

CARTOGRAPHIE DES ZONES DE RUISSELLEMENT INTENSE SUR LE BASSIN VERSANT DE LA DORDOGNE

- Avril 2017 -



Commanditaire de l'étude



EPIDOR
la rivière solidaire

Co-financeur de l'étude



AGENCE DE L'EAU
ADOUR-GARONNE

Etude réalisée par

Inselberg



Pour citer cette étude :

POIRAUD A., LAVEUF C. (2017). **Cartographie des zones de ruissellement intense sur le bassin versant de la Dordogne**. Rapport technique pour l'Établissement Public Territorial de Bassin de la Dordogne, Groupement Inselberg/Solenvie, Mars 2017, 134 pages.

Résumé

La présente étude porte sur la cartographie du ruissellement intense sur les 24 000 km² du bassin versant de la Dordogne. Outre sa taille, le bassin versant présente plusieurs contraintes pour la modélisation, dont notamment une importante diversité de conditions géographiques. Les demandes d'EPIDOR portaient notamment sur la réalisation de cartographies utilisables dans le cadre d'études d'urbanisme, notamment pour l'établissement des SCoT. Dans la mesure du possible, EPIDOR souhaitait également utiliser des données peu onéreuses, voire en libre accès (Open Data).

Le phénomène de ruissellement est un phénomène complexe relevant d'une chaîne de processus spatio-temporels et qui se décompose classiquement en 3 compartiments fondamentaux : la PRODUCTION, le TRANSFERT et l'ACCUMULATION. Nous avons utilisé 3 modèles pour cartographier ces différents compartiments du ruissellement :

- Le modèle SCS-CN, déterministe, distribué et empirique, qui est utilisé depuis plusieurs dizaines d'années à travers le monde, dans des contextes géographiques différents. Ce modèle est considéré comme robuste.
- Le modèle STREAM, qui est de même type que SCS-CN, mis au point par l'INRA et surtout calibré pour les plaines limoneuses du Nord de la France, mais avec des essais dans d'autres régions (Corse, etc.).
- Le modèle IRIP, déterministe, distribué et spatial, qui est encore un modèle expérimental, mis au point par l'IRSTEA (anciennement Cemagref). Nous y avons apporté d'importants développements dans le cadre de cette étude pour l'adapter au mieux au contexte local et pour améliorer sa capacité de prédiction.

Ces modèles ont été vérifiés et validés par un retour "terrain", à partir de visites de secteurs de référence et partir d'une enquête sur les événements de ruissellements historiques.

Un des apports majeurs de cette étude est la synthèse et l'acquisition d'une donnée pédologique adaptée pour la cartographie du ruissellement. Ce long travail a permis néanmoins de proposer des modèles jugés plus robustes que ceux basés sur une reconstitution de la donnée pédologique à partir des cartes géologiques ou des données pédologiques synthétiques à l'échelle cantonale (BDAT). Ce travail est également révélateur de l'esprit dans lequel les modélisations ont été faites, à savoir que la qualité de la donnée d'entrée a été largement privilégiée à la sophistication des procédures de modélisation.

Les résultats sont robustes, même s'il existe encore des incertitudes pour certaines zones, liées notamment à des processus de ruissellement secondaires et/ou plus complexes. De plus, la donnée altitudinale qui a servi de base pour tous les modèles est la BD Alti25m de l'IGN qui limite la précision sur le facteur topographique.

En substance, les régions des Causses charentais, du Val de Dordogne et les vignes de la bordure de Guyenne ou de l'Entre-Deux-Mers présentent de fortes susceptibilités à la PRODUCTION de ruissellement. D'autres régions comme le bassin d'Aurillac ou les Causses jurassiques au sud de Brive présentent également des valeurs importantes. Ces régions ressortent comme les plus susceptibles du bassin versant. Bien qu'arrosées, la zone de montagne (Plateaux limousins, Plateau de Millevaches, Combrailles, Plateau volcanique du Sancy-Artense-Cézallier-Cantal) reste peu susceptible au phénomène de ruissellement, et ce, grâce à des sols généralement profonds et filtrants et à une couverture forestière et/ou prairiale qui limite le phénomène de ruissellement. Les régions caussenardes demeurent plus aléatoires, notamment à cause de complexités qui sont liées au fonctionnement karstique et qu'il n'a pas été possible d'aborder dans le cadre de cette étude. Enfin, les châtaigneraies limousines et auvergnates et le bassin de Brive font figure de région de transition entre la Montagne et les bas plateaux qui encadrent la basse vallée de la Dordogne.

Finalement, les cartographies produites sont utilisables à l'échelle du 1/50 000, notamment à titre informatif dans le cadre de l'élaboration des SCoT.

RESUME	3
INTRODUCTION	6
PARTIE 1. DU RUISSELLEMENT EN GENERAL AU RUISSELLEMENT SUR LE BASSIN VERSANT DE LA DORDOGNE : CHOIX DES STRATEGIES DE MODELISATION	9
1.1. LE RUISSELLEMENT "EN GENERAL" : DES PROCESSUS NATURELS AUX MODELISATIONS NUMERIQUES.....	10
1.1.1. <i>Les différents types de ruissellement</i>	10
1.1.2. <i>Les facteurs de contrôle</i>	11
1.1.3. <i>Les modélisations</i>	13
1.2. LE BASSIN VERSANT DE LA DORDOGNE : SPECIFICITES ET CHOIX DES STRATEGIES DE MODELISATIONS	14
PARTIE 2. ACQUISITION DES DONNEES DE BASE	18
2.1. DONNEES LIEES AUX FACTEURS DE PREDISPOSITION	19
2.1.1. <i>La donnée pédologique</i>	19
2.1.2. <i>La donnée topographique</i>	27
2.1.3. <i>L'occupation du sol</i>	28
2.2. DONNEES LIEES AUX FACTEURS DE DECLENCHEMENT	33
2.3. DONNEES DE CALIBRATION ET DE VALIDATION	34
2.3.1. <i>Les études antérieures et parallèles</i>	35
2.3.2. <i>L'enquête</i>	36
2.3.3. <i>Les arrêtés CatNat</i>	37
PARTIE 3. MODELISATIONS DU RUISSELLEMENT : CHOIX DES PERIODES DE MODELISATION	38
3.1. LES DONNEES METEOROLOGIQUES A L'ECHELLE GLOBALE : LOGIQUES SPATIALES	39
3.2. LES DONNEES METEOROLOGIQUES A L'ECHELLE MENSUELLE : LOGIQUES TEMPORELLES	42
3.3. CONCLUSIONS SUR LA DONNEE METEOROLOGIQUE	46
PARTIE 4. MODELISATIONS DU RUISSELLEMENT : LA METHODE SCS-CN	47
4.1. SCS-CN : LA CALIBRATION DES DONNEES	48
4.1.1. <i>Adaptation des données d'occupation du sol (TOS)</i>	48
4.1.2. <i>Adaptation des données pédologiques</i>	49
4.2. SCS-CN : LA PRODUCTION	56
4.2. SCS-CN : LE TRANSFERT.....	58
4.3. SCS-CN : L'ACCUMULATION	59
PARTIE 5. MODELISATIONS DU RUISSELLEMENT : LA METHODE IRIP	61
5.1. IRIP : LES ADAPTATIONS PAR RAPPORT A LA METHODE INITIALE.....	62
5.1.1. <i>Problèmes théoriques et géostatistiques soulevés par la méthode</i>	62
5.1.2. <i>Contournements des problèmes et adaptation possible de la méthode IRIP</i>	64
5.1.3. <i>Modification des facteurs d'entrée : la PRODUCTION</i>	65
5.1.4. <i>Modification des facteurs d'entrée : le TRANSFERT</i>	80
5.1.5. <i>Modification des facteurs d'entrée : l'ACCUMULATION</i>	85
5.2. IRIP : LA PRODUCTION	86
5.3. IRIP : LE TRANSFERT	88
5.4. IRIP : L'ACCUMULATION.....	89
PARTIE 6. MODELISATIONS DU RUISSELLEMENT : LA METHODE STREAM	91
6.1. ADAPTATION DES DONNEES DE BASE.....	92
6.2. IMPLEMENTATION DU MODELE	94
PARTIE 7. COMBINAISON DES MODELES, CARTOGRAPHIE DE LA SUSCEPTIBILITE AU RUISSELLEMENT ET VALIDATION "GRANDEUR NATURE" DES CARTES	96
7.1. COMBINAISON DES MODELES SCS-CN ET IRIP : VERS UNE CARTOGRAPHIE GLOBALE DE LA SUSCEPTIBILITE AU RUISSELLEMENT	97
7.1.1. <i>Discretisation et homogénéisation des distributions</i>	97
7.1.2. <i>Combinaison</i>	100
7.2. DU MODELE A LA CARTE : CATEGORISATION FINALE ET PROBLEMES SEMIOLOGIQUES.....	102

7.3. VALIDATION DES CARTES FINALES	104
7.3.1. Résultats bruts de l'enquête	104
7.3.2. Spatialisation et croisement avec les cartes finales.....	105
7.7. Conclusions sur la validation	110
PARTIE 8. ESSAI DE CARTOGRAPHIES D'ALEA ET DE RISQUE	111
8.1. MODELISATION DE L'ALEA HISTORIQUE	112
8.2. MODELISATION DU "RISQUE" LIE AU RUISSellement	113
8.2.1. Le "risque" coupure de route	113
8.2.2. Le "risque" urbain	114
CONCLUSION GENERALE DE L'ETUDE	116
BIBLIOGRAPHIE	117
REFERENCES DES CARTES PEDOLOGIQUES	121
ANNEXES.....	122
<i>Annexe 1.</i>	123
<i>Annexe 2.</i>	125
<i>Annexe 3.</i>	127
LISTE DES FIGURES	130
LISTE DES TABLEAUX.....	133
LISTE DES EQUATIONS.....	133
NOTES	134

Introduction

En 2015, l'Établissement Public Territorial du Bassin de la Dordogne (EPIDOR) a lancé une consultation en vue de réaliser la **cartographie des zones de ruissellement intense sur le bassin versant de la Dordogne**. Cette consultation faisait en partie suite à une étude déjà menée en 2010 (Haziza, 2010) qui avait recensé les dégâts liés aux inondations par ruissellement qui s'étaient produits en juin 2007 et mai 2008. Cette question du ruissellement a été également abordée antérieurement dans le Programme d'Actions de Prévention des Inondations du Bassin de la Dordogne (PAPI.3, 2006) qui présente un ensemble de cartographies globales sur ce phénomène (Figure 1).

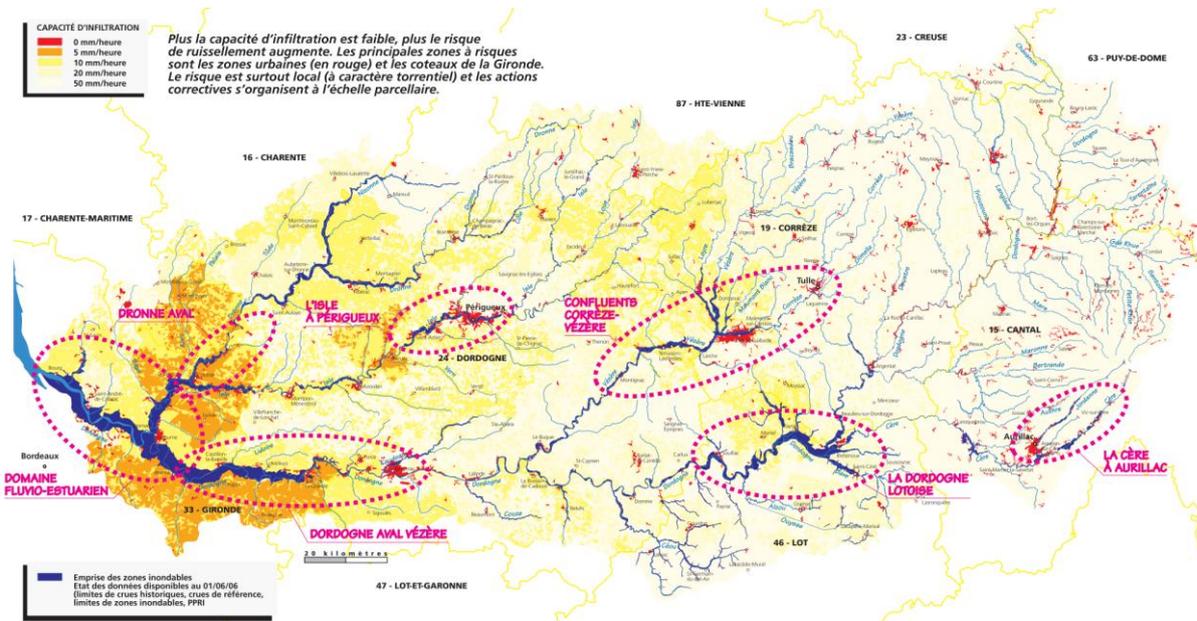


Figure 1 - Cartographie des capacités d'infiltration dans le bassin versant. in PAPI, 2006. Cette carte a été obtenue avec un calcul *via* le modèle STREAM (INRA) en utilisant les données pédologiques de la BDAT (échelle cantonale) et les données d'occupation du sol de CORINE Landcover (1/100 000). Échelle d'utilisation < 1/100 000. On remarque tout de suite la forte susceptibilité de la partie aval du bassin versant en général, et notamment des coteaux viticoles de Gironde.

Au regard de la sensibilité de certaines zones du bassin versant au phénomène de ruissellement et en vue de la réalisation de nombreux SCoT et autres documents d'urbanisme, EPIDOR a souhaité produire une cartographie plus précise de l'aléa ruissellement, voire du risque lorsque c'était possible. La volonté de l'Établissement Public était de fournir aux techniciens et prestataires l'information nécessaire à la prise en compte de cet aléa dans les réflexions territoriales.

Le ruissellement demeure un **phénomène complexe**, car il est à la fois lié aux dynamiques de versant (processus géomorphologiques) et aux dynamiques hydrologiques (processus hydrologiques). C'est un phénomène éminemment spatial et multifactoriel qui dépend de la structure des pluies incidentes. En effet, pour une même quantité de pluie en 24 heures, le ruissellement produit ne sera pas forcément le même. Le ruissellement est contrôlé par des facteurs de prédisposition (occupation du sol, type de sol, topographie, aménagements hydrauliques, infrastructures) et des facteurs de déclenchement (quantité de précipitations, modalités de ces précipitations). Les dégâts éventuellement occasionnés par ce phénomène vont donc dépendre de la conjonction des facteurs de prédisposition et de déclenchement avec la présence d'enjeux plus ou moins vulnérables.

Une des caractéristiques essentielles du phénomène de ruissellement est qu'il s'agit d'un phénomène décomposé dans l'espace et dans le temps qui se structure autour de **relais de processus spatio-temporels**. Ainsi, il est nécessaire d'approcher ce phénomène selon ses 3 compartiments fondamentaux que sont la PRODUCTION, le TRANSFERT et l'ACCUMULATION. La **PRODUCTION** exprime le % de ruissellement potentiel à un endroit donné en fonction de la conjonction entre facteurs de prédisposition et facteurs de déclenchement. Le **TRANSFERT** exprime le potentiel d'une zone à concentrer les ruissellements produits à l'amont et à les transférer à l'aval. Il exprime aussi la rapidité à laquelle ce TRANSFERT peut se réaliser. Enfin, l'**ACCUMULATION** exprime le potentiel d'une zone à recevoir les flux venant de l'amont ou à être stagnante. Une des difficultés majeures avec les compartiments de TRANSFERT et d'ACCUMULATION est qu'ils se chevauchent avec les approches hydrauliques. De fait, nous considérons que dès lors

que ces compartiments concernent des cours d'eau globalement d'ordre de Strahler ≥ 3 , nous entrons dans de la dynamique fluviale et donc de l'hydrologie/hydraulique.

La cartographie de ce phénomène nécessite le plus souvent de passer par des **modélisations** qui vont estimer soit le % de ruissellement par rapport à une pluie incidente, soit le degré de conjonction des facteurs de prédisposition et/ou de déclenchement. On parle de **cartographie de la susceptibilité** quand on utilise uniquement les facteurs de prédisposition et de **cartographie de l'aléa** dès lors qu'on y introduit une variable temporelle, à savoir les facteurs de déclenchement (les pluies).

L'étude a couru de la fin de l'année 2015 au 1^{er} trimestre 2017, beaucoup de temps ayant été consacré à l'acquisition de la donnée pédologique et au travail de modélisation. Le groupement en charge de ce travail, composé de géomorphologue-géographe et pédologues, a appréhendé le phénomène par une approche pluridisciplinaire et a cherché à adapter au mieux les modèles existants avec parfois des refontes importantes des méthodes formalisées (ce fut notamment le cas pour le modèle IRIP de l'IRSTEA).

Les rendus de l'étude sont structurés en 2 documents :

- le présent **rapport technique** qui décrit l'ensemble de la méthodologie utilisée pour produire les cartographies finales,
- la **notice cartographique** qui présente un jeu de cartographies commentées sur les susceptibilités au ruissellement. Les préconisations proposées pour réduire les susceptibilités au ruissellement sont intégrées à ce document.

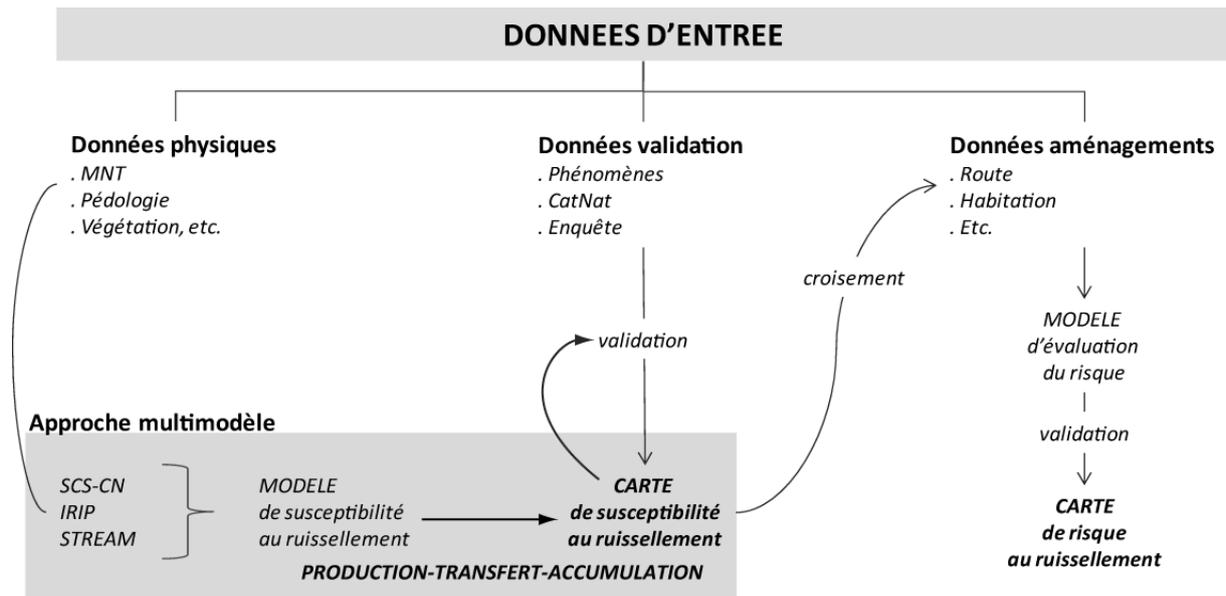
Le présent rapport technique est structuré en 4 parties.

La **première partie** rappelle quelques fondamentaux sur le ruissellement et sa modélisation, puis présente succinctement les difficultés conceptuelles et techniques posées par la réalisation de cartographie précise sur les 24 000 km² du bassin versant de la Dordogne.

La **deuxième partie** décrit toutes les procédures d'acquisition des données de base ainsi que les caractéristiques de ces données. Cette question des données est fondamentale, car elle conditionne à la fois la justesse des résultats en sortie, mais aussi l'échelle d'utilisation finale des cartographies et les limites d'utilisation de celles-ci.

La **troisième partie** présente les procédures de modélisation, depuis le formatage des données de base aux différents modèles jusqu'aux résultats bruts en passant aussi par les modifications et innovations apportées aux modèles formels. Nous y avons présenté les quelques développements conceptuels et algorithmiques générés par les réflexions et adaptations des modèles formels.

La **quatrième partie** présente la procédure de "métamorphose" des modèles (résultats bruts, matrice de chiffres) en carte utilisable. Nous y développons les procédures de combinaison de modèles, puis de discrétisation en classe de susceptibilité. Cette partie aborde également les questions de "validation" de ces cartes en les croisant avec des phénomènes réels. Enfin, nous y abordons la méthodologie du travail préliminaire sur l'évaluation et la cartographie du risque.



Méthodologie générale de l'étude

PARTIE 1. Du ruissellement en général au ruissellement sur le bassin versant de la Dordogne : choix des stratégies de modélisation



1.1. Le ruissellement "en général" : des processus naturels aux modélisations numériques

Le ruissellement est un phénomène surtout connu du grand public au travers de deux conséquences principales : les inondations et les pertes en terre qui se traduisent souvent par des coulées de boue ou une forte turbidité de l'eau (augmentation des concentrations en Matière En Suspension). Ce phénomène a d'ailleurs été beaucoup étudié dans les années 50 et 60 aux U.S.A. pour tenter d'enrayer les importantes pertes en sol que connaissait notamment la région des Grandes Plaines (Mockus, 1949, 1965). Ces premiers travaux expérimentaux et empiriques ont permis d'individualiser les facteurs de contrôle et de comprendre en partie les processus du ruissellement, donnant naissance aux premiers modèles de prédiction et de localisation des phénomènes.

1.1.1. Les différents types de ruissellement

Le ruissellement de surface se décompose en 2 sous-ensembles :

- Le **ruissellement dit hortonien** (*infiltration excess overland flow*) qui apparaît lorsque l'intensité des pluies dépasse les capacités d'infiltration du sol, notamment sa perméabilité (mm/heure). Ce type de phénomène apparaît surtout lors des épisodes pluvieux très intenses avec des cumuls d'eau importants en un temps court.
- Le **ruissellement dit hewlettien** (*saturation excess overland flow*) qui apparaît lorsque le sol est déjà saturé et ne peut assurer son rôle de transmission verticale et latérale. Cette situation peut se produire après des périodes de pluies longues et/ou en situation de bas de versant où la frange capillaire située au-dessus de la nappe peut saturer les sols (écoulement dit "de retour").

Ces deux phénomènes peuvent être synchrones ou décalés dans le temps comme le montre la Figure 2.

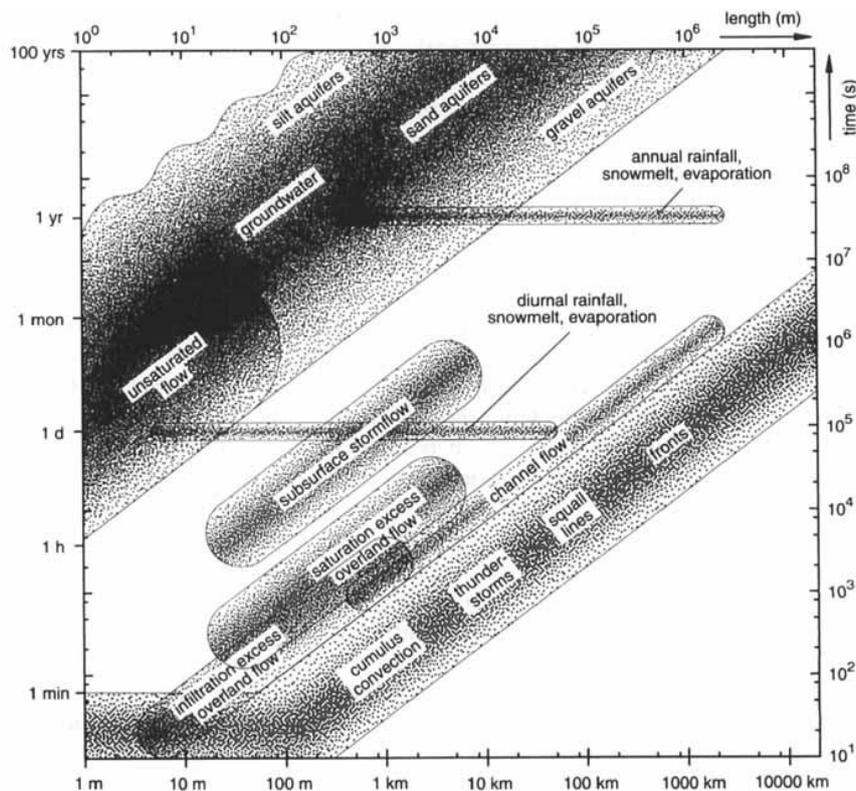


Figure 2 - Distribution des processus hydrologiques selon leurs caractéristiques spatio-temporelles. In Blöschl and Sivapalan (1995). Sur cette figure, le ruissellement hortonien (*infiltration excess overland flow*) s'étend sur des surfaces de quelques mètres à 1km sur des temporalités inférieures à l'heure, tandis que le ruissellement hewlettien (*saturation excess overland flow*) est légèrement plus inertiel (distance un peu plus longues et temporalité pouvant s'étendre sur plusieurs heures). La plage de recouvrement de ces deux types de ruissellement reste quand même très large, ces deux phénomènes étant la plupart du temps subsynchrones à l'échelle d'événements pluvieux de plusieurs heures.

Le ruissellement se décompose dans le temps et l'espace selon 3 compartiments fondamentaux qu'il faut appréhender séparément pour bien caractériser le phénomène (Figure 3).

Le premier compartiment est celui de la PRODUCTION. Ce compartiment représente la tranche d'eau qui ne s'infiltrera pas dans le sol et restera en surface. On distingue deux types de production. Le plus fréquent est une tranche d'eau "produite" qui a vocation à s'écouler vers l'aval. Les moteurs de l'apparition de cette tranche d'eau sont soit hortonien, soit hewlettien, soit les deux. Le second type est une production qui reste sur place et provoque ainsi une inondation. Ceci peut arriver sur des zones très planes, au réseau hydrographique quasi endoréique, qui ne permet pas d'évacuation rapide des eaux et où les sols sont alors saturés. C'est le cas de certaines zones humides sur les hautes terres du bassin versant de la Dordogne.

Le deuxième compartiment est celui du TRANSFERT. Il s'agit de la phase de mobilisation de la tranche d'eau produite depuis les zones amont, vers les zones aval. Le TRANSFERT peut être "concentré" au travers des lignes de thalwegs, ou bien "diffus" sur un versant (ruissellement aréolaire, en nappe). Les processus érosifs qui peuvent accompagner le ruissellement (arrachement des particules de sol, ravinement, coulée de boue, érosion laminaire, décapage, etc.) s'expriment essentiellement dans ce compartiment. La vitesse des eaux et leur capacité à se concentrer rapidement vers un exutoire ou vers un enjeu est également une donnée essentielle au sein de ce compartiment.

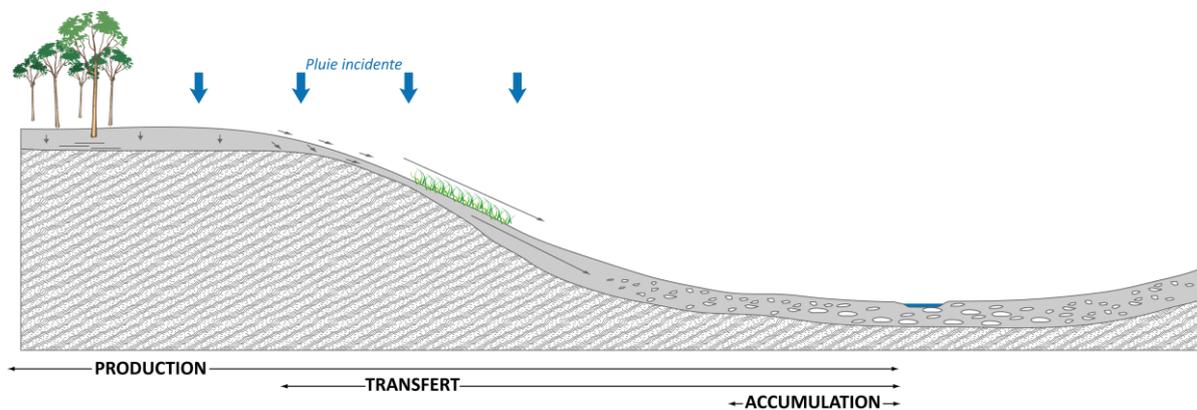


Figure 3 - Schéma conceptuel de la répartition des 3 compartiments fondamentaux du ruissellement le long d'un versant. Sur ce schéma, on voit bien la réduction des emprises spatiales des compartiments.

Enfin, le troisième compartiment est celui de l'ACCUMULATION. Il concerne spatialement les zones de rupture des vitesses de TRANSFERT et les points bas où la lame d'eau reçue excède la capacité d'évacuation. L'accumulation se fait le plus souvent sur les zones aval et déprimées, en fonction des caractéristiques des bassins versants qui alimentent cette zone. L'accumulation peut aussi se faire sur place et renvoie alors à la seconde modalité de la PRODUCTION (sans évacuation), les deux compartiments se confondant alors.

1.1.2. Les facteurs de contrôle

Classiquement, le ruissellement de surface (*overland flow*) est contrôlé par 3 grands facteurs :

- L'occupation du sol,
- La couverture pédologique,
- La topographie.

L'hydrographie est également un facteur qui contrôle les compartiments de TRANSFERT et d'ACCUMULATION. Bien qu'identifiés, les processus à l'œuvre au sein de ces facteurs ne sont pas encore complètement compris de par leurs interactions étroites. De fait, l'étude d'un facteur isolé dans un cadre expérimental *in situ* est toujours très délicate, ce qui laisse subsister des incertitudes sur les poids de chaque facteur de contrôle.

1.1.2.1. L'occupation du sol

L'occupation du sol est certainement le facteur qui fait le plus consensus dans la communauté scientifique. Les travaux de Weaver and Noll (1935) préfiguraient déjà les travaux des années 50 et 60 sur les modélisations du ruissellement aux Etats-Unis. Cet article est fondateur, car il avance déjà les interdépendances entre végétation et sol et montre l'impact du type de couverture végétale sur les taux de ruissellement et l'érosion. Dans cet article, les

auteurs proposent des opérations de ré-engazonnement pour réduire le phénomène. Nous ne pouvons pas citer l'ensemble des travaux réalisés, mais certains comme ceux de Niehoff et al. (2002) montrent bien les impacts des changements d'occupation du sol, notamment l'extension urbaine, sur les débits de pointe aux exutoires des bassins versants. Si les couvertures forestières et prairiales sont reconnues favorables pour limiter le ruissellement, l'artificialisation des sols, les grandes cultures ou la vigne sont au contraire reconnues comme favorables au ruissellement. Au-delà de l'occupation du sol, les types d'usage, notamment agricoles, ont fait l'objet de nombreuses recherches afin de formaliser des taux ou des sensibilités de chaque type de pratique au ruissellement (Papy et al., 1988; Wauchope et al., 1999). Il existe aujourd'hui des classifications permettant d'associer, pour des régions données, des coefficients de ruissellement pour chaque type d'occupation du sol (Taillon, 1991).

1.1.2.2. La couverture pédologique

Les propriétés physiques du sol contrôlent fondamentalement le ruissellement par deux principales caractéristiques. La première est la conductivité du sol (liée en partie à sa texture) et sa capacité de stockage (liée en partie à sa texture et sa profondeur). Ces facteurs peuvent varier fortement dans l'espace et influencent nettement le ruissellement (Merz and Plate, 1997). Un sol profond et conducteur aura plus de capacité à infiltrer les pluies incidentes et donc à réduire le potentiel de ruissellement (Hümann et al., 2011) qu'un sol peu perméable et peu profond. La deuxième est l'état de surface du sol, car si un sol est profond et conducteur mais que sa surface est "fermée" (colmatage des pores de surface), ni sa profondeur ni sa conductivité n'entreront en ligne de compte dans sa capacité à infiltrer les pluies incidentes. Des travaux sur l'état de surface existent depuis plusieurs années (Casenave and Valentin, 1990) et ont donné lieu à des modélisations numériques (Cerdan et al., 2002). Une des principales difficultés de la prise en compte de ce facteur est sa perpétuelle évolution au cours du temps (activité biologique, travail du sol, etc.) et donc la difficulté de relever cette donnée pédologique sur de vastes surfaces en un temps restreint.

1.1.2.3. La topographie (et ses dérivées)

Toutes choses étant égales par ailleurs, la PRODUCTION de ruissellement hortonien augmente avec la pente par une baisse de l'infiltration, mais le ruissellement hewlettien a un comportement inverse du fait de l'augmentation du drainage oblique avec la pente ce qui limite les possibilités de saturation du sol (Bouvier, 2004). Les relations entre pente et coefficient de ruissellement sont délicates et les résultats, bien que convergent vers une augmentation du coefficient de ruissellement avec une augmentation de la pente, divergent sur la linéarité de la relation. En effet, Duley and Hays (1932) et Fox et al. (1997) trouvent une relation logarithmique sur la gamme de 0 à 20%, tandis que d'autres auteurs trouvent des relations linéaires sur la gamme de 0 à 5% (Mishra et al., 2014) ou 0 à 10% (Chaplot and Le Bissonnais, 2000) ou encore des relations non linéaires plus complexes (Pan et al., 2016). Roose (1967), trouve également une relation logarithmique entre ruissellement et pente, sur la gamme 0 à 2% sur des sols ferrugineux tropicaux. Wishmeier (1966) montre également que le coefficient de ruissellement tend à augmenter avec la pente, mais que cette évolution est dépendante d'autres facteurs (notamment les caractéristiques pédologiques) qui contribuent plus au contrôle du taux de ruissellement. Hudson (1957) et Lal (1976) ont également constaté une augmentation rapide du coefficient de ruissellement avec la pente (jusqu'à quelques %), puis une stabilisation du coefficient sur les pentes plus raides. L'effet de la pente est pris en compte dans la méthode du SCS-CN avec une modification des coefficients selon que la pente soit supérieure ou inférieure à 5%. Selon Steven McCutcheon (Warnell School of Forestry and Natural Resources, University of Georgia), l'effet de la pente sur le CN number est encore incertain et il n'existe encore que peu de publications permettant de tirer des conclusions fermes sur cet aspect.

En tout cas, la question fait encore débat parmi les praticiens et scientifiques¹. Pour exemple, l'étude expérimentale de Janeau et al. (2003) sur des versants pentus et des sols limoneux thaïlandais donne un résultat contraire, c'est-à-dire, une baisse linéaire du coefficient de ruissellement avec l'augmentation de la pente pour des pentes de 10 à 70% (fig.7 de l'article cité). L'étude de Shen et al. (2016) montre également que si la pente joue sur la perte en sédiment, elle ne joue pas sur l'évolution du coefficient de ruissellement qui semble plutôt contrôlée par la quantité de précipitations. Sur des pentes de 15 à 50%, Fang et al. (2015) montrent également un plafonnement du coefficient de ruissellement avec des évolutions qui ne sont pas nettes.

¹https://www.researchgate.net/post/Can_I_use_Curve_Number_Method_for_runoff_estimation_in_a_mountainous_terrain_or_Do_we_have_some_another_method_for_runoff_estimation

On le voit, le coefficient de ruissellement étant multifactoriel, il est délicat d'extraire juste la contribution de la pente sur l'évolution de la PRODUCTION de ruissellement.

Par contre, la pente et des dérivées comme le *Topographic Wetness Index* (Beven and Kirkby, 1979) contribuent clairement sur les compartiments de TRANSFERT et d'ACCUMULATION. Il est par contre utile, mais encore incertain sur la PRODUCTION. Selon ces auteurs, l'indice topographique *TWI* vise à quantifier et spatialiser le degré de saturation potentielle des sols lié aux conditions topographiques. Il faut rappeler également que ce modèle vise à reproduire les ruissellements sur surface saturée ainsi que les apports hypodermiques. Selon ce modèle, la relation entre saturation (et donc ruissellement indépendamment des autres facteurs) et *TWI* est linéaire. À partir de mesures expérimentales, Burt and Butcher (1985) ont montré l'existence d'une corrélation positive significative entre le *TWI* et la saturation des sols (et donc, leur potentiel de ruissellement sur surface saturée). Cependant, les auteurs mettent en garde sur deux points :

- L'existence d'importantes colinéarités du *TWI* avec d'autres facteurs comme l'épaisseur des sols qui viennent fausser la relation,
- La non-linéarité de la saturation du sol qui semble contrôlée par des phénomènes d'hystérésis.

De plus, les relations expérimentales entre profondeur saturée et *TWI* montrent un maximum de saturation pour des valeurs de *TWI* normalisées proches de 0.5. Contrairement à Beven and Kirkby (1979), ces auteurs annoncent donc plutôt une relation non linéaire entre *TWI* et saturation (et indirectement, ruissellement).

Les travaux de Famiglietti et al. (1998) et Merz and Plate (1997) sur les relations entre ruissellement, saturation du sol et les autres paramètres physiques montrent une extrême variabilité des réponses hydrologiques rendant illusoire toute modélisation précise. Cependant, Merz and Plate (1997) ont aussi démontré que la variation spatiale du taux de saturation antécédent lors des événements pluvieux extrêmes est négligeable sur le ruissellement total en sortie de bassin versant. De fait, le *TWI* semble rester un facteur pertinent pour des conditions extrêmes (fortes pluies ou au contraire, détection des zones conservant une humidité relative en condition de déficit hydrique).

Des paramètres plus complexes sont également évoqués pour les compartiments de TRANSFERT et d'ACCUMULATION comme les formes des bassins versants ou d'autres paramètres hydrographiques. Nous développerons spécifiquement ces paramètres dans la PARTIE 3 sur les modélisations effectuées dans le bassin versant.

1.1.3. Les modélisations

Le ruissellement a fait et continue de faire l'objet de plusieurs investigations visant à prédire les zones susceptibles de produire des lames d'eau et les débits en sortie de bassin versant, selon des relations pluies-débit (Beven, 2012). Il existe également des modèles liant une lame d'eau précipitée avec le ruissellement produit et l'érosion (pertes en terre), le plus connu étant le modèle *RUSLE* (*Revised Universal Soil Loss Equation*) dont nous ne parlerons pas ici, mais que nous évoquerons plus tard à titre de comparaison.

Dans la seconde édition de son monumental ouvrage de synthèse sur la modélisation du ruissellement, Beven (2012) présente différentes voies de modélisation et différents modèles conceptuels et numériques. Il distingue les modèles "de bloc" qui établissent des prédictions à l'échelle des sous bassins versants et les modèles "distribués" qui spatialisent l'information à l'échelle des pixels. Au-delà de ces catégorisations formelles, l'auteur insiste surtout sur les fondements conceptuels des modèles numériques en séparant :

- les modèles déterministes qui donnent un seul résultat possible pour un ensemble de facteurs donnés,
- les modèles stochastiques qui donnent une probabilité d'occurrence ou plusieurs possibilités pour un même ensemble de facteurs. Ces modèles ne seront pas utilisés dans cette étude.

Parmi les modèles déterministes, nous pouvons globalement différencier 3 types de modèles :

- les modèles à base physique qui font tourner des équations fonctionnelles liant différents compartiments du système hydrologique dont les comportements sont connus sur des bases physiques. Ces modèles donnent en sortie des hauteurs d'eau et des hydrogrammes de crue. Ces modèles fonctionnent avec des pluies entrantes.
- les modèles empiriques qui sont basés sur des acquis expérimentaux (bassin versant expérimental, suivi de pluie et de débit au niveau des réseaux fixes, etc.). Ces modèles donnent en sortie des % de ruissellement et

des hauteurs d'eau ruisselées. Ces modèles peuvent fonctionner avec des pluies entrantes. Le modèle le plus connu de cette gamme est le SCS-CN (*Soil Conservation Service Curve Number*) de l'USDA Natural Resources Conservation Service ou le modèle STREAM (INRA-France)

- les modèles cartographiques, plus récents, qui sont apparus avec la démocratisation des SIG. Ces modèles fonctionnent par croisement de facteurs et proposent en sortie des niveaux de susceptibilité relative. Ces modèles ne fonctionnent pas avec des pluies entrantes. Il existe un modèle de ce type développé par l'IRSTEA à la fin des années 2000 et encore en cours d'amélioration : IRIP.

1.2. Le bassin versant de la Dordogne : spécificités et choix des stratégies de modélisations

Le bassin versant de la Dordogne couvre une superficie de 24 000km² et présente des contextes hydro-géomorphologiques et géographiques très différents (Figure 4). À partir de la carte géologique et du relief, nous pouvons distinguer 4 grandes régions qui présentent des convergences géomorphologiques, ce qui sous-entend des conditions pédologiques et topographiques convergentes vis-à-vis du ruissellement.

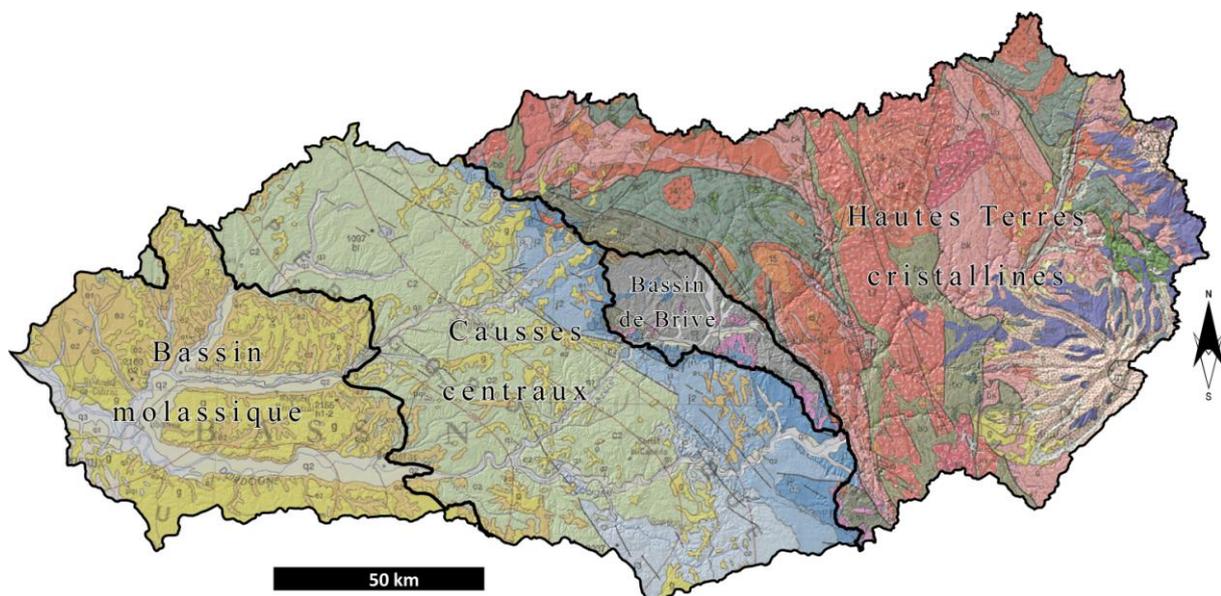


Figure 4 - Carte géologique et des grandes unités géomorphologiques. Fond cartographique : carte géologique à 1/1 000 000, BRGM.

