire l'analogie entre zones à fort coefficient de ruissellement et zones de production du ruissellement. L'utilisation de ces coefficient n'est valable que lorsque l'échelle de réalisation de l'étude est fine (parcellaires voir pluri-parcellaires au maximum). Un démarchage auprès des bureaux d'études, ou auprès de leurs clients, est envisageable pour récupérer les résultats obtenus sur un versant ou un bassin versant donné.

L'ensemble des sources de validation spatiale des zones d'accumulation du ruissellement peut être résumé à travers le tableau ci-dessous (Tableau 1) :

Validation spatiale des zones de production du ruissellement				
Acteurs	Types d'acteurs	Nature des données collectables	Qualité des données collectables	Pertinence des données collectables
Personnel	Privés (professionnels ou particuliers)	Témoignage terrain avec ou sans matériel	Données précises mais très locales et subjectives selon l'opérateur	+
Bureaux d'études	Bureaux d'études privés (BRGM) ou publiques (IRSTEA, INRA)	Rapport scientifiques sur les états des sols	Données précises avec une extension spatiale variable	++
Collectivités locales, élus locaux et gestionnaires de bassins versants	Publics (Maires)	BD* infrastructures réalisées (bassins de rétentions)	Extension communale, donnée très précise mais peu abondante	+
Agriculteurs et exploitants locaux	Privés (professionnels ou particuliers)	Connaissances et expertises terrain locales	Extension faible (parcellaire) et donnée subjective (dépend de l'expérience de l'acteur)	++

*BD = Base de Données

Tableau 1 : Récapitulatif des données utilisables et de leur pertinence pour la validation des zones de production du ruissellement

2.3.2 Validation spatiale des zones de transfert du ruissellement

Les zones de transfert du ruissellement au sens d'IRIP correspondent aux zones où va s'écouler de manière plus ou moins concentrée le ruissellement produit en amont sur les zones de production pour le transférer aux zones d'accumulation du ruissellement en aval. **Ces zones sont assez faciles à mettre en évidence par une validation sur le terrain. En effet, le transfert du ruissellement s'effectue uniquement sur une courte période temporelle (semblable à celle de l'évènement pluvieux) mais laisse des traces importantes lors de sa présence.**

Tout comme pour les zones de production du ruissellement, seules les zones importantes de transfert seront facilement identifiables par une analyse naturaliste de terrain. Tout comme pour les zones de production, il est possible, dans un but de récolte de données de validation, de faire appel à différents utilisateurs :

- **Aux services de sécurité civile :**

Cette fois-ci, la partie chronologique des interventions réalisées sur le terrain est moins pertinente. Seul **l'aspect sur les problèmes rencontrés lors des interventions (routes coupées par un écoulement, routes coupées par une entaille érosive, coulées de boues ...)** pourra être pertinent pour mettre en évidence les zones de transfert du ruissellement et ainsi affirmer ou infirmer les résultats de la méthode IRIP.

- **Aux collectivités locales et élus locaux :**

Les collectivités locales sont très au courant des problèmes liés au transfert du ruissellement. En effet, la coupure, la dégradation voire la destruction de la voirie par un axe

d'écoulement (axe de transfert) entraîne des travaux (et donc un budget) pour la protection de ces infrastructures (création de buses, de fossés, mise en place de barrière naturelle...). **Il existe donc une trace des aménagements réalisés en aval de ces zones de transfert.** L'accès à ces informations permettrait une validation des zones de transfert mises en évidence par IRIP.

- **Aux agriculteurs et exploitants locaux :**

Tout comme les collectivités locales, les exploitants locaux sont très sensibles à la problématique du transfert du ruissellement, notamment sur sa conséquence érosive. En effet, les agriculteurs connaissent généralement bien les zones d'évacuation des pertes de terre puisqu'ils tentent d'y remédier pour éviter l'appauvrissement du sol de leurs parcelles. **C'est la présence de stigmates (comme les ravines ou le déplacement des sédiments plus ou moins grossier) présents sur le terrain ou arrivés suite à un évènement qui va valider ces axes de transfert.** Un témoignage pouvant localiser ces stigmates dus au transfert du ruissellement permettrait de comparer les données issues d'IRIP et des données observées. Si ces données concordent alors la pertinence des cartes de transfert produites par IRIP pourra être validée.

- **Aux gestionnaires de bassin versant :**

Les gestionnaires de bassins peuvent aussi être une source de validation grâce aux études techniques qu'ils peuvent mener sur le territoire concerné. Différents types d'études sont menées, à la fois sur le volet qualitatif des eaux de ruissellement (suivi des pollutions, des lixiviatés, etc...), ou des études plus agronomique (étude pour l'aménagement d'infrastructures anti-érosion au niveau des ravines). Les chemins empruntés par le ruissellement vont être mis en évidence dans ces études et donc possiblement valider les résultats de la méthode IRIP.

- **Aux gestionnaires de réseaux linéaires :**

Les gestionnaires de réseaux linéaires sont une source importante d'informations concernant les zones de transfert du ruissellement. En effet, **la plupart des structures linéaires (routes, chenaux, voies ferrées...) coupent les versants parallèlement à la pente. Or le ruissellement s'écoulant gravitairement va couper ces axes et occasionner des dégâts aux infrastructures linéaires recensés par leurs gestionnaires.** Les opérateurs vont donc avoir une base de données qui peut alors être accessible pour la validation spatiale des axes de transfert du ruissellement. Actuellement des pistes de réflexions nous ont menés vers trois principaux gestionnaires de réseaux linéaires : La SNCF (à travers son réseau ferré très développé), Les Directions Départementales des Territoires (DDT, à travers leurs gestions des réseaux routiers et autoroutiers) et Voies Navigables de France (VNF, avec son important parc de canaux sensible au ruissellement).

- **Aux fournisseurs de données complémentaires :**

Ces fournisseurs regroupent notamment les centres de recherches avec les projets en cours. **Ces données concernent surtout des images satellites et radar pouvant permettre la mise en évidence des axes de transfert** lors d'évènement pluvieux.

L'ensemble des sources de validation spatiale des zones de transfert du ruissellement peut être résumé à travers le tableau ci-dessous (Tableau 2) :

Validation spatiale des zones de transfert du ruissellement				
Acteurs	Types d'acteurs	Nature des données collectables	Qualité des données collectables	Pertinence des données collectables
Services de sécurité civile	Publics (SDIS)	BD* routes coupées (ex : Inventaire PICH)	Extension locale à départementale, donnée très précise	+ + +
Collectivités locales et élus locaux	Publics (Maires, responsables de l'urbanisme)	BD* infrastructures réalisées (fossés, bassins)	Extension communale, donnée très précise	+ +
Agriculteurs et exploitants locaux	Privés (professionnels ou particuliers)	Connaissances et expertises terrain locales	Extension faible (parcellaire) et donnée subjective (dépend de l'expérience de l'acteur)	+
Gestionnaires de bassin versant	Publics (Syndicats de rivière, Agences de l'Eau)	Rapport d'études scientifiques (études hydrauliques, hydrologiques, écologiques)	Extension de la donnée variable selon la taille du bassin versant et les zones des études réalisées	+ + +
Gestionnaires de réseaux linéaires	Publics/Semi-publics (DDT, SNCF, VNF) ou Privés (Sociétés d'Autoroutes)	Rapport d'études scientifiques, BD* infrastructures, BD* zones à problèmes, connaissance et expertise locale	Extension locale à Nationale (ex SNCF sur l'ensemble du territoire français), BD* précise à plus générale	+ + + +
Fournisseurs de données complémentaires	chercheurs	Photos satellites, prises de vue aériennes	À l'étude ! Projets Cerema	+ + +

*BD = Base de Données

Tableau 2 : Récapitulatif des données utilisables et de leur pertinence pour la validation des zones de transfert du ruissellement

2.3.3 Validation spatiale des zones d'accumulation du ruissellement

Les zones d'accumulations mises en évidence par la méthode IRIP restent les zones les plus facilement validables par des observations sur le terrain. En effet, les zones d'accumulation du ruissellement correspondent à des zones submergées de façon plus ou moins longues provoquant les plus lourds dommages en terme pécuniaire et de personnes impactées.

Les zones d'accumulation présentent un atout majeur dans le cadre de la validation de la méthode IRIP. En effet, **ces zones sont submergées pendant l'évènement pluvieux (parfois même après cet évènement en fonction du bassin versant), et laissent de nombreuses stigmates de leurs présences post-évènementielle (laisses de crues, zones détrempées, sédimentation importante...).**

De plus ces zones d'accumulation sont très renseignées en termes de fournisseurs de données. Lorsqu'un particulier ou une collectivité est sujette à la formation de zones d'accumulation du ruissellement, beaucoup de témoignages sont récoltables :

- Préventions sur les voies submersibles (panneaux de signalisation),
- Prise de photos pour les assurances ou pour garder une trace dans la mémoire collective,
- Articles de presses locales ou archives communales,
- Localisation des interventions de la sécurité civile en milieu submergé,
- Localisation des actions des gestionnaires de réseaux linéaires (DDT, SNCF, VNF...) qui vont intervenir pour le déblayage (désencombrement des évacuations d'eaux...) et le nettoyage (sédiments sur les chaussées) des voiries et des lieux publics.
- Utilisation de photos satellites et imagerie radar pour la localisation précise de ces zones d'accumulation

Il existe donc différentes méthodes pour permettre de valider les résultats issus de la méthode IRIP à travers l'utilisation d'informations collectées sur le terrain. **Il faut néanmoins nuancer le fait que la validation des différentes zones du ruissellement n'est possible que dans une zone sur laquelle on peut obtenir des témoignages.** En l'absence d'habitants locaux ou de terrains appartenant à des particuliers (parcelles agricoles ou habitations) beaucoup de sources comme la sécurité civile ou les collectivités locales ne seront exploitable car inexistantes.

Il est important de garder à l'esprit qu'il existe une limite spatiale à la validation des cartes produites par IRIP. Cette limite se calque sur le système de l'aléa, des enjeux et des risques. Sans enjeux, la validation d'IRIP via une expertise de terrain n'est pas possible.

Il peut arriver que les enjeux ne soient touchés que par une seule zone IRIP dans un même bassin versant, comme par exemple un bassin versant urbanisé en aval présentant des zones d'accumulation du ruissellement en aval. La validation de ces zones d'accumulation sera possible, en revanche si l'amont du bassin versant est inhabité, seuls les stigmates restants pourront être visibles. Il n'y aura donc une validation possible que sur les zones de transfert et d'accumulation du ruissellement.

L'ensemble des sources de validation spatiale des zones d'accumulation du ruissellement peut être résumé à travers le tableau ci-dessous (Tableau 3) :

Validation spatiale des zones d'accumulation du ruissellement				
Acteurs	Types d'acteurs	Nature des données collectables	Qualité des données collectables	Pertinence des données collectables
Panneaux de signalisations	Elus locaux ou particuliers	BD* panneaux signalisation ou relevés sur le terrain	Extension locale à très locale, forte précision, assez rare	+
Témoins de l'évènement	Particuliers, professionnels (assurances) et agent publics	Données iconographiques localisables (Photos/vidéos témoignages)	Extension locale, informations nombreuses, forte précision locale	+++
Presses locales à nationales, communes	Privés (Journaux locaux) et Publics (archives communales)	Articles de presse, BD* Aléas de références et mémoire locale	Extension spatiale variable selon l'évènement, très éparsée, masse importante d'informations	+++
Services de sécurité civile	Publics (SDIS)	BD* interventions en zone inondées	Extension spatiale locale à départementale, données précises	++++
Gestionnaires de réseaux linéaires	Publics/Semi-publics (DDT, SNCF, VNF) ou Privés (Sociétés d'Autoroutes)	BD* interventions post inondation, BD des infrastructures impactées	Extension locale à Nationale (ex SNCF sur l'ensemble du territoire français), BD précise à plus générale	++++
Fournisseurs de données complémentaires	chercheurs	Photos satellites, prises de vue aériennes	À l'étude ! Projets Cerema, thèses	+++

*BD = Base de Données

Tableau 3 : Récapitulatif des données utilisables et de leur pertinence pour la validation des zones d'accumulation du ruissellement

2.3.4 La validation temporelle

En plus d'une démarche spatiale de validation, une autre piste de réflexion concernant la validation de la méthode IRIP s'oriente vers une démarche temporelle. Cet axe de validation est intrinsèquement lié aux données utilisées par la méthode IRIP. Les données récoltées pour le calage et la validation de la méthode sont issues d'observations sur le terrain. Ces observations ne sont qu'une partie des événements qui se sont produits. En effet, pour des périodes de retour importantes, le nombre de données est très faible puisque rarement, voir jamais, mesuré. C'est ce que l'on décrit comme l'aléa de référence.

Par définition, l'aléa de référence est « le niveau d'aléa choisi pour la gestion du risque. Par exemple, l'aléa de référence servant de base à l'élaboration des PPRN inondations correspond à l'évènement centennal ou au plus fort évènement connu, s'il présente une période de retour supérieure à cent ans » (source : Prim.net).

La notion d'aléa de référence, sur laquelle la validation se cale, ne dépend donc que des aléas qui se sont déjà produits. Autrement dit, si sur une zone donnée, il n'y a pas eu d'observations attestant l'existence du ruissellement, cela ne veut pas dire que

pour un évènement plus intense cette zone ne sera pas ruisselante. La problématique des références sur les aléas est la même qu'avec les crues par débordement de cours d'eau (Cadet *et al.*, 2010).

La démarche de validation temporelle d'un outil hydrologique n'est pas une approche classiquement utilisée pour la validation. En effet, beaucoup d'outils ou de modèles présentent une validation spatiale, mais n'intègrent pas une analyse chronologique des évènements. La validation temporelle est surtout utile aux zones de production du ruissellement puisque ce sont ces zones qui sont le plus difficilement mises en évidence. En effet, la difficulté de récupération des données et la faible persistance temporelle des stigmates issus des zones de production empêche une validation spatiale facilement réalisable. Les données temporelles proviennent essentiellement des services de sécurité civile.

En partant du principe, et par définition des zones ruisselantes, que les zones de production du ruissellement sont les premières à réagir à un évènement pluvieux alors les premières infrastructures impactées le seront par des zones situées juste en aval de ces zones de production. **Pour arriver à déterminer ces zones, il nous faut donc une chronologie de l'évènement pluvieux et notamment de ses dommages liés lors de l'évènement.** Lorsqu'une infrastructure d'un particulier (maison, jardin, cave...) ou des collectivités (voiries, réseaux électriques...) est impactée, les informations sont transmises directement aux services de sécurité. **Les pompiers (ou SDIS – Service Départemental d'Incendie et de Secours) ont donc une base de données chronologique des évènements et des zones impactées.** L'utilisation de ces données pourrait permettre la confirmation des zones illustrées par IRIP s'il s'avère que ces infrastructures sont situées en aval ou sur ces zones de production.

Il est important de noter que l'absence d'intervention sur une zone ne signifie pas que celle-ci ne ruisselle pas. Comme le montre la figure 16, une zone ruisselante déterminée par IRIP peut ne pas être impactée d'infrastructures du fait de l'absence d'enjeu et ainsi être absente des données recueillies par la sécurité civile. Il sera donc nécessaire de trouver d'autres formes de validation de la méthode.

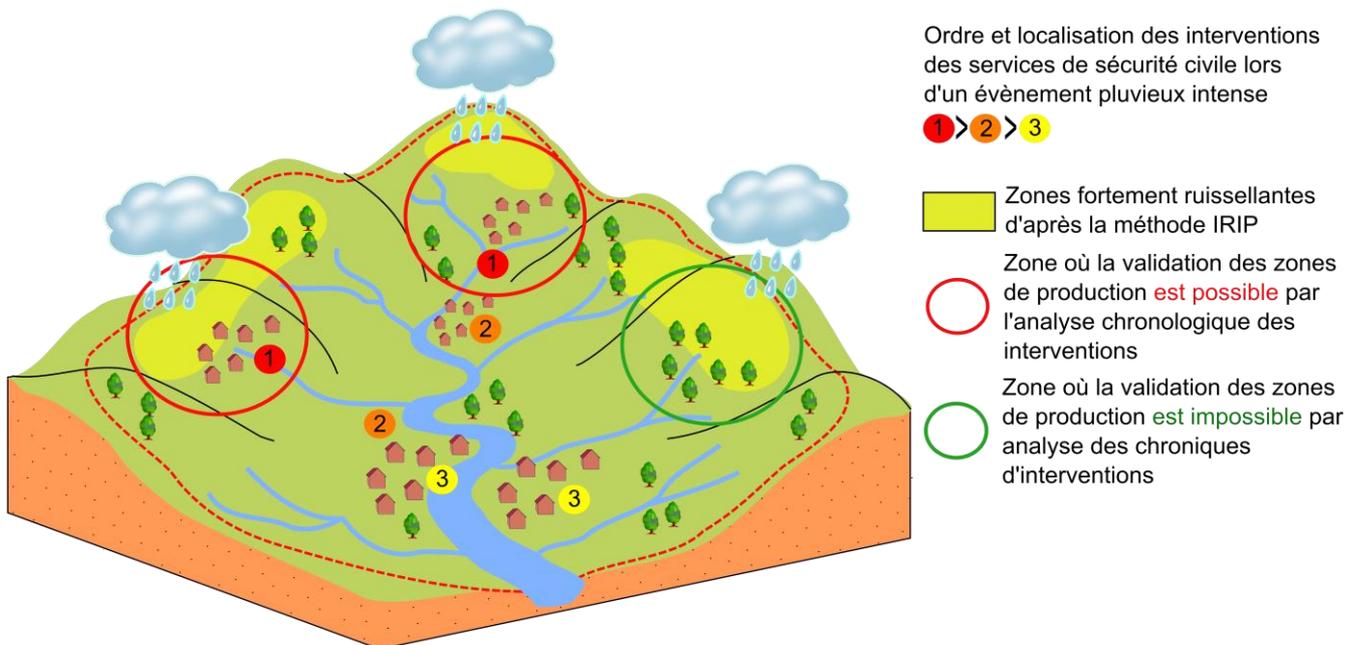


Figure 16 : Validation des cartes IRIP par analyse chronologiques des interventions des sécurités civiles

Trois possibilités peuvent exister lors de l'analyse des données chronologiques des services de sécurité civiles :

- **La localisation des zones d'intervention premières lors d'un évènement pluvieux intense correspond aux zones en aval des zones de production de ruissellement identifiées par la méthode IRIP.** Lorsque cette hypothèse est présente, la validation temporelle des cartes de production du ruissellement IRIP est possible.
- La localisation des zones d'intervention premières lors d'un évènement pluvieux intense ne correspond pas à une zone ruisselante d'après la carte IRIP. **Sur une zone donnée, on n'observe pas d'interventions de la part des services de sécurité civile mais la carte issue d'IRIP présente une zone ruisselante.** L'absence de données d'intervention peut signifier l'absence d'enjeu localement (comme au milieu d'une zone boisée, ou d'aires dépeuplées), mais ne signifie pas que ces zones ruisselantes n'existent pas. La validation grâce aux chroniques d'intervention n'est pas possible pour ce type d'hypothèse, d'autres méthodes de validation (présence de stigmates...) doivent être récoltées pour affirmer ou infirmer les cartes produites par la méthode.
- Une dernière possibilité existante, est **celle où des interventions de sécurité civiles ont lieu lors d'un évènement mais ne se situant pas en aval d'une zone identifiée par IRIP comme ruisselante.** IRIP étant une méthode de représentation de la réalité, si un fait avéré en un point a lieu, alors la méthode d'identification des zones ruisselante n'est pas pertinente. La validation de la méthode ne pourra donc pas avoir lieu dans ce cas, en revanche cela peut permettre une phase de paramétrage. En effet, en jouant sur les seuils et/ou les pondérations des facteurs, il sera possible d'obtenir une corrélation entre les cartes nouvellement produites et les chroniques d'interventions.

Cette dernière possibilité fait apparaître un point important dans la démarche de validation temporelle de l'indicateur IRIP. En effet, **l'absence de corrélation peut être la conséquence de la présence d'infrastructures linéaires (routes, fossés, retenues...) modifiant les chemins de l'eau par rapport aux « prévisions » de la méthode IRIP.** L'intégration précise de ces infrastructures dans la méthode peut permettre l'obtention de cartes plus fidèles aux informations fournies par les services de sécurités civiles.

En résumé :

- **La validation de la méthode IRIP suit une démarche itérative**
- **Les zones de production du ruissellement sont les plus difficiles à valider, puisqu'à l'inverse des zones de transfert et d'accumulation, elles ne donnent pas lieu à des conséquences.**
- **La détermination des zones de production résulte donc d'une déduction**
- **La validation temporelle n'est pleinement exploitable que pour les zones de corrélation entre les cartes fournies par IRIP et les données recueillies sur le terrain par les services de la sécurité civile.**

III. Application et validation détaillées de la méthode IRIP au bassin versant de l’Azergues

3.1 Le bassin versant de l’Azergues

Les données utilisées dans cette partie sur le bassin versant de l’Azergues nous ont été fournies par Syndicat Mixte pour le Réaménagement de la Plaine des Chères et de l’Azergues (SMRPCA).

3.1.1 La rivière Azergues

Bien moins connue que le Rhône et la Saône, l’Azergues est le troisième cours d’eau le plus important du département du Rhône. Son bassin, **d’une superficie de 875 km², draine une partie des Monts du Beaujolais** (Figure 17). L’Azergues est formée par la confluence des deux ruisseaux (l’Aze et l’Ergues) qui prennent leur source dans le massif du mont Saint Rigaud, respectivement à 900 et 700 m d’altitude. **Elle rejoint la Saône, son exutoire, en rive droite à Anse, à 165 m d’altitude.**

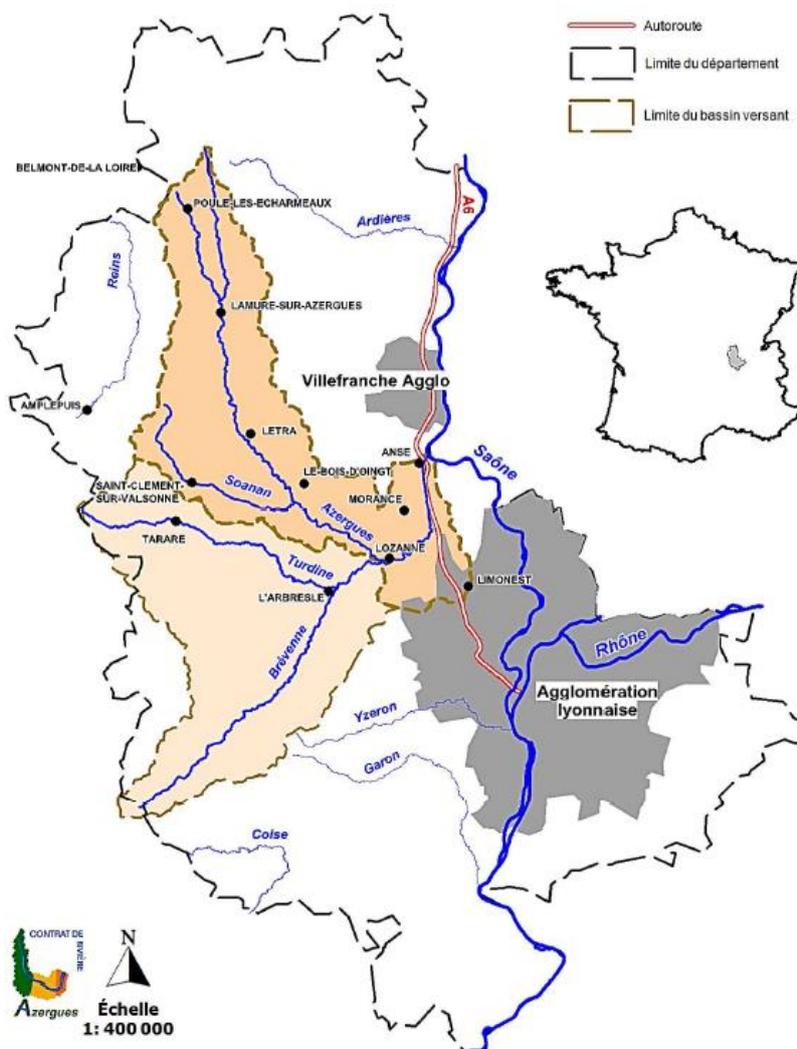


Figure 17 : Localisation géographique du bassin versant de l’Azergues (source : SMRPCA 2013)

- **Du point de vue géomorphologique :**

Il est possible de diviser le bassin versant de l'Azergues en cinq principaux ensembles structuraux influençant le tracé du cours d'eau de l'Azergues (SMRPCA 2013) :

Des sources de l'Aze et de l'Ergues jusqu'à la ville de Lamure-sur-Azergues, les deux ruisseaux de l'Aze et de l'Ergues prennent leurs sources respectives au sein de vallons évasés. Ils s'écoulent ensuite le long de pentes importantes tendant à se réduire en aval (passant de 4,5% à 1,3%). La confluence de ces deux ruisseaux formant l'Azergues se produit au niveau de Lamure-sur-Azergues avec un lit dont la largeur n'excède pas 3 mètres.

De Lamure-sur-Azergues à Letra, on observe un élargissement de vallée de l'ordre d'une centaine de mètre avant de se resserrer près de Chambost-Allières et Chamelet entraînant un encaissement du cours d'eau de l'Azergues. Le lit de celui-ci n'excède alors pas 6 à 8 mètres de larges et la pente moyenne de la section est faible, oscillant entre 0,5% et 1%.

De Letra à la ville de Lozanne, on observe un élargissement du cours d'eau de l'Azergues consécutif à une réduction des pentes moyennes (passant de 0,5% à 0,3%). Sur ce tronçon, la rivière décrit un parcours sinueux, alternant encaissement rocheux et évasement de son lit. Le lit mineur oscille alors entre 8 et 12 mètres. Il est toutefois important de prendre en compte le fait qu'au niveau de cette zone, le chenal du cours d'eau n'est pas fixe. En effet, son tracé varie légèrement au gré des crues.

De la ville de Lozanne au barrage de Morancé, on observe un élargissement de la vallée après la sortie du « verrou rocheux » de Lozanne. L'Azergues, dès lors alimentée par la Brévenne, s'élargit pour atteindre un lit de l'ordre de 25-30 mètres. La morphologie fluviale de l'Azergues décrit alors un écoulement méandriforme au sein d'un lit majeur important (de l'ordre d'une centaine de mètres). Les pentes sont à ce niveau du bassin versant fortement réduites et tournent aux alentours de 0,2%. Le barrage de Morancé constitue l'ouvrage le plus important (en taille et impact sur le profil en long du cours d'eau avec près de 4,5 mètres de chute) de l'Azergues.

Enfin, du barrage de Morancé à la confluence avec la Saône, son exutoire à Anse, le cours d'eau de l'Azergues traverse la plaine des Chères formée de terrasses fluviales. La pente moyenne du tronçon est très faible (aux alentours de 0,13%) et le cours d'eau présente une succession de seuils causés par des enrochements. Le lit de l'Azergues, encaissé dans des berges érodées, présente un tracé rectiligne parallèle à l'autoroute A6. Ce tracé rectiligne est la conséquence d'aménagements importants en basse Azergues depuis la fin du 18^{ème} siècle.

- **Du point de vue hydrologique :**

L'Azergues est alimentée par deux affluents majeurs en rive droite, le Soanan et la Brévenne-Turdine son affluent principal :

La Brévenne-Turdine (ou communément appelée la Brévenne), possède un bassin versant supérieur à celui de l'Azergues (436 km² contre 357 km² pour l'Azergues). De par sa forme ramassée, le bassin de la Brévenne draine un important réseau hydrographique supérieur à celui drainé par l'Azergues. La Brévenne s'écoule dans des fonds de vallées étroites jusqu'à sa confluence en aval avec l'Azergues. A cela, il faut rajouter le fait que la forme de son bassin soit beaucoup plus ramassée et que l'occupation des sols y est beaucoup moins forestière pour mieux comprendre le fait que la Brévenne est une rivière qui va réagir plus rapidement à un évènement pluvieux que l'Azergues (exemple de la crue de novembre 2008).

Le Soanan est une petite rivière dont la largeur n'excède pas 7 mètres à sa confluence avec l'Azergues. La morphologie de son bassin versant est comparable à la partie amont du bassin versant de l'Azergues (régime hydrologique torrentiel, fortes pentes et bassin très forestier).

En plus de ces deux affluents majeurs, l'Azergues draine au long de son parcours de très nombreux affluents (plus d'une cinquantaine) dont les principaux sont résumés dans le tableau ci-dessous (Tableau 4) :

Nom du ruisseau	Linéaire (km)	Superficie du bassin versant (km ²)
Ris	4,5	16
Saint-Cyr	4	17
Avray	5,7	17
Rebaisselet	6,5	12
Vervuis	5	11
Nizy	5	8
Alix	6,7	18
Sémanet	7,3	16,5

Tableau 4 : Récapitulatif des principaux affluents de l'Azergues (SMRPCA 2013)

Tous sont de petits ruisseaux plus ou moins pérennes drainant des sous bassins versants de tailles réduites. Pour preuve, le linéaire total de cours d'eau du bassin versant (hors Brévenne-Turdine) dépasse les 600 km (SMRPCA 2013). **Le bassin versant de l'Azergues peut donc être défini comme un bassin versant longiligne, drainant un chevelu dense de petits ruisseaux à travers une rivière principale qu'est l'Azergues.**

3.1.2 Géologie et pédologie du bassin versant de l'Azergues

Le bassin versant de l'Azergues s'étend sur trois principales entités géographiques (SMRPCA 2013). Ces trois entités géographiques se différencient par le relief et vont avoir un impact sur l'hydrologie et l'hydrographie locale.

Ces entités se succèdent de façon très distincte du point de vue géologique d'Ouest en Est avec :

- **Les monts du Beaujolais et du Tararais.**

Des sources de l'Aze et de l'Ergues jusqu'au pont des mines à Chessy cette entité est caractérisée par un relief important (Le Mont Saint-Rigaud, point culminant du Beaujolais, domine au nord le bassin versant de l'Azergues à plus de 1000 mètres d'altitude). Le substratum y est principalement **magmatique (granite) et volcano-sédimentaire** correspondant à la bordure géologique du massif central. Ce substratum magmatique est faiblement perméable, expliquant la grande densité du réseau hydrographique

- **Les collines du bas Beaujolais.**

Les collines du bas Beaujolais sont la résultante de fortes activités tectoniques lors de l'ère secondaire (durant la période du Trias au Jurassique moyen notamment). Elles forment un piémont faiblement incliné vers l'est, entaillé par un réseau dense de cours d'eau et d'accident géologiques, ne dépassant pas 500 mètres d'altitude. Cette entité est composée de **roches sédimentaires présentant une alternance marno-calcaire** plus ou moins grande. Cette entité se termine vers l'est par un accident majeur orienté nord-sud, constituant entre Belmont et Limas la limite avec le val de Saône. Un système aquifère karstique se développe au sein de cet anticlinal calcaire, expliquant la quasi-absence d'écoulements de surface.

- **La plaine des Chères et la vallée de la Saône.**

Cette entité correspond à une large vallée héritée d'un bassin tertiaire dans lequel l'accumulation de **sédiments alluvionnaires quaternaire** a été amenée par le cours d'eau de la Saône. On observe donc la présence de terrasses alluviales ayant une altitude moyenne inférieure à 200 mètres. Une autre géologie caractérise la zone. En effet, entre Lozanne et Civrieux, sur sa marge sud, le bassin versant de l'Azergues entre en contact en rive droite avec la bordure sud septentrionale des plateaux lyonnais principalement composés de roches granitiques et métamorphiques (gneiss).

Pédologiquement, le bassin versant de l'Azergues appartient à l'ensemble pédologique du Beaujolais et enclavé dans un sous ensemble comprenant la vallée de la Saône et de l'Azergues et des coteaux du Beaujolais (Chambre régionale d'agriculture Rhône-Alpes, 1997). On peut définir deux ensembles principaux de l'amont vers l'aval :

- **La zone des coteaux**, définie par une altitude inférieure à 400-450 m. Les coteaux du Beaujolais au Nord du département comportent à la fois des roches cristallines et des matériaux calcaires de différentes natures, reliés au val de Saône par différents niveaux de terrasses alluviales. Les sols sont développés d'une part sur l'altérite de la roche en place, qu'elle soit calcaire ou siliceuse à proximité de la montagne, et d'autre part sur des matériaux d'apport de répartition complexe, à proximité des vallées du Rhône ou de la Saône.
- **La vallée de l'Azergues** correspond à la partie la plus large prolongeant les vallées de montagne plus étroites. Les sols y sont plutôt sableux ou sablo-argileux, acides et moyennement profonds.

3.1.3 Occupation des sols sur le bassin versant de l'Azergues

Avant de présenter chaque secteur du bassin versant de l'Azergues, il est nécessaire de replacer ce territoire dans le cadre de l'aire urbaine lyonnaise. En effet, la deuxième agglomération de France joue un rôle important dans les dynamiques qui affectent le sud du Beaujolais.

Comme le montre la figure 18 ci-dessous, **il existe un net gradient d'occupation des sols de l'amont vers l'aval du bassin**. Plus on va en aval du bassin versant et plus celui-ci est composé de surfaces de cultures et de zones urbaines au profit des zones forestière et, dans une moindre mesure, des zones de prairies.

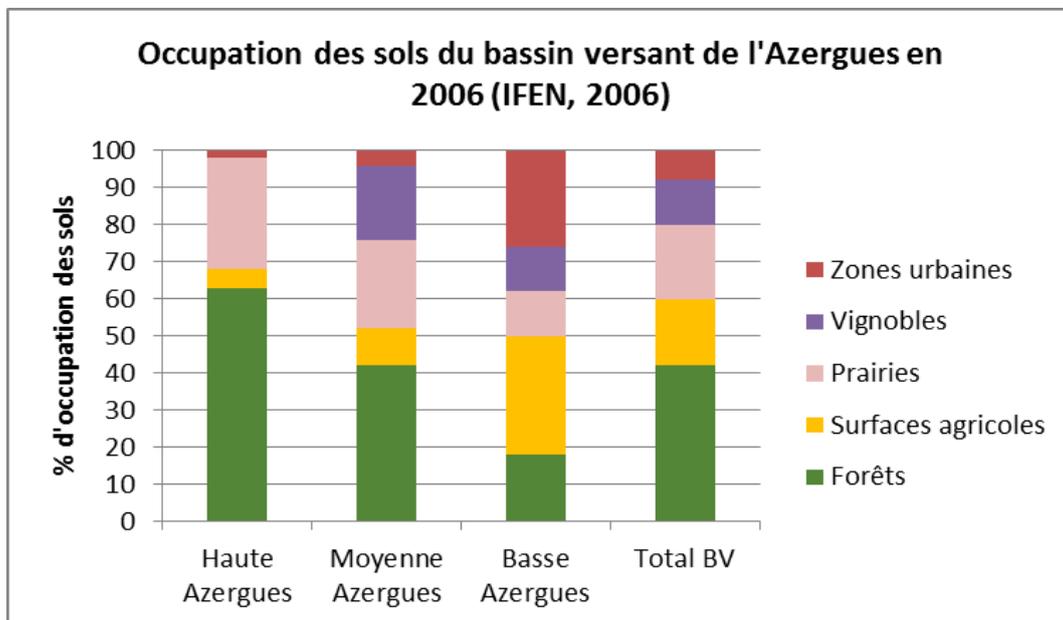


Figure 18 : Occupation des sols du bassin versant de l'Azergues selon la base de données Corine Land Cover 2006 (IFEN, 2006)

D'après la figure 18, il est possible d'en dire plus sur la répartition spatiale de l'occupation des sols et ainsi d'en distinguer trois parties principales (SMRPCA 2013) :

- **La partie amont, composée de versants à fortes pentes, possédant un couvert forestier (plus de 60 %) important comprenant la Haute Azergues.** Il s'agit donc d'une entité rurale, peu aménagée composée d'une densité de population très faible (< 2%). L'usage principal qu'il est fait de cette zone géographique est l'élevage, bovin notamment, sur près de 30 % des sols de la Haute Azergues.
- **La partie de la moyenne Azergues, avec des pentes plus douces dont la géologie et l'orientation sud de ses coteaux, forme un territoire propice à la viticulture (environ 20 %).** L'utilisation géographique de cette entité est donc majoritairement agricole. On remarque néanmoins la présence encore importante de zones forestières (environ 40 %) et la faible urbanisation (<5 %). On constate cependant une augmentation de l'urbanisation au profit des zones forestières et viticoles dû à l'accroissement de l'agglomération lyonnaise mais aussi à la crise qui touche le domaine viticole.
- **La partie de la basse vallée de l'Azergues ou vallée de la Saône. Cette plaine géographique est une zone propice à l'agriculture (plus de 30% de la surface de l'entité géographique),** surtout céréalière, de par sa géologie (sols alluvionnaires très fertiles) et sa topographie (faible pentes). La partie de la basse Azergues est aussi marquée **par une urbanisation importante (plus de 25 %).** Ce développement urbain récent s'est fait en marge de la plaine inondable. On a donc concentré au même endroit une zone d'exutoire d'un bassin versant de taille importante et la très grande majorité de la population du bassin versant. Cette zone est donc un enjeu majeur dans le cadre d'une étude de risque.

Plus de 250 maisons sont, à l'heure actuelle, situées en zones inondables dans le bassin versant de l'Azergues soit par débordement de cours d'eau, soit par ruissellement des versants (SMRPCA 2013). Bien que la durée de submersion soit

brève dans l'ensemble, les crues débordantes ou ruisselantes de l'Azergues ont des répercussions socio-économiques importantes. En effet, la proximité avec l'agglomération lyonnaise et de ses grands axes de transfert implique qu'un grand nombre d'utilisateurs de la route soient directement impactés en période de crise. Ainsi lors d'inondations, la circulation routière est perturbée voire interrompue sur les axes situés en moyenne et basse vallée de l'Azergues soit : la RD16, RD30, RD38, RD39, RD76, RD134, RD51, RD100, RD306, et la RD385 (SMRPCA 2013).

En résumé :

- **Le Bassin versant de l'Azergues est un petit bassin versant dans le département du Rhône de forme allongée.**
- **Il est caractérisé par de forts reliefs en amont et une zone plane en aval proche de la confluence avec la Saône.**
- **Il est essentiellement situé sur un substratum marno-calcaire.**
- **Le bassin versant est essentiellement urbanisé en aval, forestier en amont et agricole entre ces deux zones.**

3.2 Diagnostic du ruissellement sur le bassin versant de l’Azergues

Rappel : L’ensemble des cartes produites a été réalisé au sein d’IRSTEA-Lyon centre de Villeurbanne en date des mois d’octobre à décembre 2013, dans le cadre du contrat de M. BONNET-CARRIER. Les cartes IRIP produites dans ce document ont été réalisées par la version 1.0 bêta du logiciel développé par la SNCF sur la méthode IRIP.

3.2.1 Les données utilisées dans la méthode IRIP

Plusieurs données d’entrée sont nécessaires au fonctionnement d’IRIP. L’ensemble des données utilisées est décrit ci-dessous et résumé dans le tableau (Tableau 5).

Types de données	Caractéristiques		Provenance	Commentaires
	Format	Echelle de résolution		
BV Azergues	Vecteur	-	SMRPCA 2013	Contour de la zone d’étude
MNT	Raster	1/25 000e	BD TOPO IGN 25M	Données topographiques
Occupation des sols	Vecteur	1/250 000e	IFEN 2006	Programme Corinne Land Cover 250M
Occupation des sols	Raster	1/25 000e	IFEN 2006	Programme Corinne Land Cover 25M
Occupation des sols	Raster	1/500e	SMRPCA 2013	Données précises d’occupation des sols
Pédologie	Vecteur	1/1 000 000e	BD INRA 1998	Données sols INRA 1998

Tableau 5 : Récapitulatif des données utilisées dans la méthode IRIP pour le bassin versant de l’Azergues

- **Le contour du bassin versant de l’Azergues :**

Afin de délimiter notre zone d’étude, nous avons utilisé le contour du bassin versant de l’Azergues en enlevant le sous bassin versant de la Brévenne-Turdine. La donnée utilisée nous a été fournie par le SMRPCA. Le contour de ce bassin versant nous permet une découpe des différentes données afin d’obtenir une carte des différentes données utilisées dans le cadre de la méthode IRIP à l’échelle du bassin versant de l’Azergues.

- **Le modèle Numérique de Terrain (MNT) :**

Le MNT est à la base du fonctionnement des modules de la méthode IRIP. Grâce à celui-ci, beaucoup d’indicateurs (pentes, aire amont drainée, réseau hydrographique...) vont être définis. C’est pourquoi, dans un souci de précision, il est important d’utiliser une donnée topographique la plus précise possible. De plus, le ruissellement étant un phénomène très localisé, l’utilisation d’un MNT avec des mailles trop grandes (50m, 250m...) n’est pas pertinente pour sa caractérisation.

Nous avons utilisé le MNT le plus précis que nous disposions, à savoir des mailles de 25m (échelle de résolution de 1/25 000e) issu de la BD TOPO de l’IGN sur l’ensemble du bassin versant de l’Azergues (Figure 19).

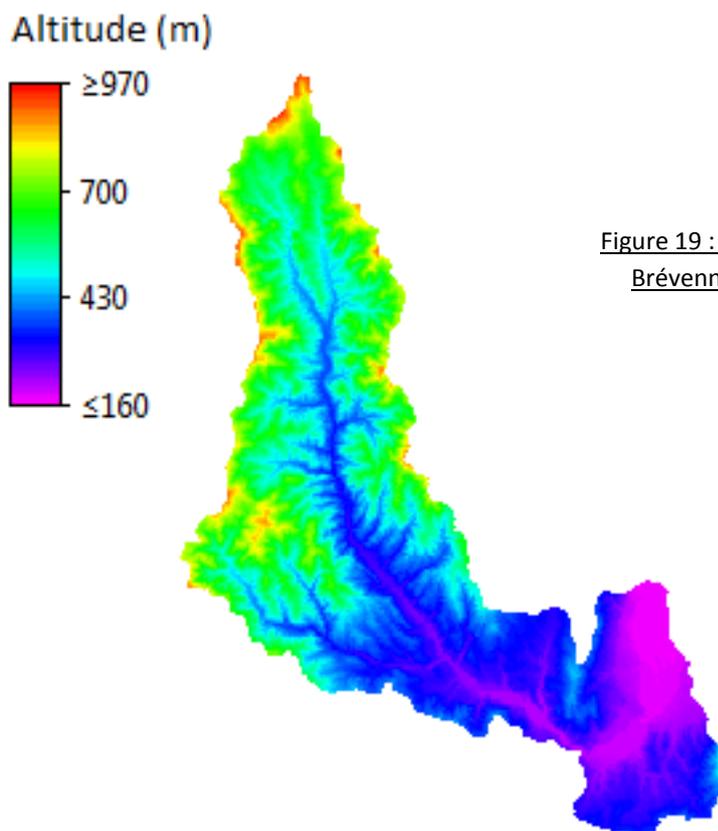
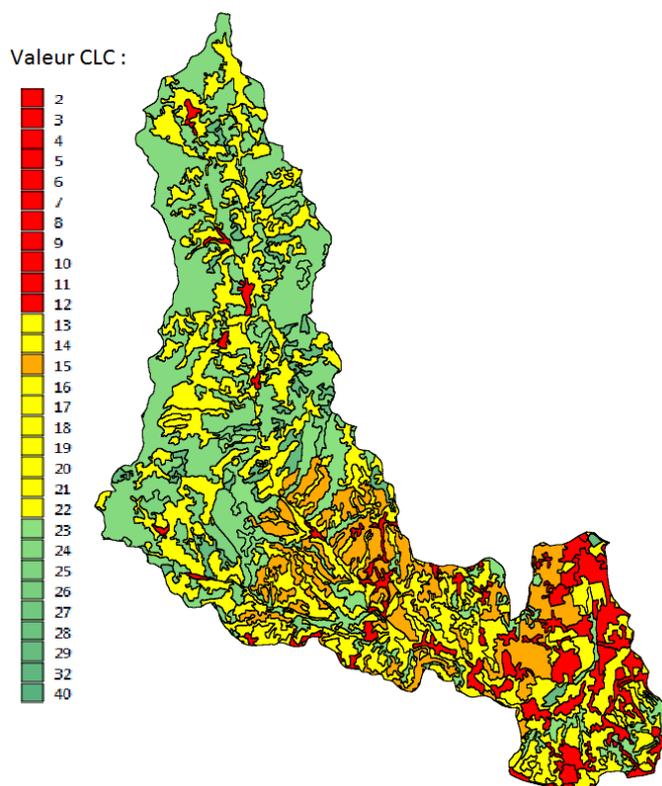


Figure 19 : MNT du bassin versant de l'Azergues (Hors Brévenne-Turdine) intégré dans la méthode IRIP

- **L'occupation des sols :**

L'occupation des sols joue un rôle important dans le phénomène du ruissellement (Gonzalez-Sosa *et al.*, 2010). L'intégration d'une carte d'occupation des sols est donc prise en compte par la méthode IRIP. La carte d'occupation des sols va surtout permettre de discriminer trois principales zones : les zones urbaines, agricoles et forestières.

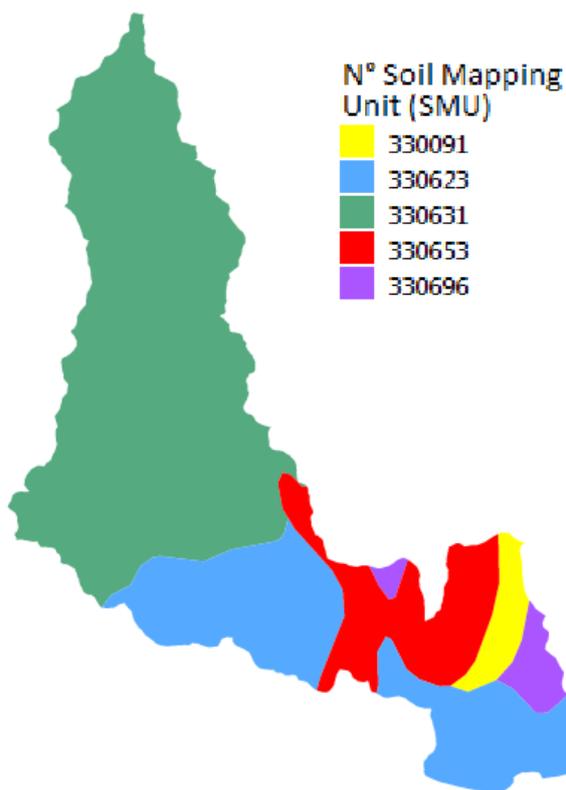
Les données utilisées sont issues du site internet de l'IFEN dans le cadre du projet européen Corinne Land Cover à différentes résolutions pour l'année 2006. L'utilisation des différentes résolutions a été réalisée, mais seul l'utilisation de la donnée la plus précise (échelle de résolution 1/25 000) a été conservée (figure 20). Chaque pixel du raster de résolution 25m est caractérisé par un code. En rouge les zones urbaines, en jaune les zones agricoles, en orange les vignobles et en vert les zones forestières.



(La légende complète des codes est fournie par l'IFEN et explicitée dans le tableau en annexe 3).

Figure 20 : Carte d'occupation des sols du bassin versant de l'Azergues utilisé dans la méthode IRIP

- **Pédologie du bassin versant de l’Azergues :**



La dernière donnée nécessaire à la méthode IRIP est la carte pédologique de la zone d’étude. **Cette carte est issue de la base de données sol de l’INRA réalisée en 1998 sur l’ensemble du territoire à une échelle de résolution de 1/1 000 000^e découpée à l’échelle du bassin versant de l’Azergues (Figure 21).**

Figure 21 : Carte des unités de sols (SMU) sur le bassin versant de l’Azergues

Cette base de données sol classe les sols en unités cartographiques (Soil Mapping Units ou SMU). Chaque SMU a ses propres caractéristiques définies dans une annexe de la base de données de l’INRA. **Les extractions des informations sur l’érodibilité, l’épaisseur et la perméabilité des sols résultent d’un travail préliminaire réalisé lors de la création de la méthode IRIP.** Les facteurs de score pour la cartographie IRIP reprennent donc les données réalisées par P. Breil et J. Dehotin en 2011.

Chaque SMU est donc caractérisé par un facteur résumé dans le tableau ci-dessous (Tableau 6) :

N° SMU	Facteur IRIP		
	Erodibilité	Epaisseur	Perméabilité
330091	0	1	0
330623	0	0	0
330631	1	0	0
330653	0	0	1
330696	1	0	0

Tableau 6 : Récapitulatif des facteurs IRIP pour chaque SMU

3.2.2 Les cartes intermédiaires produites par la méthode

La méthode IRIP va intégrer les différentes données ci-dessus pour les transcrire en cartes d’indicateur du ruissellement à travers une méthodologie de score. **A chaque facteur favorisant le ruissellement, la méthode attribuera un score de 1 (en jaune sur les cartes ci-dessous), et à l’inverse pour un facteur ne favorisant pas le ruissellement un facteur 0 (en rouge sur les cartes ci-dessous).**

Afin de pouvoir obtenir les cartes de production, transfert et accumulation du ruissellement, la méthode IRIP doit combiner l'ensemble des cartes intermédiaires. Ces cartes intermédiaires sont au nombre de :

- **Une pour les données d'occupation des sols** : Une carte de prédisposition liée à l'occupation des sols avec comme hypothèse que seules les zones forestières ne favorisent pas le ruissellement (Cerdan *et al.*, 2006 ; Gonzalez-Sosa *et al.*, 2010 ; Dehotin *et al.*, 2011). Et donc que les zones urbanisées et agricoles ont un score positif dans la transcription de la méthode (Figure 22).

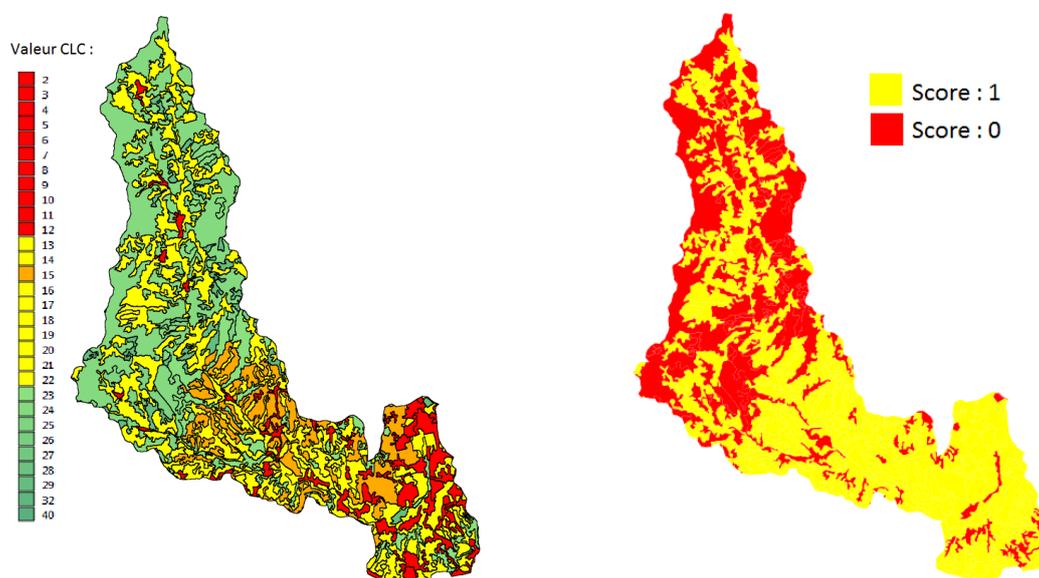


Figure 22 : Transcription de la carte d'occupation des sols par la méthode IRIP

- **Trois pour les données pédologiques** (figure 23) : Une carte de prédisposition liée à l'épaisseur des sols, une carte de prédisposition liée à la perméabilité des sols et une carte de prédisposition liée à l'érodibilité des sols.

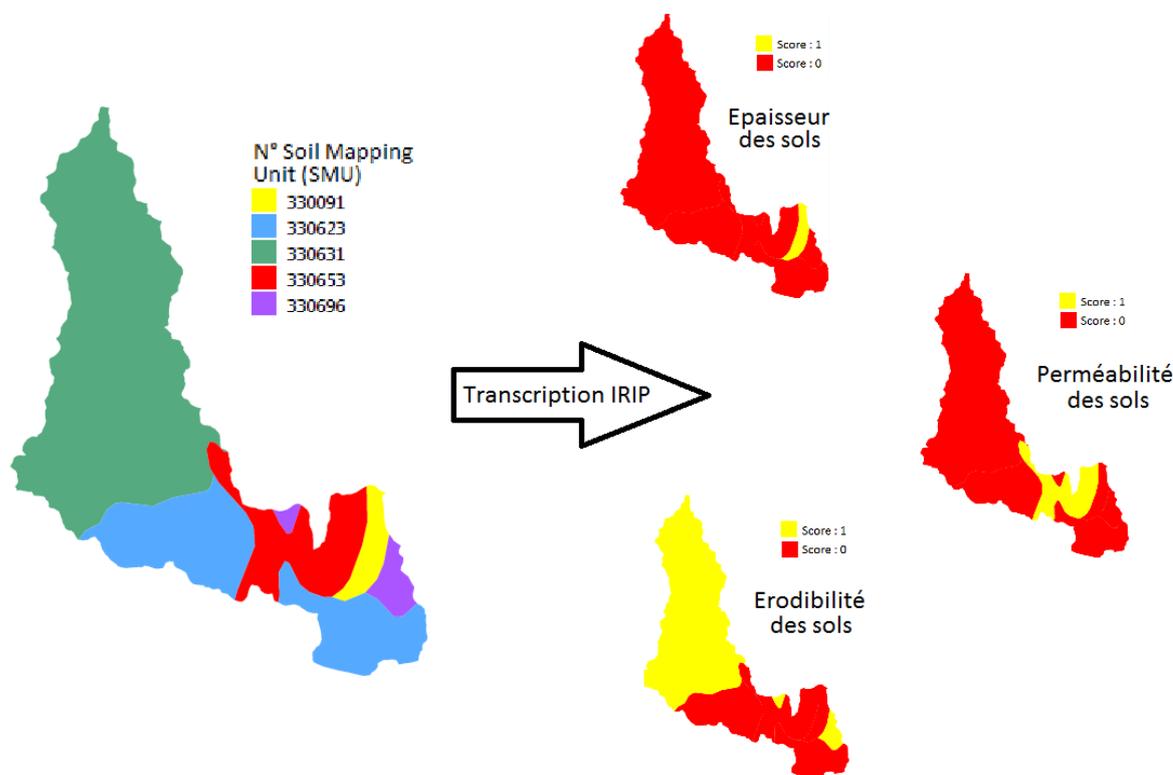


Figure 23 : Transcription des données pédologiques par la méthode IRIP

- **Cinq pour les données issues du MNT** : Une carte de prédisposition liée à la pente, une carte de prédisposition liée à l'indice d'engorgement, une carte de prédisposition liée aux axes de transferts, une carte de prédisposition liée aux ruptures de pentes et une carte de prédisposition liée à la surface et à la forme des aires drainées. **Les cartes intermédiaires issues des données MNT vont être différentes pour chaque carte d'aptitude au ruissellement. En effet, cela peut s'expliquer par le fait que la topographie va jouer un rôle différent et pourra favoriser ou non un type de ruissellement.** Par exemple, une rupture de pente faible favorisera la production mais une rupture de pente forte favorisera l'accumulation du ruissellement.

3.2.3 Les cartes d'aptitude au ruissellement

La méthode IRIP va permettre la création de trois cartes d'aptitude au ruissellement. Ces cartes résultent de l'addition des différentes cartes de prédisposition intermédiaires explicitées ci-dessus. Ainsi trois cartes finales d'aptitude au ruissellement sont créées telles que :

- **La carte d'aptitude à la production du ruissellement :**

+	Carte de prédisposition liée à l'occupation des sols (Faible : 0 / Fort : 1)
+	Carte de prédisposition liée à l'épaisseur des sols (Faible : 0 / Fort : 1)
+	Carte de prédisposition liée à la perméabilité des sols (Faible : 0 / Fort : 1)
+	Carte de prédisposition liée à l'érodibilité des sols (Faible : 0 / Fort : 1)
+	Carte de prédisposition liée à la pente (Faible : 0 / Fort : 1)
=	Carte d'aptitude à la production du ruissellement (Faible : 0 / Fort : 5)

On obtient ainsi la carte suivante sur le bassin versant de l'Azergues (Figure 25). Cette carte met en évidence les zones de formation du ruissellement, et comme on pouvait s'y attendre, **on observe un indicateur de production du ruissellement globalement faible (entre 0 et 3 très majoritairement, 4 sur de très petites zones comme le montre la figure 24) sur le bassin versant de l'Azergues.**

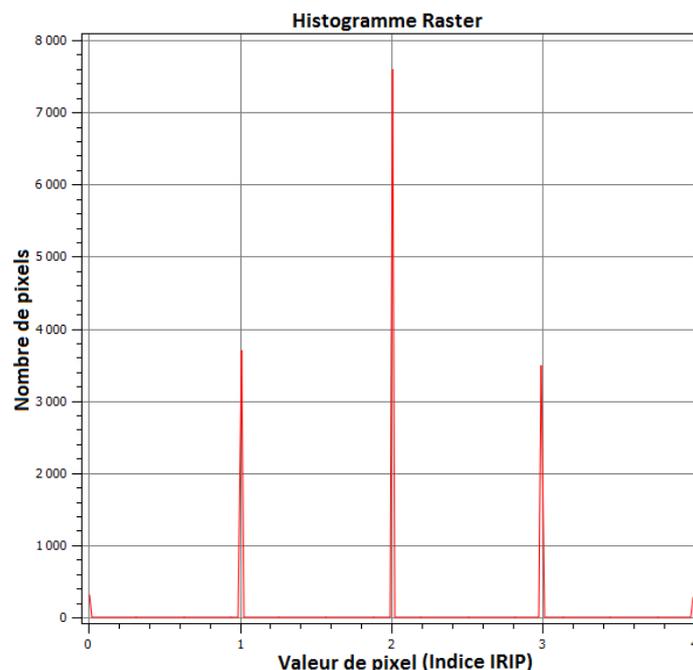


Figure 24 : Histogramme raster de la fréquence des indices IRIP pour la carte de production

Cela est notamment dû à une occupation des sols faiblement urbanisé et des sols peu enclins à ruisseler au sein du bassin versant.

D'après la carte ci-dessous, il est possible de dégager **deux grandes tendances spatiales** concernant la production du ruissellement sur le bassin versant de l'Azergues :

- **Sur la partie amont, on observe une propension au ruissellement moyenne (indice 2-3 sur la zone).** Cette propension est la résultante des forts reliefs et une érodibilité importante modérés par l'occupation forestière des sols.
- **Sur la partie aval du bassin, on observe une aptitude au ruissellement assez forte (indice 3-4).** Cette aptitude à la production résulte de l'occupation des sols très urbaine dans la zone, Cette aptitude serait plus importante si les reliefs étaient aussi plus marqués sur cette zone.

CARTE D'APTITUDE A LA PRODUCTION DU RUISSELLEMENT SUR LE BASSIN VERSANT DE L'AZERGUES (69-FRANCE) D'APRES LA METHODE IRIP

Légendes :

Indice de production

- 0 (Faible)
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5 (Fort)



Date : 11/2013
Auteur : BONNET-CARRIER S.
Méthode utilisée : IRIP
Projection : Lambert 93

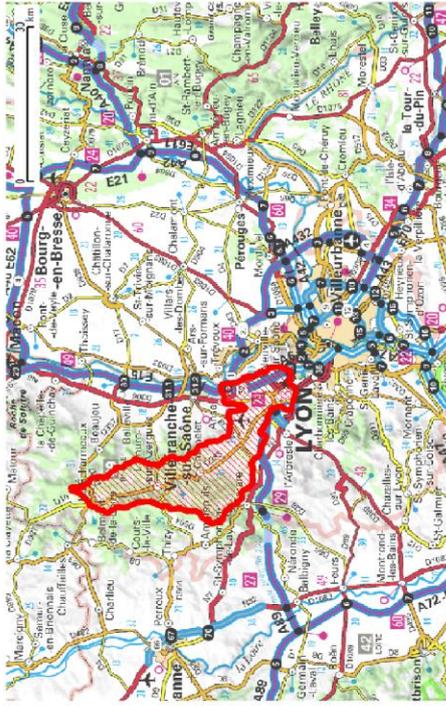
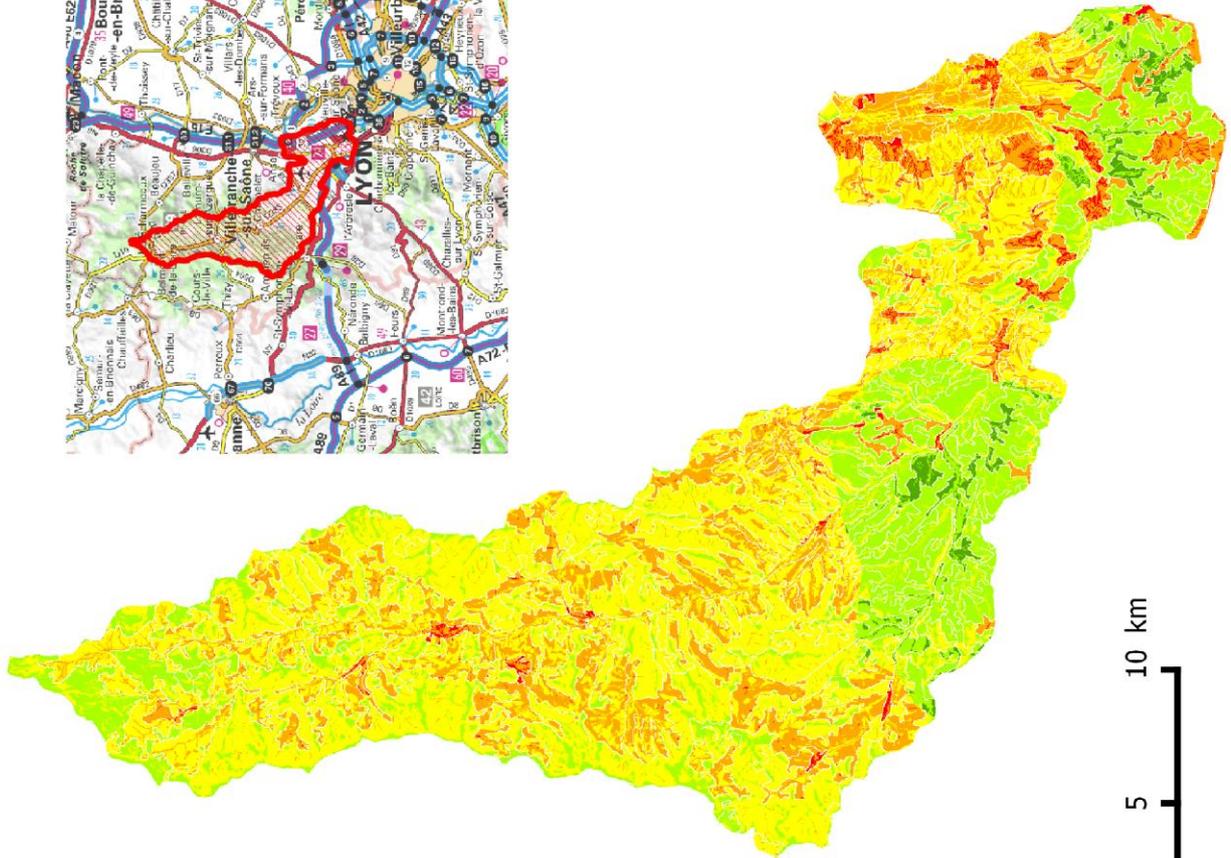


Figure 25 : Carte d'aptitude à la production du ruissellement sur le bassin versant de l'Azergues

- **La carte d'aptitude au transfert du ruissellement :**

+	Carte de prédisposition liée à l'indice d'engorgement (Faible : 0 / Fort : 1)
+	Carte de prédisposition liée à la rupture de pente (Faible : 0 / Fort : 1)
+	Carte de prédisposition liée à la production amont des aires drainées (Faible : 0 / Fort : 1)
+	Carte de prédisposition liée à la surface et la forme des aires drainées (Faible : 0 / Fort : 1)
+	Carte de prédisposition liée aux thalwegs et voiries (Faible : 1 / Fort : 0)
=	Carte d'aptitude au transfert du ruissellement (Faible : 0 / Fort : 5)

On obtient ainsi, grâce à la méthode IRIP, la carte d'aptitude au transfert du ruissellement ci-dessous (figure 27). **Comme le montre l'histogramme ci-dessous (figure 26), on remarque que les indices obtenus par la méthode IRIP sont faibles (de 0 à 2).** En effet, l'aptitude au transfert du ruissellement est peu pertinente sur le bassin versant de l'Azergues.

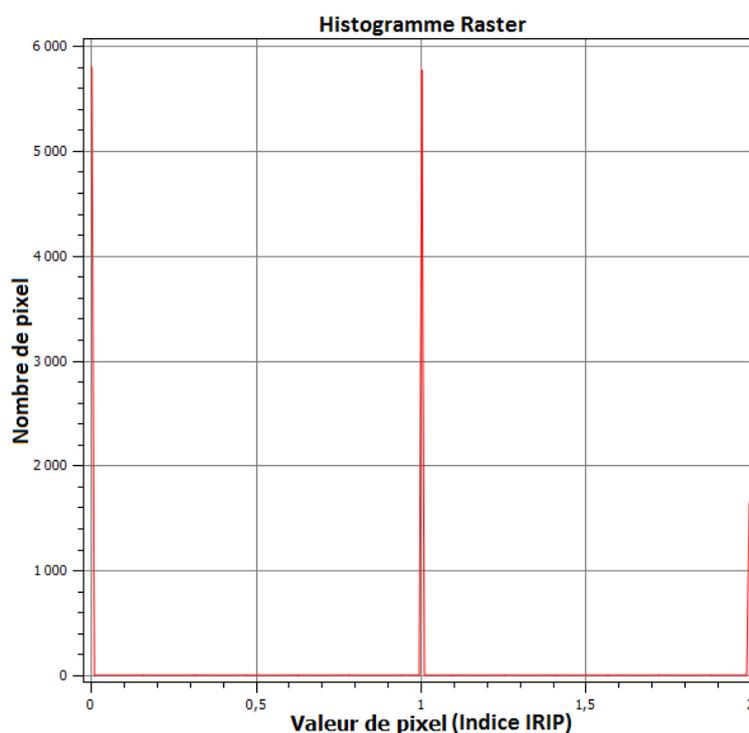


Figure 26 : Histogramme raster de la fréquence des indices IRIP pour la carte de transfert

Avant toute chose, et à l'inverse de la carte de production du ruissellement, on observe la présence de zones d'ombre (zones sans données) surtout situées en aval du bassin versant au niveau de la confluence avec la Saône. Ces zones de « vide » résultent d'une approximation inhérente au module IRIP dans les zones très planes. En effet, pour calculer les zones d'accumulation et de transfert du ruissellement, le module IRIP construit à partir du MNT un réseau de drainage. Or ce réseau de drainage rencontre une erreur en bordure de celui-ci puisque l'eau simulée dans son modèle de plan de drainage ne peut s'évacuer sur une large zone plane. Pour y remédier, le module va alors exclure ces zones du calcul. Pour les exclure, un calcul s'effectue alors de pixel en pixel, de proche en proche de façon à ce que le plan de drainage ne soit plus impacté par cet « effet de bord ». On observe donc une propagation des pixels « vides » en amont de cet effet de bord. **Une perspective à prévoir pour la méthode IRIP serait la correction de cet « effet de bord », par un forçage du réseau de drainage par exemple (stream burning).**

Concernant la spatialisation de l'aptitude au transfert du ruissellement, on peut mettre en évidence le fait **que les zones de transfert se concentrent notamment au centre du bassin versant de l'Azergues. Cela s'explique par le fait que ces zones de transfert vont faire le lien entre les zones de production et d'accumulation.** Il est donc tout à fait logique de pouvoir les identifier entre l'amont (majoritairement producteur de ruissellement) et l'aval (essentiellement accumulateur du ruissellement).

La création de cette carte de transfert du ruissellement a été réalisée sans l'incorporation d'axes préférentiels (fossés, routes,...) pour tester la méthode IRIP de façon générale. **Une utilisation plus fine permettant l'incorporation de données linéaires donnerait une carte beaucoup plus précise et pertinente.**

**CARTE D'APTITUDE AU
TRANSFERT DU
RUISSELLEMENT
SUR LE BASSIN VERSANT DE
L'AZERGUES (69-FRANCE)
D'APRES LA METHODE IRIP**

Légendes :

Indice de transfert

- 0 (Faible)
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5 (Fort)



Date : 11/2013
Auteur : BONNET-CARRIER S.
Méthode utilisée : IRIP
Projection : Lambert 93

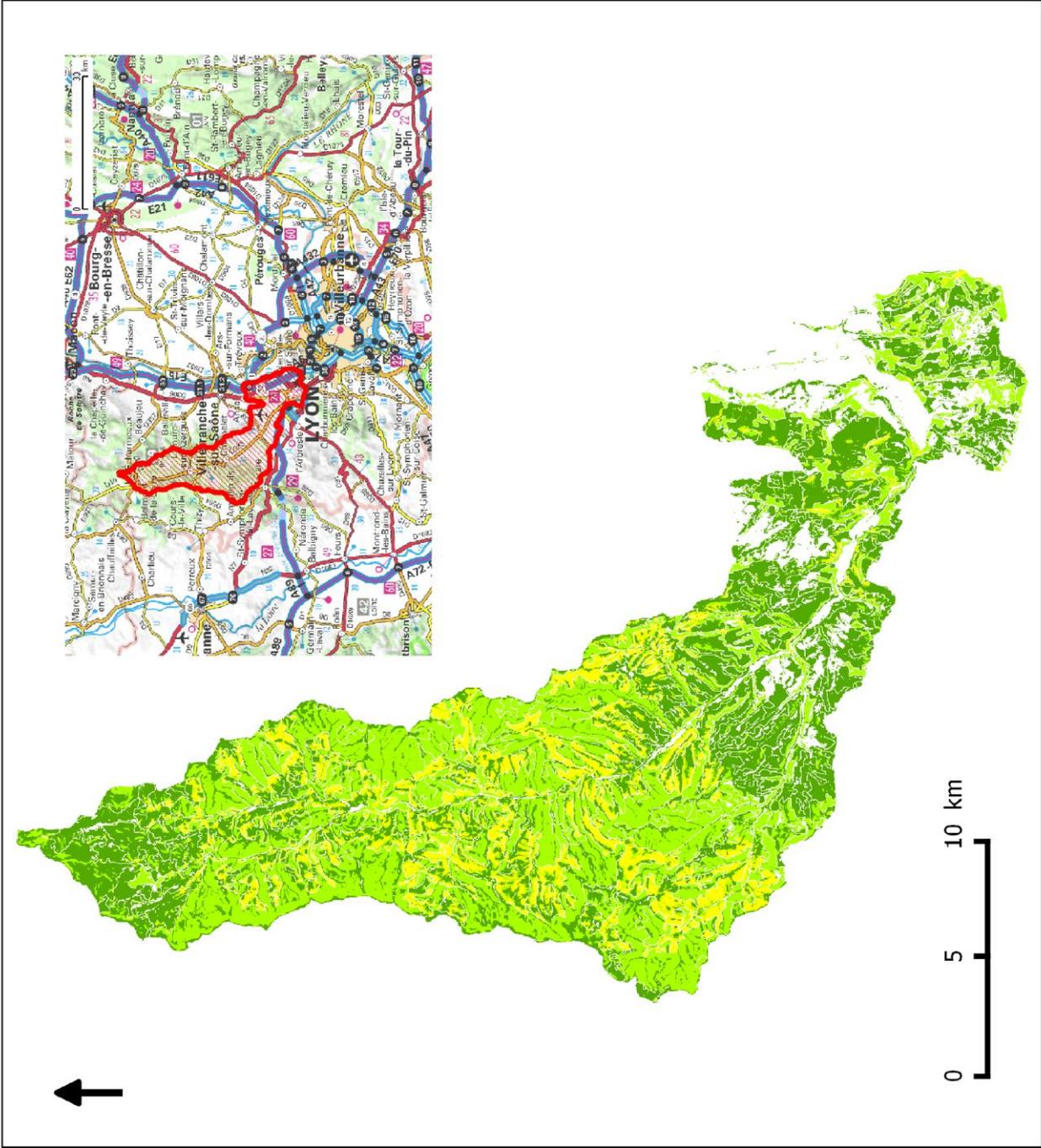


Figure 27 : Carte d'aptitude à la production du ruissellement sur le bassin versant de l'Azergues

- **La carte d'aptitude à l'accumulation du ruissellement :**

+	Carte de prédisposition liée à l'indice d'engorgement (Faible : 0 / Fort : 1)
+	Carte de prédisposition liée à la rupture de pente (Faible : 0 / Fort : 1)
+	Carte de prédisposition liée à la production amont des aires drainées (Faible : 0 / Fort : 1)
+	Carte de prédisposition liée à la surface et la forme des aires drainées (Faible : 0 / Fort : 1)
+	Carte de prédisposition liée à la pente (Faible : 1 / Fort : 0)
=	Carte d'aptitude à l'accumulation du ruissellement (Faible : 0 / Fort : 5)

La carte d'aptitude à l'accumulation du ruissellement a donc été obtenue sur le bassin versant de l'Azergues (Figure 29). Concernant les indices d'accumulation du ruissellement, on observe une prédominance des indices faibles (indices 1 et 2) comme le montre l'histogramme du nombre de pixels par indice sur la carte du bassin versant (figure 28). Certaines zones plus encaissées et drainant de plus grandes aires de production (en aval du bassin versant) présentent des indices fort pouvant aller jusqu'à l'indice maximum : 5.