À l'est, les "Hautes Terres cristallines" forment un vaste plateau perché au-dessus de 500m en moyenne et culminent avec les pointements volcaniques des stratovolcans cantaliens et montdoriers. Le soubassement est essentiellement volcanique sur l'extrême est et granitique et/ou métamorphique sur l'essentiel des plateaux limousins et des châtaigneraies auvergnate et limousine. Hormis les morsures des gorges de la Dordogne et ses affluents encaissés et les massifs montagneux du Cantal et des Mont-Dore, cette unité est plutôt tabulaire, avec un relief adouci à faible énergie de relief. Les versants y sont longs et peu déclives. Les formations géologiques sont souvent profondément altérées et recouvertes d'épaisses formations d'altérites poreuses, hormis là où le relief est suffisamment vif pour permettre aux processus érosifs des décapages importants (cas des gorges de la Dordogne par exemple). Les sols y sont généralement profonds avec des textures plutôt limoneuses à sableuses.

Au centre, les "Causses centraux" sont un secteur où affleurent les calcaires jurassiques et crétacés. Le relief karstique y est majoritaire à l'exception des zones recouvertes par des lambeaux de couverture tertiaire (cryptokarst). Les sols y sont généralement "courts", mais les processus de décalcification et décarbonatation de calcaires impurs donnent des recouvrements argileux non négligeables, plus favorables au ruissellement. De plus, il existe des alternances marno-calcaires voire des étages marneux (Toarcien et Carixien par exemple) qui donnent des terrains peu perméables et a priori favorables au ruissellement.

À l'ouest, les larges plaines alluviales de l'Isle et de la Dordogne entaillent un bas plateau aux versants courts formés par des matériaux hétérogènes en partie molassique, mais aussi provenant du glaciaire situé au piémont du Massif

central. Les terrains y sont composites, mêlant des zones très argileuses comme la bordure de Guyenne ou des zones très sableuses comme une partie de la région des Doubles. Les parties argileuses et caillouteuses accueillent les vignobles du Bergeracois et de l'Entre-Deux-Mers et constituent des zones à forte probabilité de ruissellement.

Le bassin de Brive, situé entre les Hautes Terres cristallines et les Causse centraux, constitue une entité à part, avec un relief marqué et un sous-sol varié mêlant des grès plus ou moins fracturés avec des dépôts sableux ou des argiles et quelques incursions des calcaires jurassiques (Lias). Ce bassin est de fait assez varié, mais bien limité spatialement.

Deux talus marquent fortement le relief : le talus de Brive qui marque nettement le contact entre les terrains cristallins et sédimentaires en formant un relief important (on passe de 300/350m à 450m) et l'escarpement de Tulle qui nous hisse de 400m à plus de 500/550m, ouvrant ensuite sur les vastes espaces des hauts plateaux centraux. Ces deux talus sont marqués par des pentes importantes et une densification du réseau hydrographique superficielle.

L'occupation du sol suit globalement ce premier découpage géomorphologique (Figure 5).

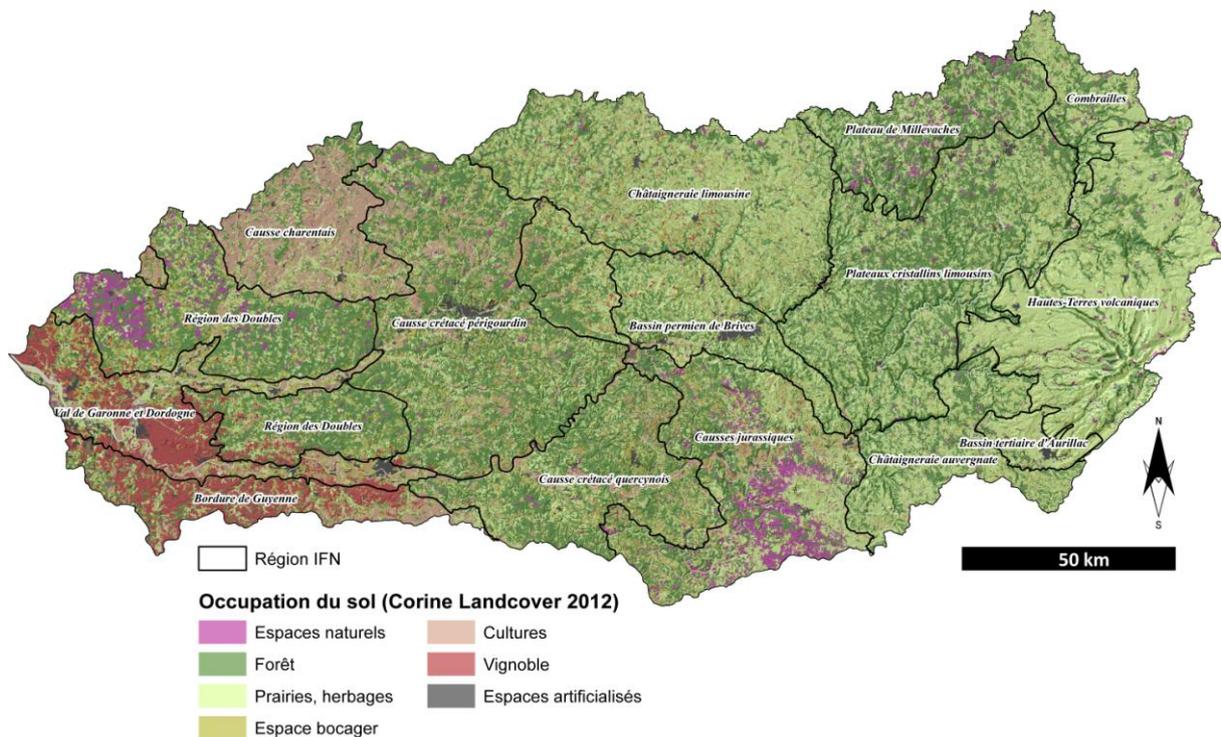


Figure 5 - Cartographie de l'occupation du sol. Corine Landcover 2012 + RPG 2012.

Les hautes terres cristallines sont essentiellement occupées par des espaces forestiers et/ou prairiaux avec une faible densité des espaces urbains hormis certains *hotspots* (bassin d'Aurillac par exemple). À l'ouest du bassin de Brive, l'occupation du sol devient plus composite avec notamment l'augmentation des surfaces cultivées (causse charentais), la diversification des cultures (vignoble bergeracois) et de plus vastes espaces urbains (Périgueux, couronnes externes de la métropole bordelaise, etc.). Nous observons donc un gradient d'est en ouest depuis des occupations du sol peu favorables au ruissellement vers des occupations du sol favorisant l'expression de ces processus. Cette première sectorisation est cohérente avec les évaluations antérieures du ruissellement sur le bassin versant (Figure 6).

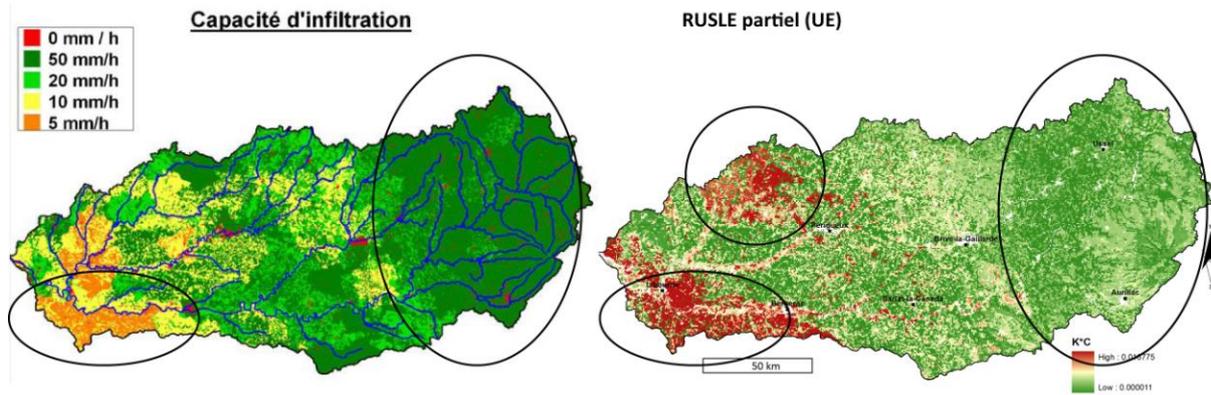


Figure 6 - Cartes antérieures sur le potentiel de ruissellement sur le bassin versant de la Dordogne. À gauche, carte issue du PAPI (modélisation avec STREAM et données de la BDAT et Corine). À droite, modèle RUSLE partiel fourni par l'UE (indices K et C uniquement). Échelle d'utilisation < 1/100 000.

Sur ces cartes, on observe bien la forte susceptibilité des espaces viticoles (Entre-Deux-Mers et Bordure de Guyenne) et au contraire, la faible susceptibilité des hautes terres cristallines. Les modèles convergent également vers une importante rugosité de l'information sur les Causses centraux et la Châtaigneraie limousine, ce qui est en cohérence avec la plus forte variabilité spatiale de l'occupation du sol et les incertitudes concernant les formations pédologiques. Par contre, il existe une forte divergence des deux modèles sur la région des Causses charentais, le modèle issu du PAPI retenant cette région comme moyennement infiltrante, tandis que le modèle de l'UE place cette région comme fortement susceptible aux phénomènes de ruissellement.

La zone d'étude pose donc plusieurs problèmes méthodologiques :

- i) cartographier la susceptibilité au ruissellement sur 24 000km² à une échelle au moins utilisable pour les SCOT, en tout cas, plus précise que celles déjà existantes (<1/100 000),
- ii) prendre en compte la variabilité des conditions géographiques,
- iii) ce travail doit se faire avec le plus de données disponibles gratuitement ou en tout cas, à un coût réduit.

Sur la base de ces constats, nous avons donc choisi d'aller sur des **modèles distribués et déterministes**.

Le modèle distribué répond aux contraintes de la variabilité des conditions géographiques ainsi qu'à la nécessité de produire des cartographies plus précises que les précédentes. L'hypothèse de base est de considérer que si nous utilisons des données d'entrée ayant une résolution spatiale plus fine que celles utilisées précédemment, nous serons en mesure de produire des résultats ayant une meilleure résolution.

Le modèle déterministe permet de simplifier les procédures de calcul et surtout, offre des résultats facilement lisibles par des non-spécialistes. En effet, les modèles déterministes peuvent se présenter sous forme de classe de susceptibilité alors que les modèles stochastiques imposent d'avoir une approche probabiliste, moins intuitive. Un des grands intérêts de ces modèles est qu'ils sont "robustes", mais nécessitent par contre une exigence qualitative importante sur les données d'entrée.

Fort de ce premier choix, nous avons écarté les modèles à base physique qui demandent beaucoup de données et de travail de calibration, ce qui est délicat à mener sur 24 000km². De fait, nous nous sommes finalement reportés sur les modèles "empiriques" et spatiaux, en choisissant des modèles déjà connus et robustes, mais aussi des modèles expérimentaux. Nous avons fait le choix d'utiliser une approche multi-modèle afin de limiter les aberrations de modélisation et d'évaluer l'incertitude des résultats. Au final, nous avons utilisé les modèles :

- SCS-CN : c'est un modèle historique, bien connu et surtout encadré par une abondante littérature scientifique permettant d'avoir de nombreux retours d'expérience dans le monde entier. Il fonctionne avec peu de données d'entrée, mais nécessite un formatage rigoureux de celles-ci. Ce modèle reste souple et possède peu de paramètres, ce qui en limite sa sensibilité. Il peut fournir à la fois des cartes de susceptibilité relative, mais aussi des lames d'eau ruisselées si on le croise avec des événements pluvieux. Il

est implémentable dans de nombreux SIG *via* des modules externes ou autres plug-ins. Ce modèle ne fournit que la PRODUCTION. Nous l'avons modifié pour l'adapter au bassin versant et y avons rajouté des approches personnelles pour les compartiments de TRANSFERT et d'ACCUMULATION.

- STREAM : c'est également un modèle empirique qui fonctionne conceptuellement comme SCS, mais avec des données d'entrée un peu différentes. Il existe depuis une vingtaine d'années au moins, mais est formalisé dans une procédure informatique depuis une petite quinzaine d'années. Calibré à l'origine pour les plaines limoneuses du Nord de la France, nous avons essayé de l'implémenter en changeant les paramètres initiaux. Si le modèle gère le TRANSFERT, il ne gère pas l'ACCUMULATION.
- IRIP : c'est un modèle spatial qui croise des facteurs spatiaux en fonction d'algorithmes (souvent un produit ou une somme de facteurs). Il gère les trois compartiments du ruissellement et donne en sortie des valeurs de susceptibilité relative. De fait, pour comparer spatialement, il est nécessaire d'utiliser le même jeu de données et de ne pas sectoriser la zone d'étude afin d'avoir les mêmes référents spatiaux. Ce modèle reste très souple et expérimental. Nous avons significativement modifié le formatage des données d'entrée ainsi que les algorithmes de croisement spatiaux pour mieux répondre à certains modèles conceptuels de fonctionnement.

Les modifications apportées aux modèles sont précisées dans la partie 3.

Comme nous sommes sur des modèles déterministes et qu'il existe toujours une part de variabilité inhérente à l'utilisation de modèles différents, nous avons tenté une **combinaison des résultats** afin de i) limiter les défauts de chaque modèle et lisser les erreurs de chacun, ii) évaluer les zones de fortes différences et donc de forte incertitude et iii) abaisser la volatilité des modèles et augmenter la robustesse des résultats au niveau du modèle combiné. Cette approche est encore peu répandue dans le domaine de la modélisation spatiale hydrologique, alors que la technique est bien connue dans d'autres domaines de prédiction des risques naturels ou autres phénomènes (Armstrong, 2001; Choi et al., 2012; Poiraud, 2014). Cette méthode implique par contre de combiner des modèles comparables et standardisés (même échelle de valeurs). Ceci impose que les modèles donnent des résultats qui soient statistiquement proches ou en tout cas, pas trop différents. Ces écarts se mesurent à l'aide d'une série d'indices comme la régression linéaire dans le cas de données continues ou le V de Cramer pour des données catégorielles ou discrètes. La méthodologie sera explicitée dans la partie consacrée à la combinaison et à la cartographie.

Partie 2. Acquisition des données de base



2.1. Données liées aux facteurs de prédisposition

L'acquisition de données de base s'est appuyée sur les besoins des 3 modèles ciblés (Tableau 1) :

Tableau 1 - Récapitulatif des données de base pour l'implémentation des modèles. P, PRODUCTION ; T, TRANSFERT ; A, ACCUMULATION. (*) données acquises par EPIDOR dans le cadre du projet (payante). (**) données partiellement payantes (frais de mise à disposition).

Famille	Données	Données d'origine	Compartment
Pédologie	Erodibilité des sols	RRP** Carte à 1/100 000 Acquisition de terrain	P
	État de surface		P
	Épaisseur des sols		P
	Perméabilité des sols		P
Topographie (dérivée MNT)	Pentes	BD Alti 25m	P, T, A
	Indice d'engorgement		P, A
	Ruptures de pente		T, A
Hydrographie (dérivée MNT)	Forme des aires drainées		T, A
	Axes de transferts		T
	Aire drainée		T, A
Occupation du sol	Occupation du sol	Corine Landcover, RPG, ZH (Epidor)	P
Géologie*	Généralisation de la donnée pédologique	Carte géologique à 1/50 000 vectorielle (BRGM)	P
Hydrographie vectorielle	"brûlage" du MNT	BD-Carthage	P, T, A

2.1.1. La donnée pédologique

La première étape a consisté à évaluer l'ensemble des informations pédologiques disponibles sur le bassin versant de la Dordogne, à les obtenir et le cas échéant à les compléter, via notamment une phase de terrain et des recherches bibliographiques.

2.1.1.1. Cartes pédologiques et bases de données associées

Afin de connaître les cartes pédologiques disponibles sur l'emprise du bassin versant, nous avons interrogé en décembre 2015 la base de données REFERSOLS qui recense la plupart des études disponibles ; ces études peuvent être des cartes papier, des cartes numériques (couche graphique) associées ou non à une base de données (couche sémantique) (Annexe 1 pour le détail des formats de données). Nous nous sommes limités aux études qui comportaient à minima une couche graphique, idéalement avec la couche sémantique associée. Les cartes uniquement "papier" ont donc été d'emblée écartées, car, d'une part, elles sont peu nombreuses et de superficie restreinte, d'autre part, leurs apports ne justifient pas le temps très important nécessaire à leur numérisation. Suite à l'établissement de cette liste, l'unité Infosol de l'INRA qui gère la base de données REFERSOLS a été contactée afin de vérifier la disponibilité des données, de nous indiquer les contacts des propriétaires et la potentielle accessibilité à ces données via une licence. Et il s'agit bien d'une potentielle accessibilité : en effet, (1) certaines études n'ayant pas encore été labellisées, elles ne sont pas forcément diffusables, même si l'ensemble des données graphiques et sémantiques est existant, et (2) certaines études sont recensées dans la base de données mais leurs propriétaires ne souhaitent pas forcément leur diffusion. Le **Tableau 2** résume ce recueil de données. Au final, plusieurs études qui auraient pu se révéler intéressantes ne sont pas accessibles (N° étude en rouge, **Tableau 2**). Nous avons écarté certaines cartes pour lesquelles l'information apportée à l'étude ne valait pas le coût financier de leur obtention (N° étude en orange, **Tableau 2**). Il s'agit des cartes 1/100 000 (Cartes pédologiques de France CPF) d'Angoulême (N°486 et 32585), 1/100 000 de Langon (N°10 133, d'autant plus qu'elle ne possède pas de couche sémantique) et 1/250 000 du Lot-et-Garonne (N°10047) : les superficies incluses dans le bassin versant sont très faibles et l'information pédologique existe déjà avec d'autres cartes (cas des études N°486, 32585 et 10 133) ou est facilement extrapolable avec les cartes voisines (cas de l'étude N°10047). Comme l'étude N°10133, l'étude N°1119 a également été écartée, car elle représentait une superficie beaucoup trop faible et ne comportait pas de couche sémantique qui aurait permis de préciser quantitativement, ou au moins qualitativement, certains paramètres. Après contact avec les propriétaires des données, nous avons pu rapidement obtenir 6 bases de données géographiques pédologiques (N° étude en vert, **Tableau 2**). Nous avons aussi profité de ces contacts pour vérifier si d'autres données au format numérique et non recensées par REFERSOLS étaient disponibles. La fusion des régions en début d'année 2016 a aussi conduit à la fusion des CRA (Chambres Régionales d'Agriculture), ce qui a ralenti mais paradoxalement permis l'obtention de données non identifiées sous REFERSOLS, en l'occurrence l'ensemble des données des RRP Creuse, Haute-Vienne et Corrèze : ces données se sont révélées très bénéfiques pour la qualité de l'étude, car elles ont

permis de couvrir au 1/250 000 des départements complets qui n'étaient que très partiellement renseignés par les études N°480 et 3158 au 1/100 000. L'accès aux données du Lot (N°31802) a aussi nécessité plusieurs mois : les propriétaires des données attendaient les résultats d'une expertise de l'INRA concernant la légalité de diffusion de certaines données incluses dans la base de données. Suite à la présentation du « Statut juridique des données sols dans le cadre du programme IGCS : De la collecte à la diffusion » au séminaire IGCS d'Avril 2016, le conventionnement a pu être mis en place.

Tableau 2. Études pédologiques – avec a minima la couche graphique – existant sous Donesol (d'après REFERSOL au 12/2015 et vérification d'Infosol). Pour la colonne N° étude : en vert, les cartes accessibles facilement ; en jaune les cartes accessibles avec difficultés ; en orange, les cartes accessibles non retenues ; en rouge les cartes non accessibles.

N° étude	Nom	Année	Échelle	Disponibilité Donesol		Potentiellement accessible avec licence	Propriétaire/Contact
				Couche graphique .shp	Couche sémantique		
480	CARTE PÉDOLOGIQUE DE FRANCE : FEUILLE BRIVE-LA-GAILLARDE - J18	1976	100 000	OUI	OUI	OUI	INRA/Infosol
486	CARTE PÉDOLOGIQUE DE FRANCE : FEUILLE ANGOULÊME - H16		100 000	OUI	OUI	OUI	INRA/Infosol
628	ETUDE PÉDOLOGIQUE DU BASSIN DU DROPT (DORDOGNE, GIRONDE, LOT-ET-GARONNE).	1971	50 000	OUI	NON	NON	INRA
629	ETUDE PÉDOLOGIQUE DU BASSIN DE LA LIZONNE.	1969	50 000	OUI	NON	NON	INRA
792	ETUDE PÉDOLOGIQUE DE LA VALLÉE DE LA DORDOGNE : SECTEURS DE PUJOLS, VELINES ET LE-FLEIX.	1959	50 000	OUI	NON	NON	BDPA SCETAGRI
793	ETUDE PÉDOLOGIQUE DE LA VALLÉE DE LA DORDOGNE. ETUDE DE RECONNAISSANCE DES SOLS - SECTEUR OUEST DE CASTILLON.	1960	50 000	OUI	NON	NON	BDPA SCETAGRI
795	AMENAGEMENT HYDRO-AGRICOLE DU BASSIN DE LA DORDOGNE - SECTEUR DE LA BASSE VALÉE. ETUDE PÉDOLOGIQUES DES VALLÉES DE LA DORDOGNE ET DE L'ISLE.	1967	50 000	OUI	NON	NON	SOGREAH
821	ETUDE PÉDOLOGIQUE DE SAINTE FOY LA GRANDE - GARDONNE	1964	10 000	OUI	NON	NON	INRA
1019	ETUDE PÉDOLOGIQUE DES SOLS HUMIDES DES COMMUNES DE LIGINIAC, PALISSE, USSEL	1980	10 000	OUI	NON	NON	INRA
1119	ETUDES PRÉLIMINAIRES EN VUE DU DRAINAGE DES TERRES AGRICOLES. DEPARTEMENT DE LA CORRÈZE. REGION LIMOUSIN. SECTEUR DE RÉFÉRENCE DU HAUT-LIMOUSIN (RÉGION DE LUBERSAC).	1985	10 000	OUI	NON	OUI	CDA19/CDA19
3158	CARTE PÉDOLOGIQUE DE FRANCE : FEUILLE SAINT-LEONARD-DE-NOBLAT - J16	2004	100 000	OUI	OUI	OUI	INRA/Infosol
10024	PAYSAGES PÉDOLOGIQUES DE LA DORDOGNE		250 000	OUI	OUI	OUI	ENITAB/Bordeaux Sciences Agro
10047	PAYSAGES PÉDOLOGIQUES DU LOT-ET-GARONNE	2015	250 000	OUI	OUI	OUI	ENITAB/Bordeaux Sciences Agro
10111	LIVRET SIMPLIFIÉ DE LA CARTE DES PEDOPAYSAGES DE LA CHARENTE (RRP CHARENTE)	1999	250 000	OUI	OUI	OUI	CRA PC/CRA Poitou-Charentes
10133	CARTE PÉDOLOGIQUE DE FRANCE : FEUILLE LANGON - G19	2013	100 000	OUI	NON	OUI	INRA/Infosol
17000	REFERENTIEL RÉGIONAL PÉDOLOGIQUE DE CHARENTE-MARITIME	1999	250000	OUI	OUI	OUI	CRA PC/CRA Poitou-Charentes
30110	REFERENTIEL REGIONAL PEDOLOGIQUE D'AQUITAINE - CARTE DES PEDOPAYSAGES DE GIRONDE	2015	250000	OUI	OUI	OUI	INRA/Infosol
31802	REFERENTIEL REGIONAL PEDOLOGIQUE DE MIDI-PYRENEES : département du Lot		250000	OUI	OUI	OUI	/ENSAT
32585	CARTE PÉDOLOGIQUE D'ANGOULÊME AU 1/100 000 - VERSION 2 ACTUALISEES	2015	100000	OUI	OUI	OUI	INRA/Infosol

Nous avons enfin cherché à obtenir des données concernant le Puy-de-Dôme et le Cantal pour lesquels rien n'était disponible de prime abord. Sachant que VetAgroSup était responsable de la réalisation des RRP (Référentiel Régional Pédologique) en Auvergne, nous les avons contactés et obtenus – rapidement – la couche graphique disponible pour une partie du Puy-de-Dôme, ainsi que quelques données ponctuelles de caractérisation des sols de cette couche graphique.

En conclusion, à force de persévérance et de discussions, et moyennant de fortes variations de coûts et de délais (Tableau 3), nous avons pu avoir accès à l'ensemble des informations souhaitées, si bien que la majeure partie du bassin versant était couverte par des cartes pédologiques et la base de données associée (Figure 7). Ces bases de données sont parfois nommées comme « principales » par la suite. Si l'obtention de ces cartes a très grandement bénéficié à la qualité de l'étude et elle a été source d'un retard si important dans le planning qu'il n'a pu être rattrapé par la suite.

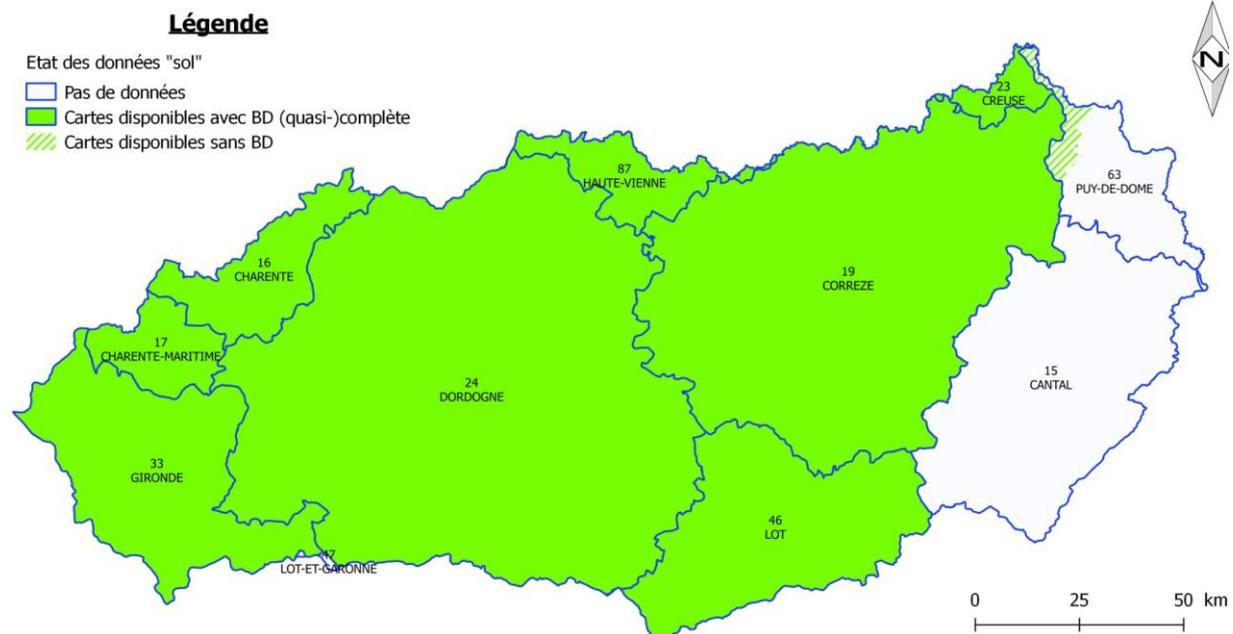


Figure 7. Couverture du bassin versant avec les cartes pédologiques acquises (couches graphique et sémantique, excepté Puy-de-Dôme).

Tableau 3. Temps nécessaires l'obtention des données auprès des différents propriétaires.

Donnée	Propriétaire	Temps nécessaire à l'obtention (en semaines) ²
RRP Dordogne	Bordeaux Sciences Agro	3
RRP partiel Puy-de-Dôme	VetAgroSup	3
RRP Gironde Feuille 1/100 000 de Brive et St Léonard	Infosol	6
RRP Charente RRP Charente-Maritime	CRA Nouvelle Aquitaine	23
RRP Corrèze RRP Creuse RRP Vienne	CRA Nouvelle Aquitaine	29
RRP Lot	ENSAT	30

² La demande de disponibilité des études a été faite le 10/12/2015 auprès d'Infosol, qui a répondu très rapidement le 15/12/2015. Nous avons alors contacté tous les propriétaires pour connaître les conditions d'acquisition une première fois le 15/12/2015, qui est le point de départ de notre calcul de temps. Certains propriétaires ont été relancés plus de 5 fois par mail, contactés par téléphone, etc. avant de pouvoir obtenir une réponse. Nous avons été jusqu'à faire remonter l'information au Ministère de l'Agriculture pour débloquer la situation du Lot. Avec d'autres des discussions ont eu lieu sur le coût d'acquisition que nous jugions élevé par rapport à d'autres (du simple au vingtuple).

2.1.1.2. Traitement des bases de données pédologiques

En premier lieu, les bases géographiques qui nous ont été fournies possédaient des erreurs de topologie (superposition de polygones, vides entre polygones), liées notamment au fait que certaines bases n'étaient pas encore finalisées. Étant donné le linéaire et le nombre conséquent d'UCS le long de tous les départements, nous n'avons pas pu traiter au cas par cas la manière de combler les vides, si bien que la procédure a été automatisée : pour combler les milliers de vides, nous avons fait le choix arbitraire d'étendre le polygone adjacent ayant le plus grand linéaire en commun avec le vide. Pour les superpositions, leur nombre étant restreint à quelques centaines, nous avons choisi de créer un nouveau polygone et d'évaluer ensuite au cas par cas l'assignation d'une valeur aux paramètres sols lors de l'élaboration des cartes thématiques.

L'évaluation des paramètres pédologiques qui serviront à la modélisation repose souvent sur l'utilisation de données qualitatives : granulométrie (pourcentages d'argiles, de limons et de sables), taux de matière organique, pierrosité, profondeur du sol et de ses différents horizons, etc. Cependant, la totalité des informations nécessaires n'est pas toujours renseignée dans les bases de données principales. Afin de calculer ou d'évaluer les paramètres pédologiques, ces trous ont dû être renseignés d'une manière plus ou moins précise.

Nous en pouvons décrire ici en détail les centaines de comblements effectués. En bref, en l'absence totale de données qualitatives, nous nous sommes appuyés sur les descriptifs qualitatifs afin de renseigner approximativement les données qualitatives manquantes : par exemple, une texture Aïse « SL » dans cette table nous indique des taux moyens d'argile/limon/sable de 6,25/25/67,5%, ce triolet étant modulé selon le contexte et ajusté afin que la somme atteigne les 100% (Figure 8). Parfois, les données qualitatives ne sont pas non plus renseignées. C'est alors le nom de l'UTS (Unité Typologique de Sol) qui sert à renseigner les données, aidé des autres dénominations si disponibles (noms locaux et/ou noms selon différents référentiels de classement de sol dont le Référentiel Pédologique) : par exemple, un sol « à texture argileuse à très argileuse, à pierrosité faible » se verra assigné un taux d'argile moyen de 55%, les taux de sable et de limon seront autour de 25%, tous ces taux étant modulés selon le contexte géologique (et basés sur le triangle textural mentionné dans les bases de données, à défaut sur le triangle de texture de l'Aïse le plus utilisé), ainsi qu'une pierrosité de 20-30% selon le contexte encore (sur la base du Référentiel Pédologique qui qualifie un solum pierreux par une charge en pierres > 40%, mais dont la charge totale en éléments grossiers est < 60%).

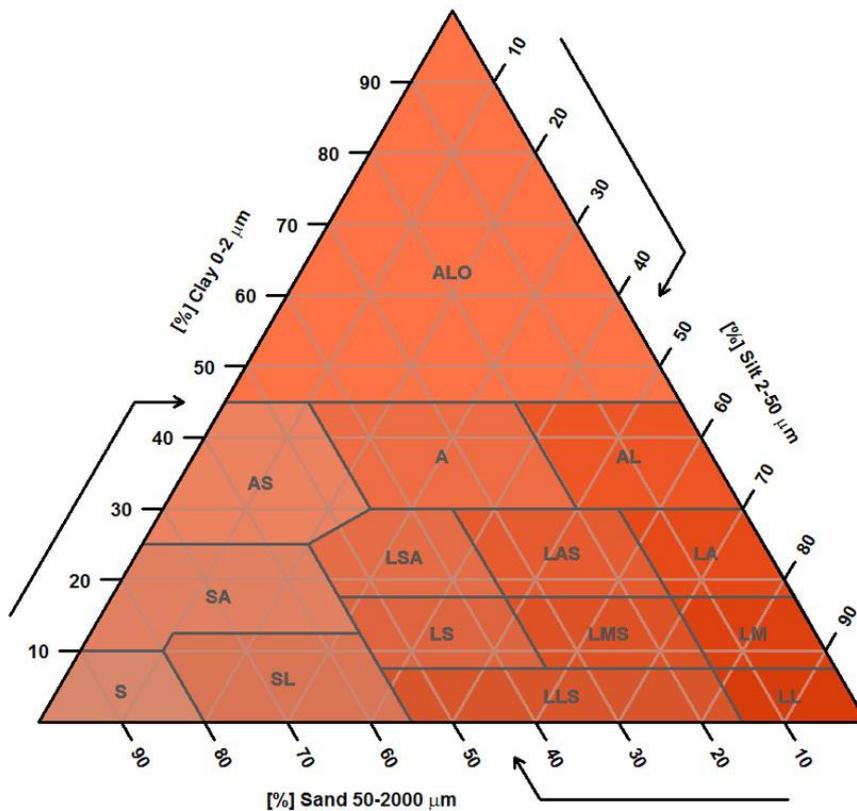


Figure 8. Triangle de texture de l'Aïse.

Si, cette évaluation demeure encore assez précise pour la granulométrie ou la pierrosité, elle fut plus délicate pour l'évaluation des taux de matière organique, par exemple lorsque la seule indication pour l'UTS est « Sols organiques sous prairie, épais, reposant sur un limon argileux à faible charge en quartz, en position de fond de talweg, hydromorphes, issus de matériaux d'apport alluvial ». Dans un cas tel que celui-ci, afin d'assigner une valeur au taux de matière organique, nous avons cherché dans la base de données les sols les plus proches typologiquement, fonctionnellement et géographiquement. Une valeur modulée selon les indications comparatives disponibles ou une valeur moyennée de plusieurs sols proches a alors été utilisée. Ici encore, nous ne pouvons pas exposer au cas par cas les nombreux compléments effectués. Néanmoins, nous pouvons illustrer la logique dans l'exemple donné ci-dessus : en l'absence de sols proches comparables comme référence, nous avons considéré que ce sol était un ORGANOSOL ; comme il est sous prairie, il possède probablement un horizon Aho hémiorganique et contient donc plus de 8 % de carbone organique ± 2 % ; ce sol étant en fond de talweg, l'hydromorphie qu'il présente affecte probablement l'horizon Aho, ce qui ralentit sans doute la décomposition de la matière organique et donc augmente son taux ; en l'absence d'analyses, le ressenti du pédologue pour que le sol soit organique est probablement lié à un taux au moins assez élevé de matière organique. En conséquence, nous avons assigné une valeur en carbone organique plus élevée que le minimum requis pour un horizon Aho, sans aller jusqu'à celle d'un horizon organique O (25%), soit 15%, ce qui correspond à $\sim 26\%$ de matière organique (par convention, coefficient multiplicateur de 1,724³ pour passer du taux de carbone organique au taux de matière organique). Dans les rares cas où il n'y a aucune information sur le taux de matière organique (même plutôt bas ou plutôt élevé car aucun qualificatif pour un sol à typologie non indicative), ce sont les valeurs médianes cantonales des taux en carbone organique de la BDAT qui ont été utilisées ou les valeurs de la base de données européennes si les valeurs ont été jugées plus opportunes, car plus précise que la médiane cantonale, vis-à-vis du contexte.

Dernier cas que nous aborderons ici pour clarifier l'utilisation faite des données, le choix de la valeur quantitative utilisée quand elle existe : effectivement, les tables des bases de données de sol peuvent indiquer une valeur minimale, modale et/ou maximale. Le plus souvent seule la valeur modale est renseignée, ce qui, statistiquement parlant, permet de spatialiser le plus précisément la variable. Toutefois, la valeur modale n'est pas systématiquement renseignée : à défaut, une moyenne arithmétique entre la valeur minimale et la valeur maximale a été utilisée, voire simplement la valeur minimale ou maximale si seule une était renseignée ; lorsque des valeurs sont disponibles dans les bases de données dites « secondaires » (BDAT, base de données européennes ou base LUCAS TOPSOIL), au cas par cas, nous avons pu utiliser la valeur fournie par ces bases de données secondaires plutôt que la valeur minimale ou la valeur maximale des bases de données principales, lorsque le contexte et l'appréciation du pédologue l'a jugé opportun.

2.1.1.3. Établissement des cartes thématiques pédologiques pour les zones du bassin versant de la Dordogne non couvertes par les bases de données géographiques principales

Certaines zones du bassin versant n'étant donc pas couvertes par les données pédologiques existantes ou d'intérêt trop faible pour les acquérir, il nous a fallu être en mesure de renseigner les modèles dans ces secteurs (Lot-et-Garonne, Cantal et en partie Puy-de-Dôme). Plutôt que de produire des cartes de sol, nous avons cherché à produire des cartes thématiques des paramètres qui alimentent les modèles ou cartes édaphiques. A cela plusieurs raisons :

- le nombre de journées de terrain pouvant être menées dans le cadre de ce travail était limité pour établir des cartes de sol à une échelle aussi précise que les données existantes acquises (a maximum du 1/250 000),
- Il est plus aisé de cartographier et d'extrapoler un paramètre de sol plutôt qu'une typologie de sol, puisque 2 typologies de sols différentes peuvent présenter la même valeur pour un paramètre,
- la délimitation d'UCS d'une carte de sol repose sur l'extrapolation de très nombreux caractères édaphiques, tandis que la délimitation d'UCS d'une carte thématique repose sur l'extrapolation d'un voire quelques caractères édaphiques : en conséquence, l'erreur inhérente à l'extrapolation (placement des limites, représentativité de la diversité intra-UCS) a une forte probabilité d'être plus faible pour une carte thématique, si bien l'échelle finale d'une carte thématique est plus précise que celle d'une carte de sol.

³ Pour connaître l'origine de ce facteur, le lecteur se référera à http://mots-agronomie.inra.fr/mots-agronomie.fr/index.php/Du_taux_de_carbone_%C3%A0_celui_de_mati%C3%A8res_organiques_dans_les_sols.

Cas du Lot-et-Garonne

Étant donné la très faible superficie du département incluse au sein du bassin versant de la Dordogne (~11,5 km² scindés en 2) et les coûts d'acquisition des cartes et base de données de sols, l'étude N°10047 à l'échelle du 1/250 000 n'a pas été acquise. L'établissement des cartes thématiques de ce département pour les différents modèles de modélisation du ruissellement intense a été réalisé par extrapolation des cartes thématiques des départements voisins de la Gironde et de la Dordogne, sur la base de la géologie, de la topographie et des photographies aériennes. Cette extrapolation fut d'autant plus facile que (Figure 9) :

- la partie Ouest du Lot-et-Garonne incluse dans le bassin versant de la Dordogne est le prolongement d'une vallée qui débute en Gironde, sachant que des vallées identiques d'un point de vue physique (géologie, topographie, occupation du sol) sont intégralement cartographiées en Gironde
- la partie Est du Lot-et-Garonne incluse dans le bassin versant de la Dordogne est le versant opposé d'une vallée dont l'autre versant est en Dordogne, sachant que de plus, une vallée quasi-identique d'un point de vue physique (géologie, topographie, occupation du sol) est intégralement cartographiée en Dordogne.

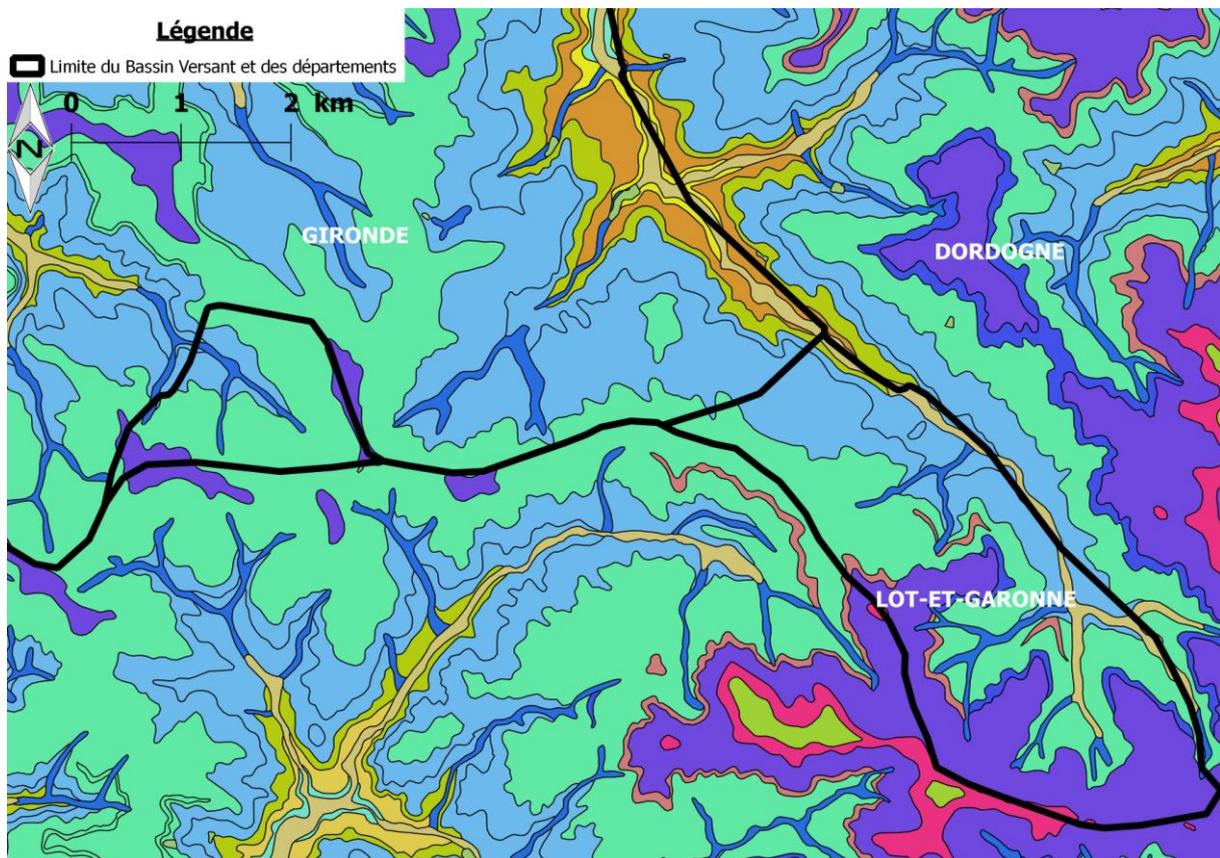


Figure 9. Fond géologique au 1/50 000 des 2 parties du Lot-et-Garonne incluses dans le bassin versant de la Dordogne.