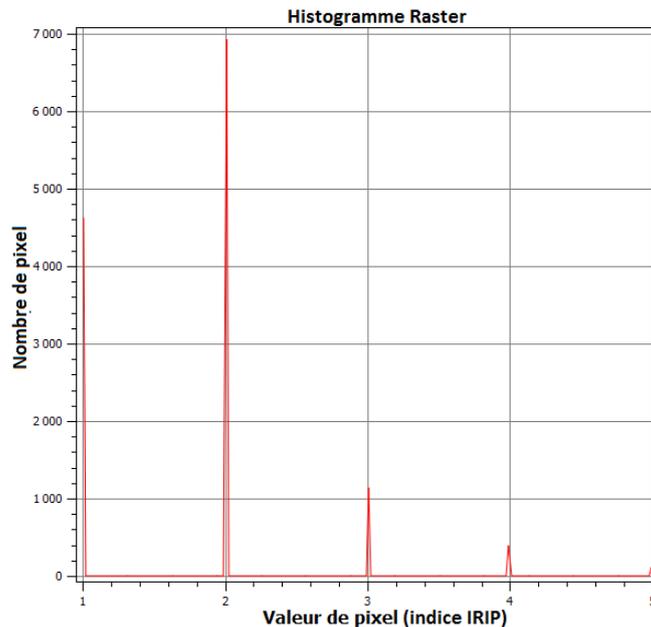


Figure 28 : Histogramme raster de la fréquence des indices IRIP pour la carte d'accumulation

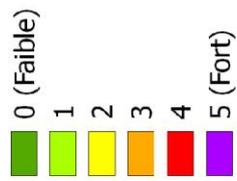
Cette carte d'accumulation du ruissellement met en avant les zones de thalwegs du bassin. Pour cette carte aussi, **il est possible de distinguer deux grandes tendances spatiales :**

- **La partie amont du bassin versant de l'Azergues caractérisé par des indices faibles (1-2)**, avec des reliefs importants qui vont favoriser l'évacuation du ruissellement produit vers l'aval empêchant ainsi la concentration des eaux ruisselantes.
- **La partie aval du bassin versant de l'Azergues caractérisé par des indices forts (2-3)**, possédant des ruptures de pentes importantes (on passe de reliefs fort à des pentes faibles voire très faible en basse Azergues proche de la confluence de la Saône. De plus l'importante zone d'apport (aire de surface drainée) en amont du ruissellement va favoriser la formation d'une lame d'eau, et la perte de vitesse de cette lame d'eau (conséquence des faibles pentes) va engendrer une accumulation importante des eaux ruisselantes.

**CARTE D'APTITUDE A
L'ACCUMULATION DU
RUISSELLEMENT
SUR LE BASSIN VERSANT DE
L'AZERGUES (69-FRANCE)
D'APRES LA METHODE IRIP**

Légendes :

Indice d'accumulation



Date : 11/2013
Auteur : BONNET-CARRIER S.
Méthode utilisée : IRIP
Projection : Lambert 93

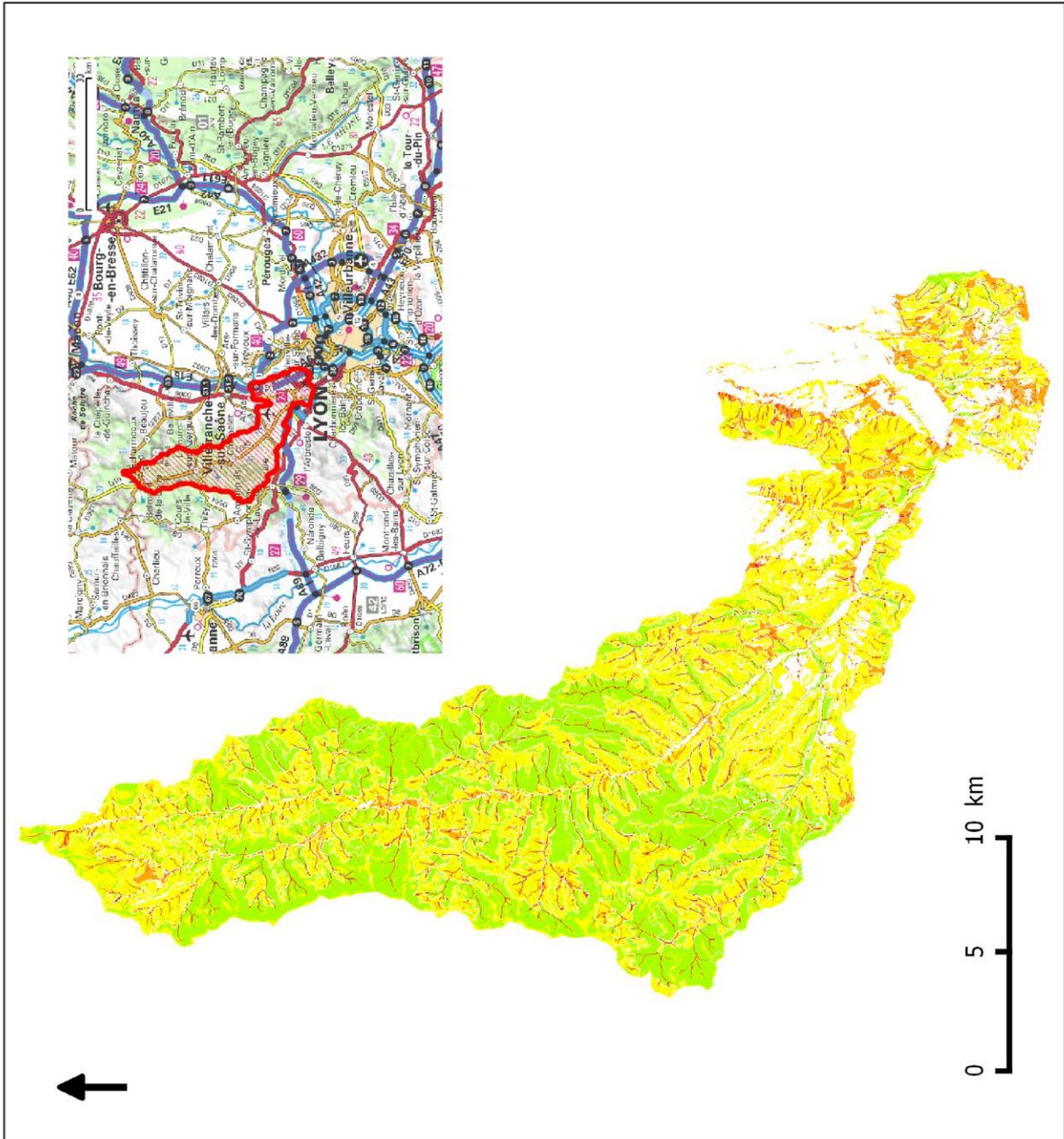


Figure 29 : Carte d'aptitude à la production du ruissellement sur le bassin versant de l'Azergues

3.3 Validation In Situ de la méthode IRIP

La validation des cartes IRIP sur le bassin de l’Azergues reste encore **incomplète**. Les différentes pistes et perspectives de validation (évoquées en partie 2.3) n’ont, pour l’heure, pas été entièrement explorées pour le bassin versant de l’Azergues. Pour autant, des résultats préliminaires ainsi que des améliorations à ceux-ci sont présentés ci-dessous pour chaque type de cartes.

3.3.1 Validation des cartes de production du ruissellement

Les cartes d’aptitude à la production du ruissellement sont les cartes les plus **difficilement validables** (partie 2.3.1). Actuellement, la validation concernant ces cartes n’a été évoquée qu’avec le SMRPCA. Il faudrait encore rencontrer des élus locaux, des exploitants et les autres gestionnaires de bassin versant.

La validation des cartes de production du ruissellement pour le bassin versant de l’Azergues **repose sur l’utilisation des données concernant les infrastructures de protection existantes : les bassins de rétention (figure 30)**. Ces données nous ont été fournies par le syndicat mixte de rivière de l’Azergues (SMRPCA).

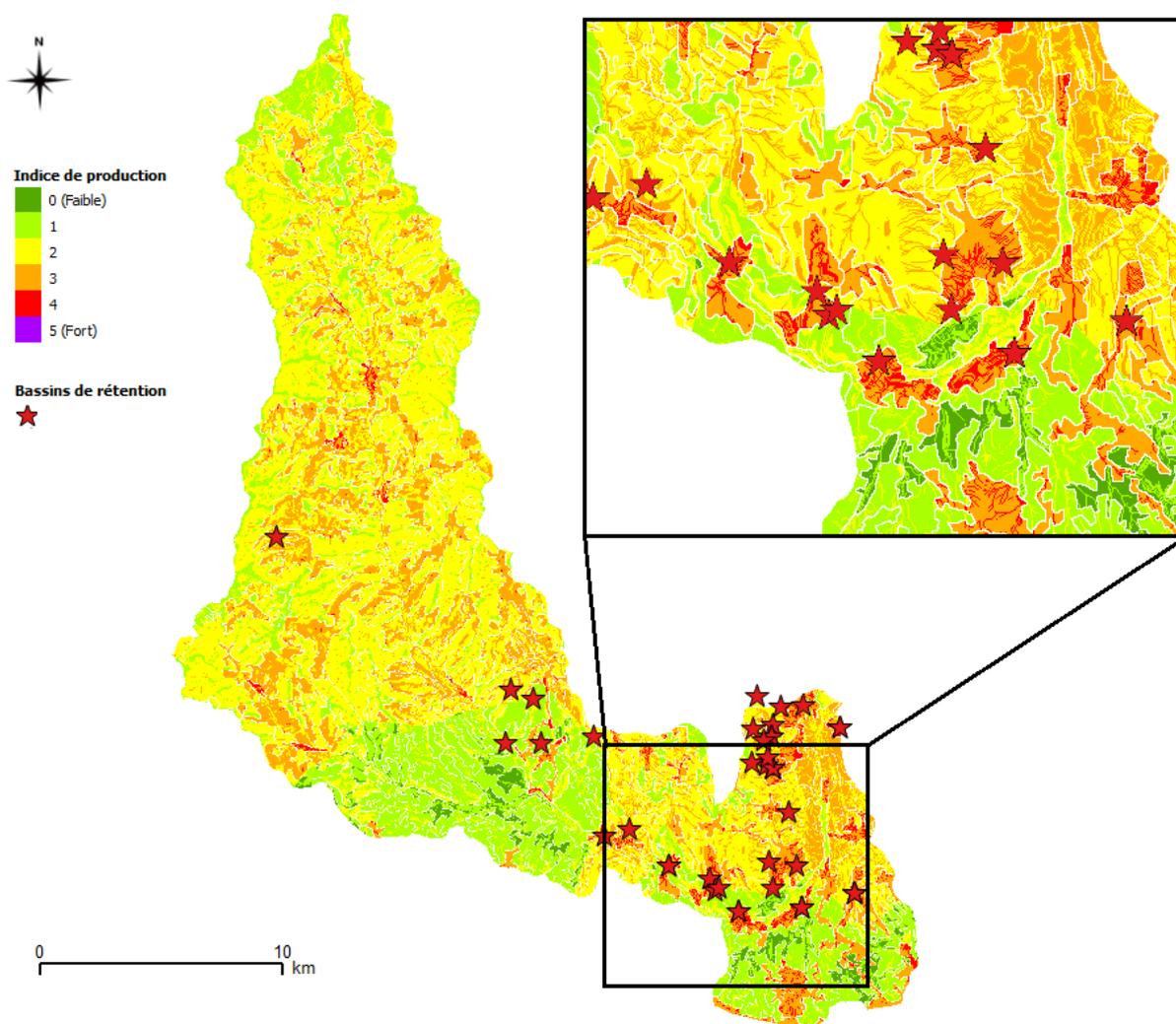


Figure 30 : Comparaison de la carte sensibilité à la production du ruissellement et la localisation des bassins de rétention sur le bassin versant de l’Azergues

Comme le montre la figure 30, **deux principales informations nous sont données par l'utilisation des bassins de rétentions** pour la validation des cartes de production de la méthode IRIP pour le bassin versant de l'Azergues :

- Les bassins de rétention sont essentiellement concentrés sur l'aval du bassin versant. Cela s'explique par la présence des enjeux à l'aval dont la protection induit la création de bassins de rétentions. **La validation de la carte d'aptitude à la production du ruissellement ne pourra s'effectuer qu'à l'aval du bassin.**
- La présence de bassins de rétention est une indication du phénomène physique rencontré par les gestionnaires locaux.

Une première analyse mise en avant, correspond au niveau de sensibilité environnant à l'aplomb des bassins de rétention. Les résultats obtenus sont synthétisés dans le tableau 7 ci-dessous :

Carte de production						
Niveau de sensibilité IRIP	0	1	2	3	4	5
Nombre de bassins de rétention	0	1	4	17	7	0
Répartition des bassins de rétention selon le niveau de sensibilité sur le bassin versant de l'Azergues (%)	0,00	3,45	13,79	58,62	24,14	0,00

Tableau 7 : Niveau de sensibilité de production des bassins de rétention sur le bassin versant de l'Azergues

On remarque que **près de 80% des bassins de rétention sont situés sur des pixels avec un niveau de sensibilité fort (3-4)**. Les bassins de rétention étant par définition des ouvrages hydrauliques de stockage temporaire afin de limiter l'impact sur les enjeux présents peuvent aussi être utilisés pour modifier les axes d'écoulement du ruissellement.

Cette dernière conséquence nous amène à nous poser la question d'une possible proportionnalité du nombre de bassin de rétention en fonction des sensibilités au ruissellement IRIP (figure 31).

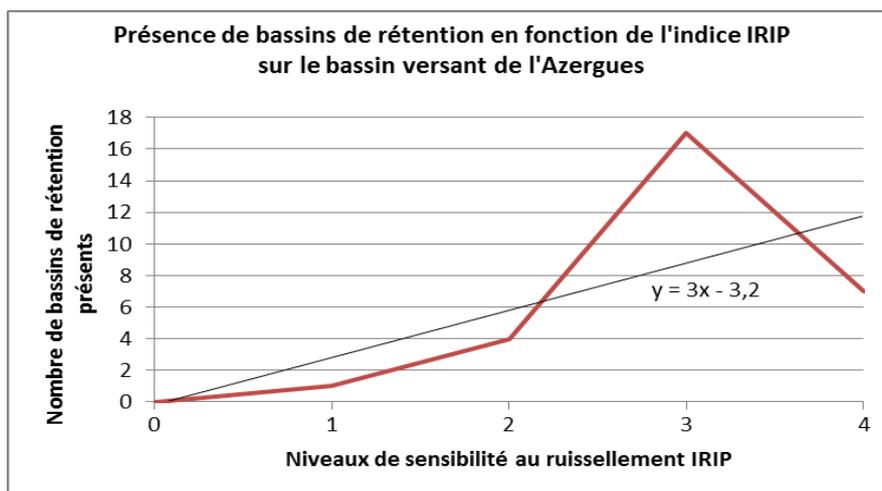


Figure 31 : Graphique du nombre de bassins de rétention en fonction des indices IRIP

La courbe rouge correspond au nombre de bassins de rétention et la courbe noire à une courbe de tendance. **On remarque une certaine tendance à la proportionnalité jusqu'à l'indice 3 (pour confirmer cette tendance, une étude avec un échantillon de bassins de rétention plus important serait nécessaire).** Cette question de proportionnalité dans un objectif de validation de la méthode IRIP nous invite à regarder de plus près les caractéristiques de ces bassins de rétention.

Afin de pouvoir se lancer sur la piste d'une méthode de validation, il faut arriver à hiérarchiser les bassins de rétention en fonction de leurs volumes de stockage (figure 32 et carte complète en annexe 4) en partant du principe qu'un bassin de rétention possédant un volume important devrait être l'exutoire d'un versant très ruisselant (indice IRIP fort). Ne pouvant déterminer le bassin versant de chaque bassin de rétention, à l'heure actuelle, nous avons utilisé la technique des plus proches voisins afin de déterminer le seuil de sensibilité où est situé le bassin de rétention.

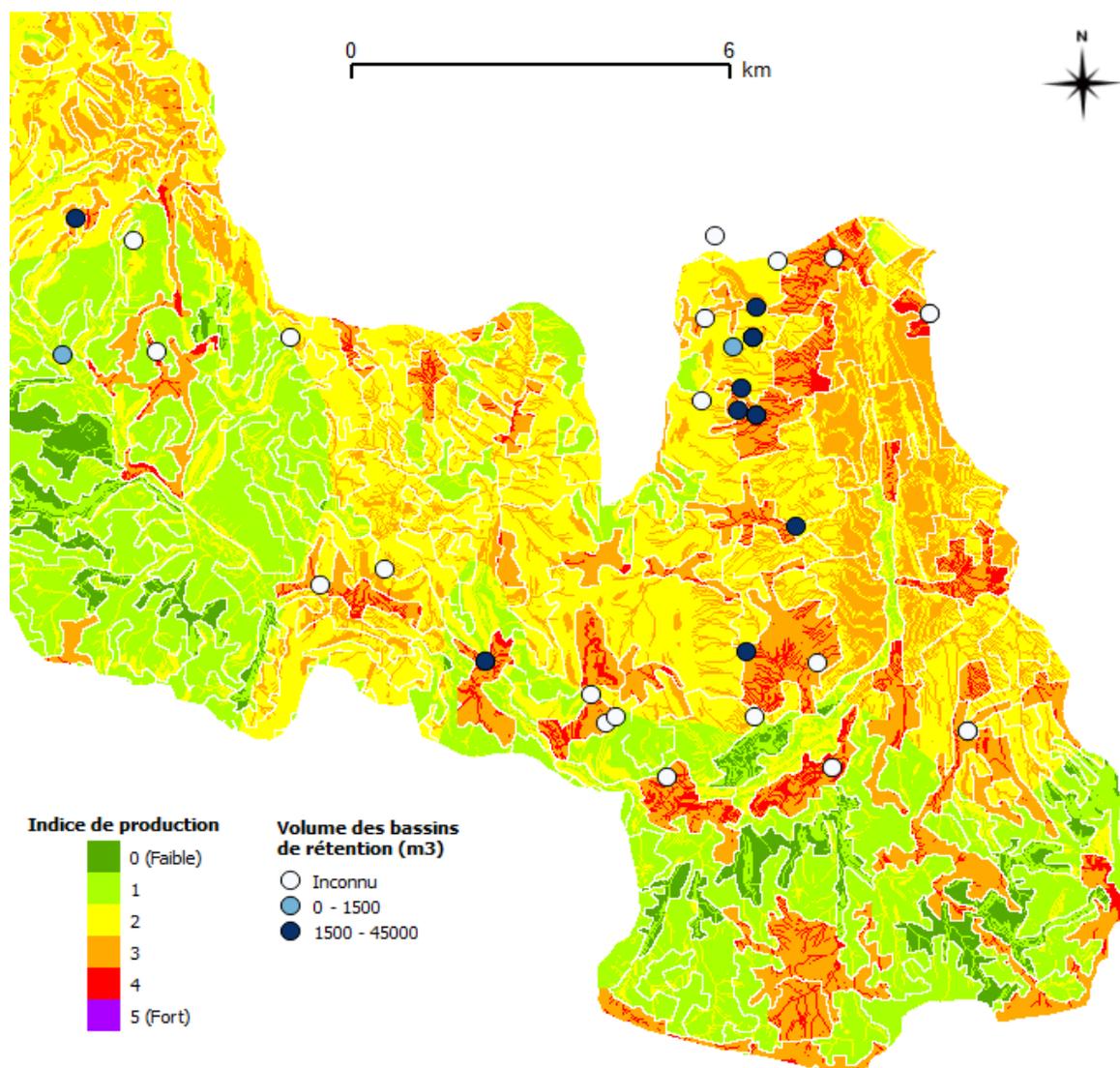


Figure 32 : Mise en corrélation du volume des bassins de rétention avec la carte de production du ruissellement

La figure 32 montre bien que les bassins de rétention ayant un grand volume de stockage sont situés sur des zones à fort potentiel de ruissellement selon IRIP (indice 3-4). Beaucoup de bassins ne sont pas renseignés. Il serait intéressant de récupérer ces données auprès des gestionnaires de ces ouvrages afin d'affiner notre

expertise. Une autre source de validation pourrait être l'utilisation des débits en sortie de ces ouvrages. Ici aussi une collecte de ces données ouvrirait une piste de validation supplémentaire.

La confirmation de l'hypothèse énoncée ci-dessus, à savoir que les bassins de rétention ayant un grand volume de stockage sont situés sur des zones à fort potentiel de ruissellement, passe par une étude statistique des données collectées. En effet, si une loi de proportionnalité venait à exister, alors une hiérarchisation en fonction du niveau IRIP du volume des bassins de rétention pourrait se faire (figure 33).

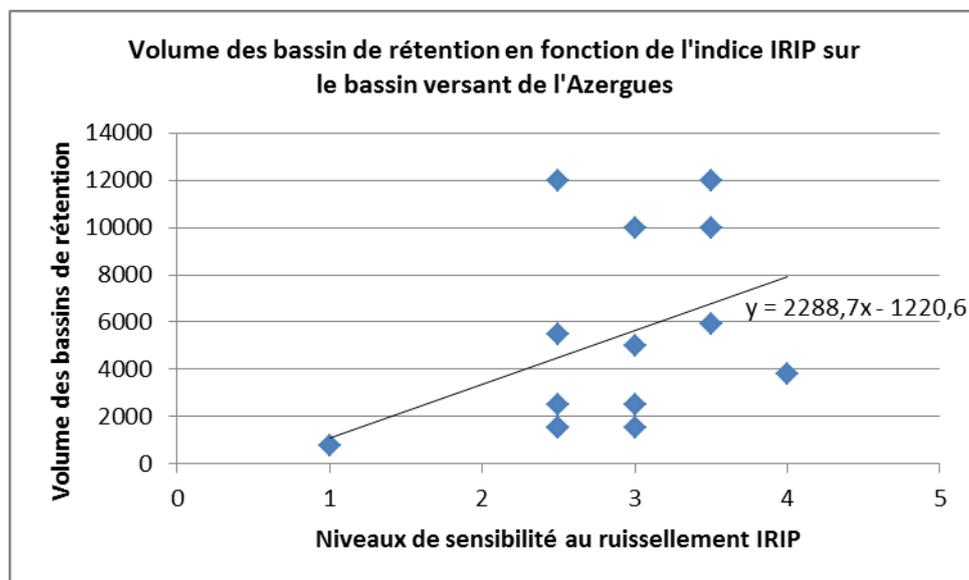


Figure 33 : Volume des bassins de rétention en fonction du niveau de sensibilité IRIP

Au vue de la figure 33, il ne semble pas y avoir de relation de proportionnalité entre le volume des bassins de rétention et le niveau de sensibilité au ruissellement IRIP sur le bassin versant de l'Azergues. **Ce constat est à nuancer du fait du faible nombre de données disponible lors de cette étude. Ici aussi, une étude plus complète avec un échantillon de bassins de rétention beaucoup plus important pourrait donner des résultats différents.**

L'utilisation des niveaux de sensibilité à l'aplomb des pixels voisins des bassins de rétention a un intérêt satisfaisant dans la méthode de validation des zones de production du ruissellement. La présence des ouvrages sur de fortes zones de production est logique puisque bâti dans un objectif de lutte contre les eaux pluviales non infiltrées. En poussant cette première analyse, il est possible de mettre en évidence le bassin versant correspondant aux bassins de rétention afin d'en déduire le taux de surface contributive. Cette seconde analyse serait plus satisfaisante hydrologiquement et permettrait d'obtenir des résultats statistiques plus corrects.

3.3.2 Validation des cartes de transfert du ruissellement

L'utilité des bassins de rétention sur des zones de fortes accumulations est quasi nulle puisque ceux-ci ont un rôle accumulateur en amont de ces zones accumulatrices afin d'en diminuer l'impact. Autrement dit, seules les zones de production et de transfert peuvent impacter la création d'un bassin de rétention. Afin de comparer et de pouvoir dissocier l'action de ces bassins de rétention sur le transfert du ruissellement, un travail similaire à celui décrit ci-dessus a été réalisé sur les axes de transfert (tableau 8) :

Carte de transfert						
Niveau de sensibilité IRIP	0	1	2	3	4	5
Nombre de bassins de rétention	18	9	2	0	0	0
Répartition des bassins de rétention selon le niveau de sensibilité sur le bassin versant de l’Azergues (%)	62,07	31,03	6,90	0,00	0,00	0,00

Tableau 8 : Niveau de sensibilité de transfert des bassins de rétention sur le bassin versant de l’Azergues

Le tableau 8 illustre bien le fait que **les ouvrages n’ont pas été implantés pour lutter contre le transfert du ruissellement** (près de 95% des ouvrages sont situés sur des zones de très faibles sensibilités au transfert).

La validation des zones de transfert du ruissellement est basé, dans ce rapport, sur des données terrain observées par le par le syndicat mixte de rivière de l’Azergues (SMRPCA). Une étude fine a été réalisée pour connaître les chemins des eaux ruisselantes sur les bassins versants de l’Alix, du Fourcon, de la Goutte-Molinante, de la Nizy, du Tagnand et du Vernier (tous sous bassins versant de l’Azergues) situés en moyenne Azergues en amont de la confluence avec la Brévenne-Turdine. Ces données ont une pertinence importante mais reste trop localisé pour permettre une validation complète de la carte de transfert du ruissellement sur le bassin versant de l’Azergues.

Dans un objectif de validation absolue, nous aurions besoin de ce type de données sur l’ensemble du bassin versant. Pour cela il serait utile de pouvoir contacter des habitants ou exploitants locaux afin de pouvoir récolter des informations sur les chemins de l’eau.

Localement, d’autres types de contact peuvent être envisagés. Les banques de données utilisées par les services municipaux de voiries ou les services de sécurités civiles sur l’accentologie du réseau de transport sont des sources potentielles de méthode de validation de la carte de transfert du ruissellement.

3.3.3 Validation des cartes d’accumulation du ruissellement

Tout comme pour la carte de transfert du ruissellement, **des données sont manquantes pour permettre une validation absolue de la carte d’aptitude à l’accumulation du ruissellement.** Des pistes de réflexion peuvent être mises en avant :

- Tout d’abord, pour une raison intrinsèque à la carte. **L’absence de données dues à « l’effet de bord » handicape fortement la pertinence de la carte d’accumulation.** En effet, la validation des cartes d’accumulation passe par la présence d’enjeu (habitations ou infrastructures), or ceux-ci sont surtout présents en aval du bassin sur les zones de « vide » (cf. partie 3.2.1 sur l’occupation des sols de l’Azergues).
- Ensuite, mise à part le syndicat mixte de rivière de l’Azergues (SMRPCA), **aucun contact n’a été établi avec des élus locaux, des responsables de bassins ou des assureurs.** Les bases de données fournies par ces acteurs seraient idéales pour mettre en comparaison la carte IRIP produite et les zones réellement affectées. De plus, une prise de contact avec des propriétaires

sinistrés, identifiés via le cadastre, sur des zones sensibles à l'accumulation du ruissellement serait une piste de validation complémentaire. Enfin, un contact avec des assureurs locaux et des élus locaux, afin d'obtenir la localisation et l'historique des déclarations de sinistres survenus sur ces zones sensibles, pourrait permettre l'utilisation d'un autre moyen de validation de la méthode sur les zones d'accumulation.

- **Enfin, l'absence d'évènements significatifs lors de la période d'avancement de ce travail.** Ainsi aucun stigmate d'accumulation du ruissellement n'a pu être mis en évidence sur cette période par les auteurs. Une analyse du bassin versant sur une plus longue durée permettrait d'obtenir ce type d'informations.

En résumé :

- **L'indicateur de ruissellement IRIP a permis la création de carte de ruissellement (production/transfert/accumulation) sur le bassin versant de l'Azergues.**
- **Le bassin versant de l'Azergues présente de fortes zones de production de ruissellement en aval.**
- **L'utilisation de la géolocalisation des bassins de rétention a permis une première approche de la validation de la carte de production de ruissellement sur le bassin versant de l'Azergues.**
- **D'autres méthodes de validation seraient nécessaires pour valider de manière absolue les différentes cartes produites par le logiciel IRIP.**

IV. Éléments de validation de la méthode IRIP sur le bassin versant du Gardon et de la Nartuby

4.1 Présentation des bassins versant du Gard et de la Nartuby

La méthode IRIP a pu être testée sur deux autres bassins versant aux caractéristiques différents de celui de l’Azergues. Il s’agit **des bassins versant du Gardon (30) et de la Nartuby (83)**.

4.1.1 Le bassin versant du Gardon

Le bassin versant du Gard est **un grand bassin versant de près de 2160 km² de forme allongé** situé dans le sud de la France (figure 34) répartis sur deux départements et 148 communes ; la population qui réside sur le bassin versant est estimée à 194 000 personnes.

- **Géomorphologie du bassin versant du Gardon :**

Le Bassin versant du Gardon est **délimité au nord par les monts cévenols** (chaîne de montagnes situées au sud du massif central d’altitude moyennes avec le Mont Lozère (1699m) comme point culminant), et **au sud par les plaines et plateaux méditerranéens** (avec une élévation faible située entre 0 et 200m d’altitude).

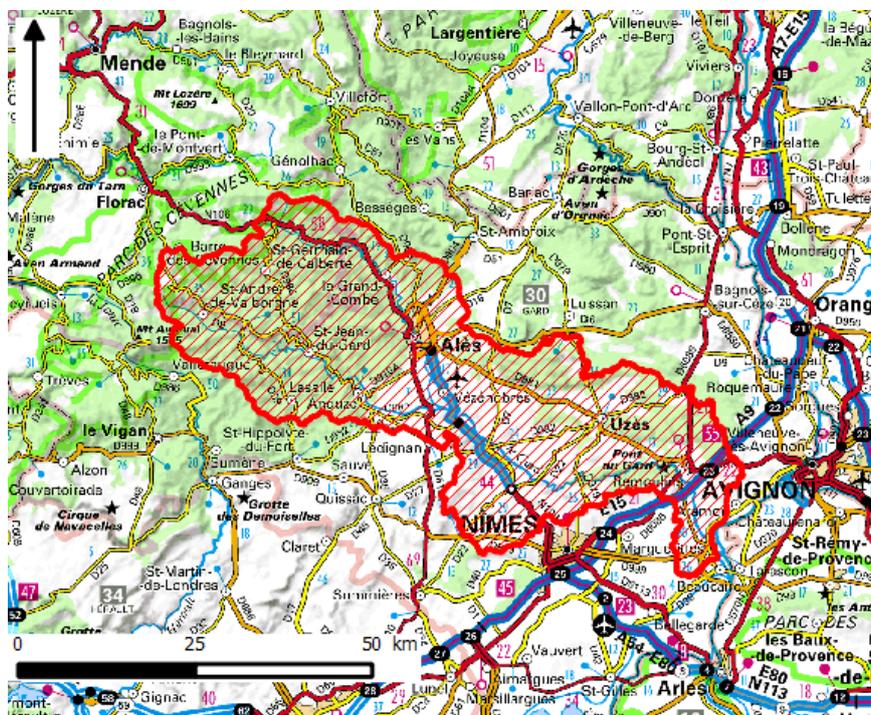


Figure 34 : Localisation du bassin versant du Gardon sur une Carte IGN à 1/1 000 000

Du point de vue climatique, le bassin versant du Gardon **est soumis à un climat méditerranéen** caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides. Les

précipitations les plus importantes se déroulent en automne où elles représentent en moyenne 2/3 du volume annuel sous formes d'averses intenses (pluies cévenoles).

Géomorphologiquement, le bassin peut être divisé en différentes entités géographiques homogènes (DIREN 2003):

- **Les Cévennes** : réparties sur les départements du Gard et de la Lozère, elles sont marquées par de fortes pentes et des vallées encaissées.
- **Le piémont cévenol** : les reliefs y sont moins marqués, les cultures et l'urbanisation se sont développés dans des plaines relativement étroites.
- **La Gardonnenque** : depuis la confluence des Gardons jusqu'aux gorges, la Gardonnenque est une large plaine alluviale bordée par des reliefs peu marqués.
- **Les gorges** : le Gardon est engorgé sur environ 25 kilomètres, la vallée est très encaissée et méandre au sein d'un large plateau calcaire.
- **L'Uzège** : secteur de garrigues et cultures situé au nord des gorges, l'Uzège est drainé par l'Alzon et les Seynes.
- **Le bas Gardon** : à la sortie des gorges, le Gardon reprend une circulation en méandres libres à l'intérieur des dépôts alluviaux du Rhône.

- **Hydrologie du Gardon :**

Dernier affluent du Rhône, le Gardon prend sa source dans les Cévennes lozériennes avant de traverser le département du Gard d'ouest en est. Dans ce territoire, l'appellation Gardon ne concerne pas une rivière unique mais un réseau hydrographique complexe composé de différents cours d'eau (Gardon d'Alès, d'Anduze, de Mialet, de Sainte Croix...).

Le cours d'eau du Gardon, et ses affluents (linéaire de 500 km) **possèdent un régime typiquement méditerranéen** caractérisé par des cours d'eau très irrégulier avec des crues subites pouvant être catastrophiques (exemple de la crue ayant engendré les ruptures de digues du Briançon et provoqué l'inondation de la plaine de Théziers et du village d'Aramon dans la nuit du 9 au 10 septembre 2003) et des étiages très accusés.

- **Pédo-géologie du bassin versant du Gardon :**

Sur le plan géologique, le sous-sol du bassin du Gardon est constitué par des terrains d'âge et de nature variés (Rollet 2007). On y trouve des formations allant de l'antécambrien au quaternaire récent. Schématiquement le département peut se diviser en quatre grandes zones :

- **La zone cévenole au nord-ouest** principalement constitué de schistes métamorphiques et de granite.
- **Les garrigues au centre** constitué par des calcaires karstifiés.
- **Les Costières au Sud Est** couvert par des dépôts alluvionnaires quaternaires et localement par des limons.

- Le "bas-pays" (plaine rhodanienne et plaine littorale) essentiellement composé de dépôts quaternaire plus récent d'origine fluviale, deltaïque et littorale.

La pédologie du bassin versant du Gardon est assez similaire à ce que l'on retrouve fréquemment en zone méditerranéenne française. **Lorsqu'il y a présence de sol (certaines parties du bassin présentent une mise à nue du substratum notamment en amont du bassin versant du Gardon) celui-ci présente des épaisseurs assez faibles mais une assez forte perméabilité due à une composition fortement sableuse.**

- Occupation des sols :

L'occupation des sols du bassin versant du Gardon est à dominante forestière. Cet aspect est notamment présent en amont du bassin sur les reliefs cévenols. De la zone du piémont jusqu'à la confluence avec le Rhône, **une large bande agricole s'est développée en bordure du Gardon essentiellement composé de vignobles.**

L'urbanisation du bassin versant est en pleine expansion. Cette expansion est remarquable au niveau de la ville d'Alès aux pieds des monts cévenols et en périphérie des grandes villes bordant le bassin versant du Gardon (Nîmes et Avignon).

4.1.2 Le bassin versant de la Nartuby

La figure 35 donne l'extension du bassin versant de la Nartuby. **La superficie totale est de 218 km² à sa confluence avec l'Argens.** **Le bassin versant possède une forme particulière en entonnoir.** Au niveau de la commune de Rebouillon, 60 % du bassin versant est formé, dont la moitié environ en provenance de la Nartuby d'Ampus.

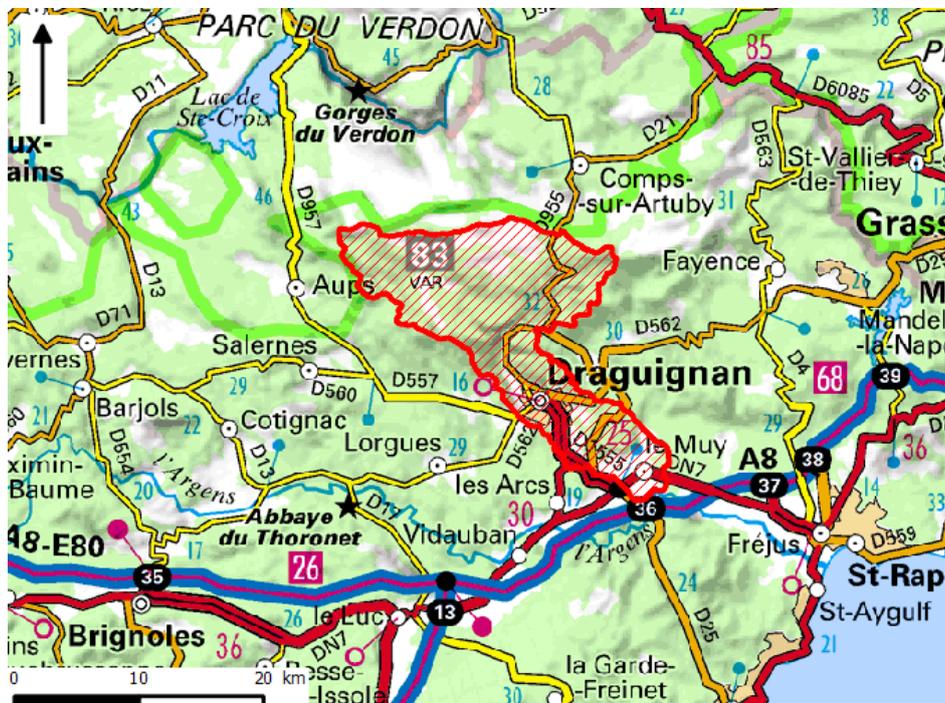


Figure 35 : Localisation du bassin versant de la Nartuby sur une Carte IGN à 1/1 000 000

Tout comme pour le bassin versant du Gardon, le bassin de la Nartuby est soumis à un régime climatique méditerranéen engendrant de fortes précipitations en

automne et provoquant des réponses hydrologiques importantes et rapides du cours d'eau de la Nartuby (crue de 1974, 1994, 1996 et 2000 qui étaient sensiblement décennales avec un débit de pointe de 80 m³/s pour la crue du 23 novembre 2000).

Le cours d'eau de la Nartuby possède une longueur de l'ordre de 30 km depuis Montferrat jusqu'à la confluence avec l'Argens.

Sur le plan géologique, une grande partie du bassin versant est constitué de calcaires jurassiques perméables très karstifiés avec un grand pouvoir de rétention. Du fait de ce caractère karstifié, le bassin versant de la Nartuby stocke assez facilement des pluies de 40 mm. Au-delà, le réservoir produit un « effet de chasse » engendrant une augmentation de débit brutale (Direction Départementale de l'Équipement Var *et al.*, 2005).

Sur le plan pédologique, la Nartuby est assez similaire au bassin versant du Gard avec **lorsque les roches du substratum n'affleurent pas une texture plutôt sableuse à sablo-limoneuse.**

Enfin sur le plan de l'occupation des sols, **près de 80 % de la surface du bassin versant est composé de zones boisées ou agricoles.** La commune de Draguignan (et sa périphérie) en aval du bassin versant regroupe le principal centre urbain.

En résumé :

- **Deux bassins versants du sud de la France de superficie différente : le Gardon environ 2000 km² et la Nartuby environ 200 km².**
- **Deux formes de bassins différentes : le Gardon allongé et la Nartuby en entonnoir.**
- **Présence d'une occupation des sols principalement forestière et agricole avec quelques centres urbains pour ces deux bassins versants**
- **Des caractéristiques climatiques, géologiques et pédologiques similaires aux deux bassins versants.**
- **Un phénomène de crue rapide et violent en réponse à des pluies intense (pluies cévenoles) présent sur les deux bassins.**

4.2 Diagnostic du ruissellement et méthode de validation sur le bassin versant du Gardon

Rappel : L'ensemble des cartes produites a été réalisé au sein d'IRSTEA-Lyon centre de Villeurbanne en date des mois d'octobre à décembre 2013, dans le cadre du contrat de M. BONNET-CARRIER. Les cartes IRIP produites dans ce document ont été réalisées par la version 1.0 bêta du logiciel développé par la SNCF sur la méthode IRIP.

4.2.1 Application d'IRIP sur le bassin versant du Gardon

- **Données de base :**

Plusieurs données d'entrée sont nécessaires au fonctionnement d'IRIP sur le bassin versant du Gardon. L'ensemble des données utilisées est résumé dans le tableau (Tableau 9) :

Types de données	Caractéristiques		Provenance	Commentaires
	Format	Echelle de résolution		
BV Gardon	Vecteur	-	IRSTEA 2013	Extraction depuis le MNT IGN 25M
MNT	Raster	1/25 000e	BD TOPO IGN 25M	Données topographiques
Occupation des sols	Vecteur	1/250 000e	IFEN 2006	Programme Corinne Land Cover 250M
Occupation des sols	Raster	1/25 000e	IFEN 2006	Programme Corinne Land Cover 25M
Pédologie	Vecteur	1/1 000 000e	BD INRA 1998	Données sols INRA 1998

Tableau 9 : Récapitulatif des données utilisées dans la méthode IRIP pour le bassin versant du Gardon

La détermination des données pédologiques sur l'érodibilité, l'épaisseur et la perméabilité des sols a été effectuée d'après la base sol INRA 1998 au 1/1 000 000. L'analyse de chaque SMU (Soil Mapping Unit) en fonction de sa texture principale a permis d'en déduire ces informations manquantes. Ces informations pédologiques utilisées par IRIP sont résumées dans le tableau 10 ci-dessous :

N° SMU	Facteur IRIP		
	Erodibilité	Epaisseur	Perméabilité
330094	1	1	1
330098	0	1	1
330109	1	0	0
330110	1	0	0
330111	1	0	0
330112	1	0	0
330162	1	0	0
330632	1	0	0
330662	1	0	0
330674	1	0	0
330675	1	0	0
331332	1	0	0

Tableau 10 : Récapitulatif des facteurs IRIP pour chaque SMU sur le bassin versant du Gardon

- Carte de production du ruissellement :

Cette carte produite par IRIP va mettre en évidence les zones qui vont ruisseler de manière importante au cours d'un évènement pluvieux. La méthode IRIP nous permet d'obtenir la carte d'aptitude à la production du ruissellement ci-dessous (figure36) :

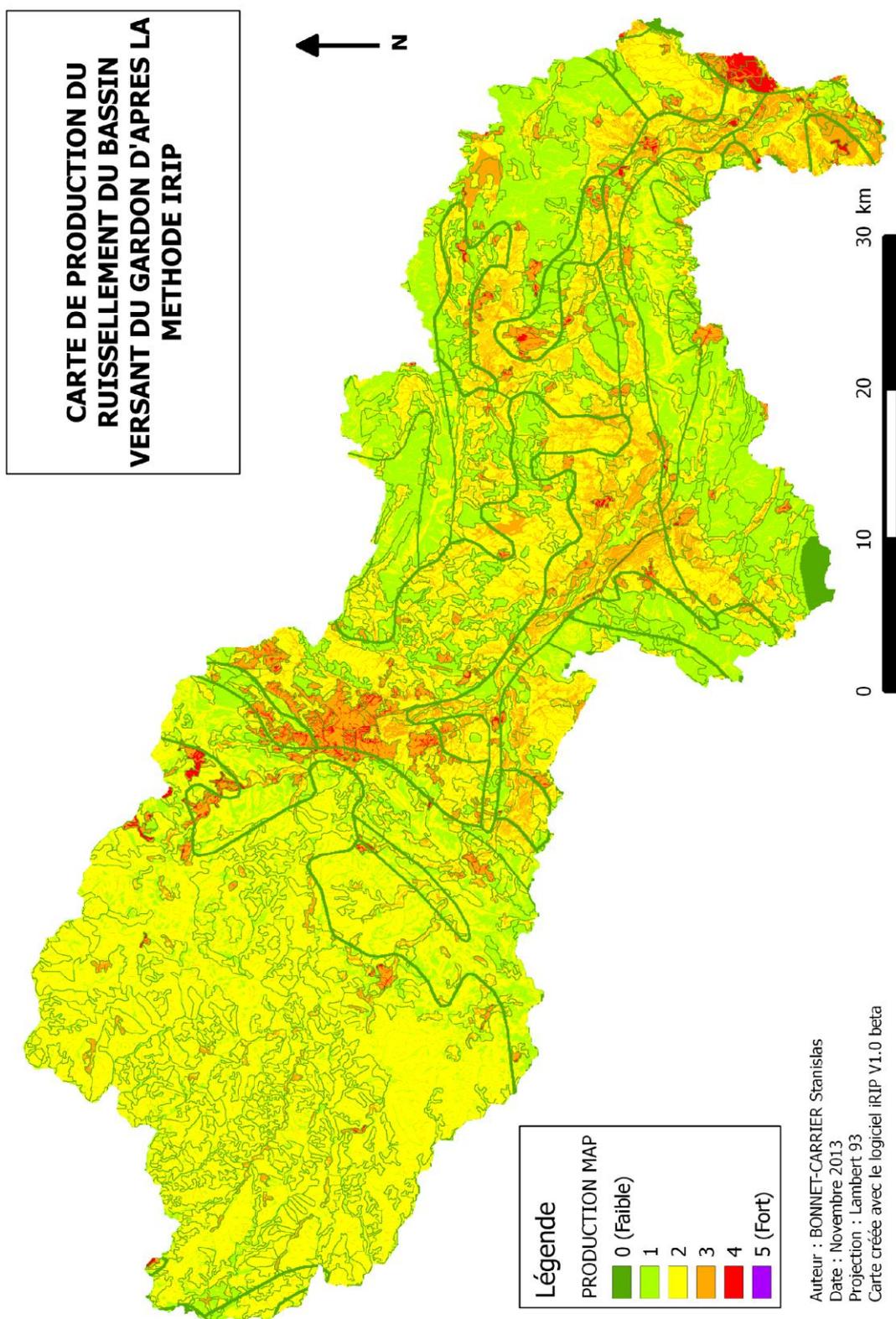


Figure 36 : Carte de production IRIP du bassin versant du Gardon

- Carte de transfert du ruissellement :

La carte de transfert du ruissellement selon la méthode IRIP va nous permettre d'obtenir la localisation spatiale des axes de transfert et d'en déterminer l'ordre d'importance. L'application d'IRIP sur le bassin versant du Gardon nous donne la carte de transfert suivante (figure 37) :

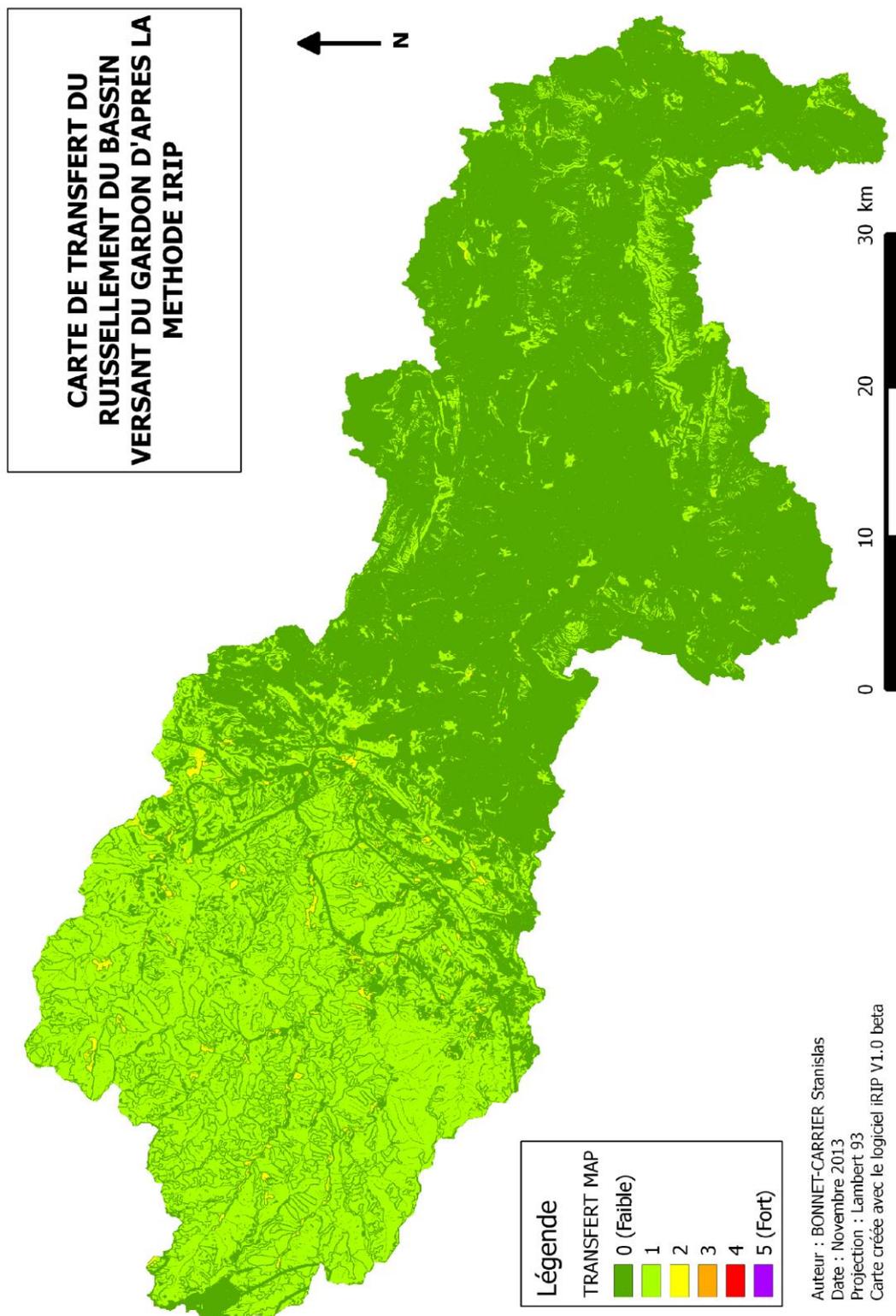


Figure 37 : Carte de transfert IRIP du bassin versant du Gardon

- Carte d'accumulation du ruissellement :

La carte d'accumulation du ruissellement selon la méthode IRIP va mettre en lumière les zones de stockage du ruissellement. L'application d'IRIP sur le bassin versant du Gardon nous donne la carte d'accumulation présentée en figure 38.

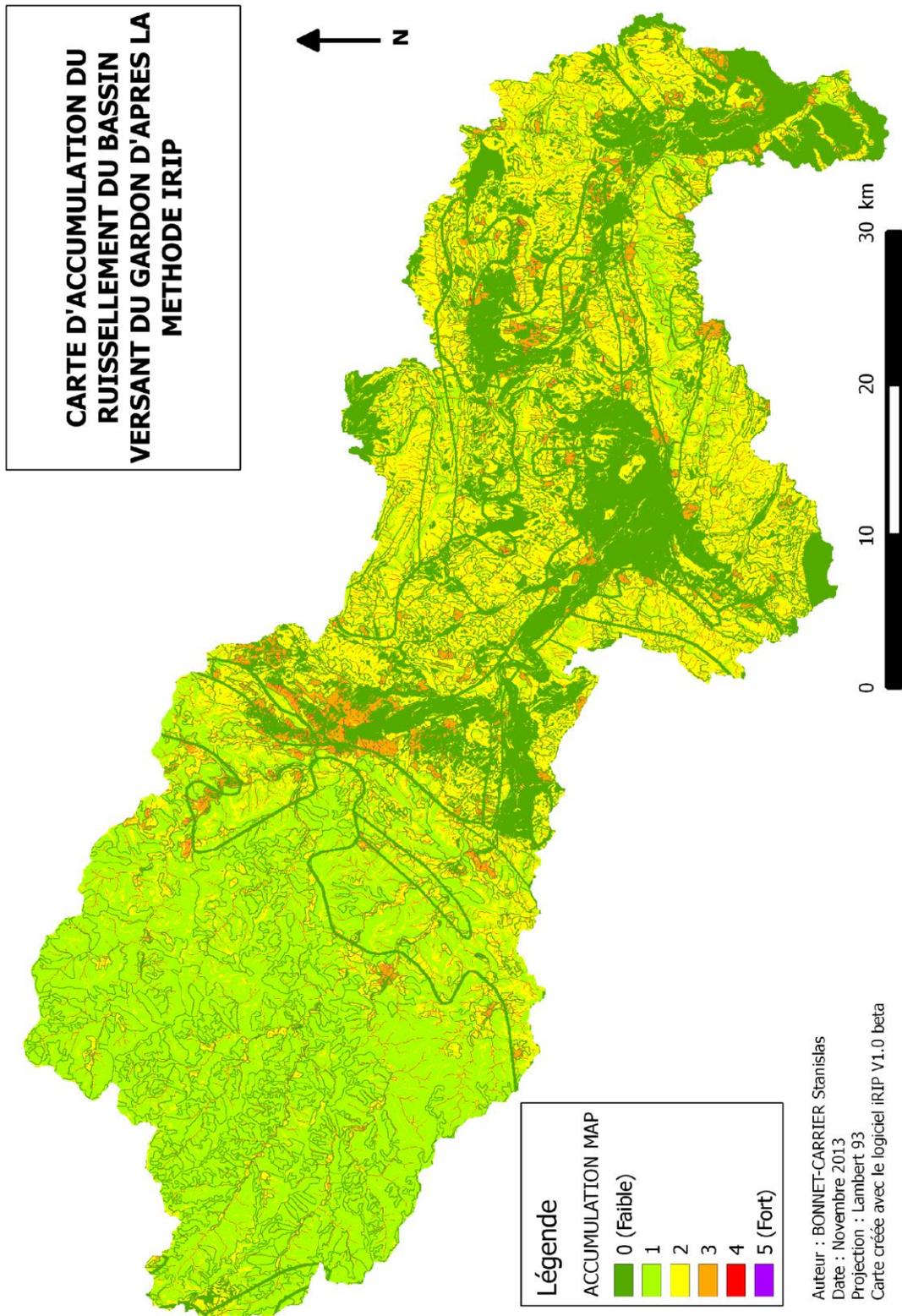


Figure 38 : Carte d'accumulation du ruissellement du bassin versant du Gardon

4.2.2 Éléments de validation de la méthode IRIP sur le bassin versant du Gardon

- **Éléments de validation pour la carte de production**

La carte de production du ruissellement par la méthode IRIP met bien en évidence le fait que le bassin versant du Gardon produit beaucoup de ruissellement. En effet, ce sont surtout les zones à fort reliefs (Cévennes) qui vont produire un ruissellement intense (niveaux de sensibilités 2 à 3) ainsi que les zones urbaines (ville d'Alès) et la bordure du Gardon essentiellement composée de terres agricoles (niveaux de sensibilités plus fort allant de 2 à 4).

La validation des zones de production est une problématique importante dans le cadre du développement de la méthode IRIP. En effet, ces zones sont souvent peu destructrices (érosion des parcelles, fine lame d'eau sur les réseaux routiers, etc...) et donc ne laissent aucunes stigmates de leurs présences post-événementielle.

Pour pallier cette difficulté, il existe différentes pistes de réflexion pouvant mener à une validation de la carte de production :

Tout d'abord, **l'utilisation de la localisation des infrastructures (bassins de rétentions, etc...) pourrait mettre en avant un état des lieux problématique à l'aplomb, ou à l'amont de ces ouvrages.** Une méthode similaire à celle utilisée pour la validation de la carte de production du bassin versant de l'Azergues pourrait être utilisée (cf. partie 3.3.1). La prise de contact avec des gestionnaires de bassins versants ou d'acteurs entretenant ces infrastructures serait une solution idéale pour collecter les données nécessaires. Ensuite, une autre piste serait **l'appel à des observateurs locaux pouvant indiquer la présence d'un ruissellement diffus sur des zones identifiées comme fortement ruisselantes par la méthode IRIP.** L'inconvénient de cette piste est la difficile acquisition des données disponibles (si elles existent) et l'échelle d'action très réduite de ces observateurs.

La validation passe aussi par la localisation des accidents observés sur les infrastructures. Ainsi une base de données importante est la base d'accidentologie du réseau routier : il s'agit **du Plan d'Intervention des Crises Hydrologiques (PICH) mise en place en 2004 par les services de la DDE du Gard** alors en charge de la gestion du réseau routier départemental. Cet inventaire comporte des informations précieuses sur l'origine des inondations observées et la période de retour de submersion estimée de manière empirique (Payrastra *et al.*, 2013).

Le couplage de la carte de sensibilité à la production du ruissellement par la méthode IRIP avec la base d'accidentologie PICH a permis la mise en évidence de points sensibles sur le réseau routier situé à proximité de forte zones de production (figure 39 et annexe 5).

Afin d'approfondir le sujet, les périodes de retour de submersion ont été ajoutée. Dans ce cas aussi, **on remarque que les routes les plus souvent submergées (périodes de retours faibles de l'ordre de 1 à 3 ans) sont situées au voisinage des forts niveaux de sensibilité (niveau 3-4).** On peut donc légitimement penser qu'il existe un lien entre le niveau de sensibilité produit par IRIP et l'accidentologie du réseau routier. Afin de mettre en évidence ce lien, une analyse statistique de la fréquence de submersion des routes en fonction du niveau de sensibilité produit par la méthode IRIP (figure 40).

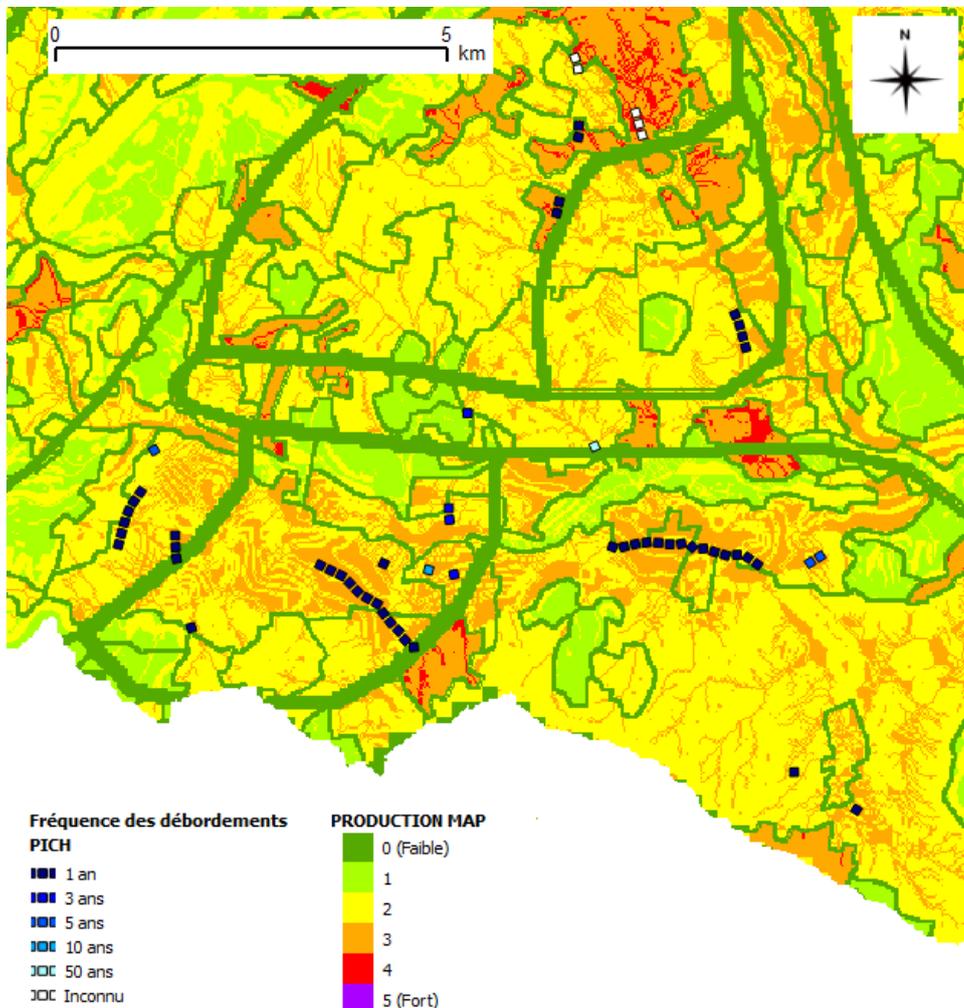


Figure 39 : Localisation des débordements de la base PICH sur la carte de production de ruissellement

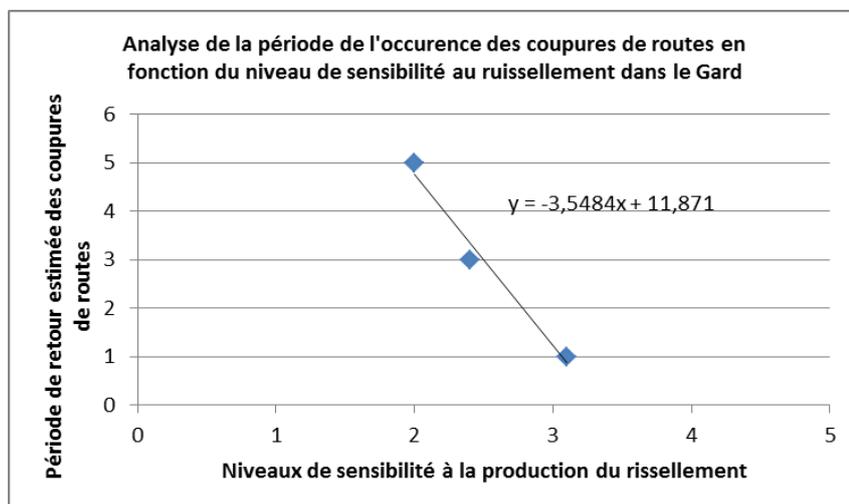


Figure 40 : Analyse de la fréquence de submersion des routes dans le Gard en fonction de l'indicateur IRIP

La figure 40 semble présenter une certaine proportionnalité (comme le montre la linéarité des points vis-à-vis de la courbe de tendance moyenne en noire) entre le niveau de sensibilité et l'occurrence des submersions. Dans ce cas aussi, les données utilisées sont trop peu nombreuses pour pouvoir obtenir une loi statistique pertinente pouvant être un élément de validation de la méthode IRIP. Il faudrait donc pouvoir compléter cette base de données en contactant les actuels

gestionnaires du réseau routier gardois (DDT) ou des observateurs ayant répertoriés ces coupures de routes sur plusieurs années de manière à déterminer une période de retour de submersion (ex : services de sécurités civiles, populations locales, gestionnaires de bassins versants...).

- **Éléments de validation pour la carte de transfert**

La carte de transfert du ruissellement obtenue via la méthode IRIP montre bien que le bassin versant du Gardon transfert peu le ruissellement (figure 37) puisqu'elle ne présente que des niveaux de sensibilités faibles (niveaux allant de 0 à 2). Cela peut s'expliquer par le fait que les zones de production soit proches géographiquement des zones d'accumulation du ruissellement réduisant ainsi la proportion du transfert de celui-ci.

La conséquence d'une faible propension à transférer le ruissellement est l'augmentation de la difficulté à trouver des éléments de validation sur la zone. **En effet, mise à part une différenciation amont/aval sur le bassin du Gardon, peu de zones remarquables au sens du niveau de sensibilité au ruissellement peuvent être validées à l'heure actuelle.**

Idéalement, un paramétrage de la sensibilité de la méthode IRIP ou l'utilisation de données plus fines pourrait permettre la mise en évidence de certains axes de transfert et une validation de la carte produite. L'utilisation des données de la base d'accidentologie routière PICH pourrait aussi être appliquée à la carte de transfert dans le cadre d'une validation absolue.

D'autres éléments de validation existent. **L'utilisation de la localisation des infrastructures et ouvrages hydrauliques (fossés, buses, enrochement...) œuvrant pour une modification des chemins de l'eau (axes de transferts)** permet la mise en exergue des zones problématiques sur lesquelles les élus locaux se sont penchés. Si un axe de transfert important (indice IRIP fort de l'ordre de 4-5) se situait sur une zone avec ce type d'infrastructure, alors les prédictions d'IRIP pour la carte de transfert du ruissellement pourraient alors être confirmées.

L'appel aux observateurs locaux est aussi une solution même si celle-ci reste difficile à mettre en œuvre du fait de l'empreinte géographique de la donnée fournie, souvent sur de très petits territoires.

En l'utilisation de **données fournies par la base CatNat, par des assureurs et réassureurs est aussi un élément de validation.** En effet, la localisation des sinistres et la nature de ceux-ci peuvent nous indiquer la présence ou non d'axes d'écoulement déterminés par la méthode IRIP.

- **Éléments de validation pour la carte d'accumulation**

Les questions de la validation de la carte d'accumulation du ruissellement sur le bassin versant du Gardon ne sont pas encore toutes résolues. En effet, la carte IRIP en figure 38 présente une faible sensibilité du bassin versant à l'accumulation du ruissellement.

L'utilisation de l'accidentologie du réseau routier n'est ici pas pertinente. En effet la carte IRIP mise en corrélation avec la base de données des coupures de routes ne semble pas présenter de prédisposition des coupures de routes par accumulation du ruissellement (annexe 5). En effet, il semblerait donc que seule la carte de production du bassin versant du Gardon soit capable d'expliquer les coupures de routes par inondation hors des cours d'eaux.

L'utilisation d'autres méthodes sont nécessaires à la validation des cartes IRIP. Ainsi l'utilisation des bases CatNat, la localisation d'incident dans des zones dépressionnaires par des observateurs locaux ou des gestionnaires des bassins versants ou encore l'observation terrain de stigmates (dépôts de sédiments pour les zones d'accumulation) peuvent fournir des éléments de validation sur le bassin du Gardon.

En résumé :

- **La méthode IRIP a permis de fournir une carte de production, de transfert et d'accumulation du ruissellement sur le bassin versant du Gardon.**
- **Le bassin du Gardon est un bassin très producteur mais peu accumulateur. La partie validation de la production du ruissellement est donc un enjeu essentiel pour ce bassin versant.**
- **La validation des zones de production est une vraie problématique puisqu'elles ne laissent aucune trace de leurs existences.**
- **L'utilisation de la base d'accidentologie des coupures de routes (base PICH) du Gard est pertinente pour la mise en évidence des zones de production du ruissellement.**
- **Une étude plus complète permettant de renseigner les points PICH incomplet permettrait d'avoir un échantillon statistique plus grand afin de déterminer une proportionnalité ou non entre la sensibilité des zones de production et l'occurrence des coupures de routes.**
- **Diverses pistes de réflexions ont été apportées concernant les moyens de validation des zones de transfert et d'accumulation pour le bassin versant du Gardon.**

4.3 Diagnostic du ruissellement et méthode de validation sur le bassin versant de la Nartuby

Rappel : L'ensemble des cartes produites a été réalisé au sein d'IRSTEA-Lyon centre de Villeurbanne en date des mois d'octobre à décembre 2013, dans le cadre du contrat de M. BONNET-CARRIER. Les cartes IRIP produites dans ce document ont été réalisées par la version 1.0 bêta du logiciel développé par la SNCF sur la méthode IRIP.

4.3.1 Application d'IRIP sur le bassin versant de la Nartuby

- **Données de base :**

Plusieurs données d'entrée sont nécessaires au fonctionnement d'IRIP sur le bassin versant de la Nartuby. L'ensemble des données utilisées est résumé dans le tableau (Tableau 11) :

Types de données	Caractéristiques		Provenance	Commentaires
	Format	Echelle de résolution		
BV Nartuby	Vecteur	-	IRSTEA 2013	Extraction depuis le MNT IGN 25M
MNT	Raster	1/25 000e	BD TOPO IGN 25M	Données topographiques
Occupation des sols	Vecteur	1/250 000e	IFEN 2006	Programme Corinne Land Cover 250M
Occupation des sols	Raster	1/25 000e	IFEN 2006	Programme Corinne Land Cover 25M
Pédologie	Vecteur	1/1 000 000e	BD INRA 1998	Données sols INRA 1998

Tableau 11 : Récapitulatif des données utilisées dans la méthode IRIP pour le bassin versant de la Nartuby

La détermination des données pédologiques sur l'érodibilité, l'épaisseur et la perméabilité des sols a été effectuée d'après la base sol INRA 1998 au 1/1 000 000. L'analyse de chaque SMU (Soil Mapping Unit) en fonction de sa texture principale a permis d'en déduire ces informations manquantes. Ces informations pédologiques utilisées par IRIP sont résumées dans le tableau 12 ci-dessous :

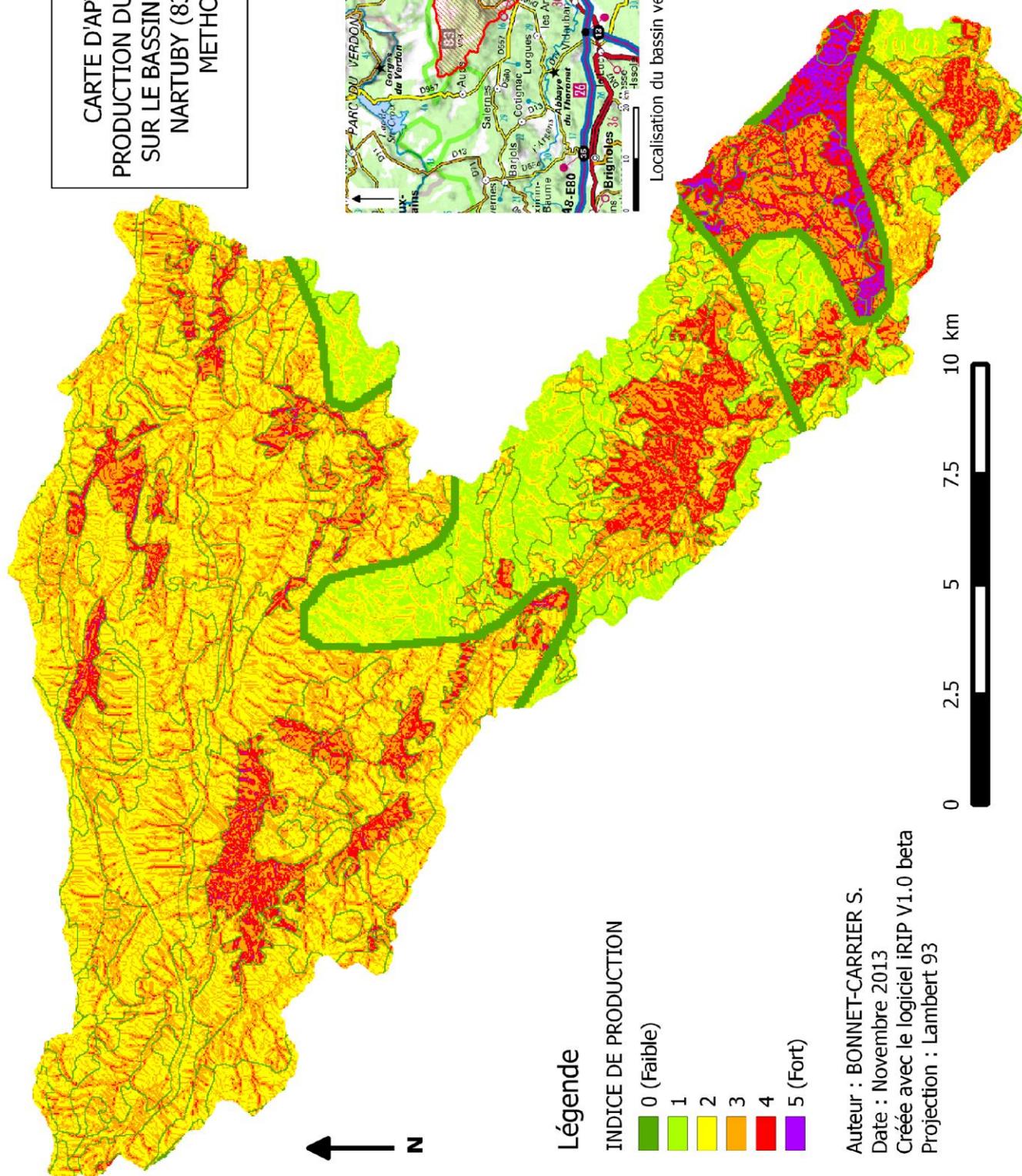
N° SMU	Facteur IRIP		
	Erodibilité	Epaisseur	Perméabilité
330094	1	1	1
330145	1	0	0
330160	1	0	0
330297	1	0	0
330661	1	0	0
390297	0	1	1

Tableau 12 : Récapitulatif des facteurs IRIP pour chaque SMU sur le bassin versant de la Nartuby

- **Carte de production du ruissellement sur le bassin versant de la Nartuby (figure 41) :**

Le bassin versant de la Nartuby est un bassin très producteur, notamment en aval (indice IRIP fort). Les bandes vertes sur la carte sont des artefacts dus à la rastérisation des données sols.