Pour autant, les cartes thématiques produites ne sont pas qu'un simple copier-coller : pour certaines, nous avons privilégié la continuité avec la cartographie thématique de Gironde, plus que la transposition du versant opposé en Dordogne ; pour d'autres, les paramètres ont été réévalués en fonction des appréciations visuelles par photographies aériennes ou par Google Street View®.

Cas des zones non renseignées dans les bases de données pédologiques

La plupart des grandes zones urbaines ne sont pas cartographiées dans les bases de données de sol existantes, ce qui est logique, la cartographie pédologique à ces échelles décrivant des paysages. D'autres zones inaccessibles, comme les grandes bases militaires, ne sont également pas cartographiées (ex. du camp de la Courtine en Creuse). Néanmoins, les modèles utilisés requièrent des paramètres pédologiques en tout point, même si les zones sont fortement imperméabilisées et que c'est alors l'occupation du sol (et la topographie dans une autre mesure) qui est primordiale : il était donc nécessaire d'extrapoler les cartes thématiques de chaque modèle dans ces secteurs. Ces

secteurs étant nombreux, nous avons automatisé la procédure pour les secteurs les plus petits et procédé manuellement pour les plus grands (Bordeaux Métropole, Libourne, Périgueux, Bergerac, Brive-la-Gaillarde, Sarlat-la-Canéda, Camp militaire de la Courtine). Comme pour le cas du Lot-et-Garonne, pour ces grands secteurs, nous avons procédé par analogie topo-géo-pédologique (moins grâce à l'occupation du sol, quoique certaines zones peu anthropisées sont présentes en bordure des ensembles urbains) afin de construire une carte thématique propre à chaque modèle. Pour les plus petits secteurs, l'automatisation a consisté à assigner à ces polygones non renseignés la valeur du polygone adjacent le plus grand pour chaque carte thématique.

Pour le Cantal et le Puy-de-Dôme, seuls des renseignements incomplets sont disponibles sur une partie du Puy-de-Dôme (environ 70 km²). D'une part, l'amont du bassin versant débutant dans ces départements, aucune donnée pédologique n'existe au Nord, à l'Est ou au Sud du bassin versant (Figure 7). D'autre part, le bassin versant y couvre ~2900 km² dans le Cantal et 825 km² dans le Puy-de-Dôme. Enfin, le contexte géologique, les formes du relief, l'occupation des sols, le climat... - bref la plupart des facteurs de formation des sols (Jenny, 1941, 1994) - de ces 2 départements sont majoritairement très différents du reste du bassin versant, puisqu'on se situe en grande partie sur les contreforts des 2 stratovolcans du Puy Mary et du Puy Sancy. Cette conjonction de facteurs, ajoutée aux grandes surfaces à cartographier, ne permet pas une extrapolation à petite échelle.

Ainsi, pour produire des cartes thématiques sur ces 2 départements, 222 observations (sondages principalement, et quelques coupes) ont été menées au cours de l'été 2016⁴ (Figure 10).

REGLES D'ECHANTILLONNAGE EN PEDOLOGIE		
L'expertise en cartographie pédologique nécessite une densité minimale de sondages à l'hectare, densité qui dépend de l'échelle et des données existantes et qui permet de garantir la qualité et la représentativité de la carte issue de ce travail. Considérant une efficacité raisonnable de 10/20 (K) pour une échelle de carte souhaitée à 1/250 000 ^{ème} (E) sur environ 365 000 ha, les 222 sondages réalisés permettent d'atteindre l'échelle souhaitée (Ev) avec un degré d'analyse proche de 1 (Tableau 4). L'accès à cette échelle est d'autant plus favorisé que nous cartographions non pas de sols mais certains caractères édaphiques afin d'en réaliser une carte thématique.		
Tableau 4. Calculs de précision cartographique sur le site d'étude. D'après Legros (1996) et Boulaïne (1980).		
	Formule	Valeur
Échelle de la carte souhaitée	E	250000
Densité idéale Obs/ha	$Di=4x(1/E)^2x10^8$	6.40E-03
Efficacité pédologique	K= 1 à 20	10
Densité nécessaire Obs/ha	$Dn=Di/K$	0.00
Observations effectuées	Obs	222
Surface prospectée (ha)	S	365000
Densité réelle	$Dr=Obs/S$	6.08E-04
Degré d'analyse	$D^{\circ}A=Dr/Dn$	0.95
Échelle virtuelle	$Ev=E \times \sqrt{D^{\circ}A}$	256448
Le sol se présente comme un milieu spatialement continu et variable. Comme il n'est pas possible d'examiner autant qu'on le souhaite la couverture pédologique, le but du pédologue cartographe lors de la construction d'une carte de sol ou d'une carte thématique est de cerner cette variabilité spatiale et de comprendre les relations existant entre celle-ci et les autres éléments du milieu. Il convient donc d'examiner des « références » et d'en estimer la représentativité par des hypothèses sur les lois de répartition spatiale au sein du paysage : à notre échelle pour ce travail, il s'agit d'une carotte de 7 cm pour ~1650 ha... C'est pourquoi les observations doivent être soigneusement pré-positionnées dans l'espace de façon raisonnée avant la campagne de terrain. Il existe plusieurs types d'approches cartographiques (i.e. Legros, 1996) que nous ne détaillerons pas ici. Pour cette étude thématique et à cette échelle, nous avons estimé que le développement des caractères édaphiques d'intérêt pour l'alimentation des modèles utilisés par la suite était étroitement lié à des facteurs stationnels tels que la nature des matériaux parentaux, le substrat, les méso- et micro-climats et la position topographique, ce qui en fait une approche mixte.		

Ainsi, notre plan d'échantillonnage consistait à décomposer le paysage (discrétisé en régions naturelles IFN retravaillées) en éléments géomorphologiques homogènes (rebord ou sommet de plateau, milieu de versant, bas de

⁴ Les prospections n'ont pu être menées avant, puisque nous attendions la totalité des données pédologiques existantes sur le reste du bassin versant (les dernières nous ont été transmises le 13 juillet) afin de s'assurer que la totalité du temps de prospection de terrain – soit 12 jours – pouvait être dévolue à ces 2 départements.

versant, fond de talweg, vallée...) par grands types géologiques (volcaniques, plutoniques, métamorphiques, sédimentaires, de remaniement) classés selon leur altérabilité, leur « acidité »... L'étude portant sur le ruissellement intense, l'influence de la pente et de son exposition dans les versants a en particulier été observée. En cela, **l'analyse morphométrique** (Annexe 2) de la zone d'étude a été utile à l'analyse des pentes (inclinaison), de la hauteur normalisée (position dans le versant) et de la capacité d'accumulation potentielle (à travers le TWI) et leur agrégation en quelques clusters permettant une sectorisation rapide, automatisée et visuellement parlante.

Au final, de grandes toposéquences depuis les sommets des Puy ont été réalisées (**Figure 10**), permettant de déterminer :

- L'influence de la nature du matériau parental et du substrat
- L'influence de l'éloignement au sommet et donc de l'altitude
- L'influence de l'orientation des pentes et de leur intensité

Lorsque les formations n'ont plus de lien direct avec la présence des stratovolcans, elles ont fait l'objet de transects propres orientés dans le sens de la plus grande variabilité supposée qui n'est pas là forcément liée à la position topographique, mais plus à la manière dont les matériaux parentaux se sont mis en place.

Les grandes vallées ont également été prospectées par toposéquences latérales (le long des versants) et transversales (de l'amont vers l'aval), ainsi que quelques-unes plus petites représentatives d'éléments géomorphologiques homogènes, en des lieux qui semblaient représentatifs de la diversité des matériaux parentaux de l'amont.

Dans la mesure du possible et en respectant une logique de représentativité (par exemple, certains versants sont très peu boisés pour une même lithologie, si bien que l'absence d'étude des sols sous forêt sur ces versants n'induit pas de déviation marquée de la représentativité au sein de cet élément géomorphologique homogène), nous avons aussi cherché à recouper un maximum d'occupations du sol différentes par éléments géomorphologiques homogènes. En effet, si la nature de l'occupation du sol est aussi prise en compte dans les modèles, la végétation induit des modifications dans l'évolution pédogénétique des sols qui doit être évaluée afin d'en estimer l'impact sur les paramètres qui vont alimenter les modèles.

Par ailleurs, afin de se « caler » par rapport aux cartes pédologiques voisines (Corrèze, Creuse, Lot, Puy-de-Dôme), des observations ont aussi été menées dans des zones couvertes par les données pédologiques existantes. Cela permet de relier les cartes thématiques de manière cohérente de part et d'autre d'une frontière arbitraire qu'est la limite de département. De plus, cela a permis de mieux évaluer la diversité interne des UCS de la carte pédologique existant pour le Puy-de-Dôme, seuls un, voire rarement deux, profils représentatifs étant disponibles pour caractériser les UCS ; nous avons ainsi pu moduler les paramètres des modèles pour ce secteur géographique en confrontant nos observations aux profils représentatifs fournis.

Au cours des observations pédologiques, une description complète et des photographies du profil de sol, ainsi que de son contexte paysager, ont été réalisées. Les caractères suivants, de fort intérêt pour l'établissement des cartes thématiques permettant de renseigner les modèles, ont en particulier été décrits : texture, carbonatation de tous les horizons ; pierrosité de surface ; richesse évaluée en matière organique ; profondeur du substrat ; présence, nature et profondeur d'une discontinuité dans le profil ; présence et origines de nappes avec l'évaluation de leurs battements ; évaluations de leur battance et perméabilités de la surface, du profil général et du substrat.

Pour chacun des modèles, une carte thématique propre a été réalisée sur la base de ces observations, des principes d'extrapolation des observations, incluant l'analyse morphométrique de la zone et la clusterisation effectuée qui a grandement aidé dans le placement des limites des UCS dans les zones à versants si tant est qu'une limite existe effectivement au niveau des paramètres évalués. Nous reviendrons plus précisément sur la réalisation des cartes thématiques pour chacun des modèles dans les chapitres correspondants.

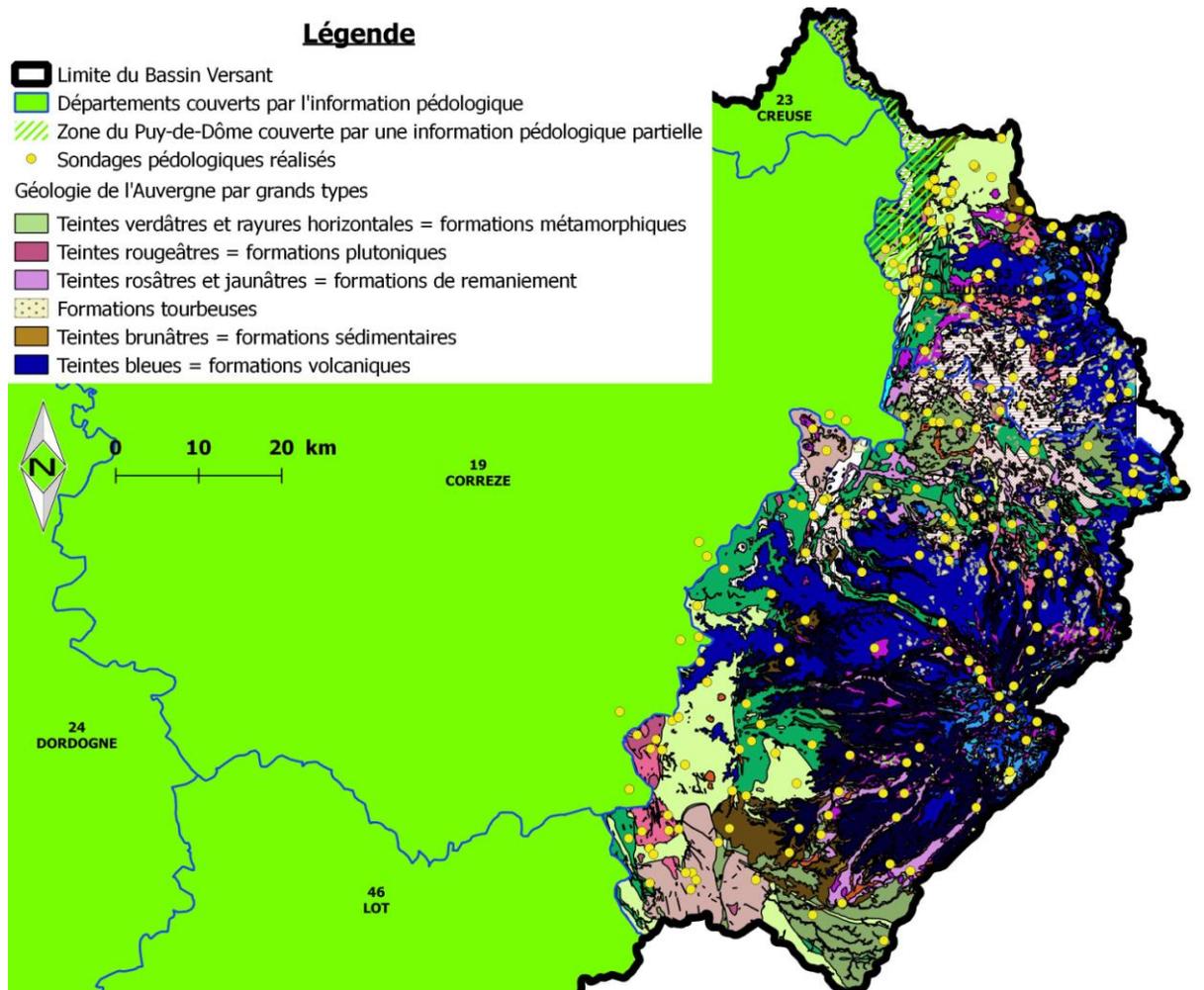


Figure 10. Localisation des observations pédologiques dans le Cantal, le Puy-de-Dôme et leurs bordures sur fond géologique de l'Auvergne colorisé par grands types de formation.

2.1.2. La donnée topographique

Nous disposons de la BDAlti 25m de l'IGN sur l'ensemble du bassin versant et du RGE1m pour les plaines alluviales (mis à disposition par EPIDOR). Étant donné que la modélisation concernait essentiellement les versants, le RGE1m, bien que plus précis, ne nous a pas été d'une grande utilité. Nous l'avons écarté dès le début de l'étude.

La BD Alti®25m V2.0 de l'IGN est un sous-échantillonnage du RGE qui est issu de l'agrégation de données altimétriques diverses. Cette donnée est structurée sous forme d'une grille raster avec des pixels de 25m de côté, ce qui impose une résolution spatiale planimétrique de 25m (on ne peut pas descendre en dessous), soit 625m². La précision altimétrique de cette donnée varie de 2 à 8m, ce qui peut être conséquent comme erreur, notamment pour les modélisations hydrographiques (Figure 11). Les zones à forte énergie de relief sont celles qui pâtissent d'une précision moindre. Cette donnée peut être utilisée pour une échelle du 1/50 000 au 1/25 000.

Ce MNT a été utilisé de manière brute pour le calcul des dérivées première (pente) et secondaire (courbure). Ces calculs ont été réalisés *via* les algorithmes classiques décrits par Burrough et al. (1998). Par contre, pour les modélisations hydrologiques, le MNT a subi la procédure classique de "brûlage" en utilisant comme support vectoriel la BD-Carthage. Le brûlage s'est fait avec le module Arc-Hydro. L'extraction des données hydrographiques s'est faite soit avec l'algorithme D8 (O'Callaghan and Mark, 1984), soit avec des algorithmes multidirectionnels dès lors que nous souhaitons mieux modéliser les transferts diffus (Gruber and Peckham, 2009). Nous précisons ces manipulations dans la partie 3.

Le *Topographic Wetness Index* (TWI) déjà abordé précédemment a fait l'objet d'un traitement spécial. En effet, son calcul est basé sur la définition des aires contributrices, lesquelles sont classiquement générées avec l'utilisation de

l'algorithme D8 de O'Callaghan and Mark (1984). Cependant, cet algorithme fonctionne bien pour les flux concentrés, mais beaucoup moins bien pour les flux diffus ce qui peut être gênant pour modéliser les saturations de bas de pente qui vont favoriser le ruissellement sur surface saturée (écoulement de retour). Ainsi, appuyés par les travaux de Kopecký and Čížková (2010) et Tang et al. (2015), nous avons intégré dans le calcul du TWI un calcul des aires contributives *via* un algorithme de type Multiple Flow Direction (Gruber and Peckham, 2009; Quinn et al., 1991) ce qui nous donne une carte plus réaliste et qui prend mieux en compte les saturations potentielles de bas de versant ainsi que la diffusion de cette saturation. Cette carte a été générée avec le logiciel gratuit SAGA Gis.

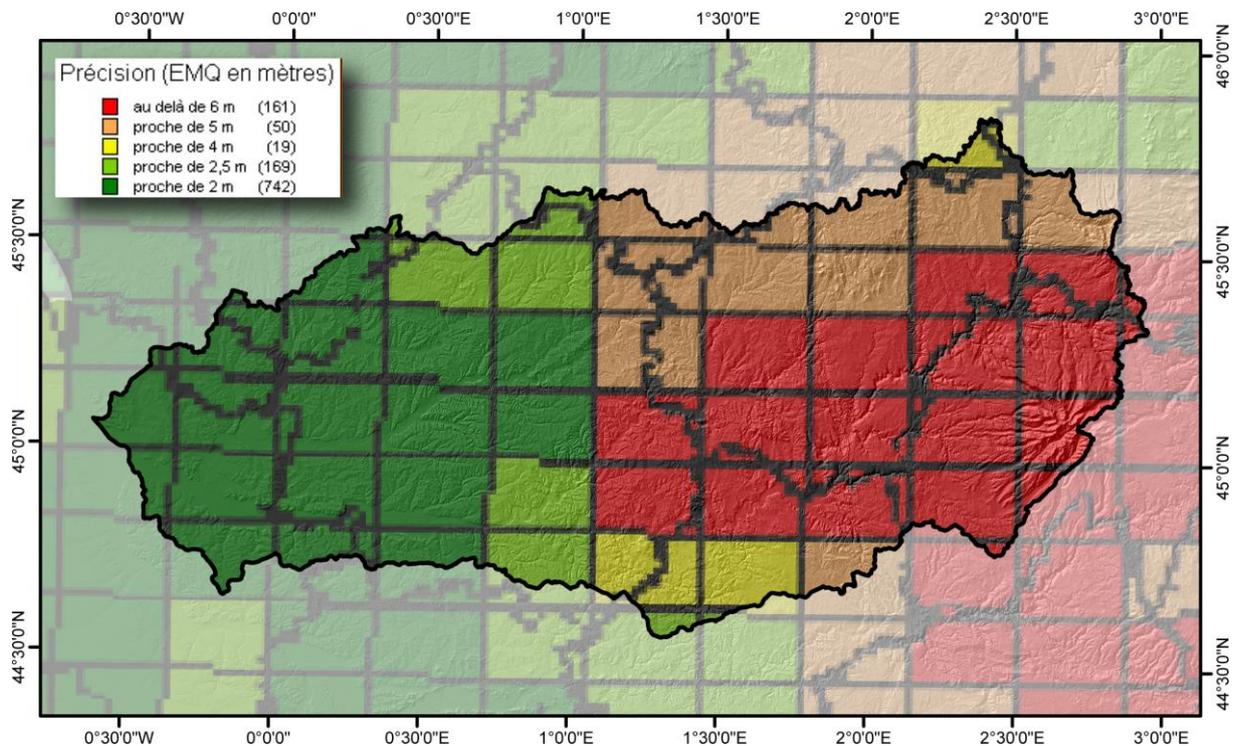


Figure 11 - Précision altimétrique de la BD Alti 25m donnée par l'IGN. Cette carte concerne la V1.0, mais est en cohérence avec les données de précision de la V2.0.

2.1.3. L'occupation du sol

Cette donnée a été générée par l'assemblage de 3 données de base "gratuites" ou fournies par EPIDOR.

La première base est la donnée européenne Corine Landcover de 2012 (Corine 2012), fournie gratuitement⁵. Cette base vectorielle est acquise par photo-interprétation d'image satellite métrique. La taille minimale du polygone est de 25ha, ce qui définit une résolution minimale de 500m. En pratique, cette base est spatialement plus précise et peut être utilisée à 1/100 000. Elle compte 44 classes d'occupation du sol organisées en 3 niveaux hiérarchiques. L'intérêt de cette base est qu'elle couvre tout le bassin versant et qu'elle est topologiquement propre.

La deuxième base d'information est le Registre Parcellaire Graphique de 2012 (RPG 2012), fournie gratuitement également⁶ par l'Agence de Services et de Paiements dans sa version "anonyme". Cette base est mise à jour annuellement et fournit le type de culture à la parcelle cadastrale, sur des bases déclaratives, mais aussi de contrôle. Il existe 28 classes de culture identifiées. Cette base est utilisable à l'échelle 1/5 000. Par contre, elle est renseignée par département et les jointures entre chaque département ne sont pas toujours "propres". La topologie est également hasardeuse, car il est fréquent que des polygones se recoupent ou ne soient pas jointifs.

La troisième base est l'inventaire des zones humides mené par EPIDOR. Cette base ne couvre pas toute la surface du bassin versant et à des précisions différentes, du 1/25 000 au 1/50 000. Les contours des zones humides sont fins

⁵ Donnée disponible à <http://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>

⁶ Donnée disponible à <https://www.data.gouv.fr/fr/>

dans certains cas (cas du Limousin) et grossiers dans d'autre (cas des Causses). Cette base est thématiquement moins précise que les deux autres bases, mais présente le mérite d'ajouter une information sur la saturation potentielle du sol et/ou sa capacité de rétention (cas des tourbières).

Les données de bases d'occupation du sol ont été vérifiées par photo-interprétation sur la base des images satellites *BirdsEye™* de 2013. Pour chaque couche, nous avons vérifié une vingtaine de polygones répartis aléatoirement sur le bassin versant, soit près de 60 polygones sur tout le bassin versant. Les résultats étaient tout à fait satisfaisants. Un important travail de "toilette" topologique a été effectué *via* les outils de topologie de Mapinfo et QGis afin notamment de supprimer les recouvrements de polygone. Au vu du grand nombre d'erreurs topologiques dans la couche du RPG, nous avons opté pour une correction automatique des recouvrements avec une assignation des reliquats au plus grand polygone adjacent. Dans les cas complexes, les reprises ont été faites à la main (plus de 200 reprises manuelles). Enfin, il reste des erreurs topologiques aux limites du bassin versant (petits polygones de quelques m², très allongés le long des limites). Afin d'augmenter la précision spatiale et thématique de cette couche d'information, nous avons contraint Corine 2012 et la couche ZH par le RPG 2012. Ce choix a été motivé par la nécessité de conserver l'information du RPG car elle touche des types d'occupation du sol potentiellement ruisselants hors des zones urbaines et que sa précision spatiale est élevée. De fait, nous avons superposé (*overlay* par *Union* afin de garder les informations d'origine de chaque couche) les couches d'information en ne gardant au niveau des superpositions que la couche prioritaire (Tableau 5). Au final, nous obtenons une couche couvrant tout le territoire avec une précision spatiale variable du 1/5000 au 1/100 000 (Figure 12). Les échelles 1/25 000 et 1/50 000 couvrent 4% de la surface respectivement, tandis que l'échelle 1/5000 couvre 35% et l'échelle 1/100 000, 56%. La couche finale contient 777 770 polygones uniques.

Tableau 5 - Hiérarchisation des couches d'occupation du sol.

Couche	Priorité	Échelle	Justification
Corine 2012	Faible	1/100 000	Au final, les espaces agricoles de Corine sont remplacés par le RPG qui est plus précis. Corine fournit par contre les espaces forestiers peu sensibles au ruissellement et donc les limites sont contraintes majoritairement par les zones agricoles (RPG) ce qui permet d'avoir des limites à 1/5000. Les espaces urbains proviennent de Corine ce qui est une faiblesse de la démarche, mais qui n'est pas un problème fondamental étant donné que ces espaces dépendent de démarches de modélisation de type "ruissellement urbain" qui demandent de prendre en compte les réseaux pluviaux ce qui est hors champ de la présente étude.
RPG 2012	Forte	1/5000	Superposée à Corine, elle permet d'apporter l'information agricole à un haut degré de précision spatiale et typologique. Elle contraint les limites de Corine au niveau des espaces forestiers et urbains ce qui permet d'améliorer indirectement la précision de Corine aux limites.
Couche ZH	Moyenne	1/25 000 à 1/50 000	Cette couche a été superposée au croisement entre le RPG et Corine. Les polygones de ZH se sont substitués aux polygones Corine, mais pas aux polygones du RPG. Dans le cas d'un croisement avec le RPG, nous avons juste retenu le caractère humide, non l'information totale de la couche ZH afin de préserver la qualité de l'information du RPG.

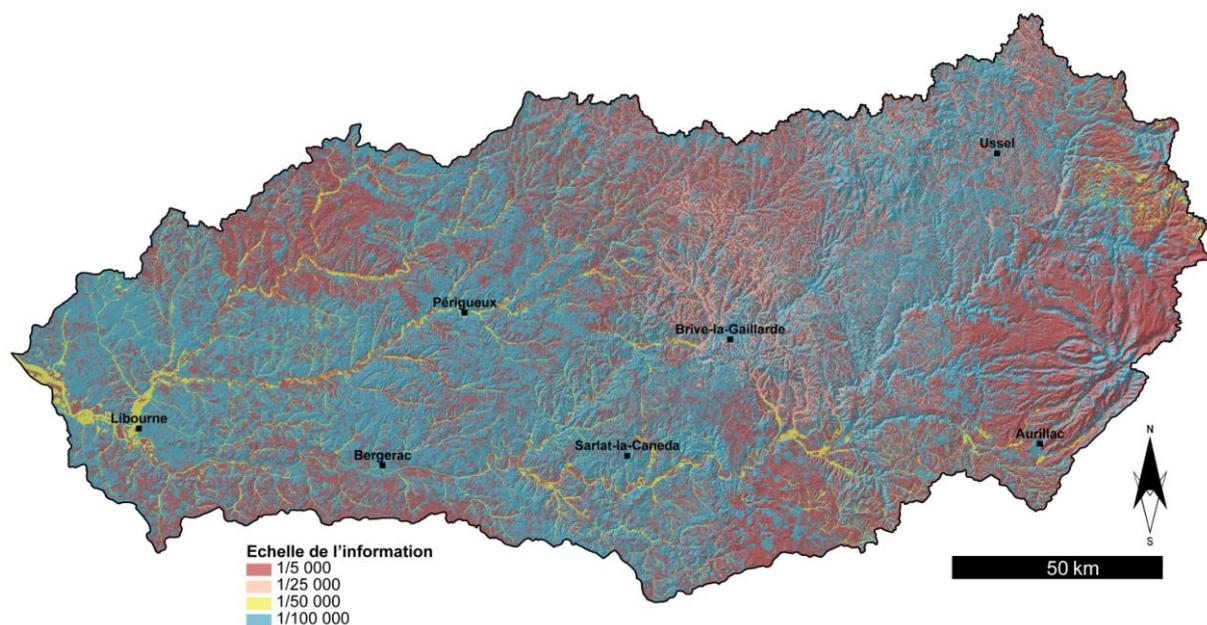


Figure 12 - Carte des échelles sur l'information "occupation du sol".

Les regroupements des types d'occupation du sol (TOS) se sont basés sur les occupations du sol proposées par la méthode SCS-CN (**United States Department of Agriculture, 1986**). Ainsi, nous avons assigné chaque type d'occupation du sol issue de Corine, du RPG ou de l'inventaire ZH aux catégories du SCS-CN. Cette assignation s'est basée sur la bibliographie et sur des échanges entre Inselberg et Solenvie à partir de nos expériences respectives (Annexe 3).

L'item "tissu urbain continu" (TUC) a été rattaché à la classe originelle "*Urban District, commercial and business*" avec plus de 85% de surface artificialisée et imperméable. Sur les images aériennes, ce TOS correspond aux hypercentres et centres urbains, mais on y décèle fréquemment quelques espaces verts ce qui explique le classement dans cette catégorie et non dans celle des surfaces imperméables pures (routes, parking, etc.). Cette catégorie couvre 6.41 km², soit 0.03% de la surface du BV.

Les zones industrielles et commerciales (ZIC) sont rattachées à la catégorie "*Urban District, industrial*" avec une couverture imperméable proche de 75%. Ces zones sont très artificialisées, mais il existe des terrains vagues ou certains espaces interstitiels non artificialisés, plus ou moins en herbe, qui possèdent encore une capacité d'infiltration. Ce TOS occupe 0.21% de la surface du BV (49.99 km²).

Le TOS "Roche nue" (SOL) correspond à des zones "naturelles", sans végétation et sans couverture pédologique suffisamment épaisse pour assurer une infiltration minimale. Nous l'avons rattaché à la catégorie "*Bare soil*" dont les niveaux de CN sont plus bas que les deux TOS précédents du fait de fissures et autres diaclases qui permettent une certaine infiltration et limitent un peu le ruissellement direct. Ces surfaces, bien que ruisselantes, ne sont pas considérées comme purement imperméables comme peuvent l'être les surfaces artificialisées. Cette catégorie couvre 1.59 km², soit 0.01% de la surface du BV et concerne surtout des intrusions magmatiques et des éboulis sous corniches localisés dans le Cantal.

Le TOS Aéroports, Chantiers, Réseau routier et ferroviaire est un ensemble composite regroupé sous l'appellation INF (infrastructures). Sur les images satellites, les routes digitalisées comprennent aussi les bas-côtés, tout comme les réseaux ferroviaires. Les aéroports comprennent également d'importantes étendues de pelouses bordant les pistes. Les chantiers sont temporaires et sont le plus souvent à l'origine de route ou d'extension de ZIC. De fait, le recouvrement de ces infrastructures est loin d'être complet et nous avons relié ce TOS à la catégorie "*Residential districts by average lot size*" en prenant la classe qui avait le plus de recouvrement, soit 65% de surface artificialisée, ce qui correspond grossièrement et en moyenne à ce que nous avons observé sur les images satellites. Ce TOS couvre 32.41 km², soit 0.14% de la surface totale du BV.

Les légumes et fruits et semences ont été considérés comme des activités de maraîchages (MAR) impliquant des surfaces bâchées et des surfaces en ados, rainurées et peu couvertes. Ce TOS est particulièrement ruisselant et a été rapporté à la catégorie initiale des "*Row crops, straight row*". Nous avons cependant fait le choix de l'intégrer à la sous-classe des "pratiques infiltrantes", considérant que ces TOS sont essentiellement sur des surfaces peu pentues. Ce TOS occupe 11.16 km², soit 0.05% de la surface du BV.

Le TOS Tissu urbain discontinu (TUD) est une catégorie assez hétérogène dans *Corine Land Cover 2012* qui regroupe les espaces résidentiels périphériques, quelques zones commerciales et centres urbains ruraux. Les couvertures de surfaces artificialisées varient mais sont globalement entre 30 et 50%. Les Coefficients d'Occupation des Sols des zones pavillonnaires sont la plupart du temps entre 0.3 et 0.5, ce qui correspondrait à nos observations. De fait, nous avons rattaché cette catégorie au "*Residential districts by average lot size*" à 38% de couverture (ce qui est le plus proche des 40% en moyenne observés). Ce TOS occupe 434.81 km², soit 1.84% de la surface du BV.

Le TOS VIG regroupe les vignes et l'arboriculture. Les alignements de ligneux sont suffisamment espacés pour laisser des portions importantes de sols nus et souvent un peu tassés et sont souvent dans le sens de la pente. Ces cultures sont reconnues pour être ruisselantes et nous les avons donc regroupées sous la catégorie "*Vineyard*". Ce TOS occupe une surface importante de 1097.84 km², soit 4.64%, et est très concentré sur l'Entre-Deux-Mers et les proches environs.

Dans la même veine, les vergers et petits fruits (VPF) ont été classés avec les "*wood-grass combination*", mais en considérant des recouvrements plus faibles et surtout une structure d'alignement plus propice aux ruissellements. Cette catégorie, exclusivement issue de *Corine Land Cover*, est légèrement différente du TOS précédent car elle intègre un peu plus d'espaces périphériques de type bocager. Les valeurs de CN, bien que plus faibles, demeurent proches de la catégorie VIG. Ce TOS occupe 45.78 km², soit 0.19% de la surface totale du BV.

Les Prairies temporaires et Autres gels (PRT) correspondent à des zones de jachère "tournantes" sur 4 à 5 ans, plus ou moins pérennisées et non soumises aux labours. Ce TOS, bien que temporaire, demeure couvrant une bonne partie de l'année. Nous l'avons rattaché à la catégorie "*Pasture, grassland, or range—continuous forage for grazing*" et dans la sous-catégorie "*50-75% ground cover and not heavily grazed*" afin de prendre en compte le caractère temporaire sur une fenêtre glissante de 4 à 5 ans. De fait, cette catégorie demeure plus ruisselante que les prairies permanentes. Les PRT couvrent 1934.89 km², soit 8.18% de la surface du BV. Cette catégorie fait la bascule entre les TOS "ruisselants" et les TOS "peu ruisselants".

Les Systèmes cultureux et parcellaires complexes (BOC) correspondent à ce qu'on pourrait communément appeler un "bocage lâche". Il s'agit d'un paysage complexe mêlant des surfaces de prairies avec des petites cultures entrecoupées de petits îlots boisés et de haies, mais intégrant aussi des habitations, des routes et quelques surfaces artificialisées. Le ruissellement y est très varié et, à l'échelle de l'étude, ne peut faire l'objet d'un affinage à la parcelle. De fait, nous avons rattaché cette catégorie complexe au "*Woods—grass combination*", mélange de bois et de prairies en considérant des conditions de drainage moyennes dues aux espaces artificialisés, ce qui place ce TOS comme un peu moins ruisselant que les VPF mais plus ruisselant que le bocage dense développé par la suite (AFM). Ce TOS occupe 2186.38 km², soit 9.25% du BV.

Les Estives et Landes (LAN) sont milieux semi-ouverts avec des boisements pionniers à faible couverture. Ce TOS correspond bien à la catégorie "*Brush—brush-weed-grass mixture with brush the major element*" avec moins de 50% de recouvrement du sol par la végétation arbustive. Ce TOS couvre 403.38 km² (1.71%).

Les Équipements sportifs et de loisirs (ESL) sont des espaces mixtes, assez variés, mélangeant des infrastructures en dur éparses au sein d'une matrice spatiale "verte" et plutôt infiltrante. Cette catégorie reste dans les espaces urbains mais a été rattachée aux "*Open space (lawns, parks, golf courses, cemeteries, etc.)*" avec un recouvrement herbacé supérieur à 75%. Cette catégorie couvre 12.18 km², soit 0.05% de la surface totale du BV.

Les Prairies permanentes (PP) sont des espaces à couverture continue d'herbacées. Elles ont été classées avec les "*Pasture, grassland, or range—continuous forage for grazing*" à plus de 75% de recouvrement par la couverture herbacée. Cette catégorie occupe 6383.82 km², soit 27% de la surface du BV. C'est le deuxième TOS en termes de surface couverte.

Le TOS Forêt et végétation arbustive (SAL) est très hétérogène dans *Corine Land Cover* car elle regroupe à la fois des peuplements purs de pins, des fourrés, des peuplements fermés ou ouverts, etc. Nous avons donc considéré le caractère globalement forestier de cette catégorie (*Woods*), mais dégradé par rapport à la forêt pure. De fait, nous l'avons rattaché à la sous-catégorie "*Woods are grazed but not burned, and some forest litter covers the soil*" ce qui correspond le mieux à une forêt un peu dégradée ou un saltus. Ce TOS occupe 440.03 km², soit 1.86% de la surface.

Les Surfaces essentiellement agricoles interrompues par des espaces naturels importants (AFM) sont du bocage dense, soit un ensemble de prairies et cultures avec un parcellaire de petite taille, séparée par des haies hautes ou basses et comprenant d'importantes surfaces boisées. Ce sont des espaces mixtes à forte imbrication des lisières et à fort recouvrement herbacé ou boisé. Nous avons rattaché cette catégorie au "*Wood-Grass combination*" avec des conditions hydrologiques plutôt infiltrantes. Ce TOS occupe 417.03 km², soit 1.76% du BV.

La catégorie Fourrage (FOU) regroupe essentiellement des prés et prés de fauche, ce qui correspond bien à la catégorie "*Meadow—continuous grass, protected from grazing and generally mowed for hay*". Ce TOS couvre 24.02 km², soit 0.1% du BV. À noter que la distinction entre FOU et PP n'est pas toujours évidente. La faible surface de cette catégorie et la proximité des valeurs de CN avec les prairies permanentes réduisent de toute façon l'impact de la difficulté de distinction.

L'ensemble des forêts feuillues, mixtes et de conifère a été regroupé sous le TOS forêt (FOR) et rattaché à la catégorie "*Woods - Woods are protected from grazing, and litter and brush adequately cover the soil*" qui qualifie les forêts "pures". Nous n'avons pas fait la distinction entre forêts décidues et à feuilles persistantes car l'interception au sol avec la litière reste la même. Cette catégorie est celle qui occupe le plus de surface sur le BV avec 8081.68 km², soit 34.19%.

Enfin, les Pelouses et pâturages naturels (PPN) sont considérés comme le TOS le moins ruisselant. Sur les Causses, cette formation est souvent un peu boisée (15 à 25%), tandis que dans le Cantal, cette formation est très couvrante mais non boisée. La catégorie est inexistante dans le SCS-CN et nous n'avons pas trouvé de bibliographie spécifique sur ces milieux. Ces formations présentent un sol plus ou moins naturel, en tout cas moins déstructuré que les prairies artificielles. Ces pelouses sont plus variées en termes de composition spécifique ce qui assure un couvert

permanent renouvelé, à forte ETP et avec souvent des horizons organiques épais. Nous les avons rattachés à la catégorie "Brush—brush-weed-grass mixture with brush the major element" avec plus de 75% de recouvrement ce qui correspondrait à des zones pionnières, à sols naturels et végétation très couvrante, à forte ETP. Ce TOS couvre 99.2 km², soit 0.42% du BV.

Les TOS pour les cultures sont issus exclusivement du RPG 2012. Ce sont :

- Mais, Tournesol (MT)
- Autres oléagineux (soja) (SOJ)
- Autres cultures industrielles (CI)
- Autres céréales, Blé tendre, orge (CER)
- Colza, légumineuses à grains, protéagineux (CLZ)

Ces TOS ont la particularité de varier au cours de l'année en fonction du cycle cultural. Pour la période de transition été/automne (Septembre/Octobre), toutes ces cultures sont récoltées et les champs, théoriquement labourés (hormis pour le soja). De fait, à cette période, toutes ces cultures se rattachent à la catégorie "Crop residue cover", très ruisselante. Il existe deux sous-catégories à pratiques infiltrantes ou ruisselantes. Le soja sera par contre couvrant mais en alignement ce qui lui vaut son rattachement à la catégorie "Row crops, Straight row" qui est moins ruisselante.

En première approche, une majorité des surfaces est occupée par des types d'occupation du sol plutôt favorables à la limitation du ruissellement (1/3 de forêt, presque 30% de prairies, presque 10% de bocage, Figure 13), mais les occupations du sol favorables au ruissellement sont concentrées spatialement (cas des vignes ou des espaces urbains qui forment des hotspots) (Figure 14).

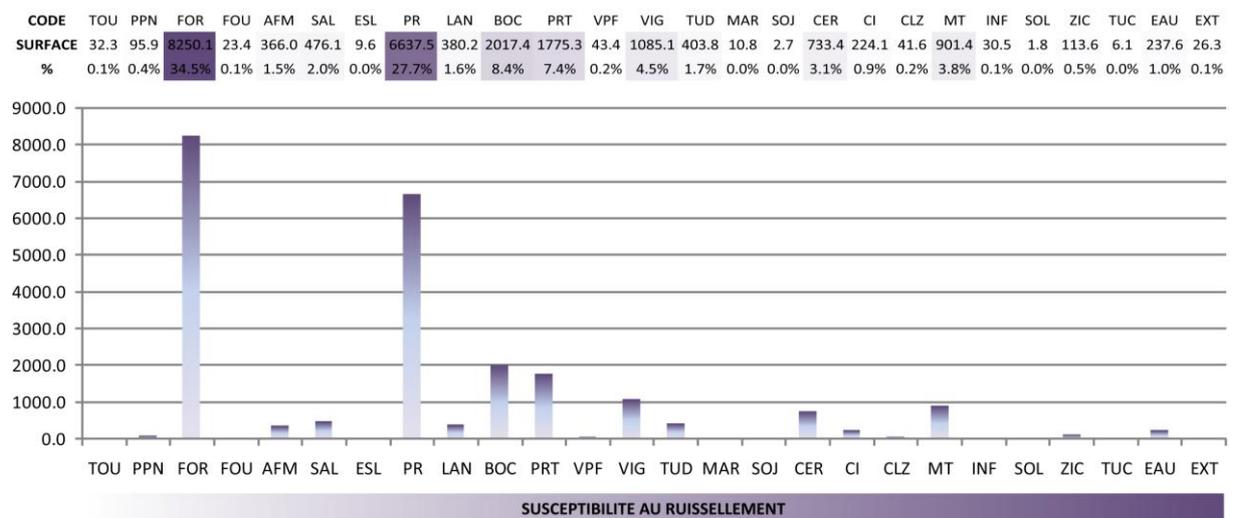


Figure 13 - Distribution des types d'occupation du sol (TOS) sur le bassin versant de la Dordogne. Les surfaces sont en km². TOU, tourbière ; PPN, pelouse et pâturage naturels ; FOR, forêt ; FOU, fourrage ; AFM, espaces mixtes agricole et forestier ; SAL, saltus ; ESL, équipements de loisirs de plein air ; PR, prairie permanente ; LAN, landes ; BOC, bocage ; PRT, prairie temporaire ; VPF, vergers ; VIG, vigne ; TUD, tissu urbain discontinu ; MAR, maraîchage ; SOJ, culture de soja ; CER, culture de céréales ; CI, cultures industrielles ; CLZ, culture de colza ; MT, culture de maïs ou tournesol ; INF, infrastructure ; SOL, sol nu ; ZIC, zone industrielle et commerciale ; TUC, tissu urbain continu ; EAU, surface d'eau libre ; EXT, extraction de pierre, carrière (non pris en compte dans les modélisations).

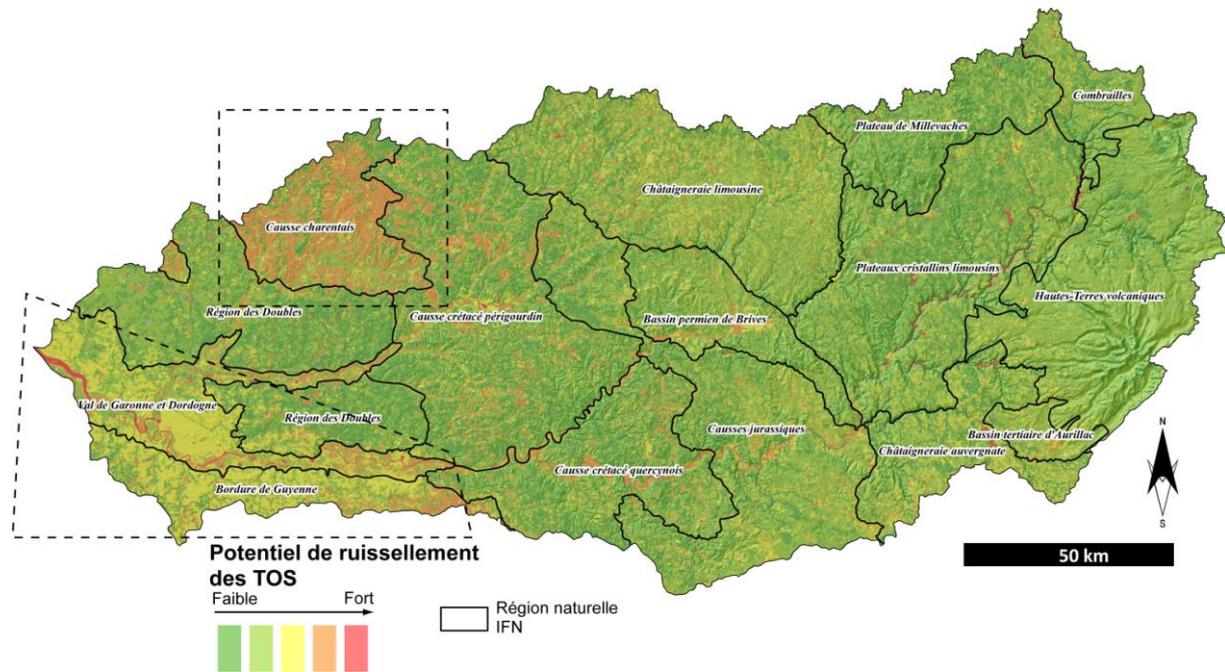


Figure 14 - CN moyen des TOS sur le BV de la Dordogne. Sur cette carte, on retient 4 régions concentrant des TOS potentiellement ruisselants. REGION 1 : le Causse charentais. Cette région concentre les cultures de céréales et de maïs avec d'importantes surfaces mises à nues à certains moments de l'année. Toutes conditions égales par ailleurs, cette zone mérite une prise en compte des variations de la couverture intra-annuelle, en relation avec les événements météorologiques enregistrés. REGION 2 : La Bordure de Guyenne et le Val de Dordogne. Cette zone basse aval est surtout dominée par la culture de la vigne et du maraichage qui sont des TOS assez ruisselants mais, a priori, sans effet trop important de la saisonnalité. Cependant, il conviendra également de privilégier les récurrences d'événements météorologiques qui sont plus fréquents sur cette zone. REGION 3 : les Causses jurassiques, quercynois et périgourdin. Ces régions présentent des TOS avec des formations végétales éparées et clairsemées et quelques ensembles parcellaires de culture. Cette région est plus hétérogène d'un point de vue du potentiel de ruissellement lié aux TOS et semble moins soumise au problème de saisonnalité des cultures. REGION 4 : les axes des grandes vallées, en aval de l'escarpement tectonique séparant les domaines cristallins de celui des causses. Les TOS de ces vallées sont plutôt ruisselants avec des cultures et de l'arboriculture.

2.2. Données liées aux facteurs de déclenchement

Cette donnée est météorologique. Une des limitations importantes pour cette donnée reste son coût élevé. En effet, pour pouvoir produire des cartographies des précipitations pour des temps de retour donnés, il convient d'avoir les données journalières de pluies sur un maillage important de stations météorologiques, et ce, sur au moins 15 à 20 ans pour assurer une certaine robustesse statistique. Ces exigences entraînent de suite un nombre très élevé de données (au moins 7500 données/station et il faut au moins 120 stations réparties régulièrement sur le bassin versant) et donc un coût dépassant plusieurs dizaines de k€.

Cette donnée est pourtant fondamentale dans le processus de modélisation pour plusieurs raisons :

1. Pour les cultures, les taux de ruissellement varient sur une année en fonction du stade cultural. Ainsi, pour produire des cartes pertinentes, il fallait caler les modélisations en fonction des cycles culturaux.
2. Afin de dépasser la susceptibilité et produire une carte d'aléa, il fallait avoir au moins la pluie maximale historique ou une pluie définie selon sa période de retour.
3. Pour les modélisations SCS et STREAM, il était intéressant pour nous de calibrer les modèles sur des événements connus (ceux de juin 2007 et mai 2008) pour lesquels nous avons des retours en terme de dégâts. De fait, il nous fallait être en capacité de reproduire spatialement les totaux précipités.

Nous avons contourné le problème de l'acquisition de la donnée de base en utilisant les cartes de pluies extrêmes mises à disposition gratuitement par Météo France. Ces cartes sont le résultat d'interpolations réalisées par Météo France à partir de son réseau d'observations pour des pluies >40mm/24h.

Pour cette étude, nous avons sélectionné toutes les cartographies de 1958 à 2014, pour les départements contenant une partie du bassin versant de la Dordogne, et pour des événements cumulant au moins 50mm/24h ou 80mm/48h. En accord avec EPIDOR, nous n'avons pas pris en compte les épisodes de longue durée et avons concentré l'effort de cartographie sur les épisodes courts et intenses.

Nous avons ainsi récolté 314 cartes sous format .pdf (Figure 15). Nous avons sélectionné 137 cartes présentant des événements pluviométriques significatifs, le reste étant hors du bassin versant, sur le reste des territoires départementaux sélectionnés. Ces 137 cartes .pdf ont été converties en .jpeg par le biais d'une routine programmée avec la suite Adobe. Chaque image .jpeg a ensuite été recalée dans le SIG à partir de 7 points de calage fixes et utilisés pour toutes les images (qui sont toutes standardisées). Le processus de calage s'est fait de manière séquentielle avec un traitement par lot. Chaque carte calée en RGF93-Lambert93 a ensuite fait l'objet d'une digitalisation à la main des enveloppes de précipitations en suivant les classes par défaut de Météo France.

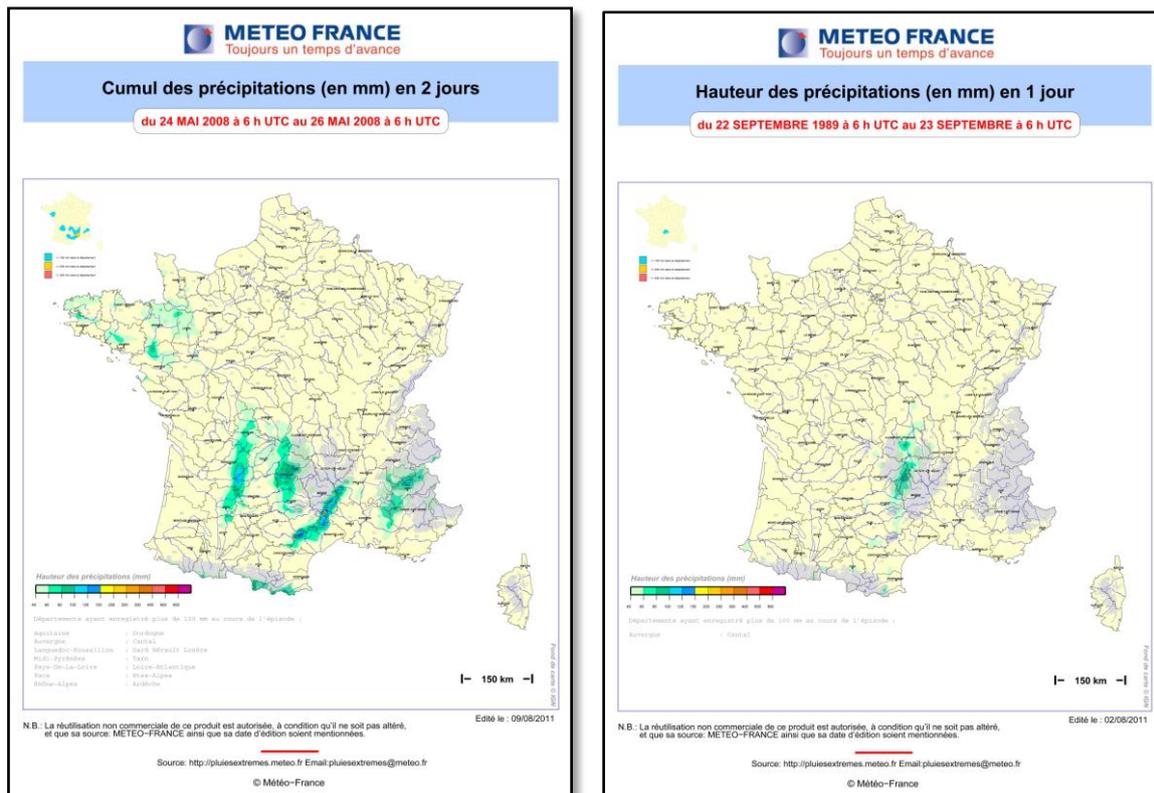


Figure 15 - Exemple de cartes brutes téléchargées sur le site de Météo France. Ici, les événements de mai 2008 et septembre 1989.

Les cartes vectorisées ont ensuite été rastérisées en se basant sur les propriétés de la BD-Altitude afin d'avoir une compatibilité de calcul, soit une maille de 25m. Au terme de cette procédure, nous avons donc 137 cartes raster avec des classes de précipitations, par date. Ce lot de données nous a permis de réaliser :

- Des calculs spatialisés comme les variations des totaux, les maxima historiques, les fréquences pour des niveaux de pluies donnés, etc.
- Des calculs globaux comme notamment les fréquences mensuelles d'événements pluvieux intenses.

2.3. Données de calibration et de validation

Afin de mieux caler les modèles de ruissellement et de les valider, il est intéressant de posséder des données issues d'événements réels. Pour ce faire, nous avons mobilisé 3 types d'information :

- Une étude sur les dégâts causés par les événements des périodes de juin 2007 et mai 2008 (Haziza, 2010) qui fournit des informations spatialisées,

- Une enquête auprès des 1515 communes du bassin versant doublée d'une étude spécifique menée en parallèle par le CAUVALDOR,
- La base des arrêtés CatNat.

L'enquête et l'étude CAUVALDOR ont servi à valider les cartographies finales, tandis que l'étude des événements juin 2007/mai2008 et la base CatNat ont servi à calibrer les modèles et valider les cartographies.

2.3.1. Les études antérieures et parallèles

L'étude Haziza de 2010 nous a été fournie par EPIDOR qui a réalisé un travail de mise sous SIG des données cartographiques présentes dans le rapport. Nous avons filtré ces données en enlevant les "ruptures de pont" qui sont liées à des inondations par débordement. Nous avons gardé la majorité des "coupures de route" mais sommes conscients que cette donnée peut être liée à une inondation par débordement d'un cours d'eau important. Enfin, nous avons gardé les "zones touchées par les inondations", même si celles-ci sont plus aléatoires, car elles intègrent des surfaces importantes qui n'ont pas eu à souffrir de l'aléa ruissellement. Cette donnée est prise en compte pour relativiser les résultats. Au final, nous avons 24 coupures de route et 47 zones touchées par les inondations.

L'étude menée actuellement par Hydratec pour le compte du CAUVALDOR nous a été fournie partiellement par EPIDOR. Hydratec a réalisé un important travail de recensement d'événements auprès des communes avec une vérification sur le terrain. Nous avons repris certains points recensés par HydraTec afin d'évaluer la qualité des modèles de susceptibilité au ruissellement. Par contre, nous avons fait un tri dans les phénomènes inventoriés, car tous ne relèvent pas de processus de ruissellement ou bien sont liés potentiellement à des décharges karstiques. Le détail est mentionné ci-après (Tableau 6).

Tableau 6 - Choix des points de l'étude Hydratec pour le CAUVALDOR.

Commune	Point	Sélection pour validation	Observation
Autoire	1	non	Les dégâts sur le pont en 1989 sont liés au débordement comme indiqué par Hydratec
	2 à 4	non	Le gondolement des routes en 1993 est lié aux phénomènes de fluage causé par la saturation des sols (baisse de la limite de plasticité). Il s'agit bien d'un phénomène de glissement de terrain qui n'est pas causé par le ruissellement en lui-même, mais au contraire par des problèmes de drainage des sols et d'infiltration en profondeur. Les sites de glissements sont situés dans les marnes noires du Toarcien sur des pentes > 10°, ce qui correspond bien aux contextes géomorphologiques pour ces phénomènes.
Belmont-Bretenoux	1 à 3	oui	
Loubressac	1	oui	
	2	non	Il s'agit de ruissellement urbain lié à un sous-dimensionnement d'ouvrages enterrés
	3	oui	Ce point est délicat car il s'agit de problèmes liés à une émergence. Si on considère que cette émergence est le fait de la concentration des circulations de subsurface dans les formations superficielles meubles, alors oui, on le prend en compte. Si par contre c'est une exsurgence karstique, on ne peut pas le prendre en compte. Pour le moment, nous avons pris ce point dans notre base, mais en spécifiant le doute qui subsiste sans diagnostic plus précis sur l'origine de cette source.
	4	non	Défaut de calibration des réseaux artificiels, problème d'hydraulique urbaine.
	5	oui	Nous rejoignons les hypothèses d'Hydratec. Campées sur les argiles et marnes du Domérien sur des pentes proches de 15°, nous pensons également qu'il existe des problèmes structuraux de stabilité des sols. C'est un point limite.
St-Jean-Lagineste	1 à 3	oui	Point 2 : la route joue un rôle chenalissant qu'on ne pouvait pas prendre en compte dans notre modélisation Point 3 : il s'agit plus d'un problème d'érosion par ruissellement que du ruissellement pur
St-Jean-Lespinasse	1 et 2	oui	
St-Michel-Loubéjou	1 à 3	oui	Ces points sont également liés à des problèmes d'infrastructures non pris en compte dans notre modélisation
	4	oui	Les problèmes sont plutôt liés à des difficultés d'évacuation. On prend le point dans l'hypothèse où nous serions ici dans des cas de ruissellement par forte production sur place et non-évacuation. Par contre, les phénomènes d'inondation par remontée de nappe sont peut-être possibles ici (à vérifier).
	5	non	Problème de calibrage de l'ouvrage et de concentration artificielle des flux = hydraulique urbaine.
St-Vincent-Du-Pendit	1	oui	Ce point serait lié à un débordement d'un petit vallon d'ordres 1 ou 2, donc de TRANSFERT, mais il y aurait aussi un problème de calibrage des ouvrages. À voir si l'affluent en question est calibré ou naturel ?

	2	non	Problème d'infrastructures (fossé bouché). Pas vraiment du ruissellement de versant (hydraulique urbaine).
	3	oui	Phénomène de ravinement dans un contexte libre de réseaux artificiels.
	a et b	non	Le point A est un glissement de terrain, donc phénomène différent. Le point B est très spécifique, car il est lié à un important travail du sol ponctuel. Nous ne retenons pas ces deux points qui ne sont pas du ruissellement ou bien liés à des pratiques "exceptionnelles". À signaler que le point A est dans une zone modélisée à forte production et forte accumulation ce qui va dans le sens par contre d'une infiltration possible
Bétaille			Pas de localisation. Nous retenons juste une sensibilité au niveau de centre-bourg mais qui doit être liée en partie à l'hydraulique urbaine non dimensionnée pour des épisodes exceptionnels (cinquantennal, centennal ?)
Saint-Céré	1	non	Il s'agit d'un phénomène de glissement-coulée, phénomène différent du ruissellement. Il est fort probable que le glissement ait affecté les marnes grises du Carixien sur des pentes >15°. Ce phénomène est bien connu dans ce type de matériaux avec une augmentation des pressions interstitielles dans les formations altérées de surface suite à des pluies intenses et/ou longues puis, avec la mise en mouvement des marnes altérées, une libération de l'eau interstitielle entraînant un abaissement des propriétés rhéologiques et l'atteinte de la limite de liquidité, donc la transformation du phénomène, en pied de glissement, en coulée de boue. Ce n'est pas du ruissellement. À noter que ce phénomène se situe dans une zone modélisée à forte susceptibilité de PRODUCTION et d'accumulation en pied de versant.
	2	non	Idem, il s'agit de glissements dans les formations superficielles. Ce type de phénomène impose une étude de stabilité (géotechnique et/ou géomorphologique). À noter que cette zone est modélisée en forte ACCUMULATION ce qui correspond bien au fonctionnement de ce type de glissement (saturation des formations meubles et baisse du facteur de sécurité).
	3	oui	
St-Denis-les-Martel	1	oui	À voir comment est alimentée la source de la Blanchie (exsurgence karstique ?).
	2	oui	Cette fontaine est surmontée sur le plateau par une doline et exsurgit au contact entre les calcaires bioclastiques de l'Aalénien inf. et moyen et les marnes noires du Toarcien inf. et moyen. À notre sens, "ça sent" le karst. De fait, les forts débits et débordements entraînant des ruissellements et ravinements en contrebas, ne peuvent être attribués directement aux phénomènes de ruissellement. C'est un ruissellement secondaire lié au débordement d'une source qui a tous les critères pour être karstique (mais à vérifier). Les ravinements en contrebas sont logiques car l'eau s'écoule sur les marnes et argiles noires du Toarcien, formation sensible à ce type de phénomène. On prend le point, mais c'est du ruissellement secondaire à très forte probabilité.
	3 et 4	oui	Même remarque pour la source de Sourtils que pour la source du Point 2 et du point 1.
Strenquels	1a, 1b et 2	oui	

[NB] Au regard des points retenus et notamment de l'exemple de la commune de Saint-Denis-les-Martel, nous émettons l'hypothèse de l'existence de phénomènes de ruissellement secondaires qui ne sont pas liés directement aux pluies incidentes, mais aux débordements des sources karstiques. Dans l'exemple de Saint-Denis-les-Martel, cette commune est configurée de telle manière qu'elle semble drainer pas mal d'exsurgences karstiques issus de réseaux situés sur les plateaux environnants. Les ruissellements canalisés dans les ravins y seraient mixtes, à la fois purs (production et transfert classique) mais aussi liés à des débordements causés par une suralimentation des sources karstiques à cause d'une mise en charge du système karstique. Ceci est à vérifier notamment par un suivi des débits de ces sources et une analyse par corrélation croisée avec les pluies incidentes pour quantifier l'éventuel "effet retard" de ce type de ruissellement lié à un temps de parcours et de résidence un peu plus long dans l'aquifère karstique. Nous sommes ici sur des modalités de ruissellement probablement biphasés et complexes.

2.3.2. L'enquête

Une enquête en ligne via Google Forms® a été créée et envoyée aux 1515 communes du bassin versant. Cette enquête comportait 5 questions, les 2 dernières étant facultatives :

- Q1 - "Nom de la commune" (textuel)
- Q2 - "Code INSEE" (textuel)
- Q3 - "Selon votre connaissance, votre commune a-t-elle été touchée par des phénomènes de ruissellement depuis les années 60 ?" (Oui-Non)
- Q4 - "Si oui, à quelle(s) date(s) ces événements se sont déroulés ? - lister les dates et indiquer pour chaque date s'il y a eu des dégâts. Exemple : 12/04/1998 = dégâts mineurs" (textuel)
- Q5 - " Dans la mesure du possible, préciser pour chaque date, les lieux des dégâts (lieu-dit, coordonnées géographiques). Exemple : 12/04/1998 = 2.35 ; 44.58 ou "centre bourg". Ces coordonnées peuvent se trouver avec Google Earth" (textuel)

Cette enquête a été créée le 31/01/2017 et envoyée début février. Les réponses s'étalent du 03/02/2017 au 28/02/2017, date de la clôture de l'enquête. Les réponses ont été toilettées (correction de certains code INSEE,

traitement des données textuelles pour les formater aux impératifs du SIG). Les liens entre le tableau de données et la donnée cartographique se sont fait *via* le n°INSEE des communes.

2.3.3. Les arrêtés CatNat

La liste des arrêtés de catastrophes naturelles est librement disponible. Nous avons utilisé la v5 de cette base (août 2016). Si cette base est intéressante, elle demeure néanmoins beaucoup moins fine que la BD-CatNat qui est payante, mais recense les événements avec une localisation métrique normalement et un descriptif technique du phénomène. La liste des arrêtés CatNat se limite à la commune (périmètre de l'arrêté) et il est délicat de savoir précisément la nature de l'aléa.

Pour cette étude, nous avons recensé par commune l'ensemble des arrêtés CatNat qui étaient classés sous le code 1140000 : "Inondation par ruissellement et coulée de boue". Si ce code semble bien correspondre à l'aléa étudié, nous savons d'expérience qu'il existe des mélanges, les coulées de boue n'étant pas toujours liées au ruissellement, mais à la liquéfaction des matériaux (donc plutôt du glissement de terrain) et vice-versa. De plus, les débordements des cours d'eau d'ordre 2 ou 3 peuvent être inclus dans la catégorie des inondations par débordement alors qu'il s'agit bien de ruissellement concentré de versant. La littérature scientifique et technique a d'ailleurs consacré quelques lignes aux problèmes et limitations posés par cette donnée (Douvinet et al., 2008). À défaut de la BD-CatNat, nous nous sommes donc contentés des arrêtés CatNat en ayant conscience des précautions d'usage à prendre lors des interprétations.

Pour chaque commune, nous avons donc totalisé le nombre d'arrêtés CatNat relatif à l'aléa 1140000 et relié cette donnée au SIG *via* le n°INSEE.

Partie 3. Modélisations du ruissellement : choix des périodes de modélisation

3.1. Les données météorologiques à l'échelle globale : logiques spatiales

Cette partie présente les résultats principaux issus du traitement des 137 cartes d'événements pluvieux enregistrés sur le bassin versant du 1^{er} janvier 1958 au 31 décembre 2014, soit 57 ans.

La concaténation des épisodes extrêmes sur 24h de 1958 à 2014 nous a permis de quantifier et spatialiser les récurrences de ces événements à fortes précipitations. En première analyse, les récurrences fortes sont concentrées sur l'est du BV, dans les secteurs "montagnards", avec des moyennes annuelles théoriques de précipitation dues à ces épisodes qui dépassent les 60mm (Figure 16). L'escarpement de Brive marque une limite nette entre ces secteurs montagnards et les bas plateaux occidentaux.

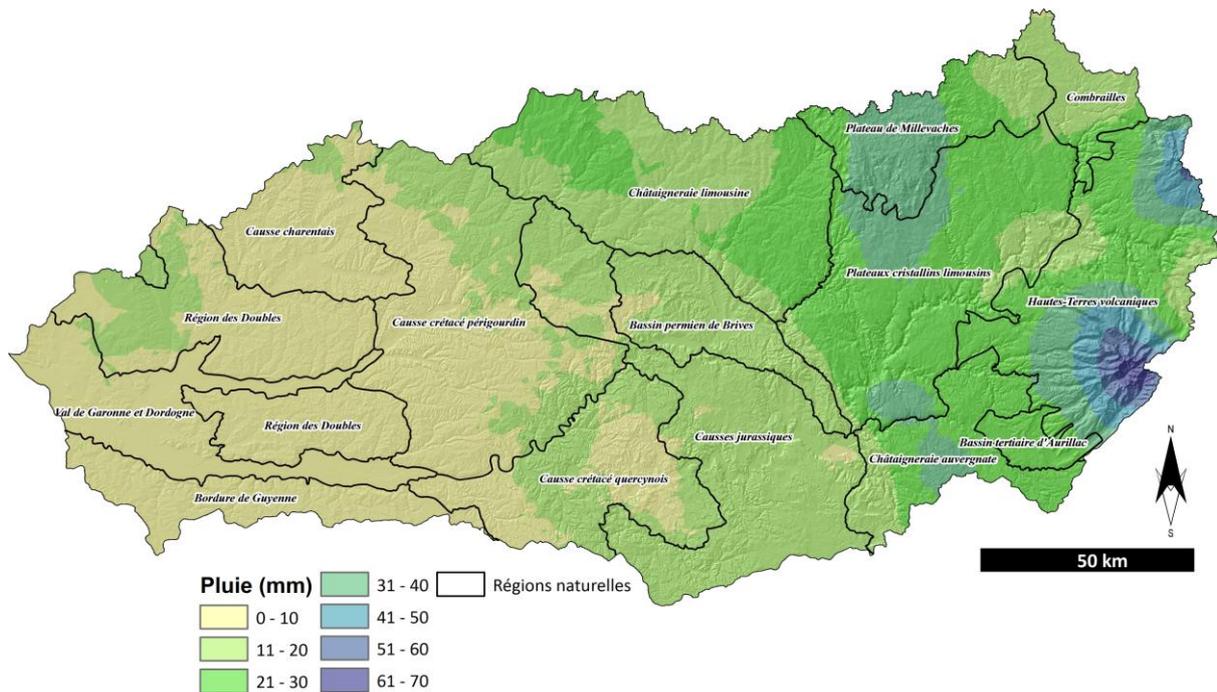


Figure 16 - Total des précipitations moyennes annuelles dues à des épisodes extrêmes.

À l'inverse, le coefficient de variation présente le négatif des précipitations extrêmes moyennes avec les zones aval du BV qui présentent des coefficients supérieurs à 250%, signe d'une très grande variabilité des événements extrêmes et surtout, une plus faible prévisibilité (Figure 17). Les zones à fort coefficient de variation témoignent de la possibilité d'événements très pluvieux mais à faible récurrence, probablement stochastiques. Ces événements touchent les zones avec des TOS à forte susceptibilité au ruissellement.

Les précipitations maximales mesurées lors des 57 dernières années (Figure 18) montrent par contre des bandes "sèches" notamment dans les causses charentais avec des TOS à forte susceptibilité au ruissellement mais certains maxima élevés dans la région des coteaux viticoles de l'Entre-deux-Mers et de la Guyenne, notamment le Bergeracois. Le massif de Millevaches ainsi que les massifs du Sancy et du Cantal – là où les TOS sont les moins ruisselants – concentrent les maxima les plus élevés.

Les événements >50mm/24h (Figure 19) sont assez ubiquistes sur le BV, avec cependant des fréquences importantes sur le secteur montagnard (quasiment annuelles) et la région des avants-causses et des causses (fréquence de 10 ans) ainsi que sur les marges charentaises et girondines. On observe un pôle de très faible fréquence sur la région des Doubles, qui correspond d'ailleurs au pôle de faibles maxima. Les événements >80mm/24h (Figure 20), sont beaucoup moins ubiquistes et sont plus rares sur la partie ouest du bassin versant où il est plus délicat de cerner les logiques spatiales (caractère semi-stochastique des événements). À noter que certaines zones occidentales du bassin versant sont historiquement exemptes d'événements de ce type sur la période 1958 à 2014. Les récurrences sont conservées sur les pôles d'altitude que constituent les Plateaux limousins et leurs bordures qui font écran aux arrivées océaniques et les massifs volcaniques du Sancy et du Cantal. Pour ce qui est du Cantal, il est fort probable qu'il soit soumis à la fois aux arrivées océaniques mais aussi aux marges des épisodes méditerranéens. Les

événements >120mm (Figure 21) sont beaucoup plus rares et les récurrences sont localisées sur le Cantal et le Sancy. En dehors de ces deux pôles encore structurés, les logiques spatiales semblent plus aléatoires.

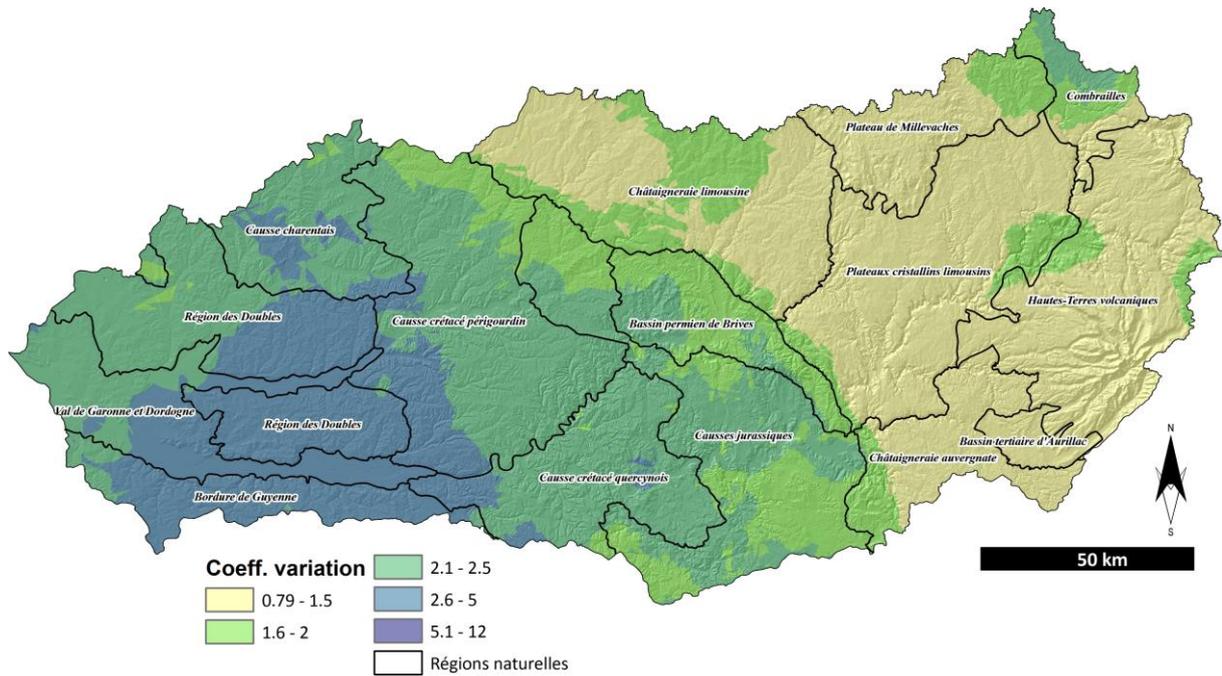


Figure 17 - Coefficient de variation des pluies apportées par les événements pluvieux extrêmes.

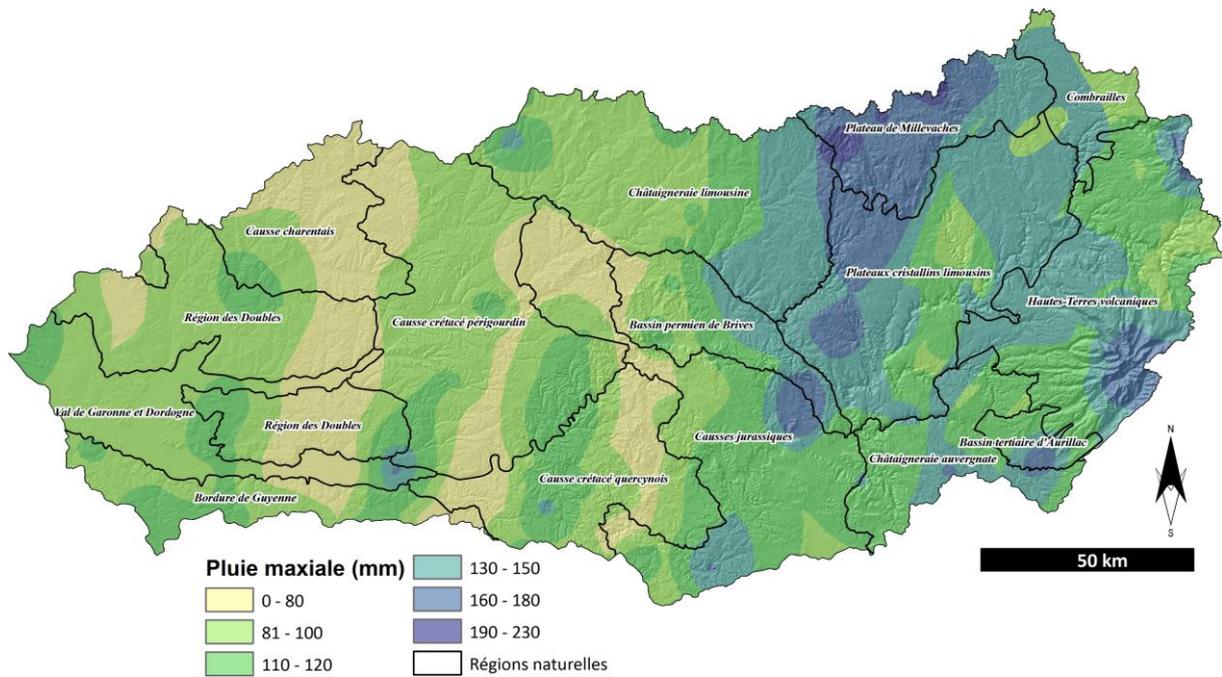


Figure 18 - Carte des maxima de précipitations liées à des événements extrêmes de 1958 à 2014. Cette carte peut être considérée comme l'aléa pluvieux historique dans le sens des PPR.

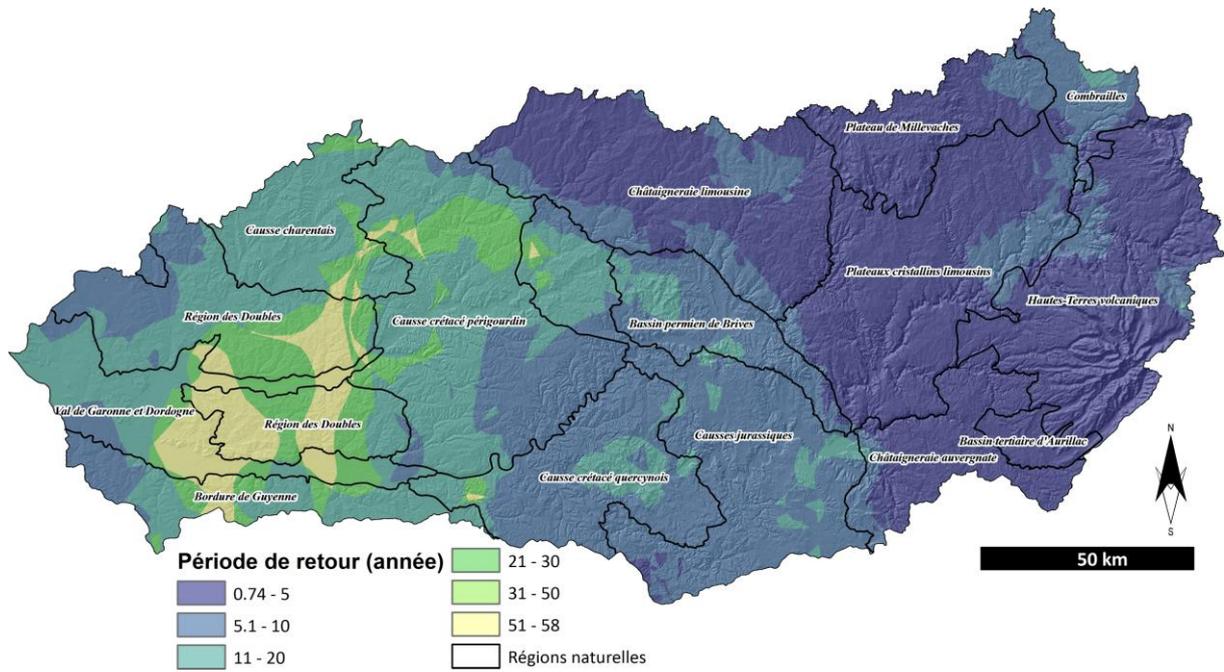


Figure 19 - Carte des temps de retour fréquentiel pour des événements >50mm/24h sur la période 1958-2014.

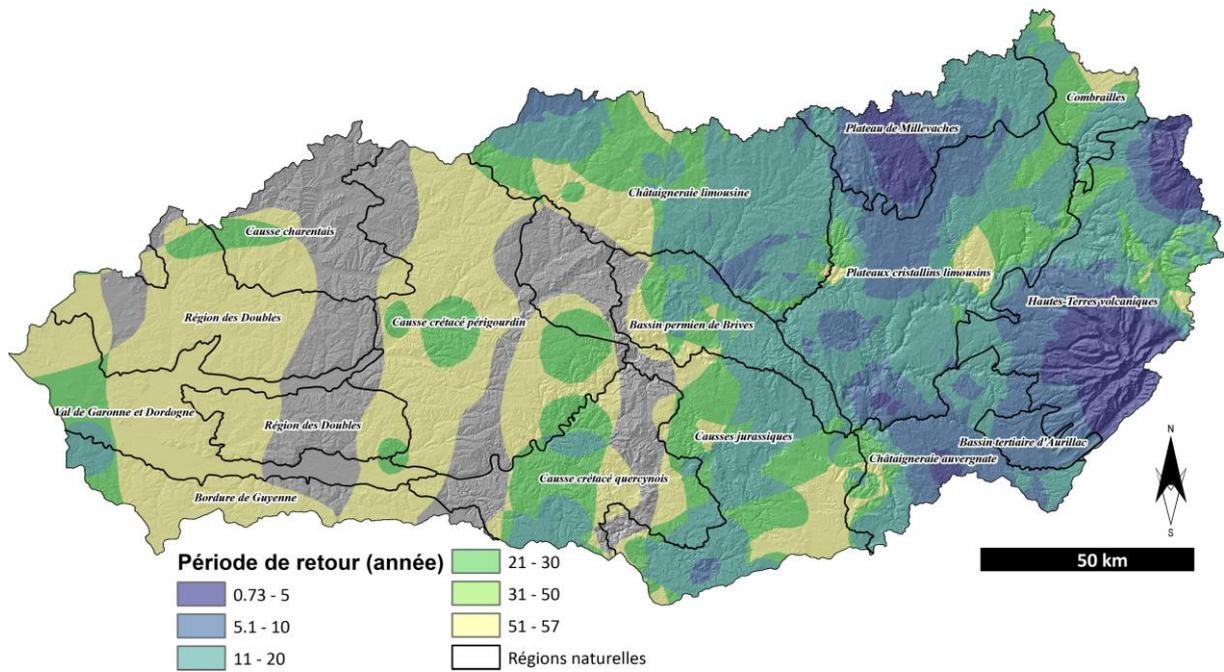


Figure 20 - Carte des temps de retour fréquentiel pour des événements >80mm/24h sur la période 1958-2014.

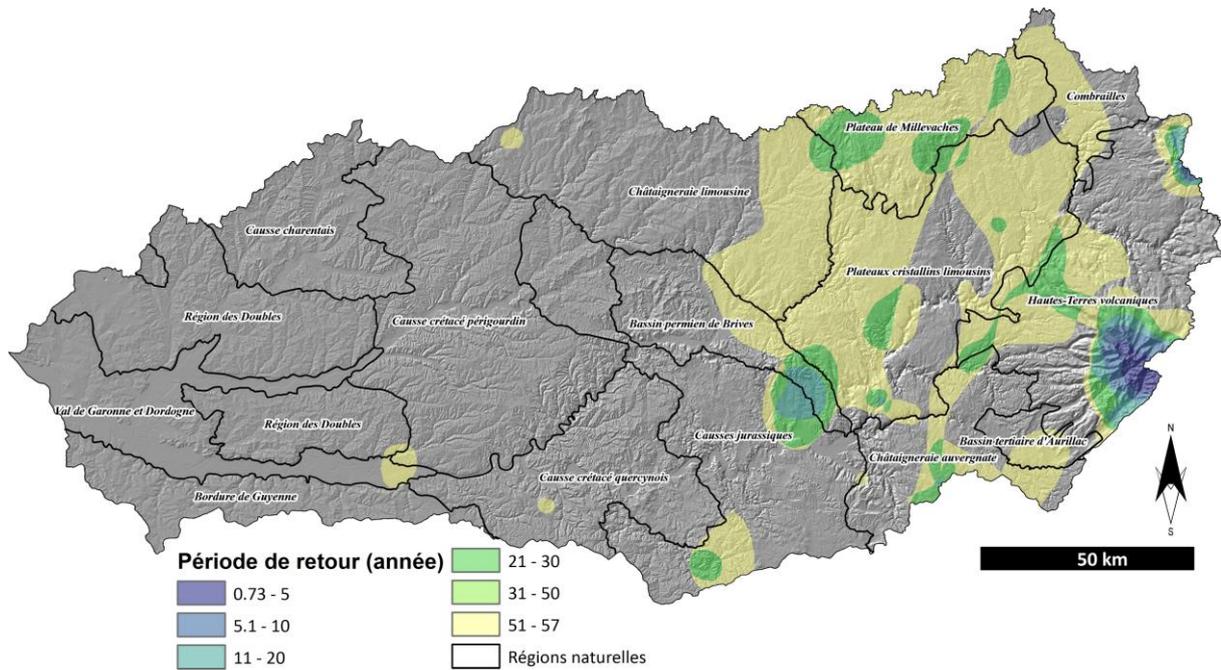


Figure 21 - Carte des temps de retour fréquentiel pour des événements >120mm/24h sur la période 1958-2014.