CARTE D'APTITUDE A LA
 PRODUCTION DU RUISSELLEMENT
 SUR LE BASSIN VERSANT DE LA
 NARTUBY (83) D'APRES LA
 METHODE IRIP



Légende

INDICE DE PRODUCTION

- 0 (Faible)
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5 (Fort)

Auteur : BONNET-CARRIER S.
 Date : Novembre 2013
 Créée avec le logiciel iRIP V1.0 beta
 Projection : Lambert 93



Localisation du bassin versant de la Nartuby

Figure 41 : Carte IRIP de la sensibilité à la production du bassin versant de la Nartuby

- Carte de transfert du ruissellement sur le bassin versant de la Nartuby (figure 42) :

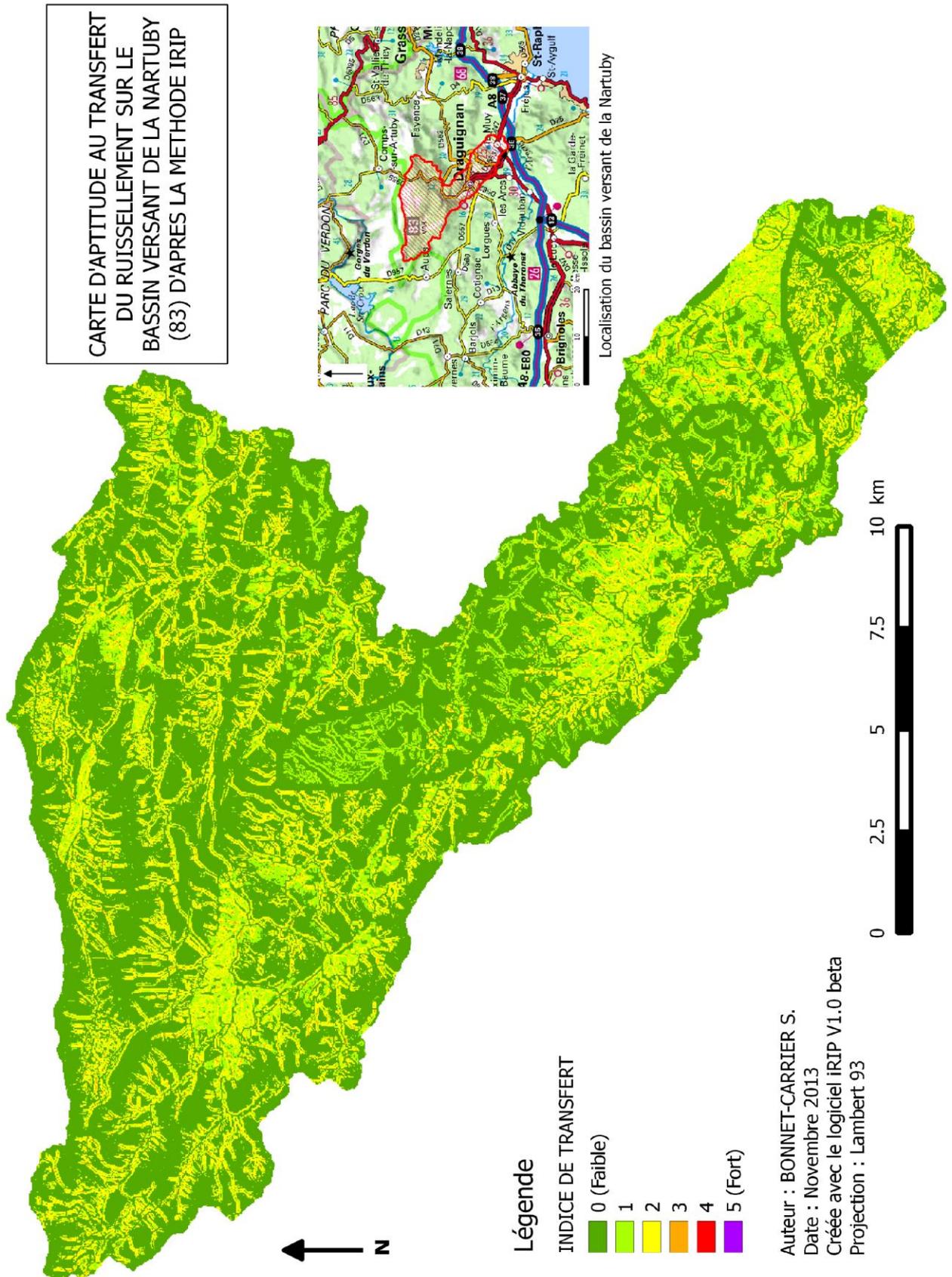


Figure 42 : Carte IRIP de l'aptitude au transfert du ruissellement sur le bassin versant de la Nartuby

- Carte d'accumulation du ruissellement sur le bassin versant de la Nartuby (figure 43) :

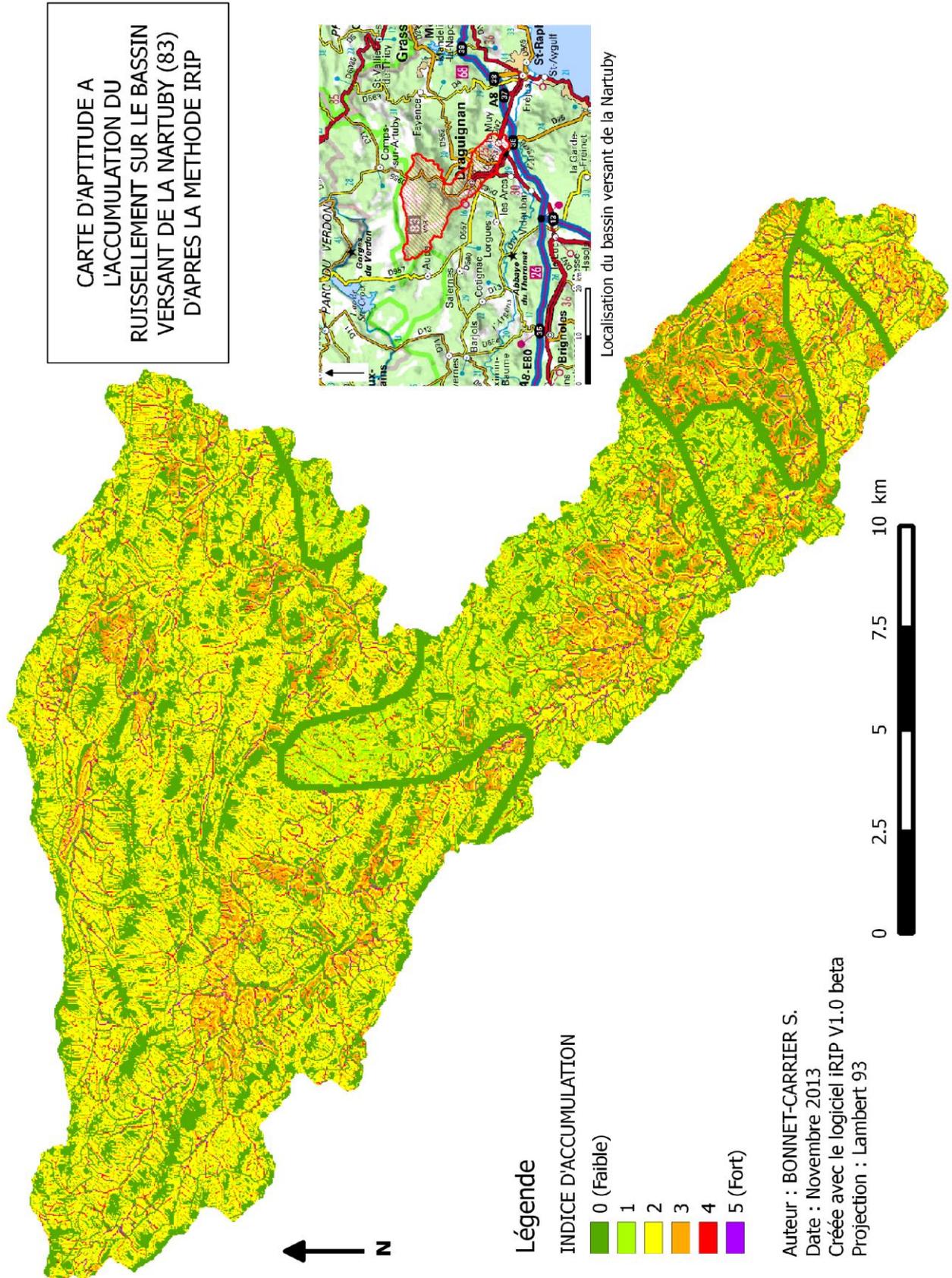


Figure 43 : Carte IRIP de l'aptitude à l'accumulation du ruissellement sur le bassin versant de la Nartuby

4.3.2 Intégration d'une notion de dynamique des écoulements dans la méthode IRIP

Actuellement, **la validation des cartes de ruissellement proposées par la méthode IRIP n'ont pas été soumises à des essais de validation.** Pour cela l'obtention de données « sinistres » (bases CatNat et assureurs, accidentologie des routes, etc...) ou des données d'observateurs locaux serait nécessaires.

Dans une thématique de réflexion sur les moyens de validation des cartes, **une autre hypothèse serait de pouvoir déterminer, à l'aide des cartes IRIP, un unique coefficient.** Ce coefficient correspondrait à la production du ruissellement permettant de comparer les zones de production d'un même bassin entre elles, mais aussi à long terme de comparer les bassins versants entre eux, quel que soit leur position géographique sur un axe latitudinal. **Ainsi une caractérisation unique du facteur sol serait possible pour chaque bassin versant.**

Dans notre logique de réflexion, les seules cartes capables de fournir ce coefficient sont les cartes de production du ruissellement. En effet, L'utilisation d'un coefficient à partir des cartes de production IRIP permettrait :

- **D'une part de pouvoir comparer les zones productrice à un coefficient de ruissellement** établi localement par expertise sur le terrain (et donc une validation des cartes de production du ruissellement).
- D'autre part, de pouvoir **donner une valeur aux seuils fixés par les niveaux de sensibilité de la méthode IRIP en intégrant une notion de dynamique des écoulements de surface.** Ces valeurs pourront par la suite donner lieu à des aménagements dans le cadre d'une gestion intégrée de bassin versant.

Le calcul d'une dynamique des écoulements se base sur un bassin versant pour être viable hydrologiquement. L'intérêt de ce calcul est de pouvoir déterminer cette dynamique en un point donné à travers la définition de l'aire amont drainée de ce point. Ainsi il est pertinent de s'intéresser à la dynamique des écoulements du ruissellement en s'appuyant sur :

- **A] La densité de drainage.** En effet, la densité de drainage va traduire l'efficacité d'un bassin versant à collecter les écoulements des versants et à les transférer vers l'aval. Cette densité de drainage se calcul de manière générale par la longueur totale du réseau de drainage divisé par la surface du bassin versant.
- **B] La courbe hypsométrique.** Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. La définition d'un indice est alors nécessaire pour prendre en compte cette courbe. Une piste de réflexion a mené à l'utilisation d'un calcul sur la convexité/concavité de la courbe hypsométrique.
- **C] Le coefficient de compacité de Gravelius.** Il est défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface. Le développement d'un indice de compacité est conditionné par le fait qu'un bassin ayant une forme arrondie aura des flux plus concomitants qu'un bassin ayant une forme plus allongée.

- **D] Le chemin le plus long en réseau constitué.** Cet indice permet l'intégration de la notion de temps de réaction du bassin versant en partant du principe que plus le chemin sera grand, plus la réponse hydrologique sera lente. Et inversement, le bassin aura une réponse rapide pour un chemin court.
- **E] La distance entre les centres de gravité des zones de production et l'exutoire.** Cette distance va conditionner l'aspect temporel de la réaction du bassin à un épisode pluvieux.

Ces deux derniers facteurs peuvent se regrouper en un seul et unique à travers la constitution d'un facteur correspondant à :

$$\text{Facteur transfert} = E / D$$

L'avantage de ce facteur est d'être adimensionnel, et en outre il intègre un résultat produit par la méthode IRIP (carte de transfert du ruissellement).

La méthode IRIP intègre déjà certains de ces paramètres (densité de drainage, compacité...) dans sa méthodologie. **L'intérêt de cette nouvelle approche est la possibilité d'intégration d'un aspect temporel à la méthode IRIP. En effet, les facteurs mis en avant ci-dessus vont influencer le temps de réponse d'un bassin et ainsi pouvoir nous fournir une sensibilité du bassin à produire des crues rapides par ruissellement.**

Pour cela il sera important d'intégrer chaque facteur de manière à ce que ceux-ci aient un poids similaire dans le calcul de cette sensibilité à produire des crues rapides. Une équation correspondante à cet indice de sensibilité (SCR) peut se définir comme suit :

$$\text{Indice SCR} = A + \text{indice B} + C + E/D$$

L'aspect temporel apporté par cet indice de sensibilité aux crues rapides est une perspective intéressante dans le cadre d'un développement de la méthode IRIP. **Cette perspective entrouvre la porte à des hypothèses de modélisation plus poussées comme le couplage avec des modèles hydrologiques existant (cf. partie 5.3).**

En résumé :

- **La méthode IRIP a permis de fournir une carte de production, de transfert et d'accumulation du ruissellement sur le bassin versant de la Nartuby.**
- **Une autre piste de réflexion concernant la cinétique des écoulements des zones de production identifiées par IRIP a été proposée.**

V. Discussions et perspectives

5.1 Approche d'IRIP et approches naturalistes des PPRI

5.1.1 Les Plans de Prévention des Risques d'Inondation

La création d'un PPRI n'est pas une tâche facile. En effet, les PPRI se basent sur des données disponibles à l'échelle d'action de ceux-ci avec les données qui ont pu être récoltées pour réaliser les cartes (cf. partie 1.2.2). **Les données utilisables pour les PPRI de débordement de cours d'eau sont issues des modélisations pluies débits basés sur des calculs hydrologiques probabilistes** (méthode Rationnelles, CRUPEDIX, méthode « Gradex »...). Bien que ces modélisations tentent d'être le plus juste possible, elles ne permettent pas de vérifier la pertinence des cartes de PPRI produites. **Une autre méthode est mise en avant dans les guides méthodologiques (source : prim.net) : l'utilisation des approches hydrogéomorphologiques aussi appelées approches naturalistes.** Ces approches sont essentiellement voir constamment utilisées pour les débordements de cours d'eau (Jaillet *et al.*, 2012).

Comme explicité en début de ce rapport (cf. partie 1.3), il existe peu de PPRI ruissellement. Et lorsque ceux-ci existent, il n'y a pas de méthodes génériques. **En effet, comme le montre le tableau en annexe 6, de par la définition du ruissellement, sa caractérisation et sa méthode de mise en évidence, aucun PPRI n'exploite une méthodologie précise associée au ruissellement** (Jaillet *et al.*, 2012). Tous les PPRI ruissellement sont basés sur des analyses « à dire d'experts » mettant plus en avant un état des lieux de l'impact du ruissellement plutôt qu'une réelle caractérisation du phénomène physique. **Cette absence de caractérisation physique est une des raisons ayant conduit à la réflexion d'un indicateur cartographique comme l'est la méthode IRIP.**

5.1.2 L'approche naturaliste des PPRI

L'approche naturaliste est un fondement de la compréhension des espaces naturels. Si cette approche reste insuffisante pour comprendre et gérer l'ensemble des phénomènes des milieux naturels, elle reste toutefois nécessaire voire indispensable dans bien des cas. **L'approche naturaliste se définit comme une approche des espaces par la connaissance du terrain. La collecte d'information sur le terrain constitue donc évidemment un point clé de l'approche naturaliste.** Cette connaissance résulte d'une pratique régulière du terrain, de l'observation, et des antécédents sur les phénomènes naturels locaux. Ce type d'approche n'est donc disponible que par les dire d'expert locaux. Sa mise en œuvre est longue et mais reste assez peu coûteuse (en terme de temps et de données) vis-à-vis d'études de modélisations hydrologiques poussées. Il existe deux principaux types d'approches naturalistes :

- **Les approches naturalistes effectuées par des experts.**
- **Les approches naturalistes effectuées par des observateurs locaux.**

Dans un sens général, les approches naturalistes sont régies par un protocole bien défini (surtout lorsqu'il s'agit d'expertises naturalistes). **Pour l'heure aucune expertise naturaliste n'a été effectuée sur la problématique du ruissellement.** En effet, ces approches sont essentiellement utilisées pour les débordements de cours d'eau dans les PPRI. Concernant le ruissellement sa mise en évidence, sa caractérisation et sa description

sont les objectifs principaux de ce genre d'approche. **Les approches naturalistes se basent alors sur des analyses hydrogéomorphologiques (Jaillet *et al.*, 2012) combinées à des expertises locales issus d'un historique connu.** Pour réaliser ce type d'approche, divers points essentiels sont à identifier, sans quoi, les données récoltées sur le terrain ne pourront être exploitées par la suite :

- Il est nécessaire de dater (minutes, heures, jours, mois, années) et localiser avec la plus grande précision (coordonnées GPS, points repères...) l'information vue sur le terrain.
- Il faut que l'auteur (expert terrain) soit identifié afin qu'il puisse être contacté par la suite.
- Il faut que la nature du phénomène soit identifiée le plus clairement possible (type de ruissellement, d'écoulement, etc ...), au moindre doute le mentionner.
- Indiquer le type de milieu où le phénomène est observé (parcelles agricoles, routes, forêts...)
- D'autres informations moins indispensables peuvent être rapportées (type de sol, météo...)
- Enfin, la tâche de l'approche naturaliste n'est pas que descriptive. En effet, l'information naturaliste passe aussi par des documents iconographiques (photos, vidéos, croquis...) permettant *a posteriori* la confirmation ou la représentation du phénomène du ruissellement.

Bien que l'expertise hydrogéomorphologique d'un territoire soit encadrée par les principes ci-dessus, **il existe une autre source pouvant mener à cette approche : les observateurs. En effet l'expérience, ou le vécu, d'habitants locaux ou des services de sécurité civile, des gestionnaires de bassin, etc... est une source précieuse d'information.** Ces informations existent mais sont très éparses et difficiles à codifier (enquête par professionnel). C'est pourquoi une approche naturaliste présente des limites au sens où l'accès à l'information est complexe (nécessité de contacter beaucoup de personne ayant un retour d'expérience du phénomène et cette information n'a pas forcément de trace écrite) mais aussi très éparses (au sens où l'information naturaliste est conservé par tous types de personnes et d'organismes). Il faudrait que le protocole soit explicité ou qu'une référence précise soit donnée. **L'utilisation d'observateurs est donc une solution à l'absence d'expertise sur la problématique du ruissellement dans les PPRIs, même si celle-ci reste difficile à obtenir.**

Une limite de l'approche géomorphologique est le fait qu'elle ne soit pas universelle. En effet, la subjectivité de ce type d'étude peut être remise en cause. Bien que chaque étude soit encadrée, les données récoltées ne dépendent que de l'auteur de cette étude. Ainsi, sur une même période, deux auteurs peuvent fournir des renseignements différents pour un même phénomène observé. La subjectivité des approches naturalistes, et donc de ses auteurs (experts ou observateurs), est variable en fonction de l'expérience (une personne expérimentée sera plus encline pour obtenir l'ensemble des informations disponibles qu'un débutant), de la connaissance du domaine et de l'approche de ceux-ci (par exemple la notion de ruissellement et sa définition varient selon les experts comme le montre le début du rapport).

Outre la subjectivité des données récoltées, **les études naturalistes posent la problématique de la prise en compte des facteurs influençant une réponse**

hydrologique. En effet, les approches naturalistes se basent sur un état des lieux de l'inondation la plus forte relativement ayant laissé des stigmates (incision des sols, entame des bourrelets de berges...). Elles ne présentent donc pas de chronologie. **La seule variable alors mis en exergue est la compétence du sol à produire une crue. Cette unique variable ne nous permet pas, pas même par extrapolation, de connaître le régime hydrologique du bassin.** En effet, la variable pluviométrique (non observable par les approches naturalistes) serait alors nécessaire pour compléter l'étude hydrologique.

Ainsi, l'utilisation d'approches naturalistes est pertinente dans le cadre des inondations par ruissellement qu'en utilisant les observateurs locaux. En revanche ces approches par des observateurs restent très localisées et ne permettent pas une validation des cartes d'inondation par ruissellement à l'échelle d'un versant ou d'un bassin versant.

5.1.3 L'utilisation d'approches naturalistes par la méthode IRIP

Comme nous l'avons vu précédemment, il n'existe pas de consensus méthodologique pour la cartographie et la représentation du ruissellement au sein des PPRIs (Jaillet *et al.*, 2012). **L'utilisation des approches naturalistes (par des experts ou des observateurs locaux) a été effectuée dans l'objectif d'un possible couplage de la méthode IRIP pour valider les cartes produites.** La comparaison de ces approches (géomatique pour IRIP et hydrogéomorphologique pour les approches naturalistes) a permis le développement d'une réflexion quant aux méthodes de validation des cartes produites par la méthode IRIP :

- **Les expertises naturalistes ne peuvent servir de méthode de validation à la méthode IRIP.**

En effet, tout d'abord il n'existe pas encore d'expertises naturalistes ou peu sur le ruissellement (uniquement des tracés d'axes d'écoulements). **Les PPRIs ruissellement existant se basent sur des modèles hydrologiques (calculs des quantiles de crues avec la méthode rationnelle préconisée dans les guides méthodologiques) et ne caractérisent pas spatialement le ruissellement** (Jaillet *et al.*, 2012).

Ensuite, les expertises naturalistes se basent sur des événements dont la chronologie n'est pas connue. En effet, **seuls les événements ayant provoqués de forts stigmates seront répertoriés.** Ainsi les événements d'importance moindre ne pourront être pris en compte dans l'expertise. Indirectement cela induit une autre conséquence : si une inondation a été répertoriée à un endroit précis **pour une période de retour donnée, cela ne signifie pas que pour une même période de retour, l'inondation se produira au même endroit.** En effet, chaque événement hydrologique induit une modification de la morphologie du versant, du lit du cours d'eau, etc. L'absence de la chronologie est donc un frein à l'utilisation des approches naturalistes comme méthode de validation des cartes de ruissellement IRIP.

Enfin, comme explicité dans la partie 5.1.2, les approches naturalistes effectuées par des experts ne tiennent pas compte de tous les facteurs hydrologiques responsables du ruissellement. **Le ruissellement est la conséquence de deux facteurs : la pluviométrie et la compétence du sol à infiltrer l'eau. Seule la compétence du sol peut être expertisée par les approches naturalistes.** L'approche géomatique de la méthode IRIP parvient à intégrer ces deux facteurs. En effet, l'analyse spatiale du ruissellement permet la localisation de zones ruisselantes. L'application d'IRIP sur des bassins versants à la climatologie différente (exemple du Gard caractérisé par des pluies de type méditerranéenne et le bassin versant de l'Azergues caractérisé par des pluies d'origine

océanique) va permettre une intercomparaison des cartes de ruissellement produites. Ces cartes possédant des seuils morphologiques similaires, seul le facteur pluie va déterminer le volume ruissellement obtenu via un modèle d'extrapolation.

Les approches naturalistes fournies par des experts sont donc à utiliser avec précautions. L'absence de chronologie, la subjectivité de l'étude et la seule prise en considération du facteur sol dans l'étude hydrologique font de ces expertises un constat ne permettant pas une validation absolue des cartes d'inondation par ruissellement pouvant être produites.

- **Les approches naturalistes peuvent servir de paramétrage à la méthode IRIP**

Les approches naturalistes effectuées par des observateurs vont pouvoir être intégrées à la méthode IRIP. En effet, même sur de très petits territoires (parcellaire voir moins) la présence de ruissellement peut être mise en évidence. Par exemple un exploitant voyant des ravines dans ses champs pourra fournir des informations sur les axes d'écoulement. **Ces informations vont par la suite être intégrées à IRIP de manière à pouvoir jouer sur les seuils en paramétrant l'indicateur de ruissellement afin de coller le plus possible à la réalité.** En revanche ces informations restent difficiles d'accès (cf. partie 5.1.2) et se limite à de très petits territoires.

En résumé :

- **La problématique du ruissellement n'est prise en compte que par très peu de PPRI.**
- **Deux types d'approches naturalistes existes : les expertises et celles fournies par des observateurs locaux.**
- **Les approches naturalistes restent subjectives, sans chronologie, et ne prennent en compte que le facteur « sol » dans la problématique du ruissellement.**
- **L'utilisation d'expertises naturaliste n'est pas pertinente en tant que méthode de validation de la méthode IRIP.**
- **Les approches naturalistes effectuées par des observateurs locaux peuvent permettre un paramétrage de l'indicateur IRIP, mais sur de très petits territoires.**

5.2 Incertitudes des cartes produites par la méthode IRIP

Comme toute méthode de cartographie, la méthode IRIP présente des limites. Ces limites sont intrinsèquement liées à la représentation graphique. Il est possible d'en discerner deux principales liées au module de représentation graphique et une dernière liée aux incertitudes des classes des niveaux de sensibilité au ruissellement.

5.2.1 Limites liées à l'échelle cartographique d'application

Le ruissellement est un phénomène physique présentant une grande variabilité spatio-temporelle. Les caractéristiques du ruissellement peuvent s'estimer à l'échelle parcellaire de l'ordre de quelques dizaines à centaines de mètres carrés. Lorsque l'on traite du phénomène de ruissellement sur de plus grands territoires, ce qui est l'objectif de la méthode d'analyse multi-échelle d'IRIP, l'hétérogénéité du milieu augmente induisant un « effet d'échelle » (Mounirou 2012).

L'effet d'échelle sur les variables hydrodynamiques comme le ruissellement est une question encore non résolue dans le domaine hydrologique. **Afin de faciliter la gestion mais aussi la compréhension des processus physiques découverts sur de petits bassins versants, il s'opère un transfert des résultats expérimentaux sur de plus grands bassins versants** (Silvapalan *et al.*, 2003).

Ce transfert d'information, aussi appelé « mise à l'échelle » est basé sur une mesure de similarité et diverge du processus de transfert des paramètres d'un bassin versant donné à des bassins versants voisins connu sous le nom de régionalisation (Blöschl *et al.*, 1995).

Le phénomène « d'effet échelle » est une limite en soit puisque cela induit une extrapolation des données obtenues sur de petites superficies à des superficies plus importantes. **Pour le ruissellement « l'effet échelle » est la résultante de l'augmentation de l'hétérogénéité spatiale des sols**, qu'il s'agisse des propriétés hydrodynamiques (conductivité hydraulique, érodibilité, épaisseur...) ou des propriétés physiques du milieu (pente, microreliefs...).

En plus de l'altération des données par hétérogénéisation sur de grands territoires, l'étude du ruissellement à l'échelle départementale, régionale, nationale et plus est peu pertinente. En effet, les cartes de production issues de la méthode IRIP vont simplement permettre d'identifier les grands ensembles producteurs, rendant les résultats obtenus inexploitable par les opérationnels locaux. De plus les cartes de transfert du ruissellement ne pourront mettre en évidence que les axes principaux de transfert, c'est-à-dire les grandes rivières et les grands fleuves. Enfin, les cartes d'accumulation du ruissellement ne pourront mettre en avant que les grandes zones inondables, en lissant toutes les petites zones d'accumulation pourtant dommageables aux collectivités.

Sur de petits territoires (parcellaire voire plus petit), la méthode IRIP n'est pas non plus pertinente. En effet, il est très possible qu'à cette échelle de travail, tous les types de zones ne soit pas représentés ou bien que ces zones soient difficilement différenciables en pratique puis que les propriétés des sols seront trop homogènes (sur de petits territoire, le transfert peut être confondu avec la production ou l'accumulation du ruissellement selon la perception de l'opérateur).

On peut donc en déduire que la méthode IRIP reste applicable sur des territoires de tailles variables. Néanmoins, il est important de pouvoir lui définir un intervalle d'action afin de réduire au maximum les erreurs dues à « l'effet

échelle ». Une étude plus poussée sur ce travail pourrait préciser l'ordre de grandeur de l'échelle d'action de la méthode qui doit se situer entre la parcelle (plusieurs dizaines de m²) et le bassin versant (d'une taille inférieure à 10 000 km²) pour être la plus pertinente possible.

5.2.2 Limites liées aux problèmes des frontières cartographiques

Comme indiqué précédemment, le rôle d'une carte va dépendre de son objectif. La cartographie est une méthode de représentation particulière des phénomènes physiques comme le ruissellement. En effet, elle permet d'avoir une information spatiale localisée et localisable sur le terrain. Une limite consécutive à la réalisation d'une carte est la « zone frontière » entre deux types d'informations. **Cette « zone frontière » est une représentation floue entre le passage d'une propriété physique à une autre.** Bien que sur la carte la limite semble distincte, ce n'est pas toujours le cas sur le terrain.

Ce trait cartographique représente donc une variation du milieu. Cette séparation peut avoir un impact important dans la gestion et l'aménagement de bassins versants. Par exemple, si l'on prend le cas des zones inondables, en fonction de la position de cette limite à une parcelle, l'aménagement sera différent.

La méthode IRIP, comme tout module cartographique, est donc concerné par cette limite. La taille de la « zone frontière » va dépendre de l'échelle de travail. Plus l'échelle est grande, plus cette zone transitoire sera importante cartographiquement.

Il est donc important de garder cette notion en tête lors d'études avec la méthode IRIP. Les résultats obtenus, notamment les limites des différents niveaux de sensibilités, peuvent se révéler vagues sur le terrain. **La méthode IRIP va donc identifier les caractéristiques du ruissellement mais la justesse de ses limites cartographiques ne va dépendre que de l'échelle de travail et donc de la qualité des données d'entrée de l'indicateur.**

5.2.3 Limites liées aux classes des niveaux de sensibilité de la méthode IRIP

Dans le cadre de son implémentation, la méthode IRIP utilise des niveaux d'aptitude à la production, au transfert et à l'accumulation pour réaliser ses cartes de ruissellement. Ces niveaux de sensibilités sont définis de façon arbitraire (au choix de l'utilisateur) en fonction des données dont il dispose. **Une piste de réflexion est de comprendre le fonctionnement de ces niveaux de sensibilités et de visualiser l'impact de ceux-ci sur le ruissellement.** À terme l'objectif serait de connaître le niveau de sensibilité à partir duquel on observe un ruissellement de manière fréquente quel que soit l'intensité de l'évènement pluvieux. C'est pourquoi une étude réalisée par la SNCF en 2012 (Hasnaoui, 2012) a cherché à comparer les cartes de production du ruissellement avec des études locales de coefficients de ruissellement. Pour les cartes de transfert et d'accumulation du ruissellement, une autre étude sur les zones inondables doit être réalisée en parallèle.

Partant du principe que les coefficients de ruissellement identifiés sur le terrain par des expérimentations sont justes, l'estimation des paramètres hydrologiques devait pouvoir retrouver ces résultats.

L'étude réalisée par la SNCF a utilisé les niveaux de sensibilités allant de un (un facteur favorisant le ruissellement) à quatre. L'expérimentation a porté sur différents bassins versants de tailles variables et de localisation géographique et climatologique différente (Figure 44).

BV	Sirip(Km²)	Climat	niveau 1		niveau 2		niveau 3		niveau 4		Cest	Cobs
			Sprod	Cirip	Sprod	Cirip	Sprod(Km²)	Cirip	Sprod	Cirip		
1	5.54	Continental	5	1	5	1	4.328	0.78	1	0.324	0.42	0.140
27BIS	13.26	Continental	S tot	1	17	0.818	4.736	0.216	0	0.017	0.54	0.045
19	27.26	Continental	22	0.817	5	0.213	0.42	0.015	0	0.004	0.475	0.046
6	4.76	Montagnard	5	0.986	5	0.213	0.423	0.016	0	0.004	0.68	0.049
7	5.75	Montagnard	3	0.691	0	0.171	0.007	0.001	-	-	0.14	0.151
31	12.29	Méditerranéen	12	0.979	10	0.781	1.189	0.09	0	0.059	0.666	0.073
22	9.71	Montagnard	S tot	1	9	0.999	4.296	0.439	0	0.101	0.46	0.247
21	21.26	Montagnard	S tot	1	21	0.998	10.872	0.511	0	0.007	0.6	0.065
42	21.96	Montagnard	21	1	5	0.657	1.237	0.142	0	0.002	0.55	0.100
30	28.67	Montagnard	28	1	16	0.819	5.373	0.271	0	0.01	0.754	0.142
9	30.88	Montagnard	30	1	19	0.616	0.723	0.023	0	0	0.505	0.212
16	6.87	Océanique	6	0.992	3	0.57	1.333	0.194	0	0.024	0.6	0.063
33	7.22	Océanique	7	1	19	0.685	4.826	0.168	0	0.02	0.44	0.066
38	8.72	Océanique	8	1	11	0.454	1.546	0.064	0	0	0.56	0.062
23	8.25	Océanique	S tot	1	8	1	6.219	0.753	1	0.232	0.17	0.118
37	9.25	Océanique	7	0.781	28	1	6.786	0.235	0	0.005	0.32	0.093
34	13.47	Océanique	S tot	1	7	0.57	0.638	0.052	-	-	0.5	0.035
17	19.98	Océanique	19	0.996	17	0.866	10.549	0.528	1	0.082	0.48	0.041
39	18.73	Océanique	S tot	1	2	0.32	0.496	0.054	0	0.0004	0.58	0.107
24	21.16	Océanique	S tot	1	18	0.895	3.286	0.155	1	0.092	0.22	0.143
26BIS	19.81	Océanique	S tot	1	18	0.963	6.525	0.348	0	0.001	0.54	0.019
15	24.51	Océanique	S tot	1	24	1	9.581	0.391	0	0.03	0.56	0.121
14	28.54	Océanique	28	1	27	0.956	8.635	0.302	0	0.011	0.56	0.040
35	28.89	Océanique	S tot	1	5	0.82	1.491	0.206	0	0.002	0.5	0.098
18	28.14	Océanique	S tot	1	27	0.99	11.542	0.41	0	0.004	0.6	0.117
26	30.37	Océanique	30	1	27	0.91	13.189	0.434	1	0.059	0.52	0.088

Figure 44 : Tableau récapitulatif des surface de production et des coefficients de ruissellement en sortie de la méthode IRIP (source : Hasnaoui, 2012)

Bien que l'échantillon de bassins versant étudiés soit limité (26 bassins versants étudiés) pour pouvoir en définir une analyse statistique, différentes informations peuvent néanmoins être mises en avant :

- Si l'on prend en compte les zones de faibles sensibilités (niveaux 1 et 2), on remarque que la surface de production est importante voire trop lorsque l'on met en comparaison le C_{irip} et le C_{obs} . Cet argument semble logique, puisque ces zones représentent une majeure partie des bassins versant étudiés. **On peut donc en déduire que l'étude du ruissellement avec des zones peu productrice de ruissellement (niveaux 1 et 2) ne sont pas pertinente pour une analyse des niveaux de sensibilité du ruissellement.** De plus, ces zones ne sont actives que lors de forts évènements, elles ne conditionnent donc pas la réponse hydrologique immédiate.
- De plus, en partant de la formule de calcul de débit à partir du coefficient de ruissellement (C_{obs} ($C_{obs}=Q_{obs}/(I*A)$)), **on remarque une surestimation importante (plus de 100 %) des débits lorsque que l'on prend en compte les niveaux de sensibilité 1 et 2 dans le coefficient de ruissellement de la méthode IRIP dans près de 90 % des bassins versants étudiés.** On peut alors en déduire que les niveaux de sensibilités 1 et 2 ne vont pas participer de façon immédiate à la réponse hydrologique.

- **En ne prenant en compte que les niveaux de sensibilités fort (niveaux 3 et 4) issus de la méthode IRIP, on remarque une meilleure corrélation entre les débits estimés et ceux observés.** On peut donc penser que ce sont les niveaux de sensibilités 3 et 4 qui vont participer le plus fréquemment à la réponse hydrologique d'un bassin versant. Et donc que le seuil de sensibilité serait situé dans le niveau de sensibilité 3 défini par IRIP.

Bien qu'une étude complémentaire soit nécessaire pour confirmer ces premières tendances, on peut déjà mettre en avant le fait que les cartes produites par la méthode IRIP présentent une limite à travers la conception des niveaux de sensibilité. Le niveau de sensibilité impliquant un impact suffisamment important pour être pris en compte peut donc varier d'un bassin versant à l'autre. **C'est pourquoi la définition la plus appropriée aux niveaux de sensibilité définis par la méthode IRIP serait « un seuil à partir duquel on observe de manière fréquente (période de retour faible) et intense (observation d'une contribution à la réponse hydrologique du bassin versant) du ruissellement sur un bassin versant donné ».**

Une étude plus approfondie sur un échantillon plus important de bassins versant est nécessaire pour réaliser une analyse statistique. Cette analyse statistique pourra par la suite mettre en évidence ou infirmer ces tendances mais aussi pouvoir corréler l'impact des niveaux de sensibilité de la méthode IRIP par rapport à des conditions environnementales comme le climat ou encore par rapport à des propriétés physique du bassin comme la taille, la pente moyenne...