De manière globale, à l'échelle du bassin versant, nous retenons qu'il existe :

- Un secteur "montagnard", à TOS peu susceptibles au ruissellement et à forts apports pluvieux par des événements extrêmes, récurrents. Cette partie est "prévisible" d'un point de vue météorologique et les TOS sont peu sujets aux variations intra-annuelles (peu de cultures annuelles).
- Un secteur à l'ouest de l'escarpement de Brive dont les TOS sont plus susceptibles au ruissellement, avec des couvertures variant annuellement, et touché par des événements pluvieux très irréguliers, peu récurrents mais potentiellement violents.

3.2. Les données météorologiques à l'échelle mensuelle : logiques temporelles

L'échelle mensuelle est importante car une bonne partie du BV est couverte par des TOS de cultures annuelles (Figure 22) ayant un pouvoir couvrant très variable au cours de l'année, allant du sol nu à une couverture quasiment complète. De fait, la sensibilité potentielle de ces TOS est forcément liée à l'occurrence mensuelle de certains événements météorologiques.

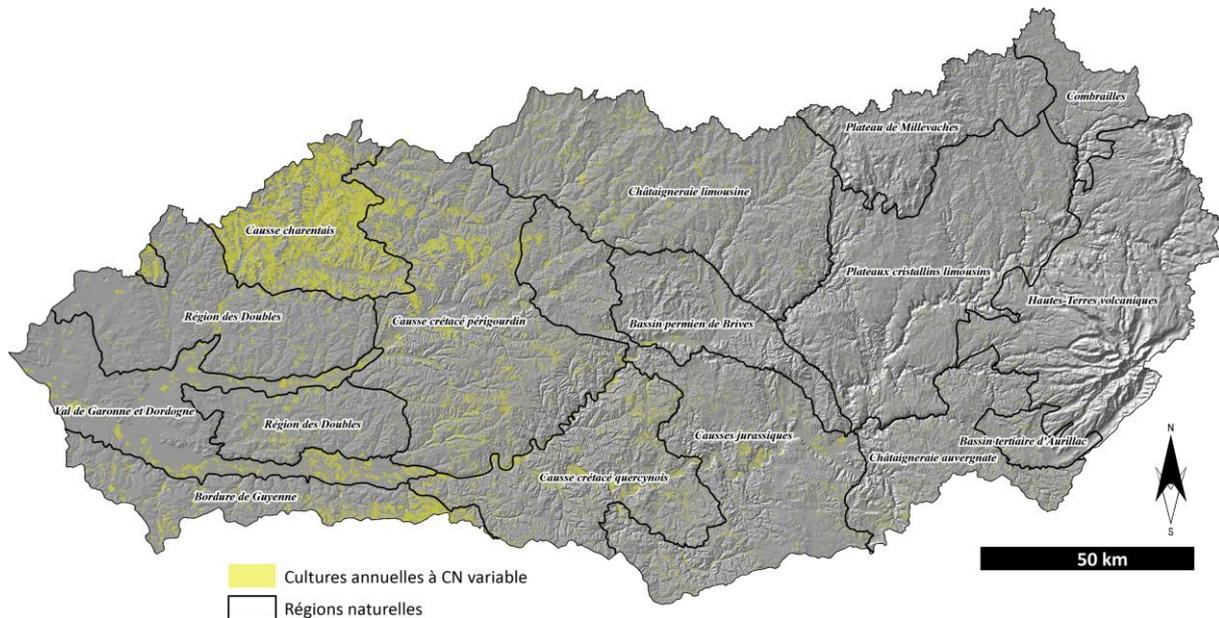


Figure 22 - Répartition des TOS de cultures annuelles. Ces TOS comprennent, le maïs, le tournesol, le blé, le soja, le colza et les autres cultures industrielles. Ces TOS sont essentiellement répartis sur la partie ouest du BV et le long des grandes vallées.

La **Figure 23** présente les principaux indicateurs à l'échelle mensuelle sur la période d'observation (1958 à 2014). L'année hydrologique peut être décomposée en 2 saisons majeures pour les pluies extrêmes.

De novembre à mars, les pluies extrêmes sont concentrées essentiellement sur la zone "montagnarde" avec une relative stabilité des pôles pluvieux en termes de fréquence et de niveaux de précipitations. Les précipitations sont corrélées à la fréquence, ce qui donne une certaine prédictibilité des événements. On observe quelques rares débordements des fréquences sur la partie nord du bassin versant, depuis la Châtaigneraie limousine jusqu'aux confins des causses mais l'essentiel des événements reste structuré autour des pôles d'altitude (Plateaux limousins, Sancy, Cantal). Cette période de fortes pluies potentielles avec de fortes récurrences affectent des TOS essentiellement forestiers et prairiaux.

De mai à septembre, les structures des pluies deviennent plus hétérogènes avec d'importants débordements sur les régions des causses et des événements maximaux qui se répartissent de manière plus aléatoire sur le bassin versant (juin à août). Les structures des temps de retour pour les événements >50mm/24h deviennent moins lisibles et plus diffuses dans le secteur "montagnard". Les zones des causses et des marges girondines sont elles aussi affectées par des événements ponctuels, rares mais pouvant être violents (ex. des mois de mai, août et septembre). Nous qualifions cette période de "stochastique" du fait que les événements sont moins prévisibles à la fois sur la quantité des précipitations (ex. des écarts entre pluies max et pluies moyennes) mais aussi sur leur localisation (diffusion spatiale des temps de retour et des fréquences). Ces événements affectent aussi bien la zone "montagnarde" à TOS moins susceptibles au ruissellement, que la zone de plaine et de causses à TOS plus susceptibles au ruissellement, et ce, dans une période où certaines cultures passent en labours (sol nu).

Le mois d'octobre assure une transition entre ces deux périodes majeures. On y retrouve la structuration fréquentielle autour des pôles montagnards, mais également une certaine récurrence d'événements extrêmes sur les parties médiane et aval du bassin versant, avec notamment des maxima enregistrés sur les zones de transition entre montagnes et causses. Les Causse charentais, potentiellement en sol nu en octobre, semblent peu affectés par les événements extrêmes de ce mois.

Enfin, sur la période d'observation 1958-2014, le mois d'avril totalise très peu d'événements, essentiellement concentrés sur les pôles montagnards, et assure une transition avec la période hydrologique estivale.

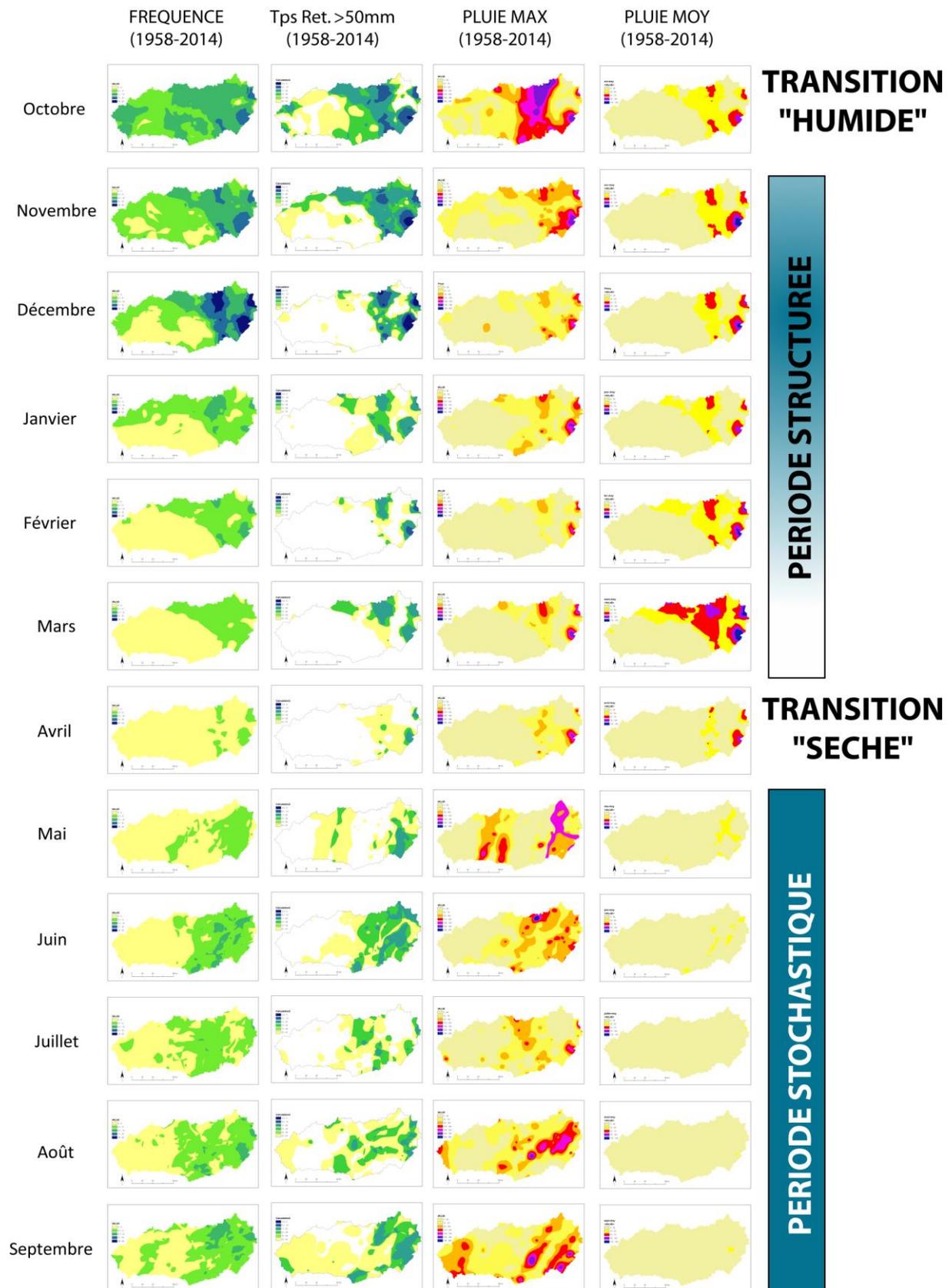


Figure 23 - Structure des pluies extrêmes à l'échelle mensuelle sur le BV (période de 1958 à 2014).

Cette analyse mensuelle des précipitations extrêmes a permis de dégager des périodes remarquables que nous pouvons ensuite mettre en relation avec les cycles culturaux des principales cultures rencontrées sur le bassin versant de la Dordogne (Figure 24).

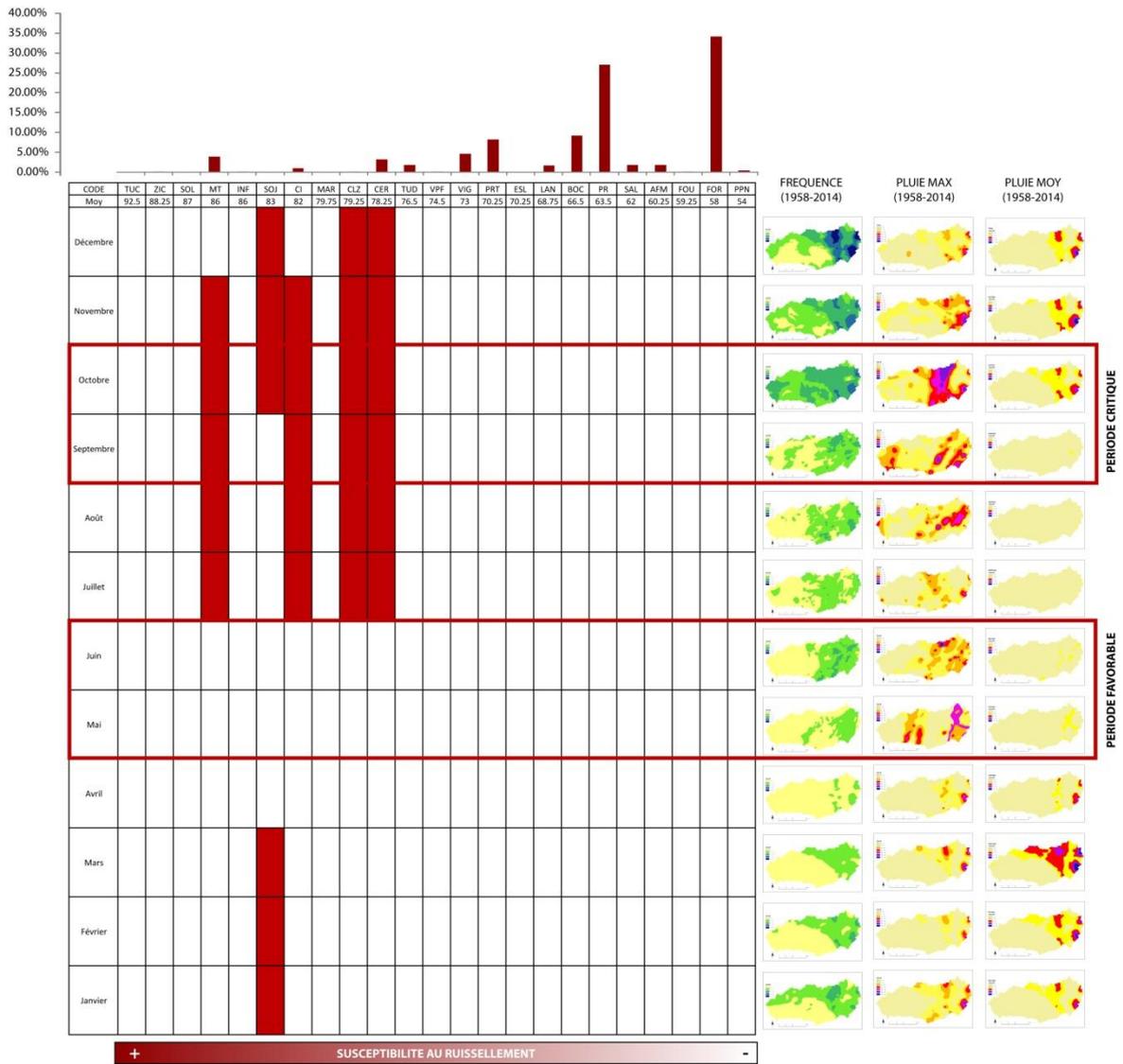


Figure 24 - Relation entre les périodes de mise à nu du sol de certains types de culture et les structures mensuelles des événements pluvieux extrêmes. Source des cycles culturaux : AGRESTE.

Par rapport aux périodes "sensibles" des principaux types de cultures majoritaires sur le BV (maïs, tournesol, céréales et autres cultures industrielles), la transition été/automne semble être une période critique. En effet, le mois de septembre présente une certaine récurrence d'événements répartis sur les zones occupées par ces cultures (ouest du bassin versant), avec des précipitations potentielles importantes (caractère stochastique) tandis que le mois d'octobre présente des récurrences d'événements extrêmes sur tout le bassin versant avec des cumuls potentiels très importants, notamment sur les régions caussenardes. La plupart des cultures sont récoltées et les champs labourés ou à peine semés. De fait, lors de cette période, les sols sont quasiment à nu et particulièrement ruisselants.

La période du printemps (mai/juin) est également intéressante pour deux raisons. La première est que l'ensemble des cultures est "couvrant" ce qui permet de créer un modèle "favorable" et ce, dans un contexte météorologique de mise en place des événements stochastiques. La seconde est qu'EPIDOR possède une étude et des données sur deux épisodes de ruissellement intense sur ces périodes, ce qui permettra de tester le modèle avec des données de dommages.

3.3. Conclusions sur la donnée météorologique

Cette analyse nous amène à retenir deux périodes de modélisation qui couvrent les extrêmes en termes de sensibilité :

- La transition été/automne avec des événements pouvant subvenir partout sur le BV et pouvant accumuler d'importantes lames de pluies. Les cultures sont pour la plupart exploitées et les sols sont quasiment nus et très ruisselants. Cette première, conjonction entre des événements pluvieux potentiels majeurs et ubiquistes et des surfaces de culture mises à nu, constitue l'aléa de référence maximal sur le BV.
- La période printanière fournie au contraire l'aléa de référence minimal, à savoir que certains événements pluvieux ponctuels et intenses peuvent subvenir sur les zones de montagne ou de plaine, mais les TOS de cultures sont dans des périodes moins sensibles.

De fait, pour la carte de TOS qui est une des bases majeures de la modélisation avec la carte des sols, nous retenons 2 cas : un cas avec des TOS dont les CN par type de sol sont fixes toute l'année et un cas avec les TOS correspondant aux cultures annuelles dont les CN par classe de sol sont variables. Pour ce dernier cas, nous retiendrons donc une série de CN propre à la transition été/automne (après récolte), et une période plus couvrante, au printemps, où les cultures sont censées être levées.

Partie 4. Modélisations du ruissellement : la méthode SCS-CN

[SCS-CN est une méthode déterministe et distribuée qui affecte des courbes de comportement hydraulique (CN) à chaque pixel en fonction du type de sol et de l'occupation du sol. Pour chaque CN, on peut ainsi évaluer le % de ruissellement en fonction de la lame d'eau incidente. Ces valeurs de CN sont formalisées dans l'ouvrage TR55 (**United States Department of Agriculture, 1986**). La démarche de classement des types d'occupation du sol et des types de sol en fonction des grilles formalisées dans le TR55 ont été présentés dans la partie 2 et en annexe 1.]

4.1. SCS-CN : la calibration des données

4.1.1. Adaptation des données d'occupation du sol (TOS)

Relativement à l'étude climatologique (partie 3), nous avons défini deux types de comportement dans l'année hydrologique : les TOS stables (ex. de la forêt) et les TOS variables (ex. des cultures annuelles). Pour les TOS stables, nous nous sommes directement reportés aux valeurs de CN du TR55. Pour les TOS variables, nous avons réalisé des reclassements.

Pour la période de transition été/automne (Septembre/Octobre), toutes ces cultures sont récoltées et les champs, théoriquement labourés (hormis pour le soja). De fait, à cette période, toutes ces cultures se rattachent à la catégorie "*Crop residue cover*", très ruisselante. Il existe deux sous-catégories à pratiques infiltrantes ou ruisselantes. Ne pouvant déterminer pour chaque parcelle le type de pratique à l'échelle du bassin versant de la Dordogne, nous avons donc fait la moyenne de chaque valeur de CN pour chaque classe de sol. Le soja sera par contre couvrant mais en alignement ce qui lui vaut son rattachement à la catégorie "*Row crops, Straight row*" qui est moins ruisselante. De la même manière, il existe des valeurs de CN pour des pratiques ruisselantes ou infiltrantes dont nous avons fait la moyenne. Les valeurs retenues sont fournies dans le **Tableau 7**. À noter que les écarts type sont très faibles car les valeurs de CN entre pratiques infiltrantes et ruisselantes demeurent très proches.

Tableau 7 - Valeurs de CN pour les cultures pour la période de transition été/automne

Type	ORIGINE	CODE	Curve numbers for hydrologic soil group				Moy	Et
			A	B	C	D		
Maïs, Tournesol	RPG 2012	MT	75±1	84±1	89±1	92±1.5	85.0	6.4
Autres oléagineux (soja)	RPG 2012	SOJ	70±2.5	80±1.5	87±1.5	90±1	81.8	7.7
Autres cultures industrielles	RPG 2012	CI	75±1	84±1	89±1	92±1.5	85.0	6.4
Autres céréales, Blé tendre, orge	RPG 2012	CER	75±1	84±1	89±1	92±1.5	85.0	6.4
Colza, légumineuses à grains, protéagineux	RPG 2012	CLZ	75±1	84±1	89±1	92±1.5	85.0	6.4

Pour la période printanière (Mai/Juin), l'ensemble de ces cultures devrait être couvrant. Les cultures de maïs, tournesol, soja et les autres cultures industrielles sont rangées dans la catégorie des "*Row crops, Straight row*". Les céréales (principalement du blé) ont une catégorie spécifique dans le TR-55 avec "*Small grains, straight row*", tandis que le colza est classé avec les "*Close-seeded or broadcast legumes or rotation meadow*" plus couvrantes en alignement (*straight row*). Pour toutes ces cultures, nous avons fait la moyenne entre les CN de pratiques ruisselantes et infiltrantes pour les mêmes raisons que celles évoquées précédemment. Les résultats apparaissent dans le **Tableau 8**.

Tableau 8 - Valeurs de CN pour les cultures pour la période printanière

Type	ORIGINE	CODE	Curve numbers for hydrologic soil group				Moy	Et
			A	B	C	D		
Maïs, Tournesol	RPG 2012	MT	70±2.5	80±1.5	87±1.5	90±1	81.8	7.7
Autres oléagineux (soja)	RPG 2012	SOJ	70±2.5	80±1.5	87±1.5	90±1	81.8	7.7
Autres cultures industrielles	RPG 2012	CI	70±2.5	80±1.5	87±1.5	90±1	81.8	7.7
Autres céréales, Blé tendre, orge	RPG 2012	CER	64±1	76±1	84±1	88±0.5	78.0	9.2
Colza, légumineuses à grains, protéagineux	RPG 2012	CLZ	62±4	75±3	83±2	87±2	76.8	9.5

Le CN des zones humides n'existe pas dans le TR-55 et il est plus délicat à déterminer car il est grandement dépendant de la structure du sol. En effet, le classement en 4 classes de sol de la méthode SCS-CN ne prend pas en compte la spécificité des sols organiques humides qui sont souvent des Histosols (Menberu et al., 2015). Or, ce type de sol est complexe au regard du ruissellement comme l'a montré Boelter (1968) qui expose les différences de conductivité hydraulique importante entre les histosols "fibriques" (peu décomposés) à forte conductivité et les histosols sapriques (bien décomposés) à plus faibles conductivité. Bay (1969), à partir de son expérience sur des bassins versants tourbeux et boisés dans le Minnesota, a observé l'effet "tampon" significatif des zones humides pour les orages en période de non-saturation, mais constate que ces zones n'affectent pas les lames ruisselées dès lors que les épisodes pluvieux sont plus longs (état de saturation). À l'inverse, Holden et Burt (2003), en Angleterre,

observent d'importants coefficients de ruissellement dans l'acrotelm lors d'épisodes orageux à forts niveaux de précipitations instantanées. Cette étude, ainsi qu'une autre étude précédente (Holden and Burt, 2002), ont démontré que l'essentiel du ruissellement des épisodes pluvieux intenses dans ces sols tourbeux à para-tourbeux était lié à la saturation préliminaire de ces sols : "[...] *quickflow response of upland blanket peat catchments is a result of saturation-excess overland flow generation*". Malgré l'apparente contradiction de ces deux équipes, les résultats convergent cependant sur l'important potentiel de ruissellement de ces sols dès lors qu'ils sont saturés en surface (acrotelm). De fait, la capacité de ruissellement de ces zones sera fortement dépendante du niveau piézométrique par rapport au sol lors de l'événement pluvieux. Dans le cas d'un haut niveau piézométrique, ces zones se comportent alors quasiment comme des plans d'eau, à la rugosité de surface près. De même, dans le cas d'histosol saprique, la baisse du niveau piézométrique n'entraînera pas une baisse du taux de saturation immédiat ou synchrone, mais décalée dans le temps. Ce type de sol conservera alors une capacité de ruissellement importante en surface, tandis que les histosols fibriques alimenteront plus facilement la nappe ou le ruissellement hypodermique au sein de la masse tourbeuse. Menberu et al. (2015) propose des valeurs de CN pour ces sols basées sur des suivis hydrologiques de 59 événements hydrométéorologiques répartis de 2010 à 2013 dans deux bassins versants mixtes à histosol de couverture et allant de 20 à plus de 75mm de pluie. Relativement aux propriétés hydrologiques de ces sols, les auteurs intègrent une correction des valeurs de CN liée à la hauteur de nappe. Nous nous sommes basés sur leurs valeurs. Finalement, nous avons retenu les valeurs de CN suivantes qui mixent les valeurs originelles et des valeurs rajoutées et/ou modifiées en fonction de la littérature (Tableau 9).

Tableau 9 - Valeurs de CN retenues pour les modélisations. TOU, tourbière ; PPN, pelouse et pâturage naturels ; FOR, forêt ; FOU, fourrage ; AFM, espaces mixtes agricole et forestier ; SAL, saltus ; ESL, équipements de loisirs de plein air ; PR, prairie permanente ; LAN, landes ; BOC, bocage ; PRT, prairie temporaire ; VPF, vergers ; VIG, vigne ; TUD, tissu urbain discontinu ; MAR, maraîchage ; SOJ, culture de soja ; CER, culture de céréales ; CI, cultures industrielles ; CLZ, culture de colza ; MT, culture de maïs ou tournesol ; INF, infrastructure ; SOL, sol nu ; ZIC, zone industrielle et commerciale ; TUC, tissu urbain continu ; EAU, surface d'eau libre.

T.O.S.	TYPE DE SOL							
	FIN D'ÉTÉ/AUTOMNE				PRINTEMPS			
	A	B	C	D	A	B	C	D
AFM	32	58	72	79	32	58	72	79
BOC	43	65	76	82	43	65	76	82
CER	75	84	89	92	64	76	84	88
CI	75	84	89	92	70	80	87	90
CLZ	75	84	89	92	62	75	83	87
EAU	100	100	100	100	100	100	100	100
ESL	39	61	74	80	39	61	74	80
FOR	30	55	70	77	30	55	70	77
FOU	30	58	71	78	30	58	71	78
INF	77	85	90	92	77	85	90	92
LAN	42	62	74	80	42	62	74	80
MAR	67	78	85	89	67	78	85	89
MT	75	84	89	92	70	80	87	90
PPN	30	48	65	73	30	48	65	73
PR	39	61	74	80	39	61	74	80
PRT	49	69	79	84	49	69	79	84
SAL	36	60	73	79	36	60	73	79
SOJ	70	80	87	90	70	80	87	90
SOL	77	86	91	94	77	86	91	94
TOU	34	36	40	46	74	75	78	82
TUC	89	92	94	95	89	92	94	95
TUD	61	75	83	87	61	75	83	87
VIG	62	71	78	81	62	71	78	81
VPF	50	69	79	84	50	69	79	84
ZIC	81	88	91	93	81	88	91	93

4.1.2. Adaptation des données pédologiques

4.1.2.1. Considérations techniques générales

La méthodologie SCS du *Soil Conservation Service* (Musgrave, 1955 ; SCS, 1958 ; Ogrosky et al., 1964 ; SCS, 1972 ; Rawls et al., 1993) requiert de classer les sols en quatre groupes hydrologiques (GHS) A, B, C et D – caractéristiques

respectivement de vitesses limites d'infiltration des plus élevées aux plus faibles – en fonction de leur taux d'infiltration minimum. Ces 4 GHS sont un des paramètres utilisés pour déterminer les numéros de courbes de ruissellement.

Le taux d'infiltration est la vitesse à laquelle l'eau pénètre dans le sol à la surface du sol. Les taux d'infiltration des sols varient considérablement et sont affectés par la perméabilité subsurfacique (donc la vitesse de transmission, *i.e.* la vitesse à laquelle l'eau se déplace dans le sol), ainsi que les taux d'absorption de surface, la structure du sol...

Les plages numériques approximatives des taux de transmission indiqués dans les définitions des GHS ont d'abord été publiées par Musgrave (1955). Le taux d'infiltration est obtenu pour le sol nu, non gelé, après mouillage prolongé et avec des boursouffures maximales des argiles gonflantes, ce qui est particulièrement important pour les sols argileux, où les fentes de dessiccation peuvent largement en fausser la mesure.

La pente des sols – tout comme la couverture végétale – n'est pas prise en compte lors de la classification des sols, mais l'est dans la méthodologie globale du SCS. Toutefois, comme le taux d'infiltration des sols n'est que rarement connu, et que ce taux est contrôlé par le profil du sol, les affectations des différentes classes d'infiltrabilité des sols sont fréquemment réalisées sur la base de la comparaison des caractéristiques des sols à classifier avec des profils de sols déjà placés dans des GHS, appelé la description amplifiée (SCS, 1958 ; Ogrosky et al., 1964 ; SCS, 1972 ; Chisholm et al., 1984 ; Rawls et al., 1993). Ce rattachement est basé sur la supposition que les sols trouvés dans une région climatique et qui sont semblables en profondeur (via une couche restrictive ou une table d'eau), en vitesse de transmission hydrique, en texture, en structure et en degré de gonflement lorsqu'ils sont saturés, auront des réponses de ruissellement similaires (National Engineering Handbook, 2007). Si ce principe de rattachement est pratique, il n'en demeure pas moins simplificateur de la diversité des profils rassemblés sous un même nom ou sous quelques caractéristiques communes : la présence d'un plancher qui n'induit pas forcément un battement de nappe important, l'horizonation en elle-même avec des différences de perméabilité notables, les caractéristiques physico-chimiques de l'horizon de surface comme les teneurs en carbonate de calcium, en matière organique, sa pierrosité de surface (pas forcément similaire à la pierrosité de l'horizon lui-même), sa compacité, la présence d'une croûte de battance, l'observation de stagnation de surface, l'analyse hydrologique du profil, la structure plus ou moins perméable des différents horizons... De multiples paramètres jouent donc sur le taux d'infiltration, alors que la méthode SCS ne tient compte que d'un nombre restreint de paramètres hydrodynamiques du sol (Demarcin et al., 2011).

Pour aller + loin

LE TRIANGLE GHS ET LES CLASSES DE SOLS SCS

Ce triangle correspond à la définition des 4 groupes de sol hydrologiques GHS et de leur description amplifiée et permet de rapidement définir la perméabilité de base selon leur texture (Figure 25) :

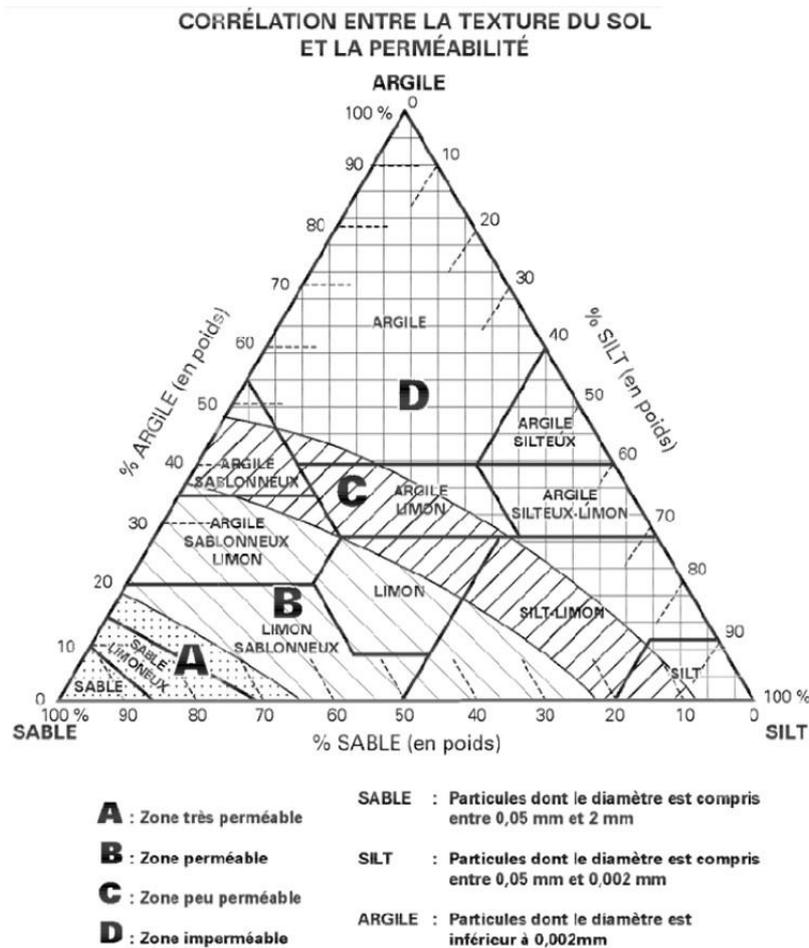


Figure 25. Triangle de corrélation entre la texture du sol et la perméabilité (MDDEP, 2009)

GROUPE A

Les sols de ce groupe ont un potentiel de ruissellement faible, un haut taux d'infiltration et de transfert (supérieure à 0,30 pouce/h) lorsqu'ils sont complètement mouillés. Ils consistent principalement en des sols profonds sableux ou graveleux, bien à excessivement drainés. L'eau est transmise librement à travers le sol. Les sols du Groupe A ont généralement moins de 10% d'argile et de plus de 90% de sable ou de gravier et ont une texture sableuse ou graveleuse. Certains sols ayant une texture sablo-limoneuse, limono-sableuse, limoneuse ou limoneuse fine peuvent être placés dans ce groupe s'ils sont bien agrégés, de faible densité apparente, ou contiennent plus de 35% de fragments de roche. Les limites sur les caractéristiques physiques de diagnostic du groupe A sont les suivantes. La conductivité hydraulique à saturation de tous les horizons du sol est supérieure à 40,0 $\mu\text{m/s}$. La profondeur à tout horizon imperméable à l'eau est supérieure à 50 cm. La profondeur de la nappe d'eau est supérieure à 60 cm. Les sols dont l'horizon imperméable est plus profond que 100 cm sont dans le groupe A, si la conductivité hydraulique à saturation de tous les horizons à moins de 100 cm de profondeur est supérieure à 10 $\mu\text{m/s}$. => **Sols sableux contenant une faible fraction de limon et d'argile (moins de 15%) et les loess profonds (de 75 à 150 cm) à vitesse d'infiltration de base élevée (de 7,5 à 12 mm/h) et à drainage excellent à bon.**

GROUPE B

Les sols de ce groupe ont un potentiel de ruissellement modéré faible, avec un taux d'infiltration et de transfert (0,15-0,30 pouce/h) modéré lorsqu'ils sont complètement mouillés. Ils consistent principalement en des sols profonds à moyennement profonds, bien à moyennement drainés, avec des textures moyennement grossières à fines. Les transferts de l'eau dans le sol ne sont pas gênés. Les sols du Groupe B ont généralement entre 10 et 20% d'argile et entre 50 et 90% de sable et ont une texture sablo-limoneuse à limono-sableuse. Certains sols ayant une texture limoneuse, limoneuse fine ou limono-argilo-sableuse peuvent être placés dans ce groupe s'ils sont bien agrégés, de faible densité apparente, ou contiennent plus de 35% de fragments de roche. Les limites sur les caractéristiques physiques de diagnostic du groupe B sont les suivantes. La conductivité hydraulique à saturation de l'horizon le moins perméable entre la surface et 50 cm de profondeur varie entre 10,0 et 40,0 $\mu\text{m/s}$. La profondeur des horizons imperméables est supérieure à 50 cm de

profondeur. La profondeur de la nappe d'eau est supérieure à 60 cm de profondeur. Les sols dont l'horizon imperméable ou la nappe sont plus profonds que 100 cm sont dans le groupe B, si la conductivité hydraulique à saturation de tous les horizons à moins de 100 cm de profondeur est supérieure à 4,0 $\mu\text{m/s}$ mais est inférieure à 10,0 $\mu\text{m/s}$. => **Sols sablo-limoneux et les loess moins profonds (de 50 à 125 cm) de texture moyennement grossière à moyennement fine (donc moins bien structurés que le groupe A), à vitesse d'infiltration de base modérée (de 4 à 7,5 mm/h) et bien à moyennement bien drainés.**

GROUPE C

Les sols de ce groupe ont un potentiel de ruissellement modéré élevé, avec un taux d'infiltration et de transfert (0.05-0.15 pouce/h) faible lorsqu'ils sont complètement mouillés. Ils consistent principalement en des sols avec un horizon qui bloque les transferts verticaux hydriques, avec des textures fines à modérément fines. Les transferts d'eau à travers le sol sont quelque peu limités. Les sols du Groupe C ont généralement entre 20 et 40% d'argile et moins de 50% de sable et ont une texture limoneuse, limoneuse fine, limono-sablo-argileuse, limono-argileuse ou limono-argileuse fine. Certains sols ayant une texture argileuse, argilo-limoneuse ou argilo-sableuse peuvent être placés dans ce groupe s'ils sont bien agrégés, de faible densité apparente, ou contiennent plus de 35% de fragments de roche. Les limites sur les caractéristiques physiques de diagnostic du groupe C sont les suivantes. La conductivité hydraulique à saturation de l'horizon le moins perméable entre la surface et 50 cm de profondeur est comprise entre 1,0 et 10 $\mu\text{m/s}$. La profondeur des horizons imperméables est supérieure à 50 cm. La profondeur de la nappe d'eau est supérieure à 60 cm. Les sols dont l'horizon imperméable ou la nappe sont plus profonds que 100 cm sont dans le groupe C, si la conductivité hydraulique à saturation de tous les horizons à moins de 100 centimètres de profondeur est supérieure à 0,40 $\mu\text{m/s}$ mais inférieure à 4,0 $\mu\text{m/s}$. => **Sols sablo-limoneux superficiels (de 15 à 75 cm) ainsi que les limons argileux, à faible teneur en matières organiques et à haute teneur en argiles et colloïdes, de texture moyennement fine à fine. Ils contiennent souvent une couche imperméable à faible profondeur. La vitesse d'infiltration de base est relativement faible (de 1 à 4 mm/h) et le drainage modéré.**

GROUPE D

Les sols de ce groupe ont un potentiel de ruissellement élevé avec un taux d'infiltration et de transfert (0-0.05 pouce/h) très faible lorsqu'ils sont complètement mouillés. Ils consistent principalement en des sols argileux avec un potentiel de gonflement élevé, en des sols avec une nappe permanente peu profonde, en des sols avec des horizons très argileux peu profonds à des sols peu profonds sur un matériau peu perméable. Les transferts d'eau dans le sol sont limités ou très limités. Les sols du Groupe D ont généralement plus de 40% d'argile et moins de 50% de sable, et ont des textures argileuses. Dans certaines régions, ils ont aussi un potentiel de retrait/gonflement élevé. Tous les sols avec un horizon imperméable à l'eau à moins de 50 cm de profondeur ou avec une nappe d'eau à moins de 60 cm de profondeur sont dans ce groupe, même si certains peuvent avoir une double classification, lorsqu'ils sont drainés de manière adéquate. Les limites sur les caractéristiques physiques de diagnostic du groupe D sont les suivantes. Pour les sols avec un horizon imperméable entre 50 et 100 cm de profondeur, la conductivité hydraulique à saturation saturée de l'horizon le moins perméable est inférieure ou égale à 1,0 $\mu\text{m/s}$. Pour les sols dont la nappe est plus profonde que 100 cm, la conductivité hydraulique à saturation de tous les horizons moins profonds que 100 cm est inférieure ou égale à 0,40 $\mu\text{m/s}$. => **Sols à teneur élevée en argiles gonflantes ou sols superficiels (moins de 75 cm) reposant sur une couche imperméable enfouie à faible profondeur. Il inclut également certains sols salins. Ces sols sont à très faible capacité d'infiltration (moins de 1 mm/h) et à drainage très médiocre (nappe permanente à faible profondeur).**

4.1.2.2. Application aux données de sol sur le BV de la Dordogne

Calcul du paramètre pour les UTS

Pour affiner les différentes classes d'infiltrabilité pour les différents sols, nous avons donc cherché à prendre en compte un maximum de leurs paramètres hydrodynamiques. C'est pourquoi notre application de la méthodologie de classement des GHS s'est voulue plus « experte » que simplement « numérique » (Figure 26). Pour cela, pour chaque UTS (base de données des RRP) ou profil observé (222 sondages ou coupes observés sur le terrain dans le Cantal et le Puy-de-Dôme), la perméabilité de base de tous les horizons a été estimée dans un premier temps à l'aide du triangle de texture corrélatif (Figure 25).

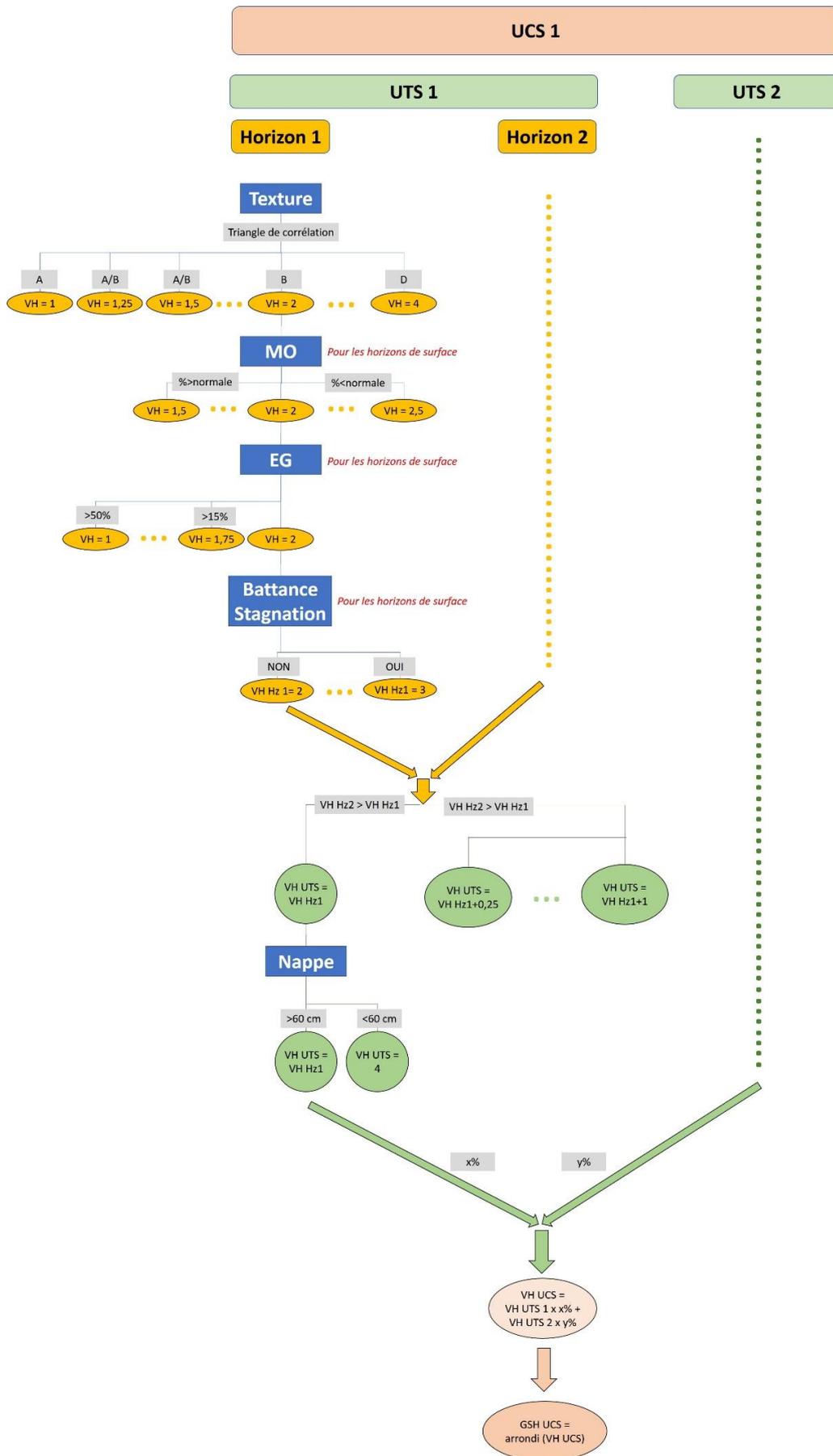


Figure 26. Arbre de décision de la méthodologie SCS pour le calcul des VU des UTS et des GSH des UCS.