En résumé :

- **La méthode IRIP est applicable sur toutes les tailles types de territoires, mais la cartographie du ruissellement n'est pertinente que dans un intervalle de l'ordre de l'hectare à quelques milliers de km².**
- **Les cartes IRIP présentent des incertitudes cartographiques liées aux frontières sur les cartes de sensibilité.**
- **La méthode IRIP possède une source d'incertitude à travers l'utilisation de seuils de sensibilité au ruissellement.**
- **Une analyse de cette dernière incertitude permis la proposition d'une définition hydrologique des niveaux de sensibilité IRIP comme un seuil à partir duquel on observe de manière fréquente et intense du ruissellement sur un bassin versant donné.**

5.3 Perspectives de couplage avec des modèles pluie-débit

Les perspectives de couplage de la méthode IRIP ont un but de quantification des zones identifiées comme ruisselante par l'indicateur. Pour cela, il serait intéressant **d'étudier IRIP avec l'approche d'un modèle Pluie-débit**. Cette méthode de quantification se baserait donc sur des modèles hydrologiques produisant des volumes d'eau ruisselés.

Une autre approche serait le couplage de la méthode IRIP avec une quantification de l'évènement pluvieux induisant le ruissellement. On parle alors d'un possible **couplage avec une période de retour** d'un évènement donné.

5.3.1 Définition d'un modèle hydrologique

Un autre outil existant permettant de caractériser l'aptitude au ruissellement d'une zone est l'utilisation d'un modèle. **Un modèle est une représentation simplifiée d'un système complexe**. Pour le modèle, ce sont les hypothèses posées qui conditionnent le choix de la modélisation (son domaine d'action, son échelle, ses paramètres...), ainsi le modèle n'a pour objectif que l'unique réponse à la problématique conduisant à sa création. Il est possible de distinguer trois types de modèle (Regazzoni *et al.*, 2010) :

- **Les modèles empiriques :**

Les modèles empiriques ont **pour objectif la mise en adéquation des variables d'entrées (pluie décennale, coefficient de ruissellement, superficie du bassin...) et des variables comme le débit instantané**. Les modèles empiriques ne prennent pas en compte les processus physiques interne et la distribution spatiale des variables (pluie...). Ainsi dans l'esprit de ces modèles, le bassin versant est pris en compte comme une entité globale. La mise en œuvre et le temps de calcul de ces modèles sont relativement courts et simple, car les paramètres requis sont facilement disponibles mais l'incertitude associée aux résultats est importante. Les modèles empiriques reposent le plus souvent sur des relations basées sur un nombre important de bassins versants comme l'approche Crupedix (CRUes par P10, CTGREF *et al.*, 1980-1982), SOCOSE (CEMAGREF, 1980) ou encore la formule rationnelle (Regazzoni, 2009).

- **Les modèles conceptuels :**

Ils reposent sur **une simplification de la représentation du cycle de l'eau**. Il existe autant de modèles conceptuels que de simplification de processus du cycle de l'eau. Une approche classique consiste à considérer le cycle de l'eau au sein d'un bassin versant par une interconnexions des différents réservoirs. Les modèles conceptuels sont les plus utilisés puisqu'ils ont l'avantage de représenter les processus physiques internes aux bassins versants à l'évènement simulé ou en continu de façon plus réaliste que les modèles empiriques. Une limite majeure inhérente à ce type de modèle est prédétermination des paramètres pour les bassins versant non jaugés. Pour illustrer les modèles conceptuels, on peut citer le modèle GR2 (Michel, 1991) ou encore le modèle intégré de Kauark-Leite (1990).

- **Les modèles à base physique :**

Les modèles à base physique cherchent à représenter le cycle de l'eau et les différents processus associés sous forme de formules mathématiques. Ce type de modèle permet une analyse de la transformation de la pluie en débit au sein des bassins versants grâce à une discrétisation spatiale et temporelle fine. Pour des raisons de temps de calcul et de données disponibles, l'utilisation de modèles à base physique se fait sur de petits

bassins versants, notamment en raison du nombre de paramètres requis en entrée de modèle. Une autre limite à ces modèles est le fait qu'ils nécessitent une phase de calage et sont donc difficilement applicable aux bassins versants non jaugés. Pour illustrer les modèles à base physique, on peut citer le modèle de Green et Ampt (1911) ou encore celui de Richards (1931).

5.3.2 Approche du couplage entre un modèle et IRIP

Il existe plusieurs modèles permettant la mise en évidence du ruissellement. La plupart de ces modèles ont un but agronomique et traitent beaucoup plus de l'érosion des sols que de la lame d'eau ruisselante. **L'une des validations possibles de la méthode IRIP serait le couplage avec un autre modèle. Ainsi les résultats obtenus par IRIP pourraient être utilisés comme données d'entrées ou comme comparaison avec les cartes produites par IRIP.**

Une étude bibliographique des différents modèles a permis la mise en évidence des apports, ou des difficultés, du couplage avec la méthode IRIP. L'ensemble des résultats obtenus pour chaque modèle traité est détaillé ci-dessous (et disponible sous forme de tableau résumé en annexe 7) en fonction de l'utilité d'un possible couplage avec la méthode IRIP. Comme indiqué précédemment, il existe une grande variabilité de modèles traitant le ruissellement (en aspect érosion, ruissellement, transport solide...), mais seuls les modèles les plus fréquemment utilisés seront décrits dans cette partie.

Les premiers modèles ci-dessous vont présenter une faible utilité pour un couplage avec IRIP :

- **Le modèle KINEROS (Woolhiser *et al*, 1990) :**
Le modèle KINEROS (KINematic runoff and EROSion model) est un modèle à base physique simulant des pluies continues par pas de temps de 10 minutes. Son échelle d'action est très faible (de la taille de la parcelle à un bassin versant de l'ordre de 1 km²). Comme son nom l'indique, il a pour objectif la modélisation du transport solide et de l'érosion des sols. L'utilisation d'IRIP en couplage avec ce modèle ne présente pas de grand intérêt, puisque celui-ci n'utilise que des paramètres physiques intrinsèques au sol (tension capillaire, teneur en eau initiale et finale, teneur en graviers...) pour simuler l'érosion des sols.
- **Le modèle WEPP (Flanagan *et al*, 1995) :**
Le modèle WEPP (Water Erosion Prediction Project) est un modèle de simulation d'érosion et du ruissellement à pas de temps journalier (ou évènementiel de 24h). Il permet la détermination des bilans à long termes et est orienté surtout sur l'impact des pratiques agricoles (utilisation première de l'USDA (Département de l'Agriculture Américain)). Ce modèle travaille à petite échelle et présente un moindre intérêt de couplage avec IRIP puisque celui-ci n'utilise pas de carte de zones pouvant ruisseler pour faire ses simulations. Il ne peut fournir que des cartes d'informations concernant les propriétés intrinsèques des sols simulés.
- **Le modèle CEQEROSS (Duchemin *et al*, 2001) :**
Le modèle CEQEROSS (combinaison du modèle CEQEAU et MODEROSS) est un modèle conceptuel de simulation d'érosion des sols par une pluie continue (allant de 1h à 12h). Ce modèle s'adapte aux petits comme aux grands territoires (de 5m² à 4000 km²). Le modèle traite le ruissellement uniquement dans sa partie érosion. Ainsi les données en sortie ne peuvent être utiles à la

méthode IRIP, et inversement, les données d'entrées ne correspondent pas aux résultats obtenus par la cartographie IRIP.

- **L'automate cellulaire RuiCells (Langlois *et al.*, 2002) :**
Le modèle RuiCells est un modèle de simulation et de cartographie du ruissellement dans les bassins versants agricoles (notamment pour la mise en évidence de l'impact du type de culture). Il se base sur la technologie des automates cellulaires et sur un découpage régulier du bassin versant. Il est difficilement en adéquation avec IRIP même si le modèle RUICELLS va fournir une carte de ruissellement car il n'est applicable qu'aux bassins versants agricoles (la comparaison avec une carte issue d'IRIP est donc limitée).
- **Le modèle WISTOO (Ozga-Zielinska *et al.*, 2002) :**
Le modèle WISTOO est un modèle physique de simulation du ruissellement suite à un épisode continu à l'échelle d'un bassin versant. Il est en théorie similaire à IRIP dans le sens où celui-ci va mettre en avant les zones de production du ruissellement. Mais étant codé spécifiquement pour un bassin versant polonais, il n'est pas applicable ailleurs, c'est pourquoi il ne présente pas d'intérêt réel pour la méthode IRIP sauf à appliquer IRIP sur ce bassin (Zywiec).

Les modèles suivants ont une utilité vis-à-vis de la méthode IRIP. En effet, ceux-ci ont la possibilité de valider (ou du moins de permettre de faire une comparaison) les cartes issues de la méthode IRIP. **Les données de sorties des modèles ci-dessous peuvent donc apporter des arguments à la méthode IRIP, en vérifiant et possiblement en validant les résultats d'IRIP.**

- **Le modèle LISEM (De Roo *et al.*, 1996):**
Le modèle LISEM (Limburg Soil Erosion Model) est un modèle d'érosion hybride (à la fois géomatique et physique) basé sur la simulation des processus hydrologiques dans le but de calculer le ruissellement locale et d'en déterminer une cartographie de l'aléa d'érosion des sols après un évènement pluvieux. Ce modèle s'applique donc à de petits bassins versant (de 50 m² à 50 km²) et va permettre d'une part de pouvoir fournir des données d'entrées à IRIP (carte d'érodibilité et de battance fournies par LISEM) mais aussi de valider les résultats obtenus par IRIP (notamment les cartes de production et d'accumulation) grâce aux cartes d'écoulement et de hauteurs d'eau produites.
- **Le modèle MAR (Bader 1994) :**
Le Modèle Analogique du Ruissellement (MAR) permet la mise en évidence des zones très productrices de ruissellement en fonction de l'état de surface des sols. Ce modèle conceptuel simule le ruissellement suite à un évènement à l'échelle de la parcelle. Le modèle MAR peut permettre la validation des cartes de production réalisées par IRIP mais uniquement à très faible échelle (échelle parcellaire).
- **Le modèle SWARM (Blair *et al.*, 2012)**
Le modèle SWARM (Stormwater Runoff Modeling System) est un modèle basé sur le Curve Number (CN) et sur le découpage spatiale d'unité hydrographique d'après la méthode du Département de l'Agriculture Américain (USDA). Le modèle SWARM est un modèle à base géomatique, ayant vocation à simuler le ruissellement lors d'un unique évènement. Il est applicable aux petits territoires (de 60ha à près de 2500ha) et nous simule le potentiel de ruissellement à

l'échelle du bassin versant uniquement. Ce modèle est potentiellement une source de validation des cartes IRIP en comparant le potentiel de ruissellement aux cartes IRIP. Il n'est en revanche pas utile de le coupler puisque ses données d'entrée sont quasi-similaires à celle d'IRIP (exception faite de la donnée Pluie) pour une carte de production du ruissellement.

- **Le modèle CASC-2D (Julien *et al*, 1991) :**

Le modèle CASC-2D est un modèle physique ayant pour objectif la simulation du ruissellement à l'échelle d'un bassin versant (32 km² pour le bassin versant test). Ce modèle va calculer le ruissellement concentré en termes de quantité par des hydrogrammes. La comparaison en vue d'une validation de la méthode IRIP est possible concernant les zones de transfert et possiblement d'accumulation à travers la lecture d'un hydrogramme en un point donné.

Enfin, il existe plusieurs modèles n'ayant pas toujours vocation à traiter le ruissellement mais qui peuvent être corrélés avec les données issues d'IRIP. Pour chacun d'eux, les cartes produites par IRIP peuvent être des données d'entrée ou à l'inverse servir de données d'entrée à IRIP. Dans le cadre de la méthode IRIP, la perspective de couplage avec ces modèles est donc double : **A la fois de permettre une validation des données IRIP en les intégrant aux modèles et de permettre une amélioration au fonctionnement des modèles par l'utilisation de données plus précises issues des cartes IRIP.**

- **Le modèle SCALES (Le Gouée et Delahaye 2007) :**

Le modèle SCALES (Spatialisation d'éChelle fine de l'ALéa Erosion des Sols) est un modèle de type score ayant pour objectif la cartographie de l'érosion à l'échelle de la parcelle agricole, en mettant en avant l'impact de l'organisation spatiale des parcelles agricoles sur le ruissellement érosif. Ce modèle géomatique est applicable aux petits territoires comme aux grands (de l'hectare à près de 5000 km²). Le modèle SCALES est tout comme IRIP une méthode de score. Il est donc facile de pouvoir comparer les deux et de valider les cartes produites par chaque outil (notamment les zones d'érosion diffuse et les zones de productions d'IRIP ainsi que les chemins concentrés du ruissellement et les cartes de transfert d'IRIP). Un couplage entre ces outils serait possible. En effet, la création d'un module remplaçant la pluie érosive avec une carte de production du ruissellement d'IRIP est envisageable.

- **Le modèle STREAM (Cerdan *et al*, 2002) :**

Le modèle STREAM (Sealing and Transfert by Runoff and Erosion in relation with Agricultural Management) est un modèle simulant la sensibilité au ruissellement et à l'érosion en contexte agricole afin d'évaluer les effets issues des différentes organisations spatiales des parcelles agricoles. Le modèle STREAM simule aussi le transport solide pour une donnée pluviométrique événementielle. L'intérêt d'un couplage de ce modèle avec IRIP est double puisqu'il va permettre d'un côté à IRIP la définition de classes de ruissellement plus précises car basées sur les données d'entrée du modèle et d'un autre côté d'utiliser les données en sortie du modèle (bilan de ruissellement) pour les comparer aux cartes IRIP (cartes de production et de transfert notamment).

- **Le modèle LISFLOOD (Van der Knijff *et al*, 2010) :**

Le modèle LISFLOOD est un modèle géomatique simulant à très grande échelle (nationale voire continentale). Ce modèle a pour vocation la simulation en débordement de cours d'eau. Son avantage est l'inclusion en données d'entrée des données ruissellement comme apport aux cours d'eau. Ainsi IRIP a un réel intérêt concernant l'introduction de ses données dans le modèle LISFLOOD.

Néanmoins ce couplage reste possible uniquement à très grande échelle, ce qui est peu pertinent pour la cartographie du ruissellement par la méthode IRIP.

- **Le « modèle CCR » (Moncoulon *et al.*, 2013) :**

Le « modèle de MONCOULON » simule le ruissellement à l'échelle d'un évènement pluvieux. A base géomatique, ce modèle se caractérise par sa simulation événementielle et son lien avec l'aspect des enjeux. Le couplage avec IRIP présente un intérêt certain. D'un côté IRIP pourrait permettre au modèle le remplacement de son module de simulation du ruissellement, et d'un autre côté, un couplage permettrait l'intégration de la notion de dommages causés par le ruissellement.

- **Le modèle EROSION 3D (Arévalo 2009) :**

Comme son nom l'indique, le modèle EROSION 3D a pour vocation la simulation de l'érosion mais aussi le ruissellement et le transport solide. Ce modèle simule un évènement pluvieux sur un territoire de la taille d'une parcelle ou d'un groupe de parcelles agricoles. Ce modèle est en termes de production de résultat similaire à IRIP dans le sens où il produit des cartes de ruissellement (notamment d'accumulation de ruissellement). Il y a donc une possibilité de comparaison des résultats. Concernant un couplage, une possibilité serait d'intégrer les données en sortie d'IRIP dans les coefficients de ruissellement du modèle EROSION 3D.

- **Le modèle TOPSIMPL (Saulnier 1996) :**

Le modèle TOPSIMPL (basé sur TOPMODEL) est un modèle physique événementiel sur de petits bassins versant ruraux (inférieur à 100 km²) ayant pour objectif de simuler le ruissellement sur ceux-ci. Ce modèle va permettre la mise en comparaison des résultats IRIP et notamment des cartes des zones contributives et d'accumulation. En revanche, le modèle TOPSIMPL se base sur un choix arbitraire de l'utilisateur pour la définition de ces zones. Il y a donc une entrée pour les résultats d'IRIP à travers la localisation de ces zones de façon automatique.

8.3.3 Quantification du ruissellement fournit par IRIP

Avant de pouvoir coupler la méthode IRIP avec d'autres modèles, une autre problématique se pose. En effet, la méthode IRIP met en avant des zones propices à la production, au transfert et à l'accumulation du ruissellement de façon qualitative. **Une approche quantitative du ruissellement, à partir des données produites par la méthode IRIP, serait nécessaire à la validation et au développement de l'outil.**

La quantification de l'aléa ruissellement est très utile pour les opérationnels. En effet, elle peut permettre la quantification des dommages, l'estimation des contraintes d'interventions de la sécurité civile ou le dimensionnement d'ouvrage dans le cadre d'une gestion intégrée d'un bassin versant.

Lorsque des chroniques de débits existent depuis suffisamment longtemps sur des bassins versants jaugés, il est possible d'estimer la période de retour des évènements observés ou à l'inverse déterminer le débit correspondant à une période de retour donnée via une analyse statistique classique à travers des lois de distribution statistique (Loi de Gumbel, Loi Log-normale, ...).

Lorsque l'analyse fréquentielle n'est pas possible du fait de l'absence de données assez longues dans les chroniques, ou par absence de jaugeage sur le bassin versant, il est alors

nécessaire d'intégrer des méthodes empiriques ou semi-empiriques de calculs des débits de pointes. Le choix de la méthode dépend d'une part de la taille du bassin versant étudié, et d'autre part de la localisation géographique de celui-ci en délimité en fonction du type de climat rencontré (Il existe une scission importante en France concernant la zone méditerranéenne et le reste du territoire). Les applications et les équations de ces trois méthodes sont résumées ci-dessous.

Actuellement, plusieurs méthodes de détermination semi-empiriques ou empiriques sont fréquemment utilisées pour l'estimation du débit décennal des bassins versant non jaugés :

- **La méthode Rationnelle :**

C'est la méthode pseudo déterministe la plus ancienne pour la détermination de débits de petits bassins versant (moins de 1 km²). Elle utilise un modèle simple de transformation de la pluie (décrite par son intensité I_p), supposée uniforme et constante dans le temps, en un débit instantané maximal lorsque l'ensemble de son bassin contribue à ce débit, selon la relation :

$$Q_i(T) = C * I_p(T) * S / 3,6$$

Avec :

$Q_i(T)$ le débit de pointe pour une période de retour T .

C le coefficient de ruissellement.

S superficie du bassin versant en km².

I_p est l'intensité de pluie de période de retour T .

- **La méthode CRUPEDIX :**

La méthode CRUPEDIX permet l'estimation du débit de pointe décennal (Q_{i10}). La formulation ci-après a été obtenue par une analyse statistique de 630 bassins versants de moins de 2000 km² (CTGREF *et al.*, 1980-1982). Cette formule s'applique donc à des bassins versant de tailles moyenne à importante.

$$Q_{i10} = S^{0.8} (P_{j10} / 80)^2 * R$$

Avec :

Q_{i10} débit instantané maximal annuel décennal.

S superficie du bassin versant en km².

P_{j10} pluie journalière maximale annuelle décennale en mm.

R coefficient régional.

L'incertitude de la méthode pour l'échantillon considéré est grande. L'intervalle de confiance à 70% est $[2/3Q, 3/2Q]$ et celui à 90% est $[Q/2, 2Q]$. Il est possible de réduire l'incertitude en multipliant le résultat par un coefficient de forme de bassin versant R' et un coefficient de correction de perméabilité R'' .

- **La méthode de Transition :**

La méthode de transition correspond à une méthode intermédiaire entre la méthode Rationnelle et la méthode CRUPEDIX. Il s'agit d'une pondération entre les deux formules pour de petits bassins versant (de l'ordre de 1 à 10 km² d'après le Sétra, 2006).

$$Q_{10} = ((10 - S)/9)^2 * Q_r + (1 - ((10 - S)/9)^2) * Q_c$$

Avec :

- Q₁₀** débit maximal annuel décennal.
- Q_r** le débit de la méthode rationnelle.
- Q_c** le débit de la méthode CRUPEDIX.

- **La méthode SCS (Soil Conservation Service) :**

Cette méthode très employée en hydrologie permet de faire intervenir directement l'état du sol. Elle consiste à faire l'hypothèse qu'à un instant t donné, le rapport entre l'infiltration cumulée jusqu'à l'instant t et l'infiltration potentielle en début d'épisode est égal au rapport entre le ruissellement cumulé et la pluie cumulée.

Cependant, lorsque la pluie commence à tomber, il n'y a pas ruissellement immédiat. Des études ont montré que l'on pouvait estimer cette rétention initiale à 0.2*J. On a donc :

$$R(t) = (P(t) - 0.25 J)^2 / (P(t) + 0.8J)$$

Fonction dite de production avec :

- P(t)** hauteur de pluie tombée entre 0 et t (mm).
- R(t)** lame nette écoulée entre 0 et t (mm).
- J** capacité maximale d'infiltration (mm).
- P(t) = a*D^{1-b}** où a et b sont les coefficients de Montana.

Une autre méthode dérivée de la fonction de production du SCS établie par le CEMAGREF-Lyon, permet d'estimer le débit décennal de pointe de petits bassins versants lorsque ceux-ci sont de petites tailles (inférieurs 15 km²). Cette méthode dérivée est plus simple et facilement utilisable avec IRIP que la première méthode SCS puisque la quantification du ruissellement est surtout utile à petite échelle. La différence par rapport à la méthode SCS réside dans le calcul de J :

$$\ln(J) = 0.232 \ln(S) + 0.3.509$$

Le reste du calcul reste valable. Donc le Débit Instantané maximal Annuel Décennal QXA10 devient alors :

$$QIXA10 = 1,3 * (S * (P(t) - 0,2J)^2) / (P(t) + 0,8J) * 3,6 D))$$

Avec :

D la durée caractéristique de crue des petits bassins versants calée dans un contexte typologique de soudaineté et violence des crues **ln(D)=0,375 * ln(S) + 3,729.**

Comme pour les autres types de modèles, il existe une grande variété de modèles à base de formules empiriques ou semi-empiriques. Chaque formule est utilisable de façon assez simple mais son domaine d'action varie d'une formule à l'autre.

Le choix de la méthode d'estimation va donc dépendre de l'utilisateur. Bien qu'il soit orienté vers une méthode en fonction du bassin versant étudié, les données dont ils disposent ainsi que la localisation géographique de la zone étudiée, vont en outre l'influencer

dans le choix de la formule. Par exemple, la SNCF utilise les formules citées ci-dessus en fonction des critères de surfaces des bassins versant et de la région climatique de ceux-ci (Figure 45).

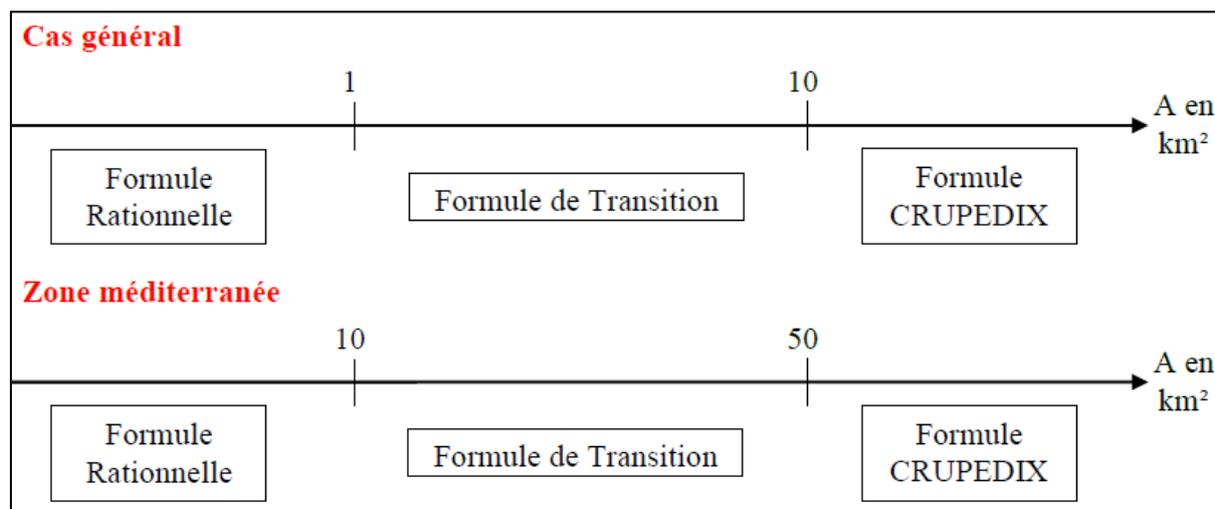


Figure 45 : Synthèse des formules utilisées par la SNCF (Hasnaoui 2013)

Concernant la possible quantification des débits issus du ruissellement déterminés par IRIP, plusieurs réponses peuvent être apportées :

- **L'utilisation de formules semi-empirique ou empirique est une nécessité dans le cadre d'un couplage avec la méthode IRIP.** En effet, il n'existe aucune base de données assez importante chronologiquement et spatialement traitant des débits observés issus du ruissellement. De plus, l'objectif de la méthodologie d'IRIP est de pouvoir intervenir dans des bassins versants jaugés et non jaugés. Par soucis de simplification vis-à-vis des opérateurs, une seule méthode de quantification du ruissellement doit être utilisée. Les formules empiriques et semi-empiriques pouvant fonctionner sur des bassins versants jaugés ou non apparaissent alors comme la solution la plus adaptée à la problématique posée.
- **L'estimation des débits de pointes doit pouvoir être réalisable facilement sur l'ensemble du territoire par une méthode générale.** IRIP se veut être un outil universel applicable en toute condition avec le moins d'approximations possibles. Ainsi des formules comme la formule SOCOSE (uniquement utilisable sur des bassins versant ruraux) ne peuvent être utilisées pour un couplage avec IRIP puisque trop spécifique.
- **L'utilisation d'une formule utilisable sur un intervalle d'échelle aussi grand que possible.** La méthode IRIP est applicable à tout type de bassin versant de toute taille. Ceci n'est pas le cas de toutes les formules présentées ci-dessus. C'est pourquoi, et afin de ne pas perdre de vue l'utilisation multi échelle d'IRIP qu'il est important de considérer un couplage avec une formule pouvant s'appliquer sur un intervalle d'échelle le plus large possible (Idéalement pour une utilisation parcellaire à une utilisation régionale voire nationale). Ainsi, par exemple la méthode rationnelle (valable uniquement sur de petits territoire) ne peut être bénéfique à la méthode IRIP.

- **L'utilisation d'une formule induisant le moins d'approximation possible au couplage.** L'incorporation d'évènements pluvieux dans la méthode IRIP, dans le but de quantifier le débit issu du ruissellement, est une source d'approximation majeure du couplage. En effet, intégrer une pluie sur un bassin versant induit une phase de distribution spatiale de l'intensité de la pluviométrie. Cette distribution spatiale des intensités de pluies fournies par calculs probabilistes augmente fortement les erreurs intrinsèques au couplage IRIP-formule.

Une démarche générale d'application des différentes méthodes a été définie en lien avec la méthode IRIP afin de mettre en évidence la formule la plus apte à fournir une quantification des débits observés dans une perspective de couplage.

Une étude menée par la SNCF en 2013 (Hasnaoui 2013), fait une comparaison de ces différentes méthodes à partir des résultats d'IRIP. Dans ce rapport une intercomparaison entre la méthode CRUPEDIX, la méthode Rationnelle, la méthode dérivée SCS (appelée SCS rapide) et la méthode de transition est étudiée. La synthèse des différents résultats obtenus sur les différents bassins versants testé est résumée dans le tableau ci-dessous (Figure 46).

Plage de superficie (Km ²)	N ^o bassins versants	Climat	CRUPEDIX	Rationnelle	SCS (rapide)	Transition
0<S<10	6	Montagne	169%	282%	3%	229%
	7	Montagne	-48%	-74%	-62%	-60%
	1	Continental	-15%	-17%	-19%	-16%
	16	Océanique	-13%	163%	32%	45%
	33	Océanique	-18%	85%	21%	13%
	38	Océanique	72%	153%	50%	83%
	31	Méditerranéen	-4%	154%	-58%	3%
	23	Océanique	-22%	-58%	-17%	-24%
	37	Océanique	-16%	-4%	8%	-16%
10<S<20	22	Montagne	-35%	-48%	-52%	-42%
	27bis	Continental	238%	334%	202%	281%
	34	Océanique	53%	212%	92%	111%
	21	Montagne	90%	157%	33%	91%
	17	Océanique	232%	222%	271%	232%
20<S<30	39	Océanique	-9%	51%	129%	189%
	24	Océanique	68%	-56%	38%	-157%
	26bis	Océanique	147%	699%	168%	1037%
	15	Océanique	76%	28%	55%	12%
	14	Océanique	28%	293%	164%	359%
	35	Océanique	43%	42%	95%	42%
	19	Continental	117%	189%	128%	141%
	42	Montagne	-33%	53%	-34%	-20%
	18	Océanique	-63%	43%	0%	-59%
	30	Montagne	6%	47%	-44%	7%
	26	Océanique	179%	64%	67%	179%
9	Montagne	-43%	-34%	-76%	-43%	

Figure 46 : Tableau récapitulatif des résidus des différentes méthodes d'estimation de débit (Hasnaoui 2013)

Le tableau de synthèse complet des estimations de débits par les différentes méthodes est disponible en annexe 8. Le tableau ci-dessus met en avant divers points importants sur l'estimation des débits :

Tout d'abord, il semblerait que l'influence du climat sur les estimations de débit ne révèle pas de tendances particulières. **Aucun lien ne peut être établi pour le moment entre le climat et le débit.** Les données n'étant pas suffisantes pour une analyse statistique, il faudrait une étude plus approfondie sur ce point (avec plus de bassins versants de climats différents) pour pouvoir affirmer ou infirmer l'influence du débit par le régime climatique.

Pour la méthode Rationnelle, on remarque une surestimation forte des débits (deux à trois fois supérieurs à ceux observés) à l'exception de certains très faiblement sous-estimés (près de la moitié voire du tiers de la valeur débitométrique observée). On remarque cependant que la méthode Rationnelle est plutôt pertinente pour les bassins versants dont la superficie est comprise entre 20 et 30 km². Cette méthode est donc peu pertinente, au vu des résultats présentés, pour une perspective de couplage avec la méthode IRIP.

Pour la méthode CRUPEDIX, on observe une estimation des débits assez correctes (avec une incertitude inférieure à 20% par rapport aux débits observés) pour les bassins versants ayant une petite superficie (inférieure à 10 km²). Une surestimation importante pour les bassins versants de superficie comprise entre 10 et 20 km², et des débits plus faiblement surestimés et sous-estimés pour les bassins versants de tailles plus importantes (de 20 à 30 km²).

Pour la méthode de Transition, on remarque une faible surestimation pour les bassins versants de petites superficies (inférieure à 10 km²). Une très forte surestimation pour les bassins versants de 10 et 20 km², et une surestimation pour les bassins versants de 20 à 30 km². Cette méthode démontre bien son côté transitoire entre les deux méthodes précédentes puisque les résultats obtenus lors de l'intercomparaison nous montrent une estimation des débits générale plus pertinente que la méthode Rationnelle, mais moins correcte que la méthode CRUPEDIX.

Enfin la méthode dite du « SCS rapide » ou « dérivée du SCS », semble assez similaire aux estimations produites par la méthode CRUPEDIX mis à part pour les bassins versants ayant une superficie comprise entre 20 et 30 km², on l'observe une forte surestimation de ces débits calculés.

Une étude réalisée avec plus de données et surtout avec une variabilité de bassins versants plus importante, et des classes de superficie plus grandes, pourrait être utile pour compléter et affirmer les tendances décrites ci-dessus. La méthode CRUPEDIX et la méthode « SCS rapide » semblent se distinguer par leur faible taux d'erreur vis-à-vis des autres formules. Néanmoins la méthode CRUPEDIX est plus correcte pour les bassins versants de taille située entre 20 et 30 km². **Donc en se basant sur cette étude réalisée par la SNCF, il est possible de dire que la méthode CRUPEDIX semble la plus appropriée (car celle étant la plus pertinente sur l'estimation des débits peu importe la superficie du bassin versant) pour un couplage avec la méthode IRIP.**

5.3.4 Incorporation d'une période de retour à la méthode IRIP

Une dernière perspective à la méthode IRIP est la caractérisation des zones ruisselantes en fonction de la période de retour d'un événement. La méthode IRIP effleure déjà l'idée à travers l'utilisation de classes de sensibilité au

ruissellement. Prenons l'exemple des zones de production du ruissellement : IRIP produit une carte des zones ayant une propension à ruisseler avec des niveaux de sensibilité. Plus le niveau est important (niveau 4 correspondant au niveau maximum) plus il ruissèlera facilement quel que soit l'intensité de l'évènement pluvieux, et en partant du principe que lors d'évènements exceptionnels (Périodes de retour pluricentennales à millénaire) l'ensemble du bassin versant ruissèle. Il est possible alors de déduire les hypothèses suivantes (figure 47) :

- Les zones de niveaux 4 vont donc produire du ruissellement pour des évènements à périodes de retour faibles à très faibles.
- Lors d'un évènement pluvieux plus intense (d'une période de retour de l'ordre biannuelle à pluriannuelle) ce sont les zones de production ayant une sensibilité de classes 4 et 3 qui vont produire du ruissèlement.
- Pour une période de retour encore plus importante (centennale à pluricentennales), ce pourrait être les zones de classe de sensibilité 4, 3 et 2 qui pourraient ruisseler.

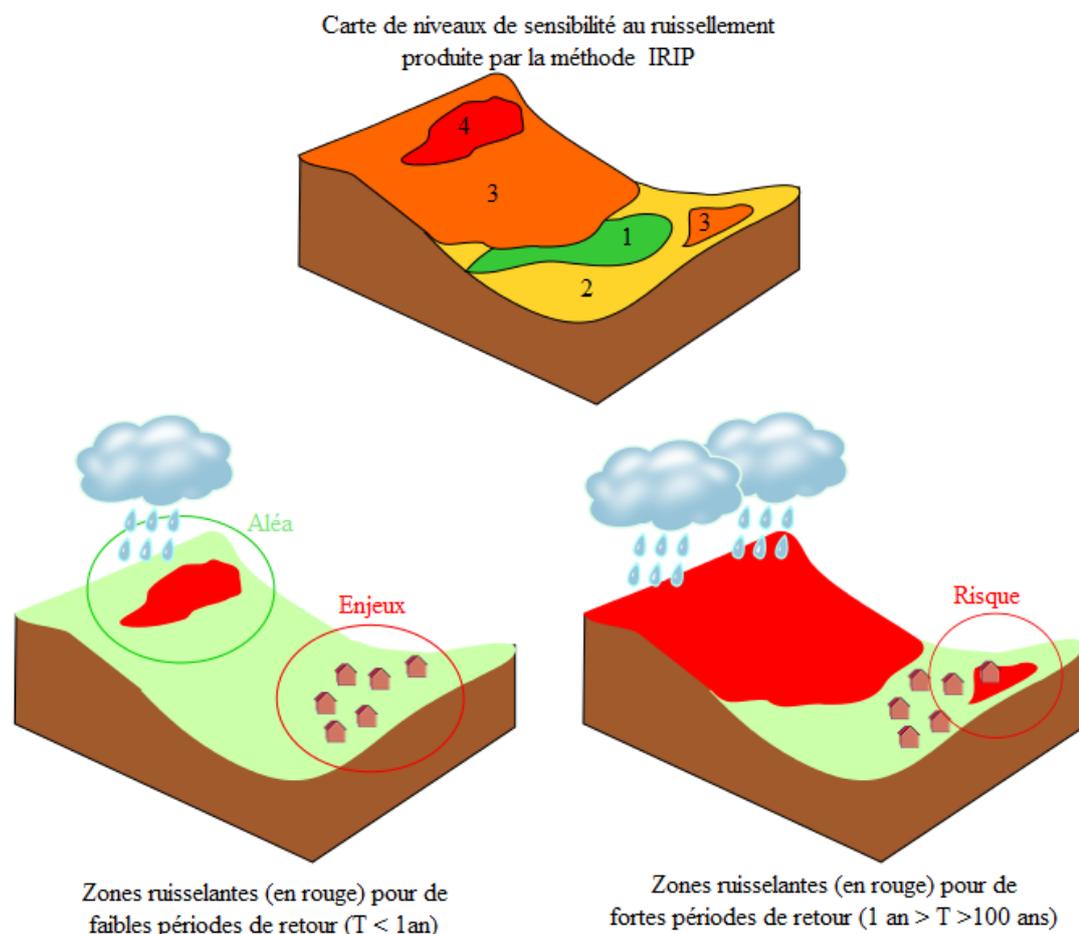


Figure 47 : Représentation de la notion de période de retour par la méthode IRIP

Le principe d'association des cartes de sensibilité à une période de retour explicité ci-dessus, n'est valable qu'après un calage réalisé sur le bassin versant étudié. Chaque bassin versant aura son niveau de sensibilité pouvant correspondre à une période de retour spécifique au bassin versant.