Plutôt que d'assigner une lettre du GSH, nous avons assigné un chiffre - appelé par la suite VH pour Valeur Hydrologique - pas forcément entier, entre 1 et 4 (A à D, respectivement), ce qui permet de moduler et préciser la valeur d'infiltration de base par des valeurs intermédiaires décimales lorsque la texture est limite entre 2 classes (Figure 25 et Figure 26).

Les profils de chaque UTS ou chaque sondage ont été étudiés pour déterminer de manière experte leur VH (utilisation principalement des tables qualitatives et quantitatives des bases de données⁷). Une VH de base est d'abord assignée à chaque horizon du profil selon le triangle corrélatif GSH/texture (Figure 25 et Figure 26). Pour les cas où le GSH est proche du GSH voisin ou lorsqu'on est à cheval sur 2 GSH, une VH intermédiaire est alors assignée (+/- 0,25 ou +/- 0,5, respectivement). Pour l'horizon de surface, si le taux de matière organique (MO) ou la pierrosité de surface est importante, la VH est modulée à la baisse, l'ampleur de la modulation dépendant de l'écart au taux de MO généralement constaté dans des sols équivalents (avec comme références la moyenne des UTS proches et similaires, la BDATou les données européennes) et du niveau de pierrosité. Au contraire, dans l'horizon de surface, la VH est modulée à la hausse lorsque de la battance (incidence évaluée selon texture) ou de la stagnation de surface a été observée (Figure 26). Néanmoins, ces 2 derniers paramètres ont été utilisés avec précaution, puisqu'ils relèvent d'une observation qualitative dont on ne connaît pas l'auteur et ses compétences : par exemple, certaines bases de données des cartes au 1/250 000 indiquent de la battance sur des horizons de texture GEPPA « SA » (sablo-argileux), ce qui est possible dans des circonstances particulières, mais il reste peu probable que cela soit généralisable à l'échelle de l'UTS en entier.

Ensuite, 2 situations se distinguent (Figure 26) :

1. Si les horizons inférieurs sont moins perméables (VH plus élevée) que les horizons supérieurs, on évalue ensuite leur influence sur le transfert d'eau dans le profil. En cela, notre méthodologie se différencie quelque peu de la méthode SCS, où la présence d'un horizon imperméable induit des changements de GSH notables (paragraphe 0). En effet, la présence d'un horizon imperméable n'est pas forcément limitant pour le transfert hydrique dans le profil, les écoulements pouvant se produire latéralement dans de nombreux sols, du moment que le pendage du toit de l'horizon imperméable est suffisant et l'horizon sus-jacent suffisamment drainant. Pour évaluer cette influence sur la perméabilité générale du profil, nous nous sommes basés sur (i) la dénomination RP (Référentiel Pédologique, Afes, 2008) des horizons et des sols qui fournissent une indication sur le fonctionnement du sol, (ii) les indices hydromorphiques dans le profil (traits d'oxydation et de réduction), (iii) le profil textural qui peut renseigner sur des phénomènes d'éluviation latérale (iv) les profondeurs de la nappe qui renseignent jusqu'où les horizons peuvent être saturés en eau... En fonction de toutes ces indications, la VH du profil peut finalement correspondre à la VH des horizons de surface ou être ajustée pour tenir compte des horizons plus profonds et moins perméables.
2. Au contraire, si les horizons inférieurs sont plus perméables (VH plus faible) que les horizons supérieurs, on retient la VH des horizons supérieurs (toujours modulée avec le taux de MO, la pierrosité... comme précédemment indiqué) comme VH du profil, même si cette valeur peut être revue à la baisse si les horizons inférieurs sont très drainants, non hydromorphes et les horizons supérieurs suffisamment perméables.

Assignation d'une GHS à l'UCS à partir des VH des UTS constitutives

- *Pour les UCS issues des cartes de sols existantes au 1/250 000*

Comme décrit précédemment, on peut donc assigner une VH à chaque UTS. Pour ensuite déterminer la VH des UCS, composées d'une ou plusieurs UTS, chaque VH d'UTS est pondérée par son pourcentage de présence dans l'UCS (Figure 26). Notre méthodologie de classification étant une approche assez « experte » réalisée à l'aveugle (on ne compare jamais ce qu'on est en train de classer avec ce qui a déjà été classé, sans quoi le classement précédent peut affecter le classement actuel et la propagation peut non intentionnellement introduire un biais systématique), nous avons comparé les VH obtenus pour les mêmes UCS qui se touchent lorsque cela a été possible.

⁷ Comme expliquée précédemment, la valeur modale n'est pas toujours définie pour toutes les UTS (base de données incomplète, non finalisée [notamment pour le RRP Puy-de-Dôme] ou nombre de profils définissant l'UTS insuffisant). En ce cas, nous avons calculé une valeur moyenne à partir des valeurs min et max du paramètre. Dans quelques cas, seule une valeur max ou min est fournie ; elle a alors été utilisée par défaut. Pour le paramètre texture, la somme argile+limon+sable des valeurs modales, moyennes ou minimum/maximum n'est pas forcément égale à 100%. Or, pour une détermination précise des VH via le triangle de corrélation texture/GSH, une somme à 100% est requise. Pour cela, nous avons corrigé les valeurs par un produit en croix.

Dans l'exemple comparatif de la déviation entre les VH d'une même UCS entre la Charente et la Charente-Maritime (Figure 27), on observe que les déviations sont souvent faibles voire nulles. Cela prouve que notre méthodologie d'évaluation de la VH, bien que partiellement subjective, n'introduit pas de biais notable et garde donc une cohérence scientifique entre les bases de données. Les déviations les plus fortes ne sont d'ailleurs pas dues qu'à notre méthodologie d'évaluation de la VH. En effet, une UCS de part et d'autre de la limite départementale peut être définie par des UTS différentes : dans l'exemple de la Figure 27, la déviation de 0,31 est d'ailleurs un de ces cas.

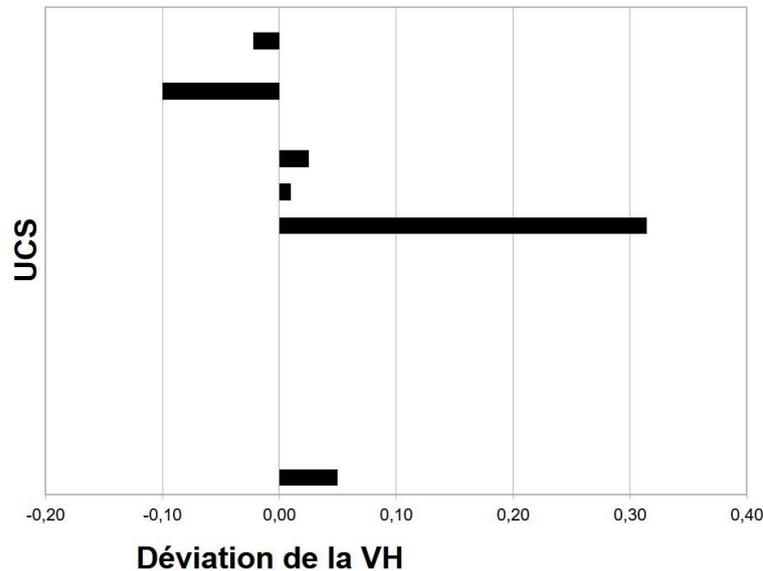


Figure 27. Déviation de la VH pour une même UCS entre 2 bases de données (exemple de la Charente et de la Charente-Maritime).

Ensuite, la méthodologie SCS nécessitant des classes A à D, la VH obtenue pour chaque UCS doit au final être une valeur entière. Différentes analyses statistiques ont été menées pour évaluer la manière de ramener la VH décimale à une VH entière. Nous avons tenté d'utiliser l'indice de Shannon pour fournir une idée de la diversité intra-UCS, mais les données sont restées très difficilement interprétables, car des indices de Shannon peuvent être très proches entre des UCS dont les compositions en nombre et en pourcentage représentatif au sein des UCS sont pourtant très différentes, interprété comme un contre-balancement du nombre vs le pourcentage dans l'indice, ce qui en limite la portée explicative de diversité intra-UCS.

Au final, après différents tests, nous avons retenu l'arrondi non pondéré à la valeur la plus proche⁸ (Figure 26). Pour les zones non renseignées au sein de ces cartes (grandes zones militaires, aires urbaines), et également pour la petite partie du Lot-et-Garonne incluse dans le bassin versant, les valeurs ont été spatialement déterminées par analogie topo-géo-pédologique comme expliqué précédemment.

- Pour les UCS issues des sondages réalisés (Cantal et partiellement Puy-de-Dôme)

Pour cela, lorsque les sondages étaient en bordure des cartes de sol existantes, nous nous sommes basés sur la similitude morpho-pédologique afin d'assigner les mêmes GSH pour les profils développés dans des contextes topographiques, géologiques et pédologiques similaires. Néanmoins, si les VH des sondages dans notre UCS sont différentes de celles de l'UCS de la carte voisine, nos VH ont pu être conservées si jugées plus pertinentes, et arrondies à la valeur la plus proche pour déterminer le GSH.

Pour les sondages trop éloignés de contextes similaires sur les cartes de sol avoisinantes, nous avons d'abord regroupé les sondages selon le contexte topo-géo-pédologique qui définit l'UCS. Si leurs VH sont différentes, la VH finale retenue est : soit un intermédiaire entre les 2, soit celle jugée la plus représentative de l'UCS ainsi construite. La VH finale est ensuite arrondie au plus proche (comme pour le cas des UCS issues des cartes de sols existantes) afin

⁸ La pondération des UTS dans l'UCS n'est pas envisageable, puisqu'elle modifie la fréquence des UTS donnée par les cartographes dans les bases de données et donc leur expertise cartographique liée à la connaissance du milieu.

de donner le GSH. Des zones de tourbière identifiées sur les cartes géologiques et dans l'inventaire des zones humides ont été reprises si jugées pertinentes selon les photographies aériennes et leurs limites éventuellement retravaillées. D'après nos observations, on peut généraliser en première approximation et faute de mieux, que selon le contexte géologique, le fonctionnement des tourbières est différent. Une VH de 3 correspond à des tourbières qui s'assèchent fortement sur le premier demi-mètre de profondeur au cours de la période estivale, et qui restent humides ou plus saturées très en profondeur ; pour ce qui concerne les périodes de ruissellement intense modélisées, elles conservent donc un potentiel d'infiltration des précipitations, juste limité par une éventuelle nappe profonde, même si l'hydrophobicité des vraies tourbières à tourbe sèche de surface limite fortement l'infiltration ; ces tourbières ont plus souvent, mais pas systématiquement, été rencontrées sur les formations plutoniques (granites, granitoïdes) et sur certaines formations métamorphiques (amphibolites). Une VH de 4 correspond à des tourbières où la saturation en eau se prolonge en été et à faible profondeur, les horizons de surface demeurant humides ; le potentiel d'infiltration de ces tourbières est donc limité, même lors des périodes plus estivales de modélisation du ruissellement intense ; ces tourbières ont plus souvent, mais pas systématiquement, été rencontrées sur les formations volcaniques – l'altitude et le climat jouant ici leur rôle – et sur certaines formations métamorphiques (micaschistes, gneiss).

Dans toutes les situations précédentes, en cas d'ambiguïtés ou de difficultés, c'est la propriété la plus limitante vis-à-vis des transferts hydriques qui a déterminé la VH et le GSH, comme il est recommandé dans la méthodologie SCS, ce qui implique donc une tendance vers les GSH les plus élevés et donc les plus ruisselants.

Au final, l'affinement attendu de la caractérisation de l'infiltrabilité des sols via une méthodologie légèrement différente du SCS (plus « experte ») a amélioré les performances de la modélisation hydrologique spatiale du ruissellement, sans que la subjectivité des classements ne semble affecter la VH. Nous avons ainsi choisi :

1. de caractériser par une VH numérique décimale l'ensemble des horizons qui composent les UTS afin de
2. déterminer la VH de l'UTS modulée selon le maximum de paramètres jouant sur le fonctionnement hydrodynamique des couvertures de sol,
3. puis déterminer la VH de l'UCS par pondération des VH des UTS,
4. dont l'arrondi au plus près fourni finalement le GSH.

À noter que l'urbanisation a un effet plus important sur le ruissellement dans les bassins versants avec des sols ayant des taux d'infiltration élevés (sables et graviers) que dans les bassins versants principalement de limons et argiles, qui ont généralement des taux d'infiltration faibles. De plus, en zone urbaine, toute perturbation d'un profil de sol peut changer de façon significative ses caractéristiques d'infiltration : avec l'urbanisation par exemple, les horizons de sols autochtones peuvent être mélangés ou décapés, des matériaux anthropiques d'autres origines peuvent être introduits. Par conséquent, pour ces sols perturbés, la classification GHS ne s'applique normalement plus et une méthode basée sur la texture de surface du sol perturbé est généralement utilisée selon un classement propre et différent de celui présenté auparavant et à condition qu'aucun compactage significatif n'a eu lieu (Brakensiek and Rawls, 1983). Malheureusement, nous n'avons pas pu attendre ce niveau de détail qui aurait nécessité une expertise, même rapide, de nombreux sites représentatifs dans tous les grands secteurs urbains initialement non renseignés dans les bases de données pédologiques. En conséquence, pour l'élaboration de la carte thématique GSH dans les zones urbaines, nous avons simplement extrapolé les UCS dans leur état naturel (ou supposé peu anthropisé).

4.2. SCS-CN : la PRODUCTION

Cette méthode a été implémentée *via* le module HEC-RAS fourni gratuitement par les ingénieurs hydrauliciens de l'armée américaine⁹. Nous avons fusionné les tables d'occupation du sol avec le sol afin d'obtenir un *shape* global où chaque polygone était caractérisé par son TOS et son type de sol (GHS). Cette table compte 463 055 polygones. Nous avons enlevé les extractions de carrière qui ne peuvent être modélisables, ce qui inclut des zones "blanches" dans le résultat. Le module a ensuite attribué les valeurs de CN du **Tableau 9** à chaque polygone en fonction de ses caractéristiques TOS/GHS. Les résultats bruts sont présentés en **Figure 28**.

⁹ <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

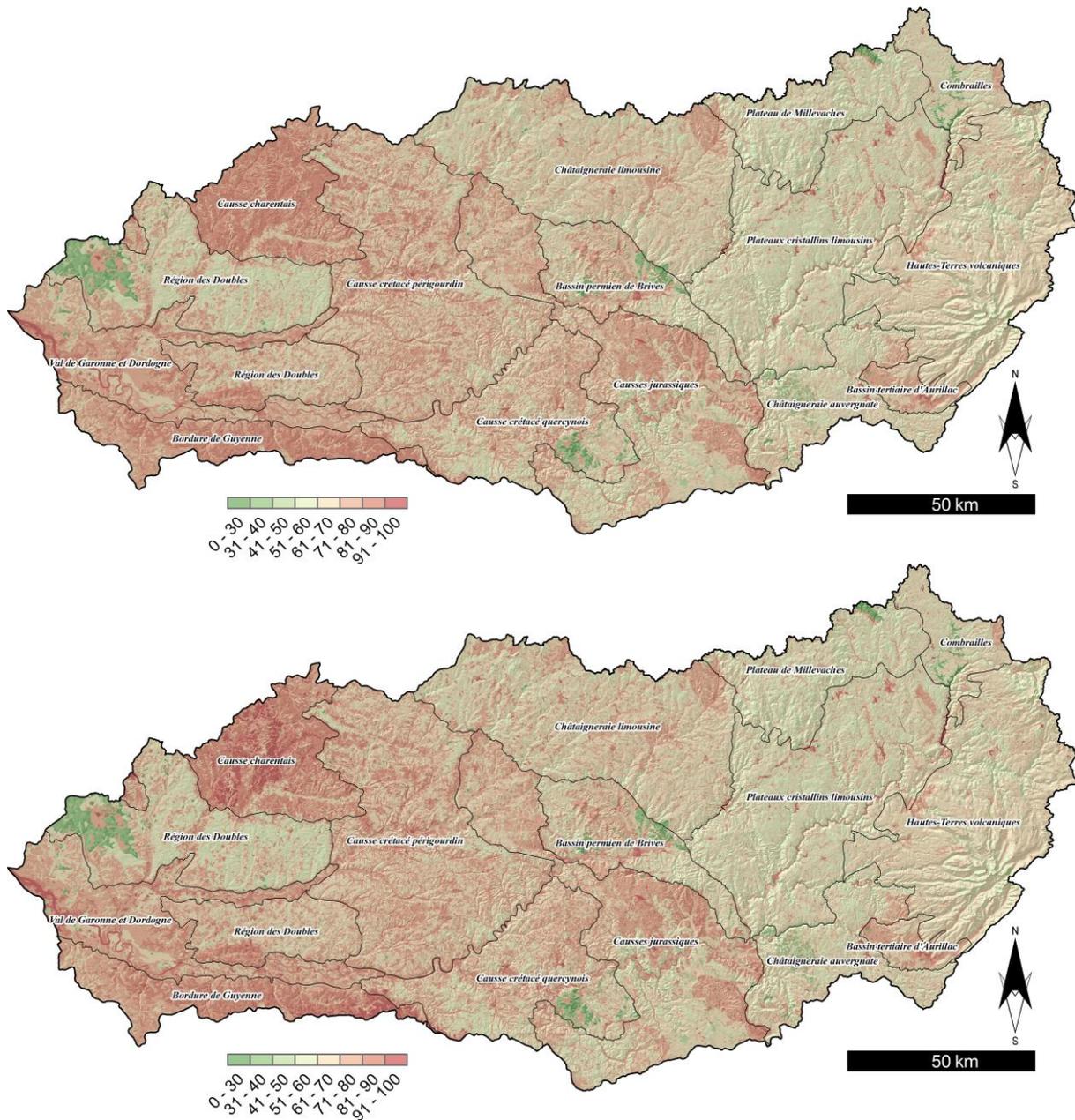


Figure 28 - Cartes des CN. En haut, valeur du printemps ; En bas, valeur à la transition été/automne. On remarque bien l'augmentation des valeurs de CN pour les Causse charentais et en limite entre la Guyenne et le causse quercynois.

L'inclusion de la pente dans la procédure de modélisation fait encore débat dans la communauté (voire partie 1). Cependant, les travaux de Huang et al. (2006) proposent une procédure élégante de modification des valeurs de CN en fonction de la pente. Basée sur des études expérimentales sur les plateaux lœssiques de Chine, les auteurs proposent une formule à partir du CN initial (Équation 1). Même si les différences de contexte amènent à critiquer cette formule, c'est pour l'instant la seule qui existe et qui a été testée par d'autres auteurs.

$$CN_{2\alpha} = CN_2 \frac{322.79 + 15.63(\alpha)}{\alpha + 323.52}$$

Équation 1 - Formule intégrant la pente dans les valeurs de CN. D'après Huang et al. (2006). Avec α , la valeur de pente en %.

Les variations de valeurs de CN entraînées par cette formule ne dépassent pas 8% pour des pentes importantes (>150%). Les variations spatiales sont assez peu perceptibles globalement, mais bien réelles cependant (Figure 29).

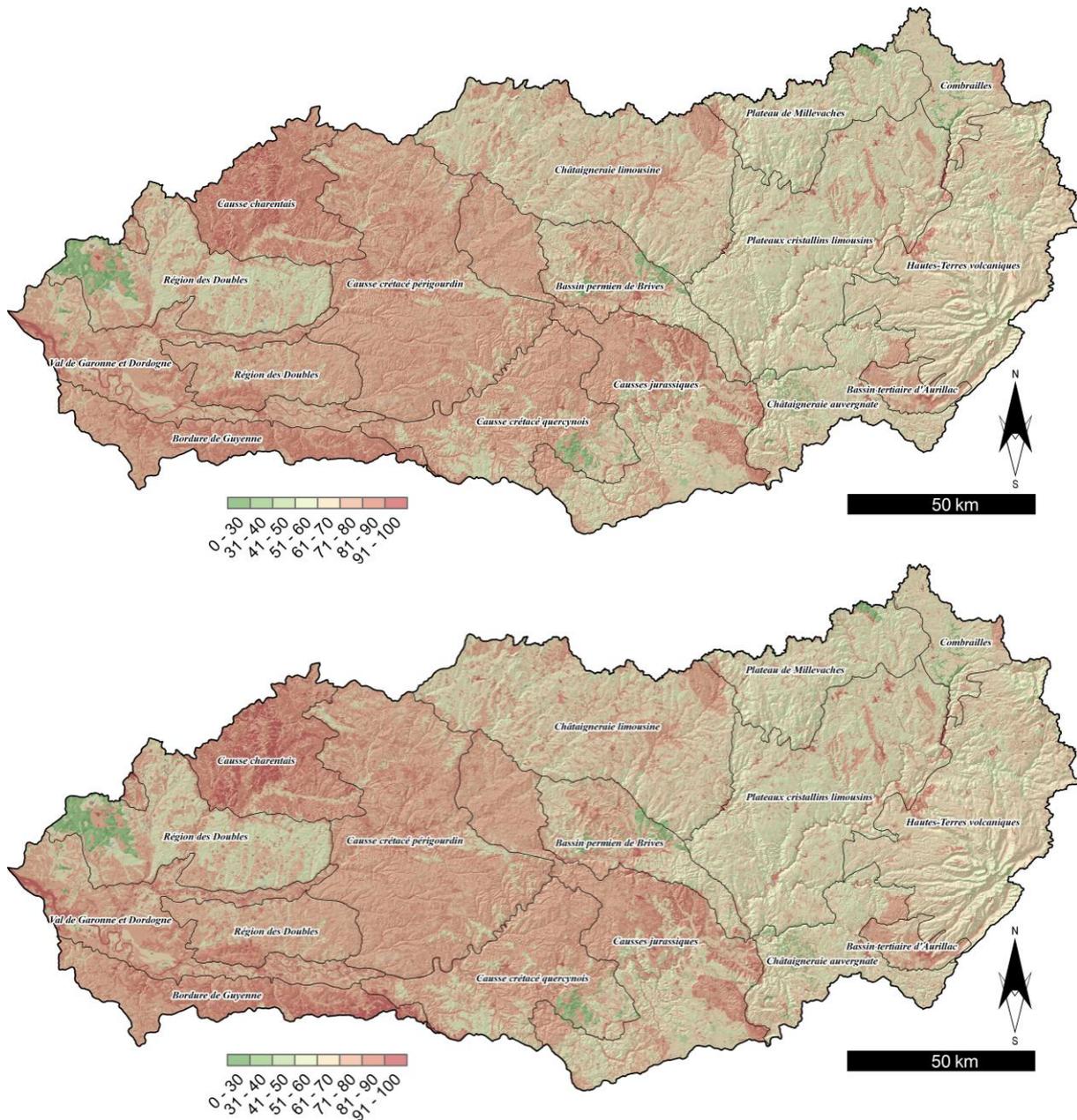


Figure 29 - Cartes des CN modifiés par la pente. En haut, valeur du printemps ; En bas, valeur à la transition été/automne.

4.2. SCS-CN : le TRANSFERT

La fonction de TRANSFERT a été créée en tachant de prendre en compte les zones de production locales et la pente afin de donner une idée du *temps de concentration*, ainsi que l'effet accélérant de l'accumulation des pentes sur le continuum hydraulique (notions de bassin versant « glissant » et de ruissellement « spécifique »). Pour ce faire, nous avons créé un algorithme composé de deux membres (Équation 2) :

$$\text{TRANSFERT} = FG([\text{Flow AccD8 (Weighted SCS)}/\text{Flow AccD8} + 0,1] * [\text{Flow AccD8 (Weighted PENTE)}/\text{Flow AccD8} + 0,1])$$

Équation 2 - Algorithme du TRANSFERT pour SCS-CN.

Le premier membre (première ligne) vise à quantifier la moyenne des valeurs de CN cumulées le long du transfert hydrologique amont-aval. Nous avons pris un algorithme D8 favorisant plutôt le ruissellement concentré qui est le

plus générateur de dégâts. Ce membre est normalisé, car il ne cherche pas à donner une valeur absolue de cumul, mais relative par rapport à l'accumulation théorique, ce qui permet de quantifier les apports continus ou non des versants le long du transfert. Le second membre (seconde ligne) est construit sur l'accumulation des pentes normalisée par l'accumulation des surfaces contributives. Ce membre exprime l'effet cumulatif de la pente et donc les capacités d'accélération du transfert hydraulique le long du continuum hydraulique. Construit de cette façon, l'algorithme permet théoriquement d'exprimer la relation entre quantité relative de flux et vitesse relative du flux en chaque point du continuum hydraulique. L'ensemble est lissé par un filtre gaussien (FG) afin d'éviter les scories. Le résultat demeure bien calqué sur la topographie qui prend plus de poids que pour la PRODUCTION (Figure 30). On remarque par exemple pour les Causses charentais que le TRANSFERT est moyen alors que la PRODUCTION y était potentiellement forte. Le relief étant de plus faible énergie, les capacités de TRANSFERT y sont plus limitées.

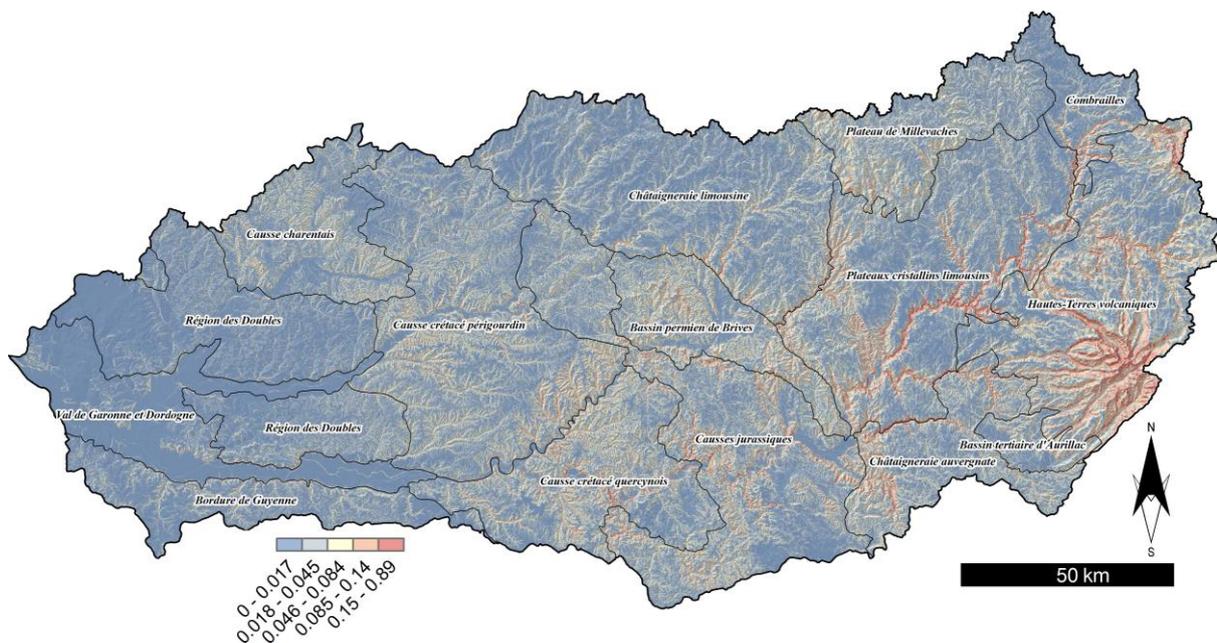


Figure 30 - Carte de TRANSFERT SCS-CN. Exemple pour l'été/automne.

4.3. SCS-CN : L'ACCUMULATION

De la même manière que pour le TRANSFERT, nous avons créé un algorithme afin de modéliser l'ACCUMULATION à partir du modèle SCS de base (Équation 3). Le premier membre est le même que pour le TRANSFERT (cumul relatif de la PRODUCTION selon l'algorithme D8). Le second membre est le *Topographic Wetness Index* calculé à partir d'un algorithme de flux de type MFD (direction multiple) qui prend mieux en compte le ruissellement diffus et la saturation de pied de versant. Pour le TWI, nous fonctionnons par contre en valeur absolue car la quantité totale potentiellement accumulée est ici importante pour différencier les pixels entre eux. L'ensemble est lissé par un filtre gaussien (FG).

$$\text{ACCUMULATION} = \text{FG}\left[\left(\frac{F_{\text{accD8w}}}{F_{\text{accD8}}}\right) * (\text{SagaTWI})\right]$$

Équation 3 - Algorithme de l'ACCUMULATION pour SCS-CN.

L'ACCUMULATION est ainsi concentrée dans les zones basses du bassin versant (grandes vallées, fonds de thalweg, dépression topographique, bassin, zones planes, etc.). À l'inverse, toutes les lignes d'interfluvies ou les zones de pentes ont des valeurs basses d'ACCUMULATION. La topographie est ici importante, mais bien modulée par la PRODUCTION primaire (Figure 31).

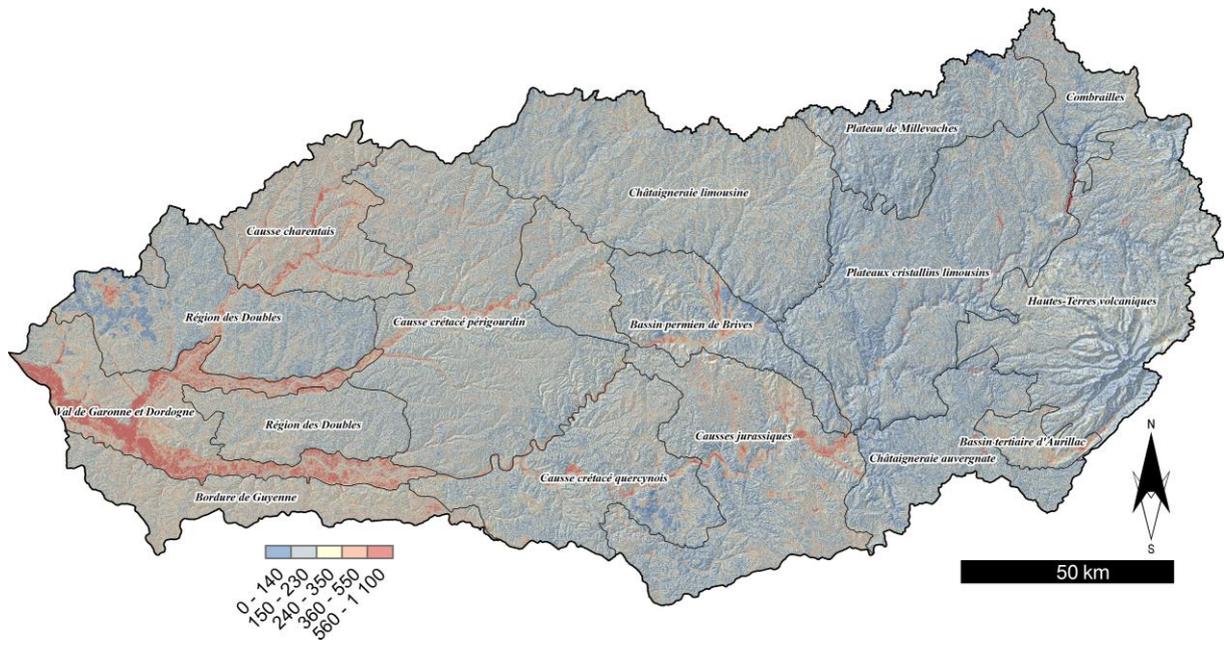


Figure 31 - Modèle d'ACCUMULATION SCS-CN.

Partie 5. Modélisations du ruissellement : la méthode IRIP

[IRIP est une méthode qui a été créée par l'IRTSEA (anciennement Cemagref) à la fin des années 2000 (Dehotin and Breil, 2011). Elle est basée sur des sommes de facteurs spatiaux binarisés et comprend les 3 compartiments du ruissellement. Cette méthode a fait l'objet de quelques tests "grandeur nature" (Bonnet, 2012; Dehotin et al., 2015).

Cette méthode est encore expérimentale et en développement. Dans le cadre de ce projet, nous avons réalisé un (très) important travail de refondation et d'adaptation de la méthode afin d'affiner les sorties de modèle et de "coller" plus aux processus naturels et aux acquis de la bibliographie spécifique. Ces adaptations ont été présentées le 9 décembre 2016 au comité de pilotage et à un représentant de l'équipe "Hydrologie des bassins versants" de l'IRSTEA (Dr. Pascal BREIL). Les retours de l'IRSTEA furent plutôt positifs.]

5.1. IRIP : les adaptations par rapport à la méthode initiale

La méthode IRIP, dans sa présentation originelle (Dehotin and Breil, 2011), impose la production de plusieurs cartes brutes et dérivées pour implémenter les 3 modèles de ruissellement : Production, Transfert et Accumulation. Ces données sont de format divers, discret ou continu, avec des plages de valeur et des distributions différentes. Afin d'homogénéiser l'ensemble de ces données et ne pas induire un biais de poids, chaque donnée est reclassée selon deux valeurs : 0 ou 1 (processus de binarisation). De fait, on obtient un ensemble de cartes binaires qui sont ensuite intégrées dans un algorithme simple, additif. Aucune notion de poids n'est apportée par la méthode.

Le modèle de production est obtenu par addition des cartes binarisées d'érodibilité du sol, d'épaisseur du sol, de perméabilité du sol, d'une carte de prédisposition du relief qui est la combinaison de la pente et de l'indice d'engorgement, et de l'occupation du sol. Cette addition donne des valeurs de susceptibilité de 0 à 5.

Le modèle de transfert additionne les cartes binarisées de production de ruissellement, la forme des aires drainées, les ruptures de pente, la pente et les axes de transfert avec leur surface drainée. Les valeurs vont de 0 à 5.

Enfin, le modèle d'accumulation reprend la carte de production à laquelle elle ajoute les cartes des surfaces et aires drainées, les ruptures de pente, la pente et l'indice d'engorgement. Les valeurs s'étendent de 0 à 5.

5.1.1. Problèmes théoriques et géostatistiques soulevés par la méthode

La méthode IRIP est de fait assez facile à implémenter car elle fonctionne avec calculs algébriques simples de cartes raster. Cependant, derrière cette simplicité, il y a **le premier problème de la binarisation des données de base** qui implique à la fois une réflexion et une adaptation des seuils pour chaque étude, mais également amène à une sur-simplification et une perte d'information par rapport aux données de base. En effet, si on prend l'exemple de la pente, le choix des seuils à fixer pour faire passer les pentes de 0 (non favorable au ruissellement) à 1 (favorable au ruissellement) est délicat et influence grandement par la suite l'ensemble des calculs, d'autant que ce paramètre intervient dans l'ensemble des 3 modèles de production, de transfert et d'accumulation. Toujours pour le cas de la pente, cette binarisation est très artificielle et ne prend pas en compte le caractère "continu" ou du moins discret du phénomène comme le montrent plusieurs études mettant en relation la pente avec le coefficient de ruissellement (Chaplot and Le Bissonnais, 2000; Duley and Hays, 1932; El Kateb et al., 2013; Fox et al., 1997; Janeau et al., 2003; Mishra et al., 2014). Pour ce facteur, la binarisation implique ainsi une perte conséquente d'information. Pour le cas de l'occupation du sol, la méthode du SCS-CN nous montre bien aussi le caractère discret de l'évolution du coefficient de ruissellement sur une gamme variée d'occupation du sol et qu'il est délicat de considérer une prairie temporaire comme une forêt au regard d'un environnement urbain, la prairie constituant en fait un intermédiaire à prendre en compte entre ces deux types d'occupation du sol.

Le deuxième problème est lié à l'existence possible de redondances d'information qui crée des sous-estimations ou des surestimations du résultat final. Ceci est par exemple vrai pour l'indice topographique qui est la résultante de la combinaison (opérateur booléen OR) des cartes de pente avec le *Topographic Wetness Index*, dont la construction intègre déjà la pente (Équation 4) :

$$TWI = Ln \frac{A}{\beta}$$

Équation 4 - Équation du TWI. A, aire contributive amont ; β , pente locale.

Ces deux indices (pente et TWI) sont globalement corrélés négativement avec, dans le cas du BV de la Dordogne, un r^2 de Pearson de 0.44 (corrélation linéaire négative) et une corrélation logarithmique significative liée à la formulation même du TWI ($r^2=0.82$) (Figure 32).

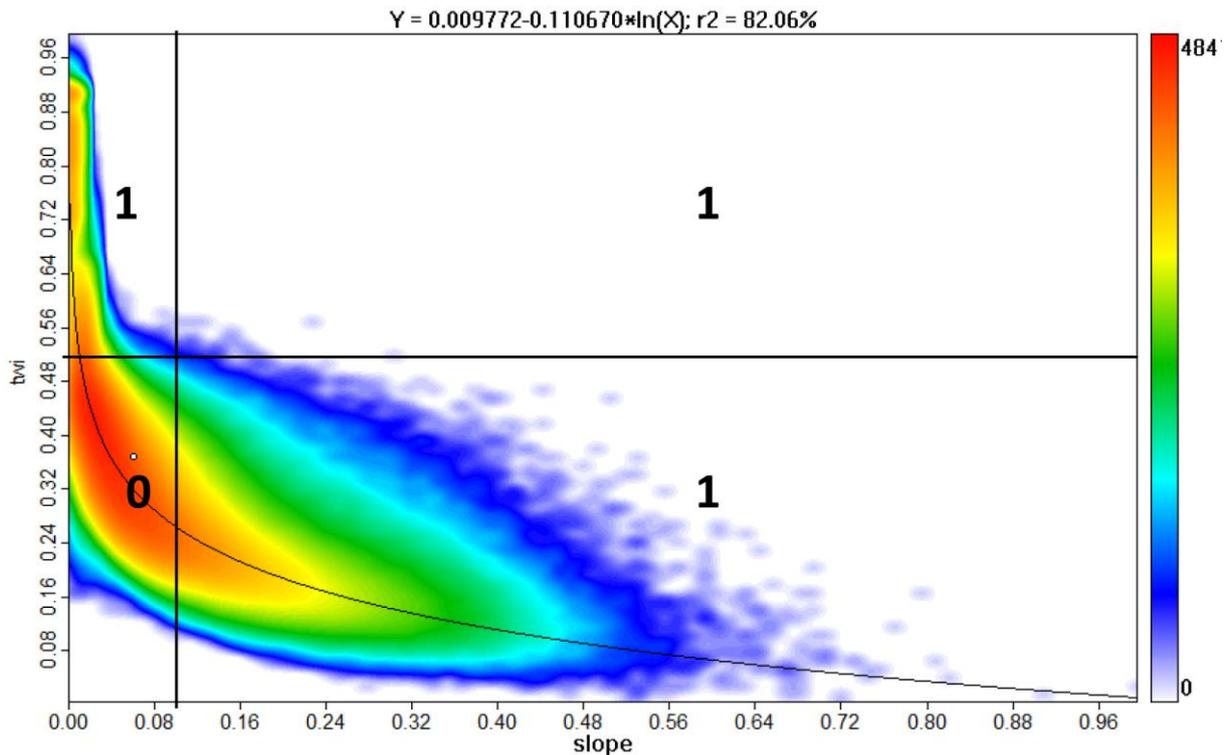


Figure 32 - Nuage de points de la relation entre la pente et le TWI (indice topographique) sur le bassin versant de la Dordogne avec les résultats d'une binarisation hypothétique.

Dans le cas de la binarisation et de la combinaison avec l'opérateur booléen OR, le TWI rend certaines zones de faible pente susceptible de ruissellement et vice-versa, ce qui au final, augmente la superficie des zones à forte susceptibilité. De plus, si la relation entre la pente et le ruissellement hortonien peut être linéaire ou corrélée positivement, cette relation est plus complexe avec le TWI, car si des fortes valeurs de TWI expriment une potentialité topographique de saturation du sol et donc un fort potentiel de ruissellement sur surface saturée, les faibles valeurs de TWI peuvent aussi exprimer des situations topographiques favorables au ruissellement hortonien (cas des bordures de plateau convexe à faible valeur de TWI mais à forte pente et faible couverture pédologique favorables au ruissellement hortonien). Dans ce cas des faibles valeurs de TWI, il y a une redondance d'information avec les secteurs de forte pente.

L'autre complication également, est la forte relation bivariée existant entre le TWI et les zones humides (Figure 33) et les zones basses. En effet, dans la méthode IRIP, le TWI est utilisé de la même manière comme contributeur à la production et à l'accumulation ce qui théoriquement signifie que, au regard de cet indice, les zones de production sont aussi des zones d'accumulation "sur place", sans transfert. En fait, le TWI indique le potentiel de saturation du sol, essentiellement par le facteur topographique d'accumulation des apports amont dû à un blocage topographique (lié à une contre-pente ou à une réduction de la pente). Il exprime le ruissellement hewlettien en bas de versant et l'accumulation du ruissellement hortonien dans les cuvettes ou les abords des axes de transfert. Or, le comportement de ces zones vis-à-vis du ruissellement est complexe car, dans le cas des zones de cuvette (fort TWI), le maintien d'une certaine humidité peut au contraire permettre au sol de garder sa porosité lors d'épisode de sécheresse prolongée. Au contraire, en dehors de ces zones de fort TWI et sur sol argileux, le risque de dessiccation importante lors des épisodes de sécheresse peut au contraire partiellement augmenter le ruissellement.