L'incorporation d'un calage de la période de retour d'un évènement avec la méthode IRIP est intéressante pour la gestion des bassins versants, de l'urbanisme et des préventions

des risques. En effet, connaissant généralement les prévisions des cumuls de pluies sur un bassin versant, pouvant relier ce cumul à une période de retour, il serait alors possible d'établir une carte des zones qui vont ruisseler par la méthode IRIP. Et ainsi, pouvoir réaliser de la prévention sur les zones à enjeux notamment pour les services de sécurité civile.

En résumé :

- **Il existe trois types de modèles hydrologiques : empiriques, conceptuels et à base physique.**
- **Sur les 15 modèles étudiés, 6 seraient pertinents pour faire l'objet d'un couplage avec la méthode IRIP (les modèles SCALES, STREAM, LISFLOOD, CCR, EROSION3D, TOPSIMPL).**
- **Le développement de la méthode IRIP pourrait se faire par l'intégration d'une quantification du ruissellement par la méthode CRUPEDIX ou « SCS rapide »**
- **L'incorporation d'une période de retour à la méthode IRIP est possible à travers l'utilisation des classes de sensibilité de l'indicateur cartographique de ruissellement**

Conclusion

1. Le phénomène du ruissellement :

La notion de ruissellement est une notion qui se définit différemment selon la perception du phénomène. Ainsi **pour un même phénomène naturel, un agronome s'intéressera à l'érosion des parcelles agricole, un hydrologue aux transferts de surface sur le bassin versant et l'hydraulicien à l'apport au cours d'eau du ruissellement** (figure 48). Ce problème de perception est responsable d'une grande ambiguïté du terme contraignant le législateur à ne pas légiférer sur le problème du ruissellement comme le montre son absence dans la Directive 2007/60/CE en date du 23 octobre 2007.

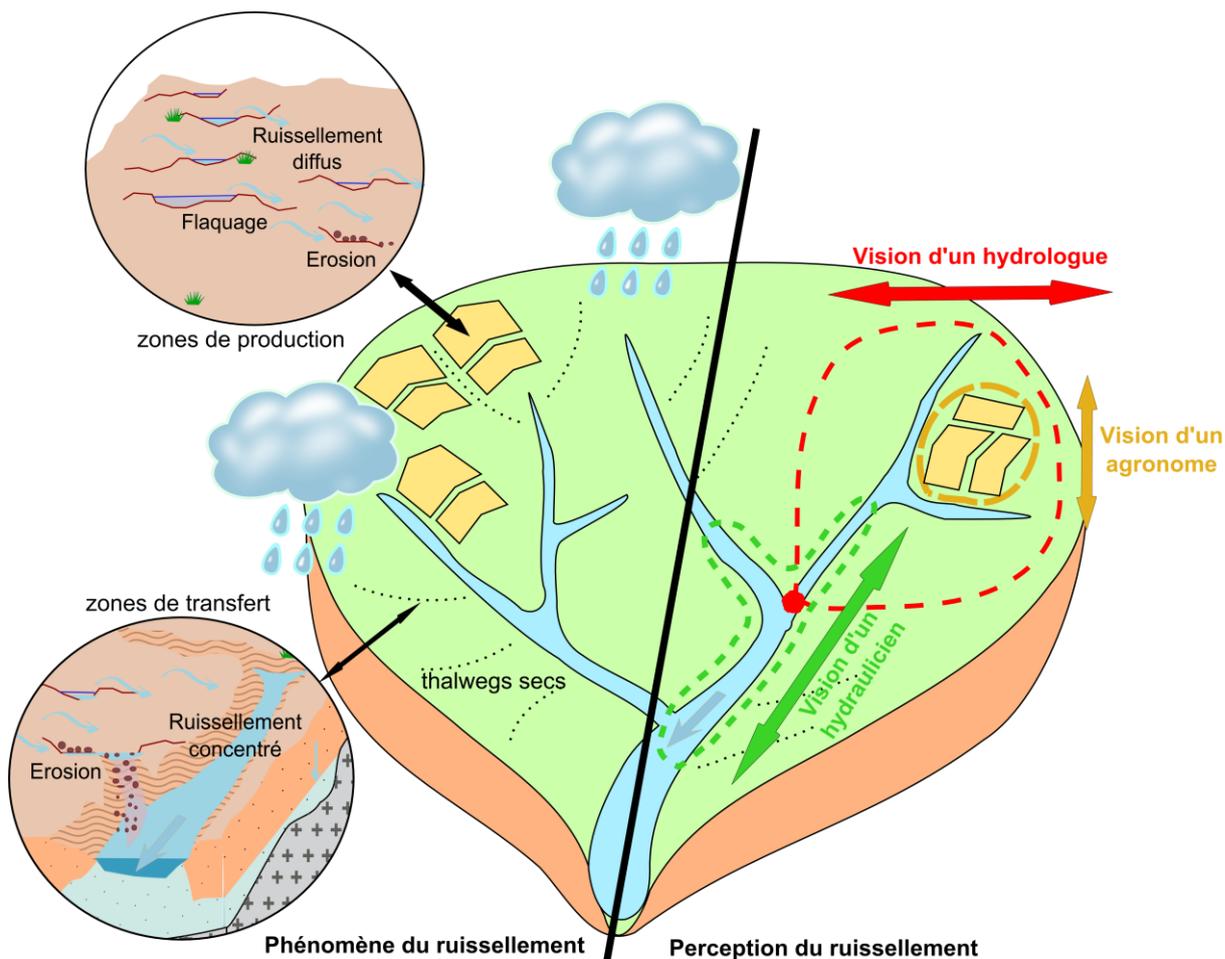


Figure 48 : Comparaison de la notion de ruissellement en fonction du phénomène et de la perception de celui-ci.

2. La méthode IRIP, objectifs et validation :

La méthode IRIP, indicateur cartographique de ruissellement, a pour objectif de proposer une réponse à une détermination plus objective que les méthodes à dire d'experts. Temporellement, la méthode IRIP doit répondre à deux problématiques : La première, à court terme, est la déclinaison de la méthode dans un cadre opérationnel pour la localisation des zones sensibles. La seconde problématique, à long terme, est d'anticiper pour pouvoir mettre en œuvre des

moyens en adéquation avec les enjeux présents (pour éviter, limiter et gérer la période de crise).

Actuellement, bien que la méthode IRIP ne réponde pas encore à tous ses objectifs (puisque la déclinaison de la méthode pour les opérationnels n'a pas été réalisée), elle permet de dégager certaines tendances sur le ruissellement, à savoir :

- **Visualiser** : En effet, la méthode IRIP permet une meilleure compréhension du phénomène physique et de l'impact pour les différents acteurs.
- **Expertiser** : elle permet un meilleur diagnostic des situations existantes.
- **Concevoir** : IRIP permet d'optimiser le coût d'un ouvrage en fonction du risque.
- **Surveiller** : à travers l'organisation de la gestion des circulations (Naulin *et al.*, 2013).
- **Comprendre** : appliquée dans le domaine de la recherche permet d'avoir un regard sur l'ensemble de l'impluvium tout en ayant une approche complémentaire aux modélisations physiques.

Bien que cette méthode soit toujours en développement au sein de la SNCF, une première approche a montré la véracité des résultats produits. Actuellement l'inexistence de bases de données historiques suffisamment précises sur la localisation des sinistres empêche une validation de la méthode IRIP. C'est pourquoi d'autres approches alternatives ont dû être prises en compte (localisation d'ouvrage, expériences de terrain...) dans notre étude pour étayer la pertinence des cartes de ruissellement produites par la méthode.

Afin de compléter les éléments de validation de la méthode IRIP, d'autres phases d'application de la méthode sur des territoires très contrastés seraient nécessaires. **En effet pour le moment, comme précisé dans le rapport, l'application de la méthode IRIP se fait en fonction des méthodes de validations disponibles sur les bassins versants considérés (ex : Les infrastructures pour les zones de production et de transfert dans le bassin versant de l'Azergues ou encore l'accidentologie des routes pour la mise en évidence des zones de transfert et d'accumulation dans le Gard...).** D'autres pistes de réflexion concernant les moyens de validation sont à rechercher pour permettre à long terme une diffusion universelle. De plus, diverses perspectives d'amélioration de la méthode (par couplage avec des modèles pluies-débits ...) ont été soumises dans ce travail afin de pouvoir rattacher la méthode avec d'autres outils déjà utilisés par la communauté scientifique.

Au-delà des objectifs et des méthodes de validation, un autre aspect apparaît : celui du paramétrage de la méthode avec des données terrains. L'application de la méthode IRIP sur le bassin versant de l'Azergues s'est contenté de suivre le protocole de base issu du rapport technique de celle-ci (Dehotin *et al.*, 2011). Il serait pertinent de comparer les cartes obtenues avec de nouvelles créées à partir d'hypothèses de travail différentes. Par exemple, utiliser une pondération aux cartes sur l'occupation du sol (une piste d'étude pourrait être la prise en considération d'un travail du sol). Un sol agricole travaillé ruissellera moins qu'un sol non labouré comme le montre Bussièr (1996). D'autres hypothèses pourraient mettre en avant le rôle plus ou moins important de chaque facteur sur le ruissellement en faisant varier le seuil à partir duquel la méthode IRIP favorise le ruissellement.

3. Perspectives :

En se plaçant dans une perspective de recherche de la compréhension spatiale et d'analyse du phénomène de ruissellement, la méthode IRIP offre diverses pistes de réflexion. Ces pistes, encore à l'état d'hypothèses, peuvent par la suite déboucher sur des avancées significatives dans la compréhension de l'aléa et donc de la protection des zones sensibles. **La méthode IRIP aborde le phénomène hydrologique du ruissellement en tant qu'analyse spatiale contrairement aux modèles hydrologiques classiques cherchant à définir le ruissellement en termes de volume.** Cet avantage permet entre autres de pouvoir réfléchir sur l'importance de la spatialisation du phénomène. En effet, deux bassins versants ayant proportionnellement les même taux de zones productrices et accumulatrices entre eux, mais répartis différemment spatialement, vont avoir une réponse hydrologique différente. **On peut dès lors émettre l'hypothèse selon laquelle la spatialisation du phénomène a un impact sur la cinétique hydrologique du bassin versant.** Dans cette optique, la méthode IRIP serait alors une entrée importante dans la modélisation hydrologique de par l'utilisation spatiale des caractéristiques des bassins versants et ainsi réduire les incertitudes obtenues lors de l'utilisation de ces modèles.

Enfin, la lutte contre les inondations est encore un débat d'actualité. Dans le cadre des lois de décentralisation des compétences du 2 mars 1982 (loi Defferre), la gestion des bassins versant et la lutte contre les phénomènes extrêmes ont pour volonté d'être transférés aux collectivités territoriales. **Ce transfert a été voté au Sénat par le projet de loi en date du 7 octobre 2013 concernant la modernisation de l'action publique territoriale et l'affirmation des métropoles et transmis à l'Assemblée Nationale en seconde lecture.** La cible des utilisateurs possibles de la méthode IRIP deviendra alors les collectivités locales et agglomérations. Cette perspective renforce d'autant plus la nécessité d'une action de lutte contre le ruissellement à travers une méthode consensuelle sur de petits comme de grands territoires. **Ainsi, le cahier des charges correspondant aux besoins de ces nouveaux acteurs locaux pourrait alors être rempli par la méthode IRIP.**

Références Bibliographiques

Arévalo, A., 2009. Simulation of a local flood event in a settling area with EROSION 3D, Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg. 72p.

Bader, J.C., 1994. Modèle analogique de ruissellement à stockage de surface test sur parcelles et extrapolation sur versant homogène. Journ. Scienc. Hydrol., 39, 6, p. 569-592.

Bendjoudi, H., Hubert, P., 2002. Le coefficient de compacité de Gravelius : analyse critique d'un indice de forme des bassins versants. Revue des sciences hydrologiques – Hydrological sciences, vol. 47, n° 6, 921-930.

Beven, K. J., Kirkby, M. J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology, Hydrol. Sci. Bull., 24, 43–69.

Blair, A., Sanger, D., White, D., Holland, A.F., Vandiver, L., Bowker, C., White, S., 2012. Quantifying and simulating stormwater runoff in watersheds. Hydrological Processes. 11 p.

Blöschl, G., Sivapalan, M., 1995. Scale issues in hydrological modelling. A Review. Hydrological Process , 9, 251-290.

Brelot, E., Chappier, J., 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.

Bussière, M., 1996. L'érosion des sols cultivés en France: manifestation, coûts, remèdes. Mémoire D.E.S.S., Université de Picardie Jules Verne, 136 p.

Cadet, Y., Gullaud, C., Dornier, G., Lazzarotto, D., Adam, C., 2010. 1910 la crue du siècle à Besançon. Dossier de presse, 9 p.

CEMAGREF, 1980. Etude de la mise en valeur de la méthode SOCOSE dans la région Provence-Alpes-Côtes d'Azur. France, 65p.

Cerdan, O., Le Bissonais, Y., Govers, G., Lecomte, V., van Oost, K., Couturier, A., King, C. and Dubreuil, N., 2002. Concentration of suspended particles in interrill flow. Earth surface processes and landforms.

Cerdan, O., Le Bissonais, Y., Souchère, V., King, C., Antoni, V., Surdyk, N., Dubus, I. Arrouays, D., & Desprats, JF., 2006. Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols Rapport n°3: Synthèse et recommandations générales. Rapport BRGM-RP-55104-FR. Tech. rept. INRA - BRGM.

Chambre régionale d'agriculture Rhône-Alpes, 1997. Cartographie des sols du Rhône – Application à la réalisation de cartes d'aptitudes culturales et forestières et à l'étude de l'enracinement de la vigne en Beaujolais. Programme Inventaire, Gestion et Conservation des sols (IGCS) du ministère de l'Agriculture, fiches de sols et notices explicative.

CORPEN (Comité d'Orientation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'Environnement), 2001. Diagnostic de la pollution des eaux par les produits

phytosanitaires : bases pour l'établissement de cahiers des charges des diagnostics de bassins versants et d'exploitations, Groupe phytopratt, 34 p.

CTGREF, SRAE, DIAME, SH., 1980-1982. Synthèse nationale sur les crues des petits bassins versant. Fascicule 2 : la méthode SOCOSE, Information technique n°38-2 (juin 1980) ; Fascicule 3 : la méthode CRUPEDIX.

Dehotin, J., Breil, P., 2011. Rapport technique du projet IRIP: Cartographie de l'aléa inondation par ruissellement, Cemagref-Publications, rapport technique Juillet 2011 Lyon : 76p.

Demarcin, P., Degré, A., Smoos, A., Dautrebande, S., 2009. Projet ERRUISSOL. Cartographie numérique des zones à risque de ruissellement et d'érosion des sols en Région wallonne. Rapport final de convention DGO3-FUSAGx. Unité d'hydrologie et hydraulique agricole. Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux. 55 p + annexes.

De Roo, A.P.J., Wesseling, C.G., Ritsema, C.J., 1996. LISEM: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. II: sensitivity analysis, validation and application. Hydrological Processes, 10, 1119-1126

Devillers, J., Farret, R., Girardin, P., Rivière, J-L., Soulas, G., 2005. Indicateurs pour évaluer les risques liés à l'utilisation des pesticides, 278 p.

DIREN Languedoc-Roussillon, 2003. Inventaire cartographique des dégâts de crues du Gard et du Vaucluse – Bassin versant des Gardons, HFS 20157 U / MN, 7p.

Duchemin, M., Lachance, M., Morin, G. et Lagacé, R., 2001. Approche géomatique pour simuler l'érosion hydrique et le transport des sédiments à l'échelle des petits bassins versants. Water Quality Research Journal of Canada, 36 (3), p. 435-473.

EA⁽¹⁾, 2010. What is the Flood Map for Surface Water - Guidance for Local Resilience Forums, Regional Resilience Teams, Local Planning Authorities and Lead Local Flood Authorities, v1 November 2010, 34 p.

EA⁽²⁾, 2010. Using Surface Water Flood Risk Information : Guidance for Local Resilience Forums, Regional Resilience Teams, Local Planning Authorities and Lead Local Flood Authorities, v1 November 2010, 44p

Esteves, A., De Rosa, C., 1989. A simple method for correcting the solar radiation readings of a Robitzsch-type pyranometer Solar Energy, 42 (1), p. 9–13

Esteves, M. et Rajot, J.L., 1999. Un exemple de cartographie de l'aptitude au ruissellement en région sahélienne : Sama Dey, Niger, Hydrological Sciences – Journal des Sciences Hydrologiques, 16 p.

Flanagan, D.C., Livingston, S.J., 1995. Water erosion prediction project (WEPP) version 95.7 user summary. NSERL Report No. 11, National Soil Erosion Research Laboratory, USDA-Agricultural Research Service, West Lafayette, Indiana, 139 p.

FOOTPRINT SUGAR, 2008. The Surface Water / GroundwAter contRibution index, Produced as part of the EU-funded FOOTPRINT project SSPI-CT-2005-022704, <http://www.eu-footprint.org/sugar.html>

Fox, D.M., Bryan, R.B., Price, A.G., 1997. The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions. *Geoderma* 80(1-2), pp. 181–194.

Gonzalez-Sosa, E., Braud, I., Dehotin, J., Lassabatère, L., Angulo-Jaramillo, R., Lagouy, M., Branger, F., Jacqueminet, C., Kermadi, S., Michel, K., 2010. Impact of land use on the hydraulic properties of the topsoil in a small French catchment, *Hydrological Processes*, 24(17), 2382-2399.

Gras R., Benoît, M., Deffontaines, J.P., Duru, M., Lafarge, M, Langlet, A., Osty, P.L., 1989. Le fait technique en agronomie, *Activité agricole, concepts et méthodes d'étude*, Institut National de la Recherche Agronomique, Le Harmattan, Paris, France.

Green, W.H., Ampt, G., 1911. Studies of soil physics, part I - the flow of air and water through soils. *J. Ag. Sci.* 4 : 1-24

Hasnaoui, A., 2013. Utilisation de la méthode IRIP pour l'estimation des débits des bassins versants non jaugés. Rapport de stage de fin d'étude de Master 2 SUEE, Université Pierre et Marie Curie Paris. Encadrement MOULIN M-A. 50p

Jaillet, C., Poulard, C., Breil, P., 2012. Méthode de cartographie du ruissellement (au sens D.I.). Synthèse des méthodes de cartographie des inondations par ruissellement en France. Convention IRSTEA/MEDDE, Volet PREVENTION DES INONDATIONS, 33 p.

Jauffret, D., Desprats, J.F., Martelat, A., Garnier, J.N., Joannon, G., Grenier, S., Paput, M.C., Creuzot, G., et Viprey, F., 2001. Cartographie préliminaire à la mise en place du réseau de suivi des produits phytosanitaires dans les eaux en région Bourgogne, 118 p.

Journal Officiel de l'Union Européenne, 2007. Directive 2007/60/CE du parlement européen et du conseil du 23 octobre 2007 relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE), 22 p.

Julien, P.Y., Saghafian, B., 1991. CASC2D users manual - A two dimensional watershed rainfall-runoff model, Civil Engr. Report, CER90-91PYJ-BS-12, Colorado State University, Fort Collins, CO.

Kauark-Leite, L. A., 1990. Réflexions sur l'utilité des modèles mathématiques dans la gestion de la pollution diffuse d'origine agricole, Thèse, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 342 p.

Langlois, P., Delahaye, D., 2002. RuiCells : automate cellulaire pour la simulation du ruissellement de surface, *Revue internationale de Géomatique*, Vol 12, n°4, p 461-487.

LAWA, 2010. Recommendations for the Establishment of Flood Hazard Maps and Flood Risk Maps, 37 p.

Le Bissonnais, Y., Montier, C., Daroussin, J., King, D., 1998. Cartographie de l'aléa «Erosion des sols » en France. Edition IFEN, Collection Etudes et Travaux n° 18, août 1998, 77p.

Le Gouée, P., Delahaye D., 2008. "Modélisation et cartographie de l'aléa érosion des sols et des espaces de ruissellement dans le Calvados." Rapport d'étude.

Le Gouée P., Delahaye D., 2007. SCALES: a large-scale assessment model of soil erosion hazard in Basse-Normandie (France). Geophysical Research Abstracts, Vol. 9, 11299, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2007-A-11299, European Geosciences Union 2007, Vienna, Austria, 15-20 April 2007.

Mardhel, V., Pinson, S., Gravier, A., 2005. Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines en région Nord-Pas-de-Calais, BRGM, 113 p.

Michel, C., 1991. Hydrologie appliquée aux petits bassins ruraux, Deux volumes, CEMAGREF, Antony, France.

Mitchell G., May A., McDonald A., 1995. PICABEU: a methodological framework for the development of indicators of sustainable development, Int. J. Sust. Dev. World. 2, 104-123 p.

Moncoulon, D., Quantin, A., 2013. Modélisation des Événements Extrêmes d'Inondation en France Métropolitaine, La Houille Blanche, Revue Internationale de l'Eau, 1, 22–26, 1.

Mounirou, L.A., 2012. Etude du ruissellement et de l'érosion à différentes échelles spatiales sur le bassin versant de Tougou en zone sahéenne du Burkina Faso : Quantification et transposition des données - Thèse de doctorat : Sciences : Montpellier 2.

Naulin, J.P., Payrastre, O., Gaume, E., 2013. Spatially distributed flood forecasting in flash flood prone areas: Application to road network supervision in Southern France. Journal of Hydrology, 486, 88-99, doi:10.1016/j.jhydrol.2013.01.044

Ozga-Zielinska, M., Gadek, W., Ksiazynski, K., Nachlik, E., Szczepanek, R., 2002. Hydrology. Mathematical model of rainfall-runoff transformation – WISTOO. In: Models of large watershed hydrology. Eds. V.P. Singh, D.K. Frevert. Littleton, Colorado, Water Res. Publ., LLC.

Poulard, C., Breil, P., 2012. Méthodes de cartographie des inondations par ruissellement. Bibliographie européenne et perspectives (dont D.I.). Apports potentiels d'IRIP. Convention IRSTEA/MEDDE, volet PREVENTION DES INONDATIONS, 47 p.

Payrastre, O., Naulin, J.P., Gaume, E., 2013. Projet PrediFlood. Prévision distribuée des crues pour la gestion des routes en région Cévennes Vivarais. Rapport final : Evaluation des conséquences locales sur le réseau routier. IFSTAR Nantes, 45p.

Direction Départementale de l'Équipement Var, DIREN Provence Alpes Côte d'Azur, 2005. Plan de Prévention des Risques Prévisibles, commune de Draguignan. La Nartuby : Note de présentation, 22p et annexes.

Regazzoni, C., Payraudeau, S., Grégoire C., 2010. Synthèse bibliographique des outils d'évaluation de l'aptitude au ruissellement Projet ENRHY (2010-2012) – Livrable I, 22p.

Regazzoni, C., 2009. Analyse des paramètres nécessaires au calcul du volume de stockage des bassins d'orage et leurs incertitudes associées : application au piémont alsacien, Master 2 Géographie Environnementale « Environnement Urbain et interfaces », 79 p.

Richards, L.A., 1931. "Capillary conduction of liquids through porous mediums". Physics 1 (5): 318–333

Rollet, J.P., 2007. Géologie du département du Gard. Essai de synthèse géologique, 10p.

Saulnier, G.-M., 1996. Information pédologique spatialisée et traitements topographiques améliorés dans la modélisation hydrologique par TOPMODEL. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.

Sétra (Service d'études techniques des routes et des autoroutes), 2006. Guide technique: Assainissement routier. France : Ministère des transports, de l'équipement, du tourisme et de la mer, p. 92.

Sivapalan, M., Takeuchi, K., Franks, S.W., Gupta, V.K., Karambiri, H., Lakshmi, V., Liang, X., McDonnell, J.J., Mendiola, E.M., O'Connell, P.E., Oki, T., Pomeroy, J.W., Schertzer, D., Uhlenbrook, S., Zehe, E., 2003. IAHS decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal*, 48,857-880.

Syndicat Mixte pour le Réaménagement de la Plaine des Chères et de l'Azergues (SMRPCA), 2013. PAPI d'intention pour le bassin versant de l'Azergues, 62 p.

Van der Knijff, J.M., Younis, J., and De Roo, A.P.J., 2010. LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river-basin scale water balance and flood simulation. *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 24, No.2, 189-212.

Veyret, Y., 2004. Géographie des risques naturels en France - De l'aléa à la gestion - Ed. Hatier, 251 p.

Veyret, Y., Bost, F., Cambrézy, L., Donze, J., Glemarec, Y., Heude, J., Janin, P., Meschinet de Richemond, N., Pelletier, P., Thouret, J.-C., Viellard-Baron, H., 2003. Les risques, Paris, Sedes, coll. DIEM, 255 p

Van Der Werf, H., Zimmer, C., 1998. An indicator of pesticide environmental impact based on a fuzzy expert system, *Chemosphere*, Volume 36, Issue 10, 2225-2249 p.

Woolhiser, D.A., Smith, R.E., Goodrich, D.C., 1990. KINEROS, A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual. U S. De Agricultural Research Service, ARS-77, 130 p.

Annexes

ANNEXE 1 : TABLEAU RECAPITULATIF DES PRINCIPAUX INDICATEURS DE L'APTITUDE AU RUISSELLEMENT	107
ANNEXE 2 : ANALYSE DE SENSIBILITE SELON LA PRECISION DES DONNEES D'ENTREES	108
ANNEXE 3 : TABLEAU DES LEGENDES DES CODES D'OCCUPATION DES SOLS SELON CORINNE LAND COVER	109
ANNEXE 4 : CARTE DE MISE EN CORRELATION DU VOLUME DES BASSINS DE RETENTION ET DE LA CARTE DE PRODUCTION DU RUISSELLEMENT SUR LE BASSIN VERSANT DE L'AZERGUES	110
ANNEXE 5 : CARTES DE L'OCCURRENCE DES COUPURES DE ROUTES SUR LES CARTES DE RUISSELLEMENT PRODUITES PAR IRIP POUR LE BASSIN VERSANT DU GARDON.	111
ANNEXE 6 : TABLEAU DE SYNTHESE DES PPRIS RUISSELLEMENT EN FRANCE.....	114
ANNEXE 7 : TABLEAU RECAPITULATIF DES PRINCIPAUX MODELES EXISTANT POUR SIMULER LE RUISSELLEMENT.....	115
ANNEXE 8 : TABLEAU DES RESULTATS DES ESTIMATIONS DES DEBITS.....	118

Annexe 1 : Tableau récapitulatif des principaux indicateurs de l'aptitude au ruissellement (selon Regazzoni et al., 2010)

Nom de l'indicateur	Echelle d'étude	Type d'indicateur	Données nécessaires	Méthode	Résultat	Limites
SUGAR⁽¹⁾	Européenne, nationale, régionale	Hybride	MNT, réseau hydrographique, bases de données sols et distribution spatiale du « Standard percentage runoff (SPR)»	Comparaison du réseau hydrographique théorique et réel pondéré par les valeurs du pourcentage de ruissellement standard	Notes exprimant les zones ruisselantes et infiltrantes	Peu fonctionnel pour les régions plates et anthropisées, et peu aptes pour les têtes de bassin versant (sans réseaux pérennes)
IDPR⁽²⁾	Nationale, régionale	Hybride	MNT, réseau hydrographique	Comparaison du réseau hydrographique théorique et réel	Notes exprimant les zones ruisselantes et infiltrantes	Peu adapté dans les régions planes et peu apte en tête de bassin
Téledétection⁽³⁾	Bassin versant de moins de 50 km	Hybride	MNT, photos aériennes, état de surface et pente	- Combinaison des cartes des états de surface et des pentes donnant lieu à des unités hydrologiques homogènes - Vérification sur le terrain des unités hydrologiques - Expertise et attribution de niveau de ruissellement en fonction de données observées sur les unités hydrologiques	Carte de niveau de l'aptitude au ruissellement	Extrapolation de la méthode à dire d'experts La résolution de l'image satellitaire peut être un frein suivant les éléments observés
CORPEN⁽⁴⁾	Bassin versant (inférieur au km ²)	Hybride	Réseau hydrographique, drainage agricole, pédologie, occupation du sol	Croisement d'informations géographiques à dire d'experts	Carte des risques de ruissellement vers les eaux superficielles	Extrapolation de la méthode à dire d'experts à d'autres contextes
Méthode BRGM⁽⁵⁾	Bassin versant, régionale et nationale	A notation	Pente, occupation du sol, lithologie et densité de drainage	Attribution de notes aux critères pentes, occupation du sol, lithologie et densité de drainage et sommation des valeurs de chaque critère pondéré par leur poids respectif	Cartes de l'aptitude au ruissellement	Limites/seuils des classes définies

(1) FOOTPRINT (2008). The Surface Water / Groundwater contribution index. Produced as part of the EU-funded FOOTPRINT project SSPH-CT-2005-022704. <http://www.eu-footprint.org/sugar.htm>

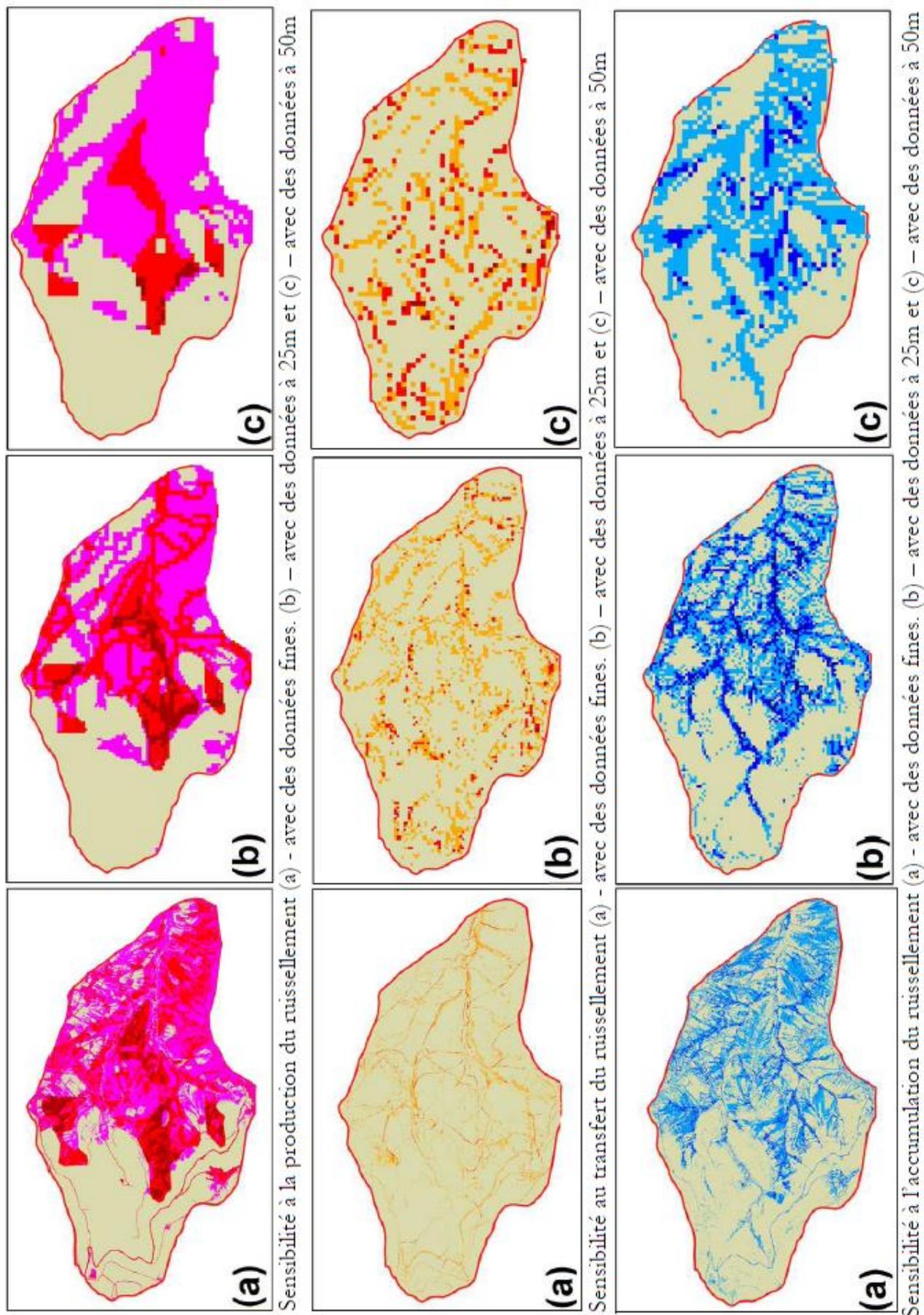
(2) Indes de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR), développé par le BRGM dans les années 1960.

(3) Un exemple de cartographie de l'aptitude au ruissellement. Estieles M. et Rajot J.-L., 1999.

(4) Diagnostics de la pollution des eaux par les produits phytosanitaires. Comité d'Orientation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'Environnement (CORPEN), 2001.

(5) Cartographie des produits phytosanitaires dans les eaux en Bourgogne. Jauffret D., BRGM, 2001.

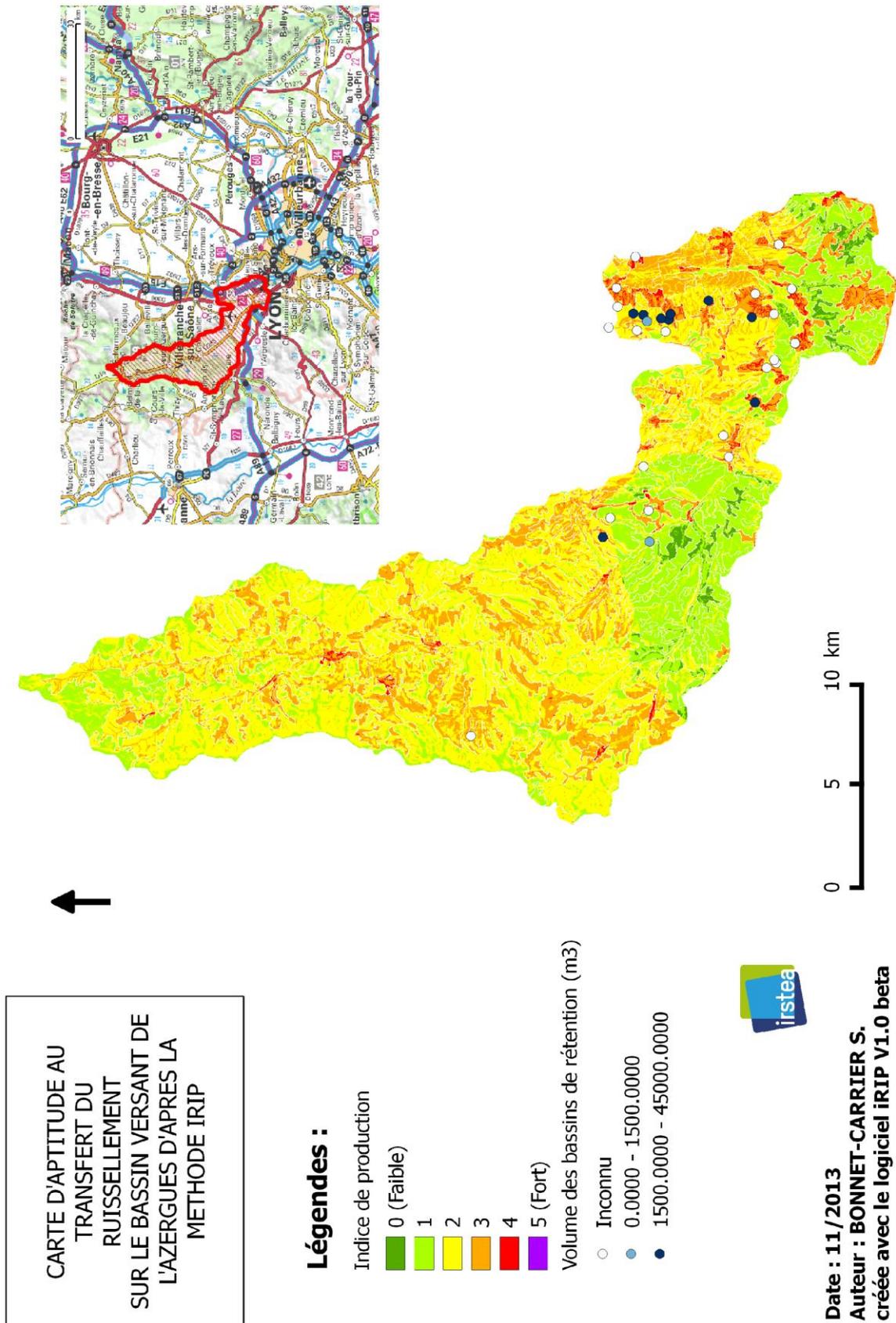
Annexe 2 : Analyse de sensibilité selon la précision des données d'entrées
(Dehotin et al., 2011)



Annexe 3 : Tableau des légendes des codes d'occupation des sols selon
Corinne Land Cover 2006 (IFEN)

Valeur CLC	Code CLC	Définition
1	111	Tissu urbain continu
2	112	Tissu urbain discontinu
3	121	Zones industrielles et commerciales
4	122	Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés
5	123	Zones portuaires
6	124	Aéroports
7	131	Extraction de matériaux
8	132	Décharges
9	133	Chantiers
10	141	Espaces verts urbains
11	142	Equipements sportifs et de loisirs
12	211	Terres arables hors périmètres d'irrigation
13	212	Périmètres irrigués en permanence
14	213	Rizières
15	221	Vignobles
16	222	Vergers et petits fruits
17	223	Oliveraies
18	231	Prairies
19	241	Cultures annuelles associées aux cultures permanentes
20	242	Systemes culturaux et parcellaires complexes
21	243	Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants
22	244	Territoires agro-forestiers
23	311	Forêts de feuillus
24	312	Forêts de conifères
25	313	Forêts mélangées
26	321	Pelouses et pâturages naturels
27	322	Landes et broussailles
28	323	Végétation sclérophylle
29	324	Forêt et végétation arbustive en mutation
30	331	Plages, dunes et sable
31	332	Roches nues
33	333	Végétation clairsemée
33	334	Zones incendiées
34	335	Glaciers et neiges éternelles
35	411	Marais intérieurs
36	412	Tourbières
37	421	Marais maritimes
38	422	Marais salants
39	423	Zones intertidales
40	511	Cours et voies d'eau
41	512	Plans d'eau
42	521	Lagunes littorales
43	522	Estuaires
44	523	Mers et océans

Annexe 4 : Carte de mise en corrélation du volume des bassins de rétention et de la carte de production du ruissellement sur le bassin versant de l'Azergues.