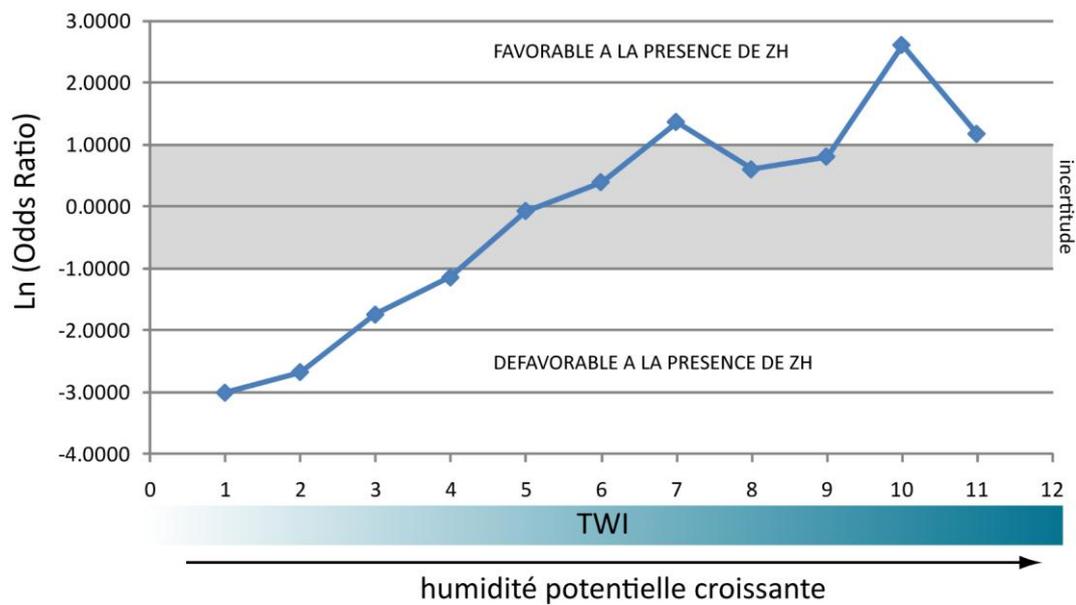


Figure 33 - Relation entre probabilité de présence de zones humides et TWI. L'Odds Ratio est le rapport entre les zones humides cartographiées et les autres zones pour chaque valeur de TWI. Les valeurs autour de 0 ne sont pas significatives. Les valeurs < -1 signifient que le TWI est défavorable à la présence de ZH; Les valeurs > 1 signifient que le TWI est favorable à la présence de zones humides.

Le troisième problème concerne la contribution des facteurs. En effet, pour la carte de PRODUCTION, la méthode IRIP intègre 3 facteurs pédologiques, 1 facteur topographique et 1 facteur lié à l'occupation du sol. De fait, la donnée pédologique possède une contribution de 3/5 dans la susceptibilité totale contre 1/5 pour l'occupation du sol, soit une contribution 3 fois supérieure, et ce, de manière constante. Dans le modèle SCS-CN, cette contribution entre occupation du sol et pente est variable, car pour une même occupation du sol, la contribution du sol aux variations de CN varie de 2 à 30% sur le bassin versant de la Dordogne et inversement, la contribution de l'occupation du sol aux variations de CN pour une même classe de sol varie de 7 à 30%.

Dans la méthode du *RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)* (Wishmeier and Smith, 1960), universellement utilisée pour évaluer les pertes annuelles en terre par ruissellement de surface dans les zones agricoles de plaines et collines, l'équation affecte un poids similaire aux caractéristiques de sol et d'occupation du sol, en combinaison avec d'autres facteurs. Si on se limite strictement aux facteurs de ruissellement (couverture et type de sol, avec les pratiques), on revient aux concepts du SCS-CN avec un poids équivalent pour le type de sol, le type d'occupation du sol et les pratiques. De fait, la méthode IRIP nous paraît surévaluer le poids des caractéristiques pédo-physiques dans la contribution au ruissellement par rapport au type d'occupation du sol alors que les autres méthodes affectent soit des poids similaires, soit des contributions variables.

Cette question de la contribution des facteurs au ruissellement reste cependant peu étudiée (Regazzoni and Payraudeau, 2012) et nous ne disposons pas de données expérimentales ou géostatistiques nous permettant de statuer sur cet aspect.

5.1.2. Contournements des problèmes et adaptation possible de la méthode IRIP

Les données dont nous disposons pour cette étude sont de deux types : catégorielles (sols et couverture) et continues (données issues du MNT). Leurs distributions ainsi que les échelles de valeurs sont très hétérogènes et ces données ne sont évidemment pas comparables entre elles.

Dans un premier temps, et pour résoudre l'épineux problème de la binarisation et de la perte d'information qu'elle engendre, nous avons ramené, pour toutes les données, l'ensemble des valeurs sur une échelle de 0 à 1, avec toutes les valeurs intermédiaires, ce qui permet de conserver l'information et d'éviter des effets de seuil trop importants. Cette manipulation procède de deux approches :

1) Une normalisation par la méthode du minimum-maximum. Chaque valeur brute est recalculée selon la formule suivante (Équation 5) :

$$X_{norm} = \frac{X_{brut} - X_{minimum}}{X_{maximum} - X_{minimum}}$$

Équation 5 - Équation de normalisation.

2) Une réorganisation des distributions par *fuzzification* experte entre les valeurs de 0 à 1. La *fuzzification* vise à reclasser les valeurs brutes, manuellement, sur une gamme de 0 à 1 afin de reconstituer une courbe mettant en relation le potentiel de ruissellement en fonction de valeurs brutes. Si on prend l'exemple de la pente, on peut procéder à deux types de *fuzzification* : linéaire (ce qui revient à une normalisation), ou se rapprochant d'une fonction logarithmique visant à reproduire une augmentation rapide du potentiel du ruissellement sur les pentes faibles et moyennes et le caractère asymptotique du phénomène sur les pentes fortes (existence d'un plateau) (Figure 34). Ces choix sont basés sur les apports de la bibliographie pour chaque facteur afin d'asseoir notre expertise.

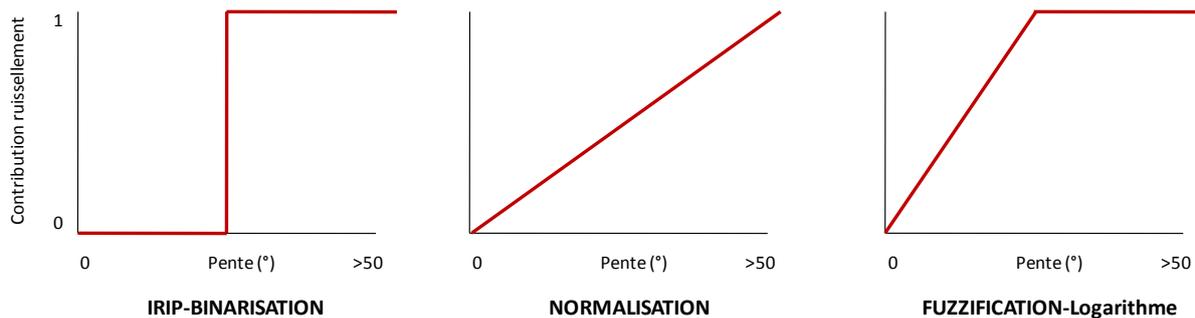


Figure 34 - Exemple de processus de reclassement de la pente pour la modélisation

Le travail de *fuzzification* peut amener à la création de néovariabiles (Poiraud, 2014; Thiery et al., 2007). Les néovariabiles sont des variables fusionnées permettant d'intégrer des relations complexes entre deux ou plusieurs facteurs. Il s'agit alors de "boîtes noires" intégrant l'ensemble des interactions complexes entre facteurs, ce qui permet d'avoir des variables intégrées et de résoudre le problème de la recombinaison. C'est par exemple le cas pour le TWI et la pente qui sont colinéaires mais expriment des processus différents.

5.1.3. Modification des facteurs d'entrée : la PRODUCTION

5.1.3.1. Création d'une néovariable topographique

Nous renvoyons aux développements qui ont déjà été présentés dans la partie 1 concernant ce facteur.

Au vu des incertitudes rencontrées dans la littérature, nous avons soumis la question à la communauté scientifique internationale afin d'avoir quelques avis d'expert¹⁰. Les réponses de William F. Hansen (Docteur en hydrologie à l'*US Forest Service, Washington, D.C.*) nous renvoient vers ses travaux publiés en 1991 (Hansen, 1991) et dans lesquels il met en évidence une augmentation globalement linéaire de l'érosion par ruissellement de surface sur des zones forestières après incendie et pour des tranches de pente de 30 à 70% (17 à 35°). Ces résultats rejoignent ceux de Duley and Hays (1932) et Fox et al. (1997) qui montraient l'existence d'une tendance à la linéarisation de la relation ruissellement/pente au-dessus de 20%.

D'un point de vue géomorphologique, les valeurs de pente jouent sur les processus morphologiques avec notamment des processus définis par la dynamique de l'eau sur les versants. Les valeurs de 20% et 70% sont souvent retenues comme étant des seuils dans les processus de versant, avec du ruissellement diffus ou en nappe sur les pentes <20%, du ruissellement concentré sur les pentes >20% et une certaine homogénéisation des processus au-delà de 70%, qui constitue la pente d'équilibre d'un versant.

On le voit, le coefficient de ruissellement étant multifactoriel, il est délicat d'extraire juste la contribution de la pente sur l'évolution du coefficient de ruissellement. Nous observons cependant certaines convergences qui vont nous permettre de proposer une courbe de normalisation qui prend au mieux en compte les processus physiques et les

¹⁰ https://www.researchgate.net/post/How_is_the_best_curve_to_normalize_the_relationship_between_slope_and_runoff

observations. D'une part, il semble exister un certain consensus, pour les pentes <20%, sur une augmentation rapide du coefficient de ruissellement qui serait de type logarithmique avec une linéarisation sur les pentes fortes de la gamme. Ensuite, pour les pentes >30%, il semble aussi y avoir une convergence sur une augmentation linéaire de la relation entre le coefficient de ruissellement et la pente ou une stabilisation de celle-ci. Au-delà de 70%, nous n'avons trouvé aucune référence. De fait, nous obtenons une courbe mixte avec une forme plutôt logarithmique sur les pentes de 0 à 10-15%, puis linéaire pour les pentes de 20 à 70%. La forme de cette courbe tendrait à un comportement asymptotique au-delà de 70%. Considérant que la pente hydraulique augmente conjointement avec la pente du versant, les versants pentus >70% tendraient à drainer directement les précipitations et donc aurait un coefficient de ruissellement théoriquement proche de 100%.

Ces constatations nous permettent donc d'établir une "normalisation" du facteur pente sur l'échelle 0-1 selon une courbe à tendance logarithmique avec une forte augmentation de la susceptibilité au ruissellement sur la plage 0-20%, puis un ralentissement sur la plage 20-70% pour ensuite atteindre un "plateau" de susceptibilité maximale au ruissellement de surface sur les pentes supérieures (Figure 35).

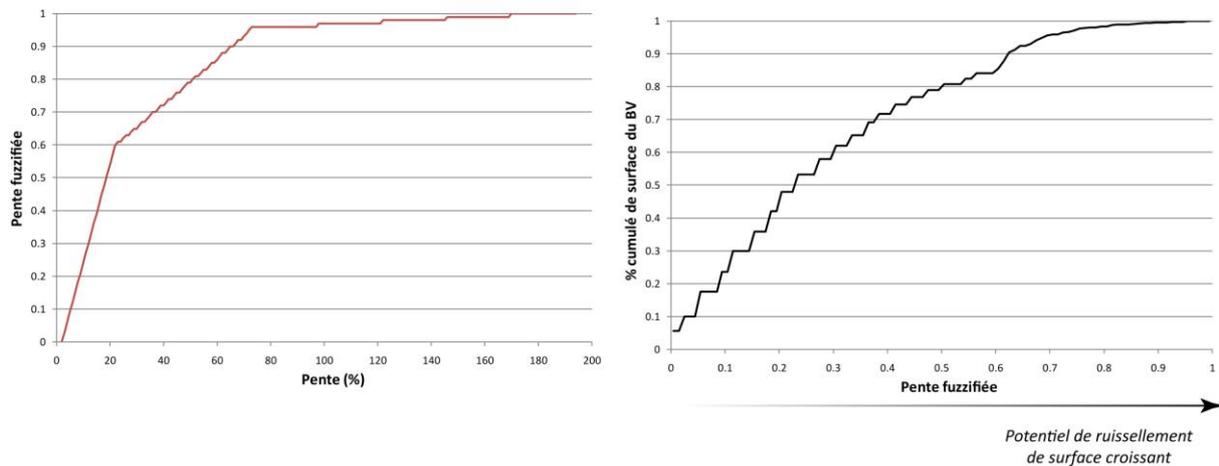


Figure 35 - Fuzzification du facteur pente (à gauche) et distribution en % de surface cumulée de la pente fuzzifiée (à droite).

La carte de la pente fuzzifiée (Figure 36) montre bien une forte susceptibilité au ruissellement de surface (selon le seul facteur "pente") le long des grandes vallées encaissées, des talus tectoniques qui marquent les grands accidents bordiers centraux, ou encore le long du talus cyclique qui encadre le Plateau de Millevaches.

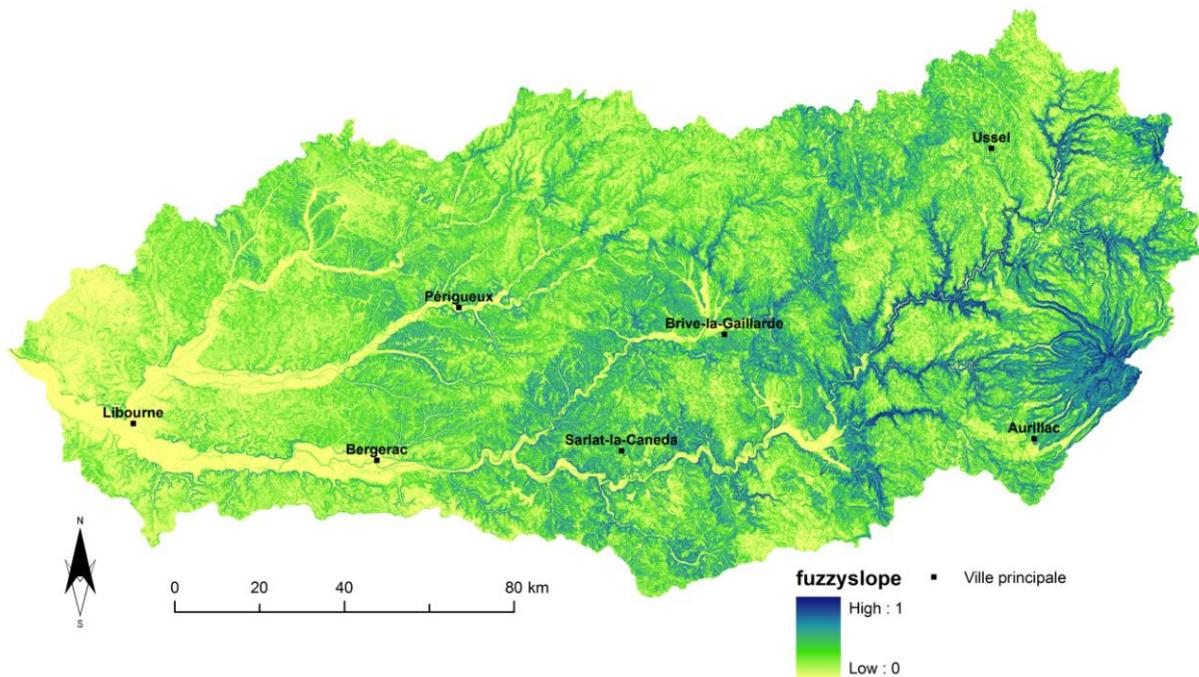


Figure 36 - Carte de la pente fuzzifiée. Plus les valeurs sont proches de 1 (bleu), plus les zones sont susceptibles au ruissellement de surface selon le seul facteur "pente".

Selon **Beven and Kirkby (1979)**, inventeurs du modèle TOPMODEL utilisé pour modéliser la réponse hydrologique d'un bassin versant aux précipitations, l'indice topographique TWI (*Topographic Wetness Index*) vise à quantifier et spatialiser le degré de saturation potentielle des sols lié aux conditions topographiques. Il faut se souvenir également que ce modèle vise à reproduire les ruissellements sur surface saturée ainsi que les apports hypodermiques. Selon leur modèle, la relation entre saturation (et donc ruissellement indépendamment des autres facteurs) et TWI est linéaire. À partir de mesures expérimentales, **Burt and Butcher (1985)** ont montré l'existence d'une corrélation positive significative entre le TWI et la saturation des sols (et donc, leur potentiel de ruissellement sur surface saturée). Cependant, les auteurs mettent en garde sur deux points :

- L'existence d'importantes colinéarités du TWI avec d'autres facteurs comme l'épaisseur des sols qui viennent fausser la relation,
- La non-linéarité de la saturation du sol qui semble contrôlée par des phénomènes d'hystérésis.

De plus, les relations expérimentales entre profondeur saturée et TWI montrent un maximum de saturation pour des valeurs de TWI normalisé proche de 0.5. Contrairement à **Beven and Kirkby (1979)**, ces auteurs annoncent donc plutôt une relation non linéaire entre TWI et saturation (et indirectement, ruissellement). Les travaux de **Famiglietti et al. (1998)** et **Merz and Plate (1997)** sur les relations entre ruissellement, saturation du sol et les autres paramètres physiques montrent une extrême variabilité des réponses hydrologiques rendant illusoire toute modélisation précise. Cependant, **Merz and Plate (1997)** ont aussi démontré que la variation spatiale du taux de saturation antécédent lors des événements pluvieux extrêmes est négligeable sur le ruissellement total en sortie de bassin versant. De fait, le TWI semble rester un facteur pertinent pour des conditions extrêmes (fortes pluies ou au contraire, détection des zones conservant une humidité relative en condition de déficit hydrique).

Dans le cadre de la PRODUCTION de ruissellement, les fortes valeurs de TWI sont indicatrices de zones à fort potentiel de saturation (et donc de ruissellement sur surface saturée), tandis que les zones à faible valeur de TWI sont par contre plutôt favorables au ruissellement de surface et sont, sur le BV de la Dordogne, très corrélées avec la pente (**Figure 32**). De fait, cet indice est un indicateur à la fois du potentiel de ruissellement de surface et de ruissellement sur surface saturée et de subsurface. Pour la PRODUCTION, la normalisation nous apparaît donc devoir être trimodale : une partie concernant les faibles valeurs de TWI favorables au ruissellement de surface, une partie concernant les fortes valeurs de TWI favorables aux ruissellements de subsurface et sur surface saturée, et une partie entre les deux où les ruissellements sont mixtes et où les potentialités de ruissellement sont plus faibles, mais plus incertaines également. La fixation des seuils se fait de manière experte, en relation avec la corrélation du TWI et de la pente (**Figure 37**). Dans le cadre de l'ACCUMULATION, nous ne tenons compte que des fortes valeurs de TWI qui expriment la capacité des sols à recevoir et accumuler les eaux de surface et à se saturer.

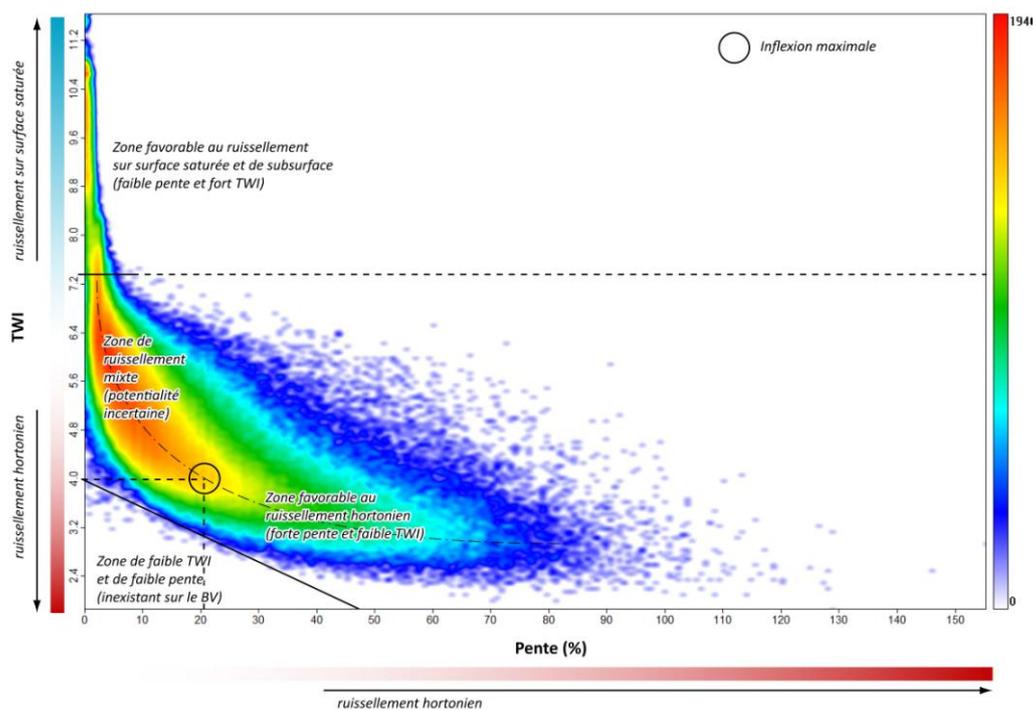


Figure 37 - Relation TWI/Pente et fixation des seuils.

On observe une forte concentration de la population des pixels du BV de la Dordogne dans la zone de faible pente et fort TWI (très forte corrélation) dont la limite se situe aux environs d'une valeur de TWI de 7. Cette zone est franche et correspond bien aux zones basses et zones humides (cette valeur de 7 est d'ailleurs également celle au-delà de laquelle la corrélation entre TWI et présence de zone humide est significative, voir **Figure 33**). On observe à l'inverse, une zone de faible pente et de faible TWI (inexistant sur le BV de la Dordogne) qui est fixée par la limite TWI = 4 et Pente ≈ 50%. Au-dessus de cette limite, la courbe entre les valeurs de TWI de 7 et 4 marque une inflexion qui fait passer d'un comportement mixte (tous les types de ruissellement) mais très incertaine, à une zone dominée par les fortes pentes et les faibles valeurs de TWI caractérisant les processus de ruissellement hortonien. Le maximum d'inflexion du nuage se situe aux alentours d'une valeur de TWI de 4. De fait, nous avons considéré une baisse linéaire de la fuzzification de 1 à 0.2 pour les valeurs de TWI allant du minimum jusqu'à 4 et une augmentation linéaire des valeurs de 7 jusqu'au maximum. La zone des valeurs de TWI entre 4 et 7 est a priori peu favorable ou très incertaine sans qu'on puisse dire non plus que le ruissellement y est nul. De fait, nous avons attribué une valeur uniforme de 0.2 permettant un ruissellement minimum sans non plus ajouter trop de poids (forte incertitude de comportement vis-à-vis du ruissellement).

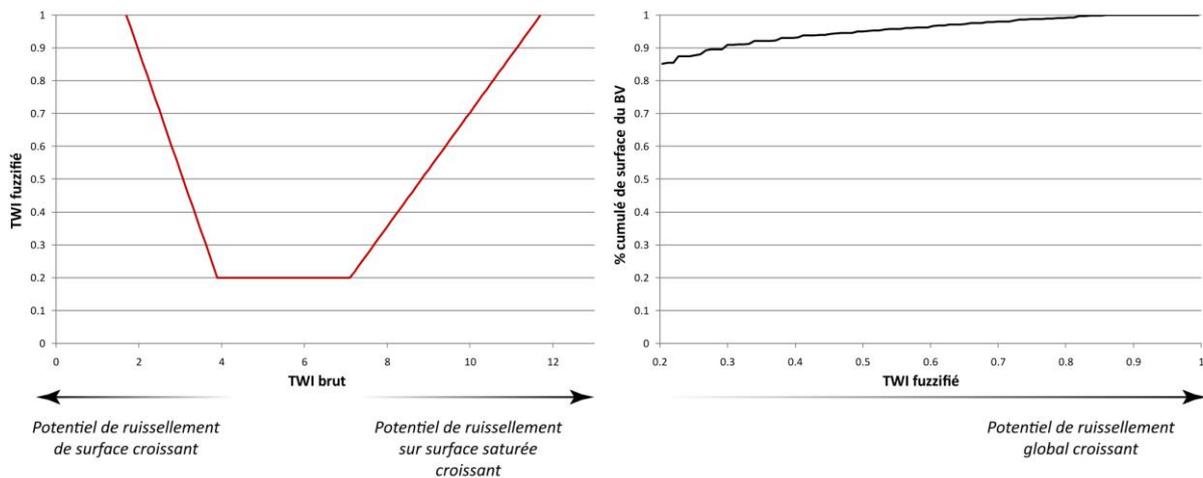


Figure 38 - Fuzzification du facteur TWI (à gauche) et distribution en % de surface cumulée du TWI fuzzifié (à droite).

La carte fuzzifiée (Figure 39) montre les zones à forte susceptibilité de ruissellement "global" vis-à-vis du TWI uniquement. On retrouve les zones basses (fond de vallée) ainsi que les zones à fortes pentes qui longent les vallées. À noter la grande part de surface "incertaine" ayant une valeur de 0.2 (85% de la surface du BV).

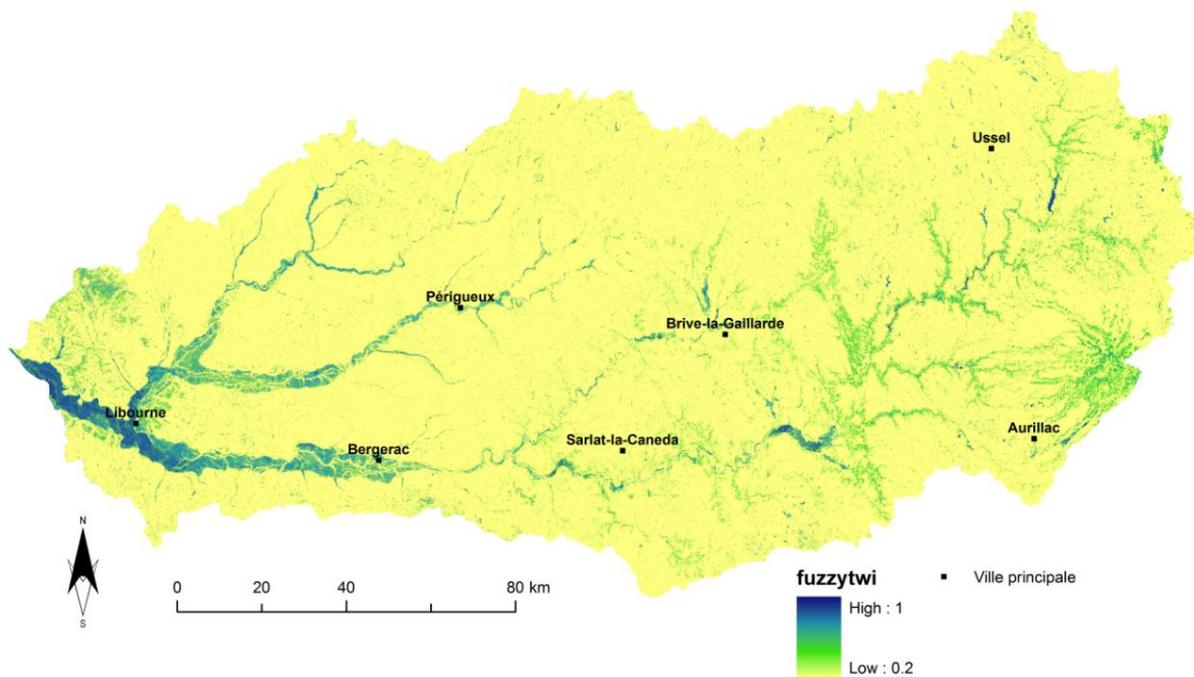


Figure 39 - Carte du TWI fuzzifié. Plus les valeurs sont proches de 1 (bleu), plus les zones sont susceptibles au ruissellement global selon le seul facteur "TWI".

Pour la carte de PRODUCTION, la méthode IRIP combine à la fois le TWI et la pente en une variable intégrée appelée "Prédisposition liée au relief". Dans notre adaptation de la méthode IRIP pour la présente étude, nous appelons cette néovariante "le facteur topographique". La fuzzification a permis de décorrélérer ces deux variables et l'application d'un opérateur flou permettra de limiter les effets de colinéarité (Figure 40).

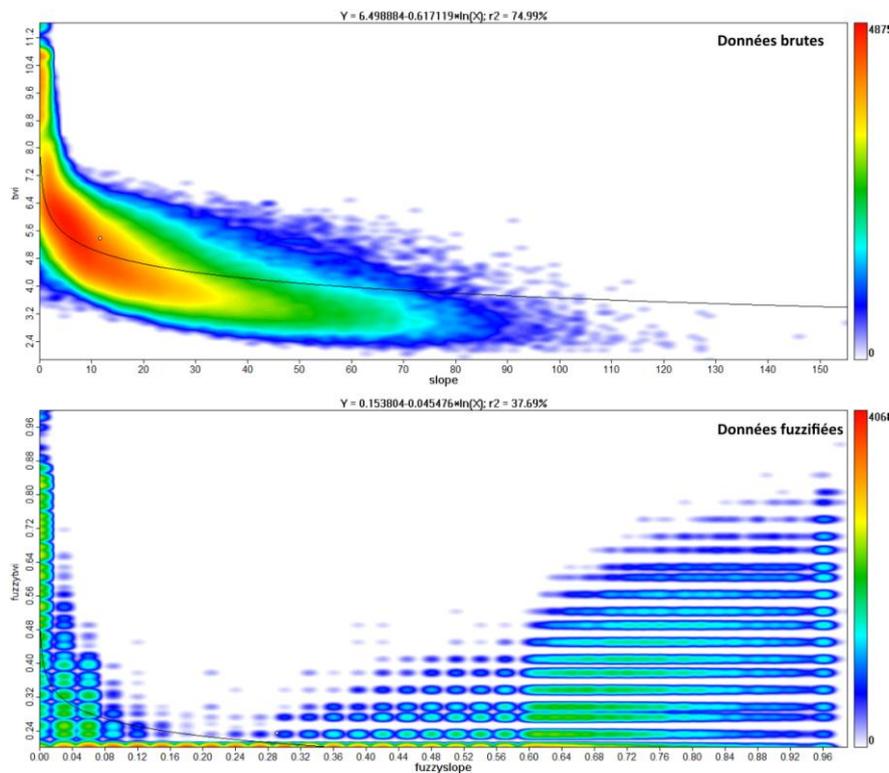


Figure 40 - Graphique croisé entre la pente et le TWI. En haut, les valeurs brutes; En bas, les valeurs fuzzifiées.

Les opérateurs flous permettent de combiner les deux cartes de la pente et du TWI fuzzifiées en une carte ayant les propriétés de ces deux cartes. Cependant, le choix de l'opérateur est déterminant pour la carte finale :

- Opérateur **AND** : pour chaque pixel, cet opérateur prend la valeur minimale des deux valeurs fuzzifiées de pente et de TWI. De fait, la carte obtenue est une carte "optimiste" qui aura tendance à sous-évaluer l'incidence du facteur topographique sur le ruissellement. Nous n'avons pas retenu cet opérateur.
- Opérateur **OR** : pour chaque pixel, cet opérateur prend la valeur maximale des deux valeurs fuzzifiées de pente et de TWI. Cette carte est plutôt "pessimiste", mais, dans le cadre de la présente étude, a l'avantage d'éviter les sous-évaluations de l'aléa, ce qui offre une "marge de sécurité" sur les résultats finaux. C'est cet opérateur qui a été (vraisemblablement) retenu par l'IRSTEA dans la méthode IRIP. Nous concernant, cet opérateur répond en effet aux exigences de "marges de sécurité" à prendre en compte dans toute cartographie du risque naturel. Nous avons donc retenu cet opérateur.
- Opérateur **PRODUCT** : pour chaque pixel, les valeurs fuzzifiées de pente et de TWI sont multipliées. Hormis pour les pixels contenant un couple de valeurs fuzzyfiées (1 ; 1), les valeurs obtenues seront toujours plus basses que les valeurs en entrée. Cet opérateur n'a pas été jugé pertinent pour bien représenter les relations Pente/TWI. Nous ne l'avons pas retenu.
- Opérateur **SUM** : cet opérateur ne correspond pas à la somme algébrique des valeurs en entrée mais à une relation du type : $1 - \text{PRODUCT}(1 - \text{TWI}, 1 - \text{PENDE})$. Les résultats obtenus sont très proches de l'opérateur OR ($r^2 = 94.63\%$) mais avec une légère surévaluation dans les classes basses. Ce modèle est donc plus "pessimiste" que le modèle OR pour les classes basses. Si nous prenons en compte que ces deux opérateurs OR et SUM produisent des cartes avec une valeur minimale de 0.2 (ce qui est déjà pessimiste), l'opérateur SUM nous semble un peu trop surévaluer le poids du facteur topographique au ruissellement. De fait, nous ne l'avons pas retenu.
- Opérateur **GAMMA** : c'est un opérateur complexe qui est la combinaison des opérateurs PRODUCT et SUM, sous la forme : $(\text{FuzzySum})^\gamma * (\text{FuzzyProduct})^{1-\gamma}$. La valeur γ permet de tendre plutôt vers un résultat proche de PRODUCT ($\gamma = 0$) ou proche de SUM ($\gamma = 1$). Délicat à manier, il nécessite de procéder par tâtonnements afin de calibrer au mieux la valeur γ . Les résultats obtenus sur le BV de la Dordogne sont systématiquement

très corrélés avec la pente ($r^2 > 90\%$) mais quasiment décorrélés du TWI. De fait, le facteur TWI est assez mal représenté par cet opérateur. Nous ne l'avons pas retenu.

Finalement, nous avons donc construit la néovariable "facteur topographique" en appliquant l'opérateur flou OR aux deux cartes fuzzifiées TWI et Pente, ce qui nous paraît être le meilleur compromis pour l'intégration des informations portées par ces deux cartes, tout en assurant une certaine marge de sécurité au résultat final sans être non plus trop "pessimiste". Le résultat final (Figure 41) donne visuellement une bonne synthèse des deux facteurs avec la prise en compte des zones basses et plaines alluviales comme favorables au ruissellement sur surface saturée, des zones de fortes pentes favorables au ruissellement de surface, la prise en compte des zones d'interfluve et plateau comme zones peu favorables au ruissellement et l'intégration des dépressions ponctuelles comme favorables au ruissellement sur surface saturée. Les distributions affichent près de 75% de la surface ayant des valeurs de susceptibilité au ruissellement global par le facteur topographique uniquement inférieures à 0.5.

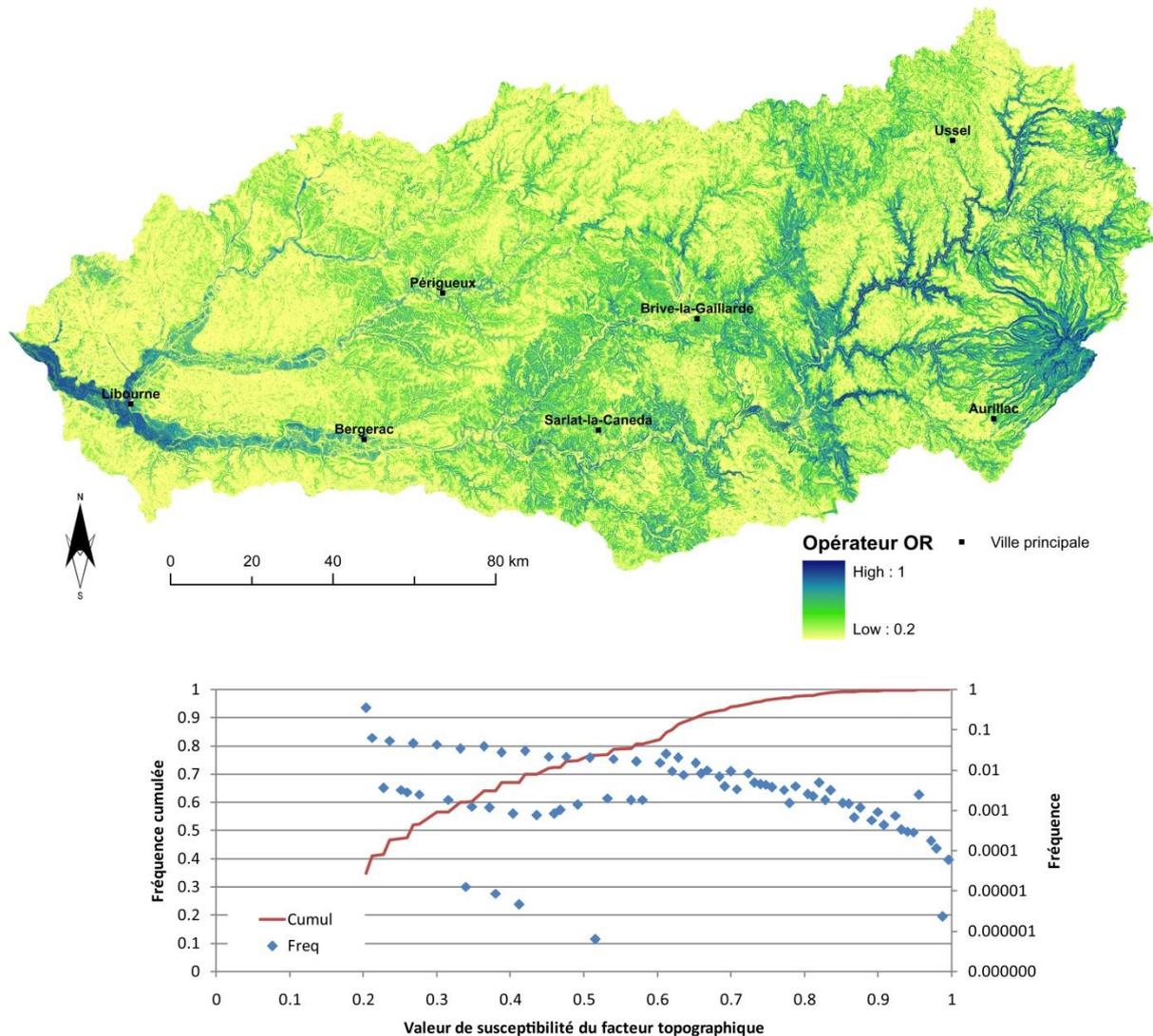


Figure 41 - Carte du facteur topographique (en haut) et distribution des valeurs (en bas).

5.1.3.2. Les facteurs pédologiques

Dans l'évaluation des facteurs pédologiques pour ce modèle, nous nous sommes efforcés d'exclure toute subjectivité et approche experte pour nous orienter vers une méthode plus numérique basée sur des postulats physiques. Les trois facteurs pédologiques sont relatifs au refus d'infiltration, liés aux propriétés texturales et structurales des sols.

Facteur de battance BAT

Initialement, la méthode IRIP prévoit d'utiliser l'érodibilité du sol pour caractériser la stabilité du sol et sa sensibilité à l'érosion. Toutefois, si l'aptitude à l'érosion n'est pas l'objectif de la modélisation, l'utilisation de la battance est plus

pertinente pour estimer le ruissellement (Casenave et al., 1989). Pour évaluer la battance à l'échelle du BV, nous nous sommes basés sur des règles de pédotransfert de Cerdan et al., 2006 et Anthoni et al. 2006, dont les seuils et l'impact des règles ont été adaptés au contexte du bassin versant de la Dordogne. La battance a été évaluée en 5 classes selon une échelle de 1 à 5 allant d'une très faible propension à la battance à une très forte propension à la battance, respectivement (Figure 42).

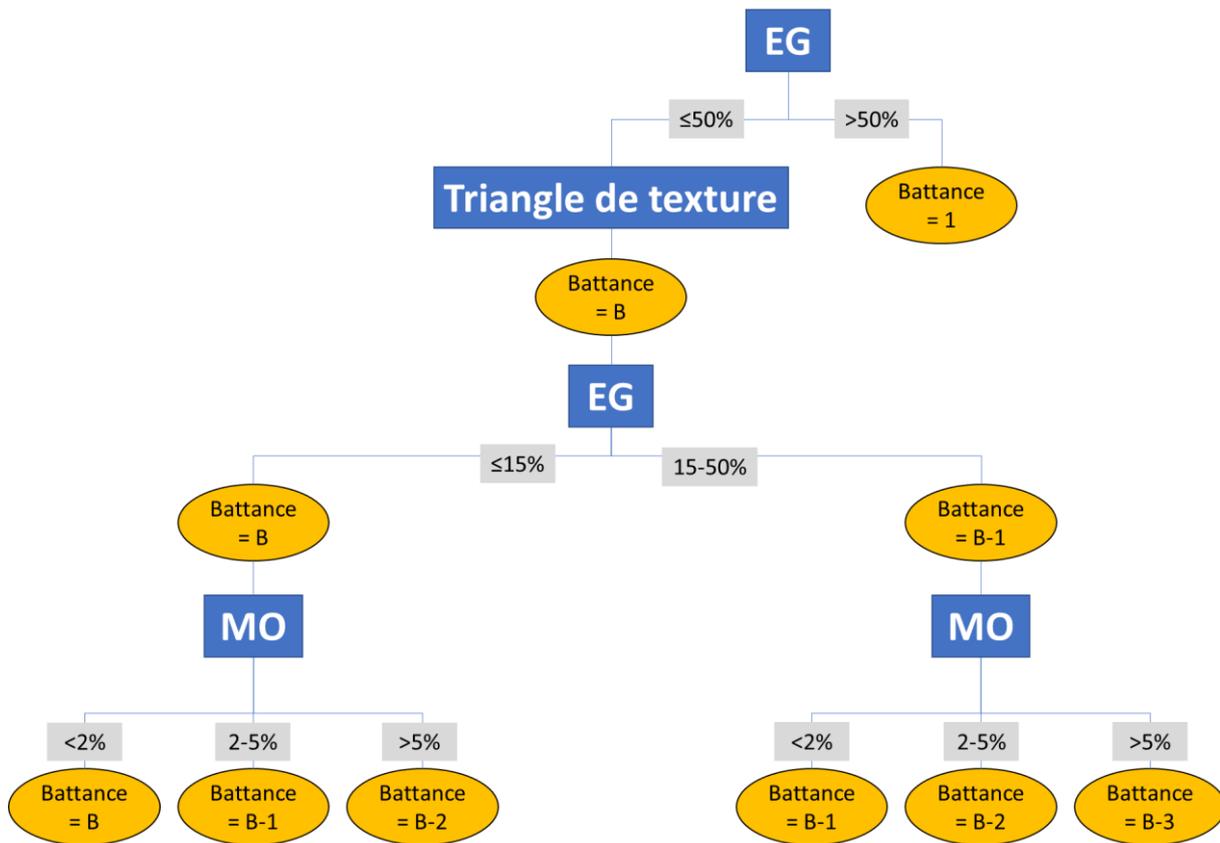


Figure 42. Organigramme des règles de pédotransfert permettant d'obtenir les valeurs des classes de battance B à partir de la teneur en éléments grossiers (EG), la texture et la teneur en matière organique (MO).