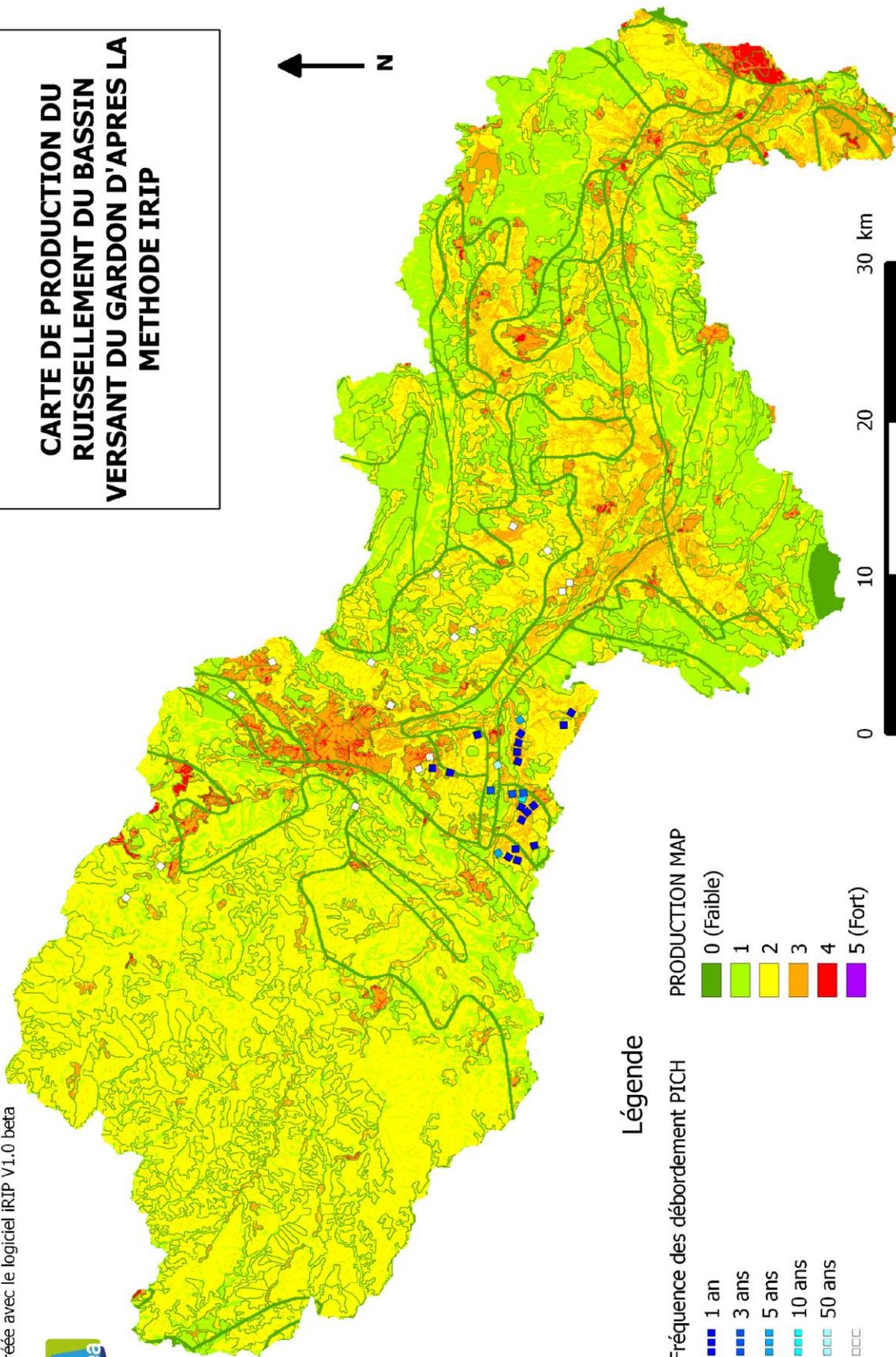


Annexe 5 : Cartes de l'occurrence des coupures de routes sur les cartes de ruissellement produites par IRIP pour le bassin versant du Gardon.

Auteur : BONNET-CARRIER Stanislas
 Date : Novembre 2013
 Projection : Lambert 93
 Carte créée avec le logiciel IRIP V1.0 beta



**CARTE DE PRODUCTION DU
 RUISSELLEMENT DU BASSIN
 VERSANT DU GARDON D'APRES LA
 METHODE IRIP**



Légende

Fréquence des débordement PICH

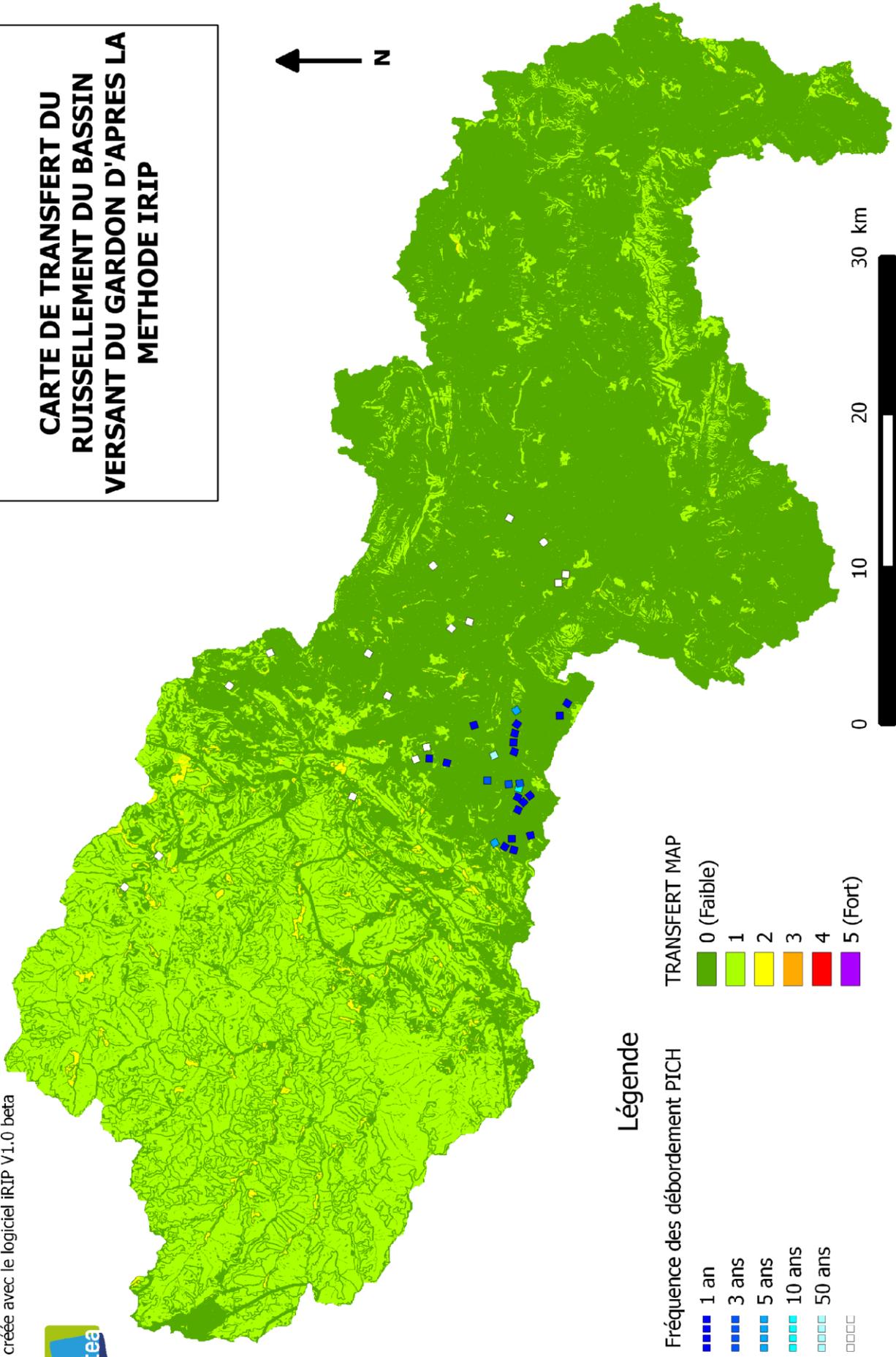
- 1 an
- 3 ans
- 5 ans
- 10 ans
- 50 ans

PRODUCTION MAP

- 0 (Faible)
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5 (Fort)



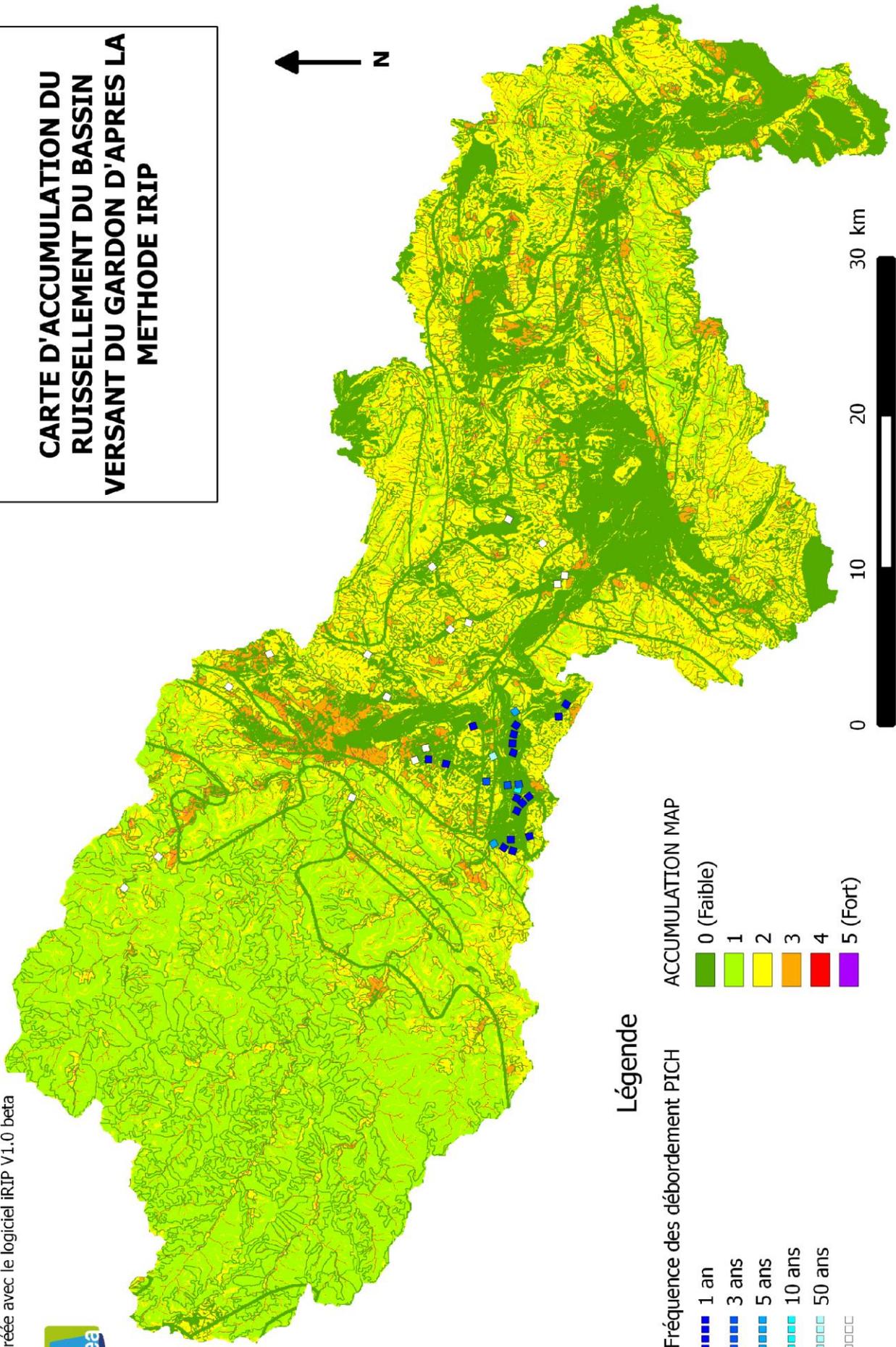
**CARTE DE TRANSFERT DU
RUISSELLEMENT DU BASSIN
VERSANT DU GARDON D'APRES LA
METHODE IRIP**



Auteur : BONNET-CARRIER Stanislas
 Date : Novembre 2013
 Projection : Lambert 93
 Carte créée avec le logiciel IRIP V1.0 beta



**CARTE D'ACCUMULATION DU
 RUISSELLEMENT DU BASSIN
 VERSANT DU GARDON D'APRES LA
 METHODE IRIP**



Légende

- | | |
|--|--|
| <p>Fréquence des débordement PICH</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ ■ ■ ■ 1 an ■ ■ ■ ■ 3 ans ■ ■ ■ ■ 5 ans ■ ■ ■ ■ 10 ans ■ ■ ■ ■ 50 ans | <p>ACCUMULATION MAP</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 0 (Faible) ■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ 4 ■ 5 (Fort) |
|--|--|

caractéristiques BV	Cousin (2010)	Wahagnies (2008)	Sancerrois (pas fini)	Austreberthe (2001)
Type Ruissellement	Ruissellement sur Versant (Écoulement la plupart du temps diffus des eaux météoriques sur des zones naturelles ou aménagées et qui peut localement se concentrer dans un fossé ou sur un chemin.)	Ruissellement sur Versant (Lors d'un événement pluvieux, ce phénomène de ruissellement intervient quand l'eau de pluie ne peut plus s'infiltrer dans le sol et circule sur les versants, en dehors du réseau hydrographique.)	Ruissellement sur Versant (divagation des eaux de pluie en dehors du réseau hydrographique, généralement suite à des précipitations exceptionnelles. Ces écoulements superficiels peuvent provoquer l'apparition d'érosions localisées. Ce phénomène est appelé ravinement.)	Ruissellement sur Versant
Définition Aléa	Intensité (mm/h) + Occurrence	Intensité (hauteurs, durées, vitesses)	Intensité (vitesses, hauteurs) + Occurrence	Hauteur d'eau
Classes d'aléa	Ecoulement, Accumulation	Zone de production, axe d'écoulement, zone d'accumulation (hauteurs, vitesses)	Axe d'écoulement (hauteurs, vitesses), zone de production (occupation du sol, pentes)	Hauteurs d'eau et axes de ruissellement
Modélisation pluie-débit + maille		Hyétogramme crue 2000, station Phalempin	Pluviogramme 1991 à 2003, station Sancerre Chavignol	
Quantile de débits + maille	Q10 et Q100: Formule Rationnelle (3 BV)	Qref: Formules Rationnelle et Manning Strickler (12 sBV)	Q10 et Q100: Formules Crupedix, Rationnelle, Sogreah, Régionalisation, Gradex (8 sBV)	
Méthode	Pas probabiliste. Méthode qualitative	Pas Probabiliste. Etudes prospectives et interprétatives	Pas Probabiliste. Méthode subjective	Pas Probabiliste. Méthode PHEC
Données d'entrée	Géomorphologie + Géologie + Historique	Observation terrain+ témoignages+ phénomènes historiques+ approche hydraulique simplifiée	Bibliographie + observation de terrain + enquêtes	Données historiques (zones inondées, hauteurs d'eau, sinistres)
Contexte	359 km². Zones agricoles et urbaines. Sol imperméable (granite, gneiss) et hydromorphe.	20 km². Zones agricoles, boisées, urbaines. Sol imperméable (argiles plastiques). Pentas 2%.	203,7 km². Zones agricoles, viticoles, urbaines. Sol imperméable (marne, calcaire).	211 km². Zones boisées et urbaines. Pentas 0,0026 m/m.
Remarques	Pas de lien entre la définition de l'aléa et sa classification.	Carte historique et carte aléa assez ressemblantes	Pas de lien entre le calcul des quantile de débits et la cartographie	Informations historiques pourtant pas de périodes de retour

Annexe 7 : Tableau récapitulatif des principaux modèles existant pour simuler le ruissellement.

Modèle	Type	Simulation	Echelle d'application	Vocation	Données d'entrée nécessaires	Avantage pour IRIP / Couplage avec IRIP	Références
LISEM	Hybride	Événementielle	50m ² à 50 km ²	Erosion	la direction locale de l'écoulement, le gradient de pente, la végétation, les états de surface (rugosité, traces de roues, surface encroûtée, cohésion, stabilité des agrégats), le diamètre médian, la conductivité hydraulique à saturation, la profondeur du sol, la largeur des routes, les fossés,...	Utile pour obtenir les cartes d'érodibilité ou de attance pour IRIP Possibilité de valider IRIP grace aux cartes d'écoulement ou hauteur d'eau	De Roo, A.P.J., Wesseling, C.G. and Ritsema, C.J., 1996. LISEM: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. II: sensitivity analysis, validation and application. Hydrological Processes, 10, 1119-1126
KINEROS	Physique	Continue / 10 minutes	Parcelle -> bassin versant 1 km ²	Erosion, TS	Paramètre du sol (Ks, tension capillaire, theta i, teneur max en cailloux) Param Sol (rugosité hauteur interception, couverture du sol par les graviers)	Pas beaucoup intérêt avec IRIP (utilisation de paramètre intrasèque du sol)	Woolhiser, D.A., Smith, R.E. and Goodrich, D.C., 1990. KINEROS, A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual. U S. De Agricultural Research Service, ARS-77, 130 p.
WEPP	Hybride	Événementielle/24h	Versant-> petit bassin versant	Erosion	Topographie (pente) Climat (précipitation, durée, intensité, T°) Sol (Texture, CEC, MO, ...) -Végétation (interception, croissance plante,...)	Peu d'intérêt pour IRIP car le modèle n'utilise pas de carte de ruissellement, mais comme irip des cartes d'informations sur les sols	Flanagan, D.C., Livingston, S.J. (Eds.), 1995. Water erosion prediction project (WEPP) version 95.7 user summary. NSERL Report No. 11, National Soil Erosion Research Laboratory, USDA-Agricultural Research Service, West Lafayette, Indiana, 139 p.
CEQERROSS	Conceptuel	Continue/1h à 12h	5 m ² ->4000 km ²	Erosion	Topo Nature des sols Landuse	Peu intérêt pour IRIP, traite juste de l'érosion	Duchemin, M., Lachance, M., Morin, G. et Lagacé, R., 2001. Approche géomatique pour simuler l'érosion hydrique et le transport des sédiments à l'échelle des petits bassins versants. Water Quality Research Journal of Canada, 36 (3), p. 435-473.
MAR	Conceptuel	Événementielle	Parcelle	Ruissellement	S (antécédent pluviométrique type Kolher) HL et N (paramètres liés à la topographie)	Permet une validation d'IRIP (par rapport au zones très productrices) mais pas un couplage avec IRIP	Bader, J.-C., 1994. Modèle analogique de ruissellement à stockage de surface test sur parcelles et extrapolation sur versant homogène. Journ. Scienc. Hydrol., 39, 6, p. 569-592.

Modèle	Type	Simulation	Echelle d'application	Vocation	Données d'entrée nécessaires	Avantage pour IRIP / Couplage avec IRIP	Références
RuiCells	Automate cell.	Continue	quelques km ²	Ruisselleme nt	MNT Fond Topo Landuse (parcellaire) Hyetogramme	Peu d'utilité de coupler à IRIP car uniquement utilisable sur bassin versant agricoles	Langlois P, Delahaye D, 2002. RuiCells : automate cellulaire pour la simulation du ruissellement de surface, Revue internationale de Géomatique, Vol 12, n°4, p 461-487.
STREAM	Géomatique	Événementielle	ha -> 100 km ² (échelle év pluvieux)	Ruiss.& Ero.	MNT Landuse Hauteur ini nappe Rugosité Drainage * Intensité Travail du sol (sens) Caract év pluvieux	utilisation pour le bilan de ruissellement (proposition des zones à ruisseller ou infiltrer) Définition plus précise des classes de ruissellement pour chaque maille	Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Govers, G., Lecomte, V., van Oost, K., Couturier, A., King, C. and Dubreuil, N. 2002. Concentration of suspended particles in interrill flow. Earth surface processes and landforms.
SCALES	Géomatique		ha-> 5000km ²	Erosion	Topographie Pluies érosives (Intensité journalière et balance hydro positive annuelle) Pratiques culturales Erodibilité du sol	Méthode SCORE comme IRIP Comparaison des zones érosion et zones mises en évidence par IRIP perspectives : remplacer pluies érosives par le ruissellement d'IRIP	Le Gouée P., Delahaye D., 2007. SCALES : a large-scale assessment model of soil erosion hazard in Basse-Normandie (France). Geophysical Research Abstracts, Vol. 9, 11299, SRef-ID: 1607-7962/gr/EGU2007-A-11299, European Geosciences Union 2007, Vienna, Austria, 15-20 April 2007.
LISFLOOD	Géomatique		continent	Débordement cours d'eau	Topo Nature des sols Landuse Précipitations	Possibilité de couplage avec IRIP mais que à grande échelle (pas très significatif pour le ruissellement à cette échelle)	Van der Knijff J.M., J. Younis and De Roo, A.P.J., 2010. LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river-basin scale water balance and flood simulation. International Journal of Geographical Information Science, Vol. 24, No.2, 189-212.
EROSION 3D	Géomatique	Événementielle	Parcelle-> plusieurs parcelles	Erosion, TS, Ruisselleme nt	Landuse Soil map (+ paramètres des sols) Rain (event) MNT	Similaire à IRIP, comparaison des résultats obtenus sur le ruissellement (surtout zones accumulations) / Intégration Données IRIP dans Cr des sols paramètres	Arévalo, A., 2009. Simulation of a local flood event in a settling area with EROSION 3D, Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg. 72p.

Modèle	Type	Simulation	Echelle d'application	Vocation	Données d'entrées nécessaires	Avantage pour IRIP / Couplage avec IRIP	Références
CCR	Géomatique	Evénementielle	échelle de l'évnt pluvieux	Ruisselement	MNT Réseau hydrographique Landuse ETP -> P journalière et P horaire Débit Max. Durant Evt. ou Mois	Couplage avec IRIP pour le modèle "Domages" Intégration d'IRIP à la place du module Ruissellement du modèle	Moncoulon, D. and Quantin, A., 2013. Modélisation des Evénements Extrêmes d'Inondation en France Métropolitaine, La Houille Blanche, Revue Internationale de l'Eau, 1, 22-26, 1.
\$WARF	Géomatique	Evénementielle/24h	61 ha -> 2415 ha	Ruisselement	MNT Landuse Sol P(24h)	Permet d'avoir le potentiel de ruissellement mais à l'échelle du bassin -> Comparaison avec IRIP à l'échelle de la parcelle	Blair A., Sanger D., White D., Holland AF, Vandiver L., Bowker C., White S., 2012. Quantifying and simulating stormwater runoff in watersheds, Hydrological Processes, 11 p.
CASC2D	Physique		échelle de l'évnt pluvieux Testé sur bassin versant 32 km²	Ruisselement	MNT quantité de stockage du sol coefficient de rugosité	le ruissellement est calculé en hydrogramme au niveau des écoulements concentrés Comparaison avec IRIP pour les axes de transit et possible avec les zones contributives (fort hydrogramme = grande zone contributive en amont)	Julien, P. Y., and B. Saghafian, 1991. CAS2D users manual A two dimensional watershed rainfall-runoff model, Civil Engr. Report, CER90-91PYJ-B5-12, Colorado State University, Fort Collins, CO.
WIStOO	Physique	Continu (pas de temps 1h ou 1j) sur de longues périodes	échelle locale du bassin versant	Ruisselement	MNT Réseau hydrographique Landuse Structure du sol et paramètres physiques du sol -localisation stations mesures	Modèle complémentaire avec IRIP. Comparaison possible avec IRIP. Pb : modèle difficilement applicable ailleurs. Modèle en "cour" (réglage en polonais) dont les modules de calculs ne sont pas extractibles.	Ozga-Zielinska M., Gadek W., Ksiazynski K., Nachlik E., Szczepanek R., 2002. Hydrology, Mathematical model of rainfall-runoff transformation - WIStOO. In: Modèles de large watershed hydrology. Eds. V.P. Singh, D.K. Frevert, Littleton, Colorado, Water Res. Publ., LLC.
TOPSIMPL	Physique	Evénementiel	Petit bassin versant rural (-100 km²)	Ruisselement	MNT Paramètres du sol Pluie (evt)	Modèle mettant en avant les zones contributives (et accumulation). Apport d'IRIP pour la localisation des zones contributives et d'accumulation. Pb : Choix arbitraire des zones contributives ou non dans le modèle (en fonction de la distance au cours d'eau et de la taille de la zone)	Saulnier, G.-M., 1996. Information pédologique spatialisée et traitements topographiques améliorés dans la modélisation hydrologique par TOPMODEL. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.

Annexe 8 : Tableau des résultats des estimations des débits (Hasnaoui 2013)

Stations	Identification		Observations		Q calculé										Banquehydro													
			Nbr années	Region	S(Km²)	CRUPEDIX					Ratonnaelle					SCS rapide					transition							
						CRUPEDIX	Résidus	Qe/Qo	E(Qru)	RMSE	Qspéctrique	Ratonnaelle	Résidus	Qe/Qo	E(Qrat)	RMSE	SCS(rapide)	Résidus	Qe/Qo	E(Qscs)	RMSE	Q(m³/s)	Résidus	Qe/Qo	E(Qtransition)	RMSE	Q(XA10(m³/s))	
6	13	Rhône-Alpes	3	0.58	8.1	169%	2.7	2.8	25.6	1.5	11.5	282%	3.8	8.0	71.7	3.1	3%	1.0	0.0	0.0	0.0	9.9	229%	3.3	5.3	47.3	2.7	2.5-3.2
7	20	Midi-Pyrénées	9	1.55	4.7	-48%	0.5	0.2	18.4	0.8	2.3	-74%	0.3	0.6	44.6	3.4	-62%	0.4	0.4	31.1	3.6	-60%	0.4	0.4	29.1	6.9	5.9-8.8	
1	13	Bourgogne	4.5	0.75	3.8	-15%	0.9	0.0	0.4	0.6	3.7	-17%	0.8	0.0	0.6	3.7	-19%	0.8	0.0	0.7	3.8	-16%	0.8	0.0	0.5	2.5	2.2-3.2	
16	9.5	Bretagne	3.2	0.45	2.8	-13%	0.9	0.0	0.2	0.4	8.4	163%	2.6	2.7	27.3	4.2	32%	1.3	0.1	1.0	4.6	42%	1.4	0.2	2.1	3.9	3.6-4.5	
33	13	Bretagne	3.6	0.49	2.9	-18%	0.8	0.0	0.4	0.4	6.7	83%	1.9	0.7	9.4	4.4	21%	1.2	0.0	0.6	4.1	13%	1.1	0.0	0.2	3.7	3.3-4.5	
38	9	Bretagne	3.4	0.39	5.8	72%	1.7	0.5	5.9	0.7	8.6	153%	2.5	2.3	26.9	5.1	50%	1.5	0.3	2.9	6.2	83%	1.8	0.7	8.0	3.5	3.2-4.2	
31	15	Rhône-Alpes	12.2	1.27	11.7	-4%	1.0	0.0	0.3	1.2	30.9	154%	2.5	2.4	351.2	5.1	-58%	0.4	0.3	50.3	12.5	3%	1.0	0.0	0.1	10.0	8.8-13	
23	12	Aquitaine	6.6	0.68	5.1	-22%	0.8	0.1	2.2	0.5	2.8	-58%	0.4	0.3	14.5	5.5	-17%	0.8	0.0	1.3	5.0	-24%	0.8	0.1	2.4	5.5	4.8-6.7	
37	10	Bretagne	5.2	0.54	4.4	-16%	0.8	0.0	0.7	0.4	5.0	-4%	1.0	0.0	0.0	5.6	8%	1.1	0.0	0.2	4.4	-16%	0.8	0.0	0.7	5.9	5.3-7.1	
22	6.5	Pyrénées	12	1.18	7.8	-35%	0.7	0.1	17.5	0.8	6.2	-48%	0.5	0.2	33.5	5.7	-52%	0.5	0.3	39.5	7.0	-42%	0.6	0.2	25.1	12.0	10-14	
27bis	14	Bourgogne	3	0.26	10.1	238%	3.4	5.6	50.8	0.9	13.0	334%	4.3	11.1	100.2	9.1	202%	3.0	4.1	36.6	11.4	281%	3.8	7.9	70.8	2.7	2.4-3.1	
34	12	Bretagne	3.8	0.29	5.8	53%	1.5	0.3	4.0	0.4	11.9	212%	3.1	4.5	64.9	7.3	92%	1.9	0.9	12.3	8.0	111%	2.1	1.2	17.9	4.3	3.8-5.2	
21	6.5	Pyrénées	7.8	0.39	14.9	90%	1.9	0.8	49.7	0.8	20.0	157%	2.6	2.5	149.3	10.4	33%	1.3	0.1	6.6	14.9	91%	1.9	0.8	50.5	8.4	7.3-10	
17	15	Bretagne	2.9	0.14	9.6	232%	3.3	5.4	45.3	0.5	9.3	222%	3.2	4.9	41.5	10.7	271%	3.7	7.3	61.6	9.6	232%	3.3	5.4	45.3	3.0	2.7-3.4	
39	15	Bretagne	4.8	0.23	4.3	-9%	0.9	0.0	0.2	0.2	7.3	51%	1.5	0.3	6.0	11.0	129%	2.3	1.7	38.2	13.9	189%	2.9	3.6	81.9	4.4	3.9-5.3	
24	23	Aquitaine	8.6	0.37	14.4	68%	1.7	0.5	33.8	0.6	3.8	-56%	0.4	0.3	23.5	11.9	38%	1.4	0.1	10.6	-4.9	-157%	-0.6	2.5	183.0	6.3	5.5-7.7	
26bis	10	Aquitaine	4.5	0.19	11.1	147%	2.5	2.2	43.6	0.5	35.9	699%	8.0	48.8	988.2	12.0	168%	2.7	2.8	56.8	51.2	1037%	11.4	107.5	#####	5.1	4.6-6.1	
15	14	Bretagne	8.1	0.34	14.3	76%	1.8	0.6	38.1	0.6	10.4	28%	1.3	0.1	5.2	12.6	55%	1.6	0.3	19.9	9.1	12%	1.1	0.0	1.0	5.0	4.5-5.8	
14	10	Bretagne	4.8	0.20	6.1	28%	1.3	0.1	1.8	0.3	18.9	293%	3.9	8.6	198.1	12.7	164%	2.6	2.7	61.8	22.0	359%	4.6	12.9	296.2	5.0	4.4-6.2	
35	11	Bretagne	6.6	0.27	9.4	43%	1.4	0.2	8.0	0.4	9.4	42%	1.4	0.2	7.6	12.9	95%	2.0	0.9	39.5	9.3	42%	1.4	0.2	7.6	7.3	6.5-9.1	
19	5	Auvergne	6	0.22	13.0	117%	2.2	1.4	49.6	0.5	17.3	189%	2.9	3.6	127.9	13.7	128%	2.3	1.6	58.8	14.5	141%	2.4	2.0	71.7	9.0	7.8-11	
42	37	Rhône-Alpes	18	0.64	12.1	-33%	0.7	0.1	34.4	0.4	27.5	53%	1.5	0.3	90.6	11.9	-34%	0.7	0.1	37.2	14.4	-20%	0.8	0.0	12.9	18.0	18-25	
18	8	Bretagne	14.8	0.51	5.5	-63%	0.4	0.4	85.8	0.2	21.1	43%	1.4	0.2	40.0	14.8	0%	1.0	0.0	0.0	6.1	-59%	0.4	0.3	75.4	8.4	7.5-10	
30	28	Rhône-Alpes	26	0.89	27.6	6%	1.1	0.0	2.5	0.9	38.3	47%	1.5	0.2	150.6	14.7	44%	0.6	0.2	128.7	27.8	7%	1.1	0.0	3.4	24.0	22-26	
26	12	Aquitaine	9	0.30	25.1	179%	2.8	3.2	258.5	0.8	14.8	64%	1.6	0.4	33.5	15.0	67%	1.7	0.4	36.1	25.1	179%	2.8	3.2	258.5	11.0	10-13	
9	19	Languedoc-Roussillon	61	2.00	34.6	-43%	0.6	0.2	696.4	1.1	40.4	-34%	0.7	0.1	424.2	14.7	-76%	0.2	0.6	2148.3	34.7	-43%	0.6	0.2	693.6	64.0	55-79	

Cartographie de l'aléa ruissellement

Inventaire des éléments de validation

BONNET-CARRIER Stanislas, POULARD Christine, BREIL Pascal.

La directive européenne 2007/60/CE prévoit la cartographie des aléas naturels. Cette directive semble omettre phénomène de ruissellement. L'aléa inondation par ruissellement intense est un phénomène naturel encore mal appréhendé par la communauté scientifique. Par définition, la notion de ruissellement est toujours ambiguë et sa caractérisation par mesure in situ est difficile à mettre en œuvre. La méthode IRIP est un indicateur cartographique de l'aléa ruissellement intense pluvial multi-échelle permettant de caractériser cet aléa. Cette méthode produit trois cartes : une carte de production, une carte d'accumulation et une carte de transfert du ruissellement. Afin de pouvoir consolider l'approche du ruissellement par la méthode IRIP, les cartes produites ont besoin d'être vérifiées et validées par des données recueillies sur le terrain. Pour cela, un travail a été réalisé sur le bassin versant de l'Azergues, du Gardon et de la Nartuby. Les données validées permettront par la suite le développement de la méthode à travers un possible couplage de celle-ci avec des modèles pluies-débits afin de quantifier le ruissellement.

Mots clés : Ruissellement, Méthode IRIP, Azergues, Gardon, Nartuby, Eléments de validation.

Title: Runoff cartography. Inventory of validation's items.

Authors: BONNET-CARRIER Stanislas, POULARD Christine, BREIL Pascal.

The 2007/60/CE European directive establishes the cartography of natural hazards. However this directive does not take into account the phenomenon of flooding by runoff water. Runoff water floods hazard is a natural phenomenon still misunderstood by the scientific community. The runoff water is in itself an ambiguous term and its calculation by land measures is difficult to implement. The IRIP method is a multi-scale, cartographic runoff water indicator which takes this hazard into account. This method consists of three maps: a product map, an accumulate map and a transfer map. In order to consolidate the IRIP runoff water approach, these three maps need to be verified and validated by on-site collected data. To that purpose, researches have been conducted in the Azergues, Gardon and Nartuby's catchment. Once validated, the data will contribute to a development of the IRIP method through a possible coupling between this method and a rain-flow model to quantifying runoff water.

Key words: Runoff water, IRIP method, Azergues, Gardon, Nartuby, Items of validation.