Règle 1 : Le premier paramètre pris en compte pour estimer la battance est la teneur en éléments grossiers (EG) de l'horizon de surface (Figure 42). Il a en effet été montré que les EG diminuent la dégradation physique de l'horizon et augmentent la rugosité de surface, si bien que l'infiltration se conserve mieux au cours du temps et le ruissellement diminue (Poesen et al., 1992 ; Poesen et Van Wesemael, 1995 ; Van Wesemael et al., 1995 ; Cerdà, 2001).

Dans les zones couvertes par les bases de données pédologiques, la teneur en EG a été estimée pour chaque UTS par le taux modal d'EG pour chaque horizon de surface, ou à défaut par une moyenne des taux minimum et maximum, ou à défaut (et au cas par cas selon la valeur) par la valeur minimum ou maximum. Lorsqu'aucune information n'est disponible sur la teneur en EG, la description des sols dans les différents champs NOM peut être indicatrice (« très pierreuse », « à charge en cailloux », etc.). Si aucune indication n'est disponible concernant les EG dans les bases, ce premier paramètre n'est pas pris en compte dans l'estimation de la battance qui est alors d'abord basée sur le triangle de texture (voir la Règle 2). Pour les zones non couvertes par les bases de données de sol et pour lesquelles nous avons dû produire une carte thématique (Puy-de-Dôme et Cantal), la teneur en EG par UCS est basée sur la moyenne des valeurs « Coarse-frag_eu23 » issue de « Topsoil physical properties for Europe (based on LUCAS topsoil data) » aux points de sondage inclus dans l'UCS considérée. En cas de différence notable avec nos estimations réalisées sur le terrain, une correction de cette teneur en EG a pu être réalisée.

Si la teneur en EG est supérieure à 50%, la susceptibilité à la battance devient très faible et la classe de battance est donc égale à 1 (Figure 42).

Règle 2 : Si la teneur en EG est inférieure ou égale à 50% (Figure 42), la classe de battance est estimée via une règle de pédotransfert (Figure 43) qui définit des classes de battance selon la texture de l'horizon de surface (Anthoni et

al., 2006). Si cette fonction de pédotransfert fut initialement établie pour les sols de la Région Languedoc-Roussillon, il a été montré qu'elle est utilisable sur tout le territoire Métropolitain (Cerdan et al., 2006).

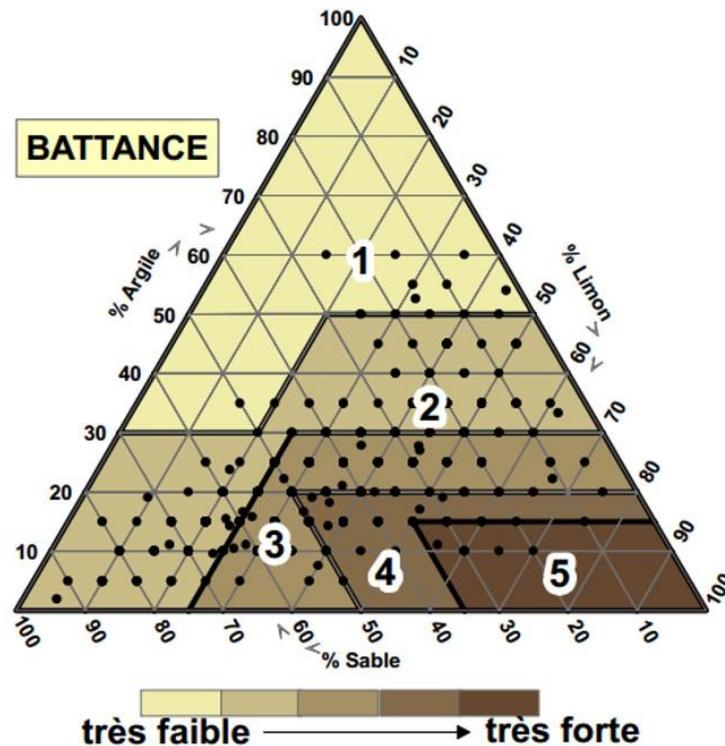


Figure 43. Règle de pédotransfert donnant la classe de battance en fonction de la texture.

Dans les zones couvertes par les bases de données pédologiques, la texture a été établie d'après la granulométrie, *i.e.* les taux modaux en argile/limon/sable, des horizons de surface, ou à défaut par une moyenne des taux minimum et maximum, ou à défaut (et au cas par cas selon la valeur) par la valeur minimum ou maximum. Lorsqu'aucune information n'est disponible sur la granulométrie, les indications de texture sont cherchées dans les différents champs NOM de l'UTS ou dans les tables qualitatives (où la texture selon un triangle est renseignée). Pour les zones non couvertes par les bases de données de sol et pour lesquelles nous avons dû produire une carte thématique (Puy-de-Dôme et Cantal), la texture est directement issue de nos observations de terrain, l'UCS pouvant être pure ou moyenner les textures évaluées.

Règle 3 : La classe de battance estimée par la texture est affinée selon le taux d'EG selon la logique de réduction de la dégradation de surface telle qu'expliquée dans la Règle 1 (Figure 42).

Règle 4 : La classe de battance est ré-affinée en considérant la teneur en matières organiques (MO). En effet, un taux de matière organique élevé diminue la susceptibilité à la battance d'un sol (Figure 42 ; *i.e.* Le Bissonais et Singer, 1993 ; Le Bissonais et Arrouays, 1997).

Dans les zones couvertes par les bases de données pédologiques, la teneur en MO a été estimée pour chaque UTS par le taux modal de MO pour chaque horizon de surface, ou à défaut par une moyenne des taux minimum et maximum, ou à défaut (et au cas par cas selon la valeur) par la valeur minimum ou maximum. Lorsqu'aucune information n'est disponible sur la teneur en MO, la description des sols dans les différents champs NOM a – en de rares occasions – pu être indicatrice. Si aucune indication n'est disponible concernant les EG dans les bases, ce premier paramètre n'est pas pris en compte dans l'affinement de la battance. Pour les zones non couvertes par les bases de données de sol et pour lesquelles nous avons dû produire une carte thématique (Puy-de-Dôme et Cantal), la teneur en MO par UCS est basée sur la moyenne des valeurs issues de la BDAT ou de la base de données européennes au sein de l'UCS considérée. Toutefois, en cas d'un écart-type important autour de la moyenne, la Règle 4 n'a pas forcément été appliquée dans les zones du Cantal et du Puy-de-Dôme.

A l'issue de l'application de ces 4 règles, nous obtenons donc une classe de battance finale. Les valeurs inférieures à 1 sont forcées à 1. La différence entre la battance affinée à l'aide des EG et MO et la battance obtenue par le triangle textural conduit à des variations généralement modérées (Figure 44).

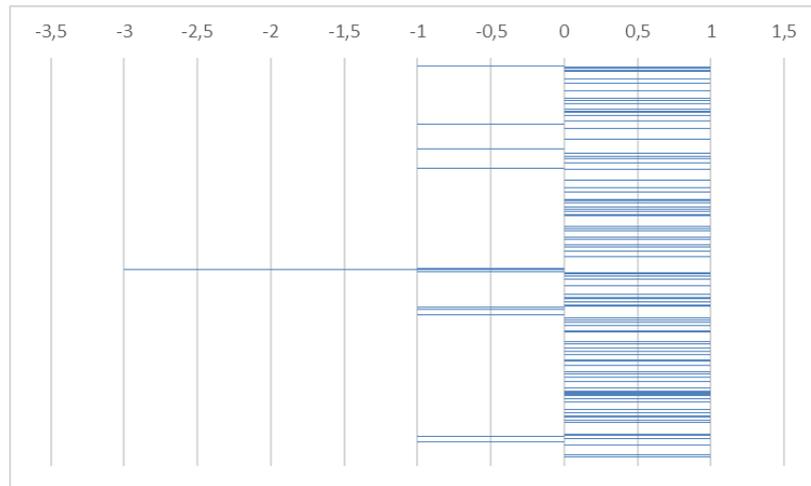


Figure 44. Différence entre la battance affinée et la battance d'après le triangle de texture (exemple pour la base de données de la Gironde incluse dans le bassin versant de la Dordogne).

En effet, dans presque 95% des UTS, les variations dues à l'affinement se limitent à un basculement d'une classe, le plus souvent vers une classe inférieure, donc moins susceptible à la battance. En cela, le cas de Gironde est particulier au sein du bassin versant de la Dordogne, puisque le plus souvent le basculement s'effectue vers une classe supérieure, donc plus susceptible à la battance (Figure 44). Cette différence s'explique par des taux en matières organiques en moyennes plus faibles dans les UTS de ce département que dans les autres départements du bassin versant. Très rarement, les variations dues à l'affinement atteignent 3 classes (jamais plus), uniquement lorsque la pierrosité de surface est supérieure à 50%, si bien que seule la Règle 1 s'applique alors (Figure 42) : ce fut le cas une fois en Gironde pour un sol sablo-limoneux moyennement organique qui passe d'une classe 4 à une classe 1 à cause d'une teneur en EG de 60% en surface.

Facteur d'épaisseur de sol PROF

Pour le facteur IRIP de prédisposition au ruissellement lié à l'épaisseur des sols PROF, il est en fait supputé que moins la couverture pédologique est épaisse, plus sa capacité de stockage en eau est faible et donc plus elle est rapidement susceptible de ruisseler.

Plutôt que de nous limiter à un classement discret et binaire – sol épais ou peu épais avec un seuil arbitraire comme il est proposé dans la méthode originelle – nous sommes partis du postulat de base qu'un sol théorique d'épaisseur nulle doit immédiatement ruisseler (PROF maximal), tandis qu'un sol profond ne ruissellera jamais (sur la base de ce seul critère d'épaisseur ! D'où PROF nul).

Le bassin versant présente des sols avec des textures parfois très drainantes et non battantes, et dans lesquels les vitesses de transfert doivent pouvoir atteindre plusieurs centimètres par minute. Ainsi, nous avons décidé que dans le cadre d'un ruissellement consécutif à un événement pluvieux intense, une profondeur de sol supérieure ou égale à 1 m correspondrait à ce facteur minimal. Même s'il est vrai que ce seuil reste en partie arbitraire, nous avons assigné une valeur continue de 0 à 10 pour l'épaisseur des sols comprise entre ≥ 100 cm à 0 cm, respectivement, ce qui a tendance à lisser les erreurs liées au choix d'un seuil. D'autre part, théoriquement, ce seuil devrait être modulé selon le type de sol, d'autant plus avec la forte diversité dans la perméabilité des sols à l'échelle d'un bassin versant ce cette taille.

Au final, nous avons donc assigné une valeur continue de 0 à 10 pour l'épaisseur des sols comprise entre ≥ 100 cm à 0 cm, respectivement.

Dans les zones couvertes par les bases de données pédologiques, l'épaisseur du sol a été établie d'après sa valeur modale, ou à défaut par une moyenne des taux minimum et maximum, ou à défaut (et au cas par cas selon la valeur) par la valeur minimum ou maximum. Lorsqu'aucune information n'est disponible sur l'épaisseur du sol, les qualificatifs sont examinés dans les différents champs NOM de l'UTS. Pour les zones non couvertes par les bases de

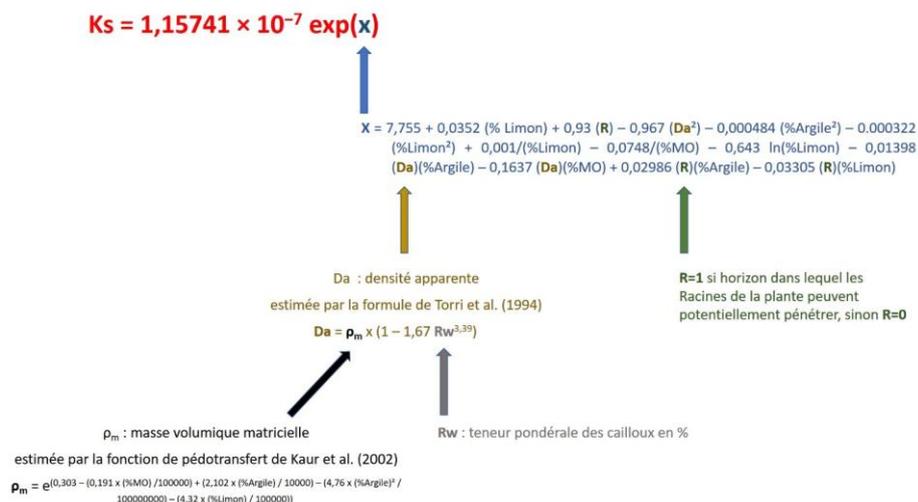
données de sol et pour lesquelles nous avons dû produire une carte thématique (Puy-de-Dôme et Cantal), l'épaisseur des sols est basée sur nos observations modulées par les données disponibles dans d'autres bases.

Facteur de prédisposition lié à la perméabilité des sols PERM

Pour le facteur IRIP de prédisposition au ruissellement lié à la perméabilité des sols PERM, il est nécessaire de calculer la conductivité hydraulique à saturation (Ks). Pour accéder à ce paramètre, de très nombreuses fonctions de pédotransfert existent (i.e. Cosby, 1984 ; Brakensiek et al., 1984 ; Campbell, 1985 ; Rawls et Brakensiek, 1985 ; Saxton et al., 1986 ; Vereecken et al, 1990 ; Wösten et al., 1997 ; Wösten et al., 1999 ; Ferrer-Julà et al., 2004 ; Saxton et al., 2006 ; Adhikary et al., 2008, etc.), reliant ce paramètre aux caractéristiques du sol (composition granulométrique, densité apparente, taux de matière organique...). Les fonctions de pédotransferts sont des modèles empiriques décrivant un paramètre de façon continue et sont le plus souvent établies par régression multilinéaire. À côté de ces relations statistiques qui sont des fonctions de pédotransfert au sens strict, les classes de fonctions de pédotransfert permettent elles d'estimer un paramètre après avoir regroupé et classé les sols selon leur composition (Bruand et al., 2003 ; Bruand et al., 2004 ; Wösten et al., 1999). Il nous a donc fallu choisir. Au vu des sols rencontrés au sein du bassin versant et de leurs diversités, nous avons d'emblée écarté :

- les classes de fonction de pédotransfert, qui auraient pu amener à des effets de seuil géographiques par les regroupements de sols effectués
- les fonctions de pédotransferts dont les équations sont basées sur des données provenant de sols trop différents de ceux rencontrés au sein du bassin versant ou qui ne représente pas assez de diversité de sols (comme les fonctions de pédotransfert issue de régression sur des sols brésiliens, des sols de Belgique...), car toute application d'une équation à un milieu différent de celui de son obtention présente un risque de biais considérable (Arrouays et Jamagne, 1993)

Il restait encore un certain nombre de fonctions de pédotransfert disponibles. Parmi celles-ci, la plupart utilisent directement des paramètres mesurés (granulométrie, matière organique, taux d'éléments grossiers), tandis que quelques-unes utilisent avec les paramètres mesurés d'autres paramètres estimés par une fonction de pédotransfert dans la fonction de pédotransfert donnant la conductivité hydraulique à saturation, c'est-à-dire des couplages de fonctions de pédotransfert. Intuitivement, on se dit que le couplage va induire une propagation d'erreur et rendre la valeur estimée moins juste ; il faut toutefois garder à l'esprit que l'utilisation d'une fonction de pédotransfert en-dehors de son contexte exact de mise au point, et même en contexte proche et très similaire, conduit à des erreurs d'estimation qui explosent rapidement et peuvent atteindre plus de 100%. En cela, l'apport d'une donnée supplémentaire, si elle introduit une erreur supplémentaire qu'il convient de garder à l'esprit, introduit aussi plus de justesse dans la mesure. Plusieurs couplages de fonctions de pédotransfert ont été testés dans un travail de thèse (Behzad, 2013), la densité apparente étant l'autre paramètre à évaluer à l'aide d'une fonction de pédotransfert. Encore une fois de nombreuses fonctions de pédotransfert existent pour évaluer la densité apparente d'un sol (le lecteur se réfèrera au travail de thèse pour les références) et encore une fois nous avons d'emblée écarté celles établies sur des contextes trop différents du bassin versant de la Dordogne (comme les sols d'Amazonie, du Brésil, sols carbonatés, sols cultivés, horizons spécifiques...). Quant au choix final du couplage, ce sont les résultats statistiques de cette thèse et quelques essais sur nos bases de données pédologiques qui nous ont guidés. Nous avons ainsi choisi la fonction de pédotransfert de Wösten et al. (1999) pour estimer la conductivité hydraulique à saturation (Ks) :



raisonnements et calculs lors de l'élaboration de la méthodologie de pondération, nous avons cherché à faire varier ce facteur pédologique combiné (nommé SOL) des 3 facteurs pédologiques (BAT, PERM et PROF pour battance, perméabilité et profondeur, respectivement) entre 0 et 1 (respectivement, peu à très susceptible au ruissellement). Nous sommes repartis du fonctionnement physique de l'eau dans le sol :

- En cas de fortes arrivées d'eau en surface (par précipitations ou par apports *via* du ruissellement de l'amont), c'est en premier lieu la battance qui va jouer sur le ruissellement en ce lieu.
- Si l'eau s'infiltré, passé la croûte de battance ou la surface si elle n'existe pas, c'est ensuite la perméabilité du profil qui est importante, c'est-à-dire sa capacité à évacuer l'eau qui pénètre le sol.
- Enfin, l'eau étant rentrée dans le sol et s'infiltrant en profondeur (on néglige donc quelque part les phénomènes latéraux qui sont certes pris en compte par un autre facteur IRIP de prédisposition au ruissellement mais qui devraient ici aussi jouer un rôle interne sur le facteur pédologique même s'il reste modeste dans la plupart des situations), et c'est donc l'épaisseur du sol qui intervient dans sa capacité ou non à stocker l'eau qui s'infiltré et par conséquent le ruissellement de surface.

À ces postulats de fonctionnement de base, nous avons adjoints 3 conditions aux limites (en plus de la condition de variation de SOL entre 0 et 1), ainsi qu'une condition de forme afin de conserver une progressivité dans la valeur SOL et une symétrie de distribution :

- Un sol avec BAT=0, PERM=0 et PROF=0 (non battant, très perméable et profond) devra avoir un facteur pédologique SOL=0
- Un sol dont la PROF=0 (sol théorique de profondeur nulle) ou la PERM=0 (sol très peu perméable) devra avoir un SOL=0
- Un sol potentiellement très battant (BAT=4) aura un SOL=1 seulement si la profondeur et/ou la perméabilité sont également favorables au ruissellement
- Un sol de battance moyenne, de perméabilité moyenne et de profondeur moyenne doit présenter un facteur SOL proche de 0,5 avec une certaine tolérance

L'ensemble de la démarche peut se résumer par l'organigramme suivant (Figure 46).

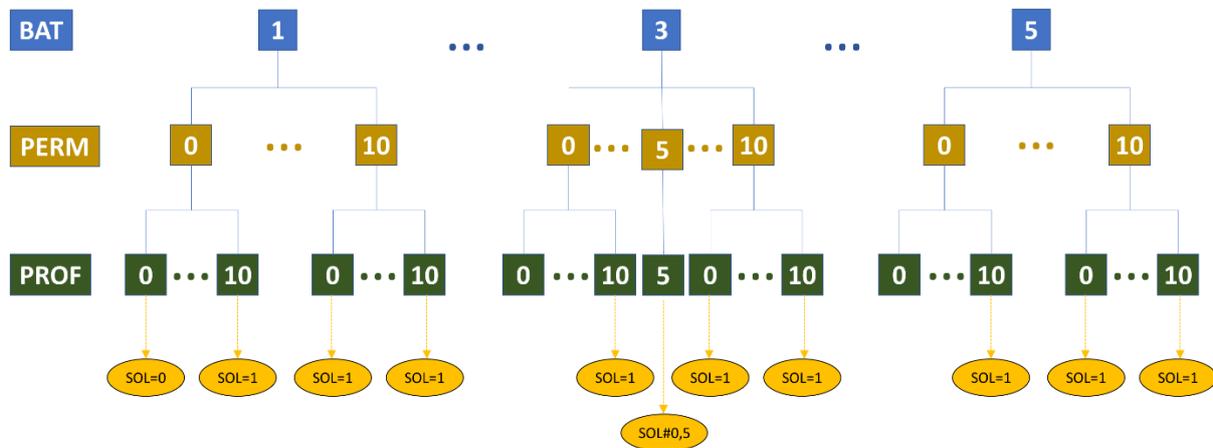


Figure 46. Organigramme du principe de pondération des facteurs pédologiques battance, perméabilité et profondeur pour le calcul du facteur pédologique SOL

Afin de satisfaire l'ensemble de ces conditions, nous ne pouvons pas donner un poids fixe à chacun des 3 facteurs pédologiques – BAT, PERM et PROF – dans le facteur pédologique final SOL, en dehors du fait que nos tests ont montré que cela induisait toujours une asymétrie même si elle était inversée par rapport à la somme des 3 facteurs comme précédemment expliqué.

En conséquence, nous avons fait une pondération inverse PERM/PROF par BAT avec des valeurs de BAT re-seuillées pour satisfaire les conditions et obtenir une distribution mathématiquement correcte, *i.e.* étalée et pseudo-gaussienne, tel que :

$$SOL_{0 \rightarrow 1} = (BAT^* + PERM^* + PROF^*) / 100$$

Pour obtenir BAT*, nous avons joué sur la valeur assignée à chacune des classes BAT 1 à 5, de façon à ce que la situation moyenne soit proche de SOL=50 et sans trop déformer la distribution gaussienne. Le re-seuillage de BAT en BAT* s'est fait selon le **Tableau 10**.

Tableau 10. Tableau des seuils pour la conversion de BAT en BAT*.

BAT	1	2	3	4	5
BAT*	0	15	35	55	70

Au final, l'équation de calcul du facteur pédologique s'écrit :

$$SOL_{0 \rightarrow 1} = (BAT^* + PERM^* + PROF^*) / 100$$

avec

$$PERM^* = [(PERM / 10)^2 \times (100 - BAT^*)]$$

$$PROF^* = (PROF / 10)^2 \times (100 - BAT^* - PERM^*)$$

Théoriquement, on pourra vérifier que toutes les conditions aux limites posées sont respectées et que la condition de forme l'est aussi, puisque cette équation donne une valeur de SOL de 0,51 en situation moyenne (BAT=3 soit BAT*=35, PERM=5 et PROF=5)

Si on observe les effectifs par gamme de SOL (gamme de valeur de SOL par combinaisons possibles de BAT/PERM/PROF), on constate une décroissance de SOL=1 à SOL=0 (**Figure 47**): en effet, pour la classe de battance la plus élevée BAT 5, la valeur de SOL peut varier de 0,7 à 1, tandis que pour la classe de battance la plus faible BAT 1, la valeur de SOL peut varier de 0 à 1, si bien que plus les valeurs de SOL sont élevées, plus il y a tendance à l'accumulation, ce qu'on appréhende très bien visuellement (**Figure 48**). Notre méthodologie permet donc théoriquement d'exploiter pleinement l'amplitude des valeurs possibles du facteur SOL. Au final, on obtient une courbe de fréquence cumulée sans à-coups (**Figure 47**), montrant que les seuillages et la pondération inverse choisie permettent, comme désiré dans notre logique méthodologique, de s'affranchir de ruptures dans la continuité du paramètre SOL et donc d'effets de seuil dans les cartes thématiques qui en découleront.

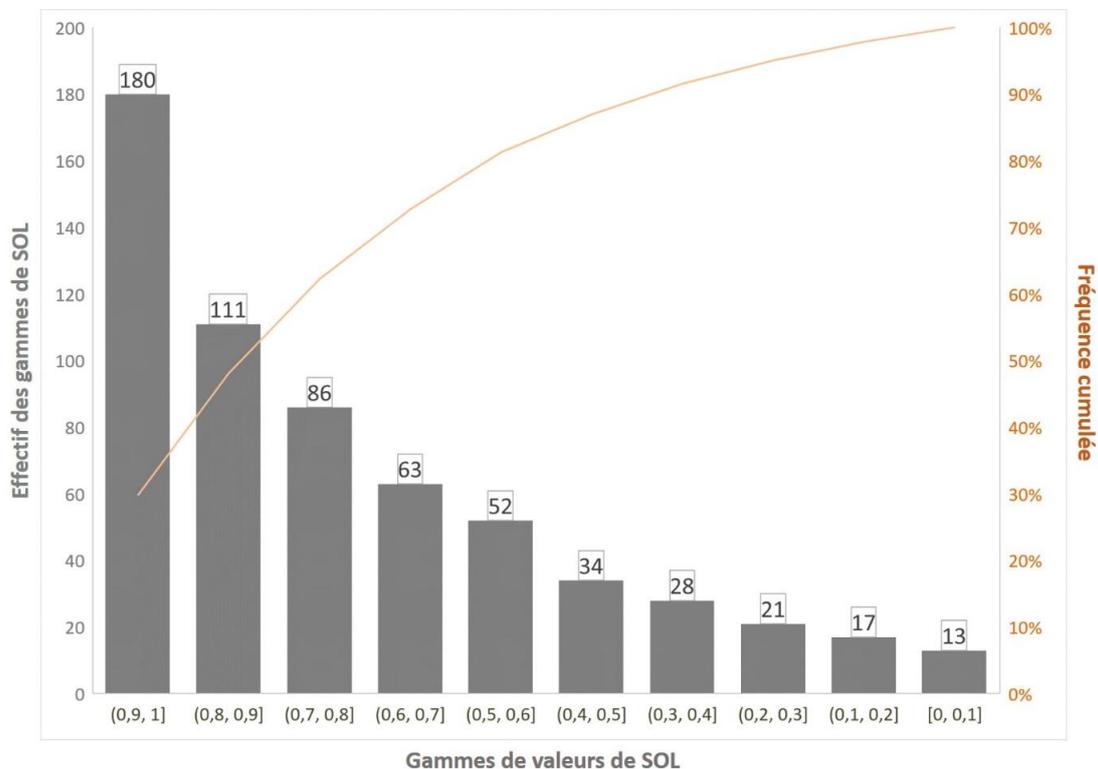


Figure 47. Effectifs et fréquences cumulées des combinaisons possibles BAT/PERM/PROF par gammes de valeurs de SOL d'amplitude 0,1.

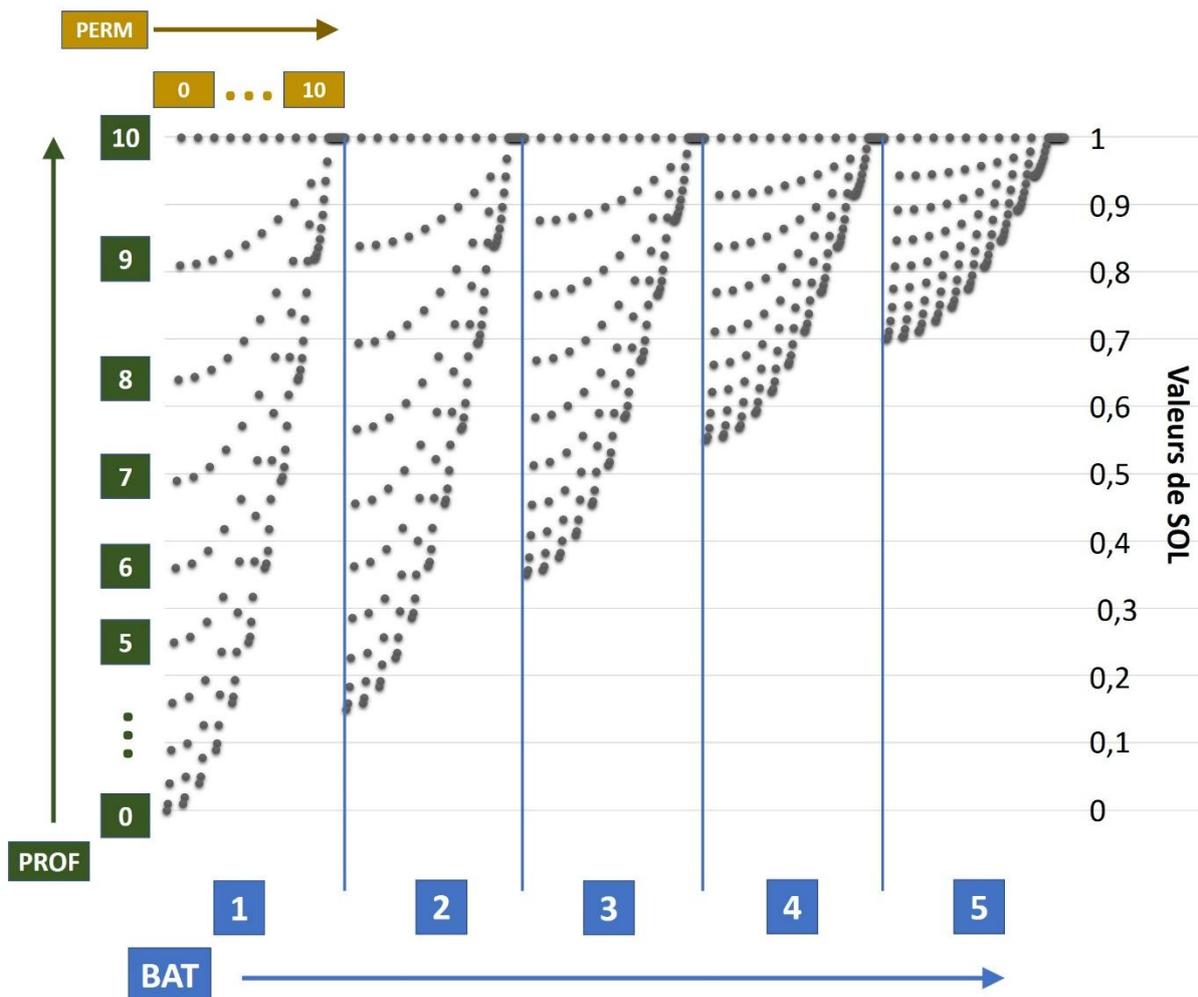


Figure 48. Distribution des valeurs de SOL selon les facteurs BAT, PERM ET PROF.

Finalement, lorsque nous appliquons la méthodologie présentée à nos données pour produire la carte thématique de SOL, on obtient des valeurs de SOL comprises entre 0,04 et 1 au sein du BV de la Dordogne (Tableau 11). L’amplitude la plus faible se trouve dans la carte thématique issue de la partie du BV cartographiée par nos soins en Puy-de-Dôme et Cantal. Pour les cartes thématiques issues des données existantes, l’amplitude la plus faible se trouve en Puy-de-Dôme (sur le jeu de donnée du RRP qui couvre une superficie réduite et présente donc moins de variabilités spatiales physiques et géographiques) et la plus forte se situant en Dordogne, département à cheval sur plusieurs ensembles géomorphologiques différents (Figure 4). On note un partitionnement plus fort du paramètre SOL en Gironde, dû à la diversité de sol allant de profils sableux drainants à des profils limoneux battants à nappe. On voit donc que notre méthodologie de calcul du facteur pédologique permet de pleinement exploiter l’amplitude théorique du facteur avec un minimum de ruptures dans la continuité, avec une distribution des valeurs harmonieuses entre les quartiles (Tableau 11).

Tableau 11. Statistique des valeurs du facteur SOL au sein du BV de la Dordogne.

Département (Origine des données)	16 (RRP)	17 (RRP)	19 (RRP+CPF)	23 (RRP)	24 (RRP)	33 (RRP)	46 (RRP)	63 (RRP partiel)	87 (RRP)	15+63 (terrain)	Ensemble du BV
1 ^{er} quartile	0,45	0,31	0,32	0,35	0,34	0,18	0,26	0,19	0,44	0,35	0,32
Médiane	0,57	0,52	0,48	0,46	0,45	0,38	0,45	0,41	0,59	0,48	0,48
3 ^{ème} quartile	0,70	0,70	0,62	0,65	0,63	0,59	0,64	0,55	0,69	0,56	0,63
Minimum	0,08	0,13	0,04	0,08	0,04	0,04	0,04	0,09	0,08	0,10	0,04
Maximum	0,83	0,83	0,88	0,93	1,00	0,95	0,95	0,77	0,93	0,76	1,00
Amplitude	0,76	0,71	0,84	0,85	0,96	0,91	0,91	0,67	0,85	0,66	0,96

5.1.3.3. L'occupation du sol

L'occupation du sol reste une donnée fondamentale pour la modélisation du ruissellement. Les relations entre le type d'occupation du sol et le coefficient de ruissellement sont toujours délicates à établir du fait de l'aspect multifactoriel du ruissellement. Cependant, nous avons à notre disposition deux outils pour nous aider à établir une gradation entre 0 et 1, de la susceptibilité des occupations des sols au ruissellement de surface.

Le premier outil est le travail de classement réalisé pour l'implémentation de la méthode SCS-CN. Pour rappel, les données du RPG 2012 et de Corine 2012 ont été classées en fonction des classes déjà établies dans le rapport TR-55 (United States Department of Agriculture, 1986). Ce classement fournit, par type d'occupation du sol et par type de sol, un numéro de courbe (CN) permettant de simuler le ruissellement. Plus ce CN est élevé, plus le coefficient de ruissellement est élevé également. La moyenne pondérée des CN par type d'occupation du sol et de sol nous semble être une bonne estimation de la susceptibilité au ruissellement. De fait, nous avons normalisé les valeurs moyennes des CN par type d'occupation du sol en été et au printemps afin d'avoir deux cartes de susceptibilité de l'occupation du sol (Figure 49).

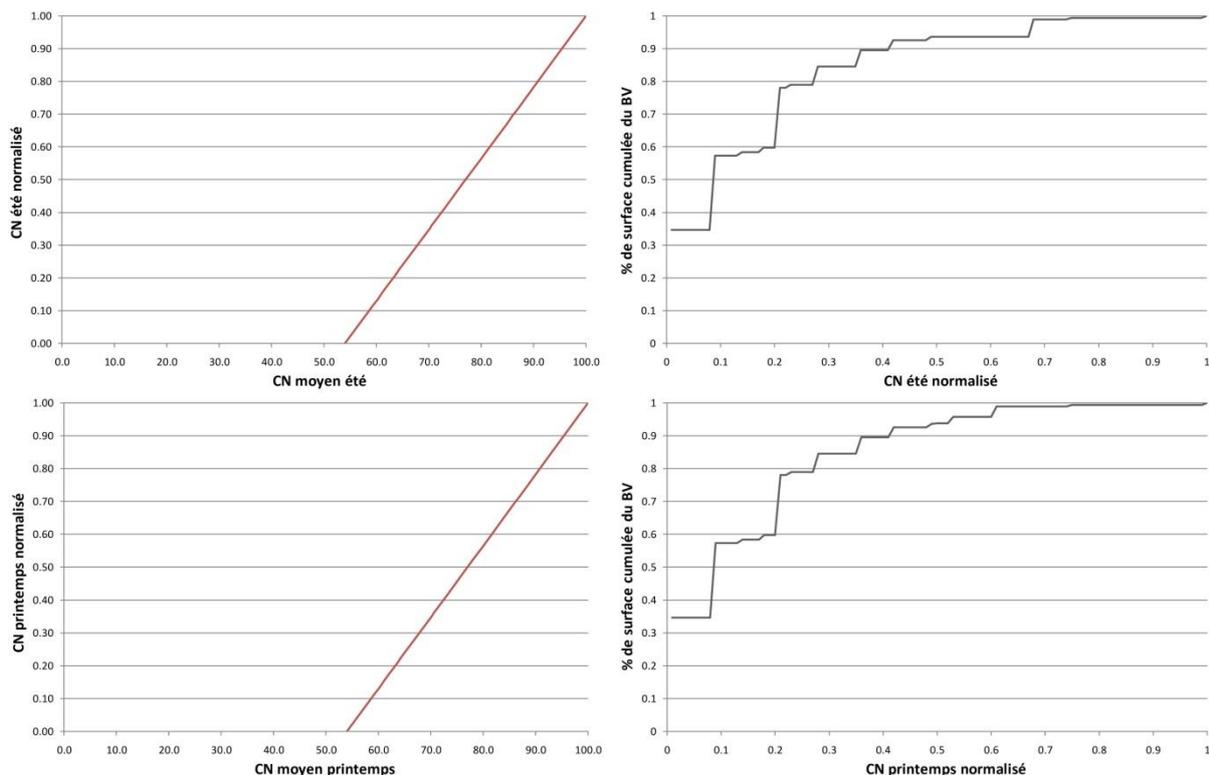


Figure 49 - Normalisation des valeurs CN.

Le second outil est l'utilisation des cartes de *C-Factor* utilisé pour l'implémentation du modèle de calcul de Pertes en Terre (RUSLE). La carte du *C-Factor* exprime la sensibilité de l'occupation du sol à l'érosion des terres, et donc leur capacité d'interception des pluies. Panagos et al. (2015) ont produit récemment une carte du *C-Factor* à l'échelle de l'UE, à une résolution de 100m^{11} . Les auteurs proposent une compilation des données *Corine Land Cover*, des statistiques agricoles et des analyses par photo-interprétation. Le classement du *C-Factor* se rapproche de celui réalisé avec le SCS-CN avec cependant quelques différences de détail. Comme pour la carte précédente, c'est une carte catégorielle ce qui implique une normalisation standard de 0 à 1 (Figure 50). Les valeurs brutes sur le BV de la Dordogne s'étalent de 0.00026095 (forêt mixte) à 0.44979 (zone découverte). À noter cependant que cette carte de *C-Factor* exclut les zones urbaines et artificialisées. Le détail des types de couverture agricole étant moins précis et la maille de calcul étant moins fine (100 m contre 25 m pour le SCS-CN), nous n'utiliserons pas cette donnée pour la modélisation. Cependant, elle nous servira pour comparer nos résultats et ajuster les fortes divergences s'il y a lieu.

¹¹ Données disponibles à l'adresse suivante : <http://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/cover-management-factor-c-factor-eu>

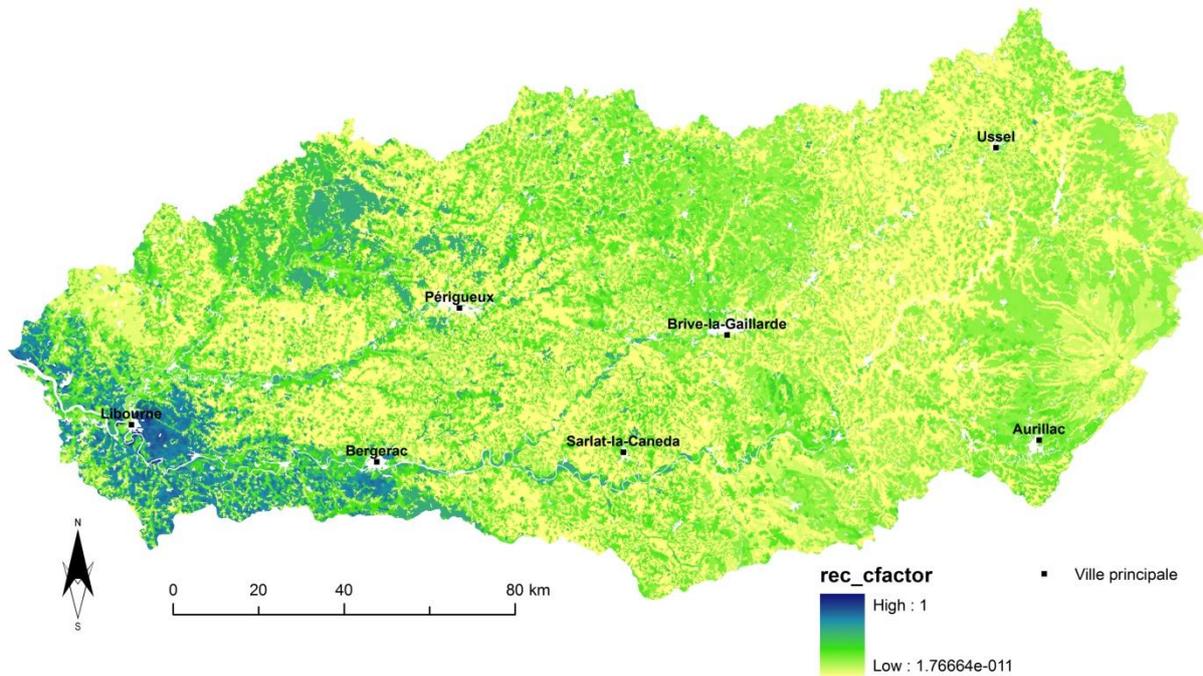


Figure 50 - C-Factor normalisé de 0 à 1.

5.1.4. Modification des facteurs d'entrée : le TRANSFERT

5.1.4.1. Le facteur pente

La pente intervient dans l'accélération du ruissellement et donc, le temps de concentration des lames d'eau dans les parties aval. Il est pris en compte par la méthode IRIP. Cependant, de nombreuses études montrent que la longueur de la pente joue aussi sur l'accélération des flux et donc, le temps de concentration (Wishmeier, 1966; Wishmeier and Smith, 1960, 1978). De fait, nous avons utilisé le LS-Factor, facteur prenant en compte à la fois la pente locale et la position du pixel par rapport à la longueur du versant. Cet indice est calculé en utilisant la pente et l'aire drainée dans l'algorithme mis au point par Desmet and Govers (1996), adapté aux topographies complexes. L'indice obtenu, sans unité, prend en compte les variations de pente et de longueur et est non-linéaire, intégrant ainsi les processus de variations de la vitesse de l'eau ruisselée. De fait, afin de conserver la distribution initiale de ce facteur, nous avons procédé à une normalisation classique (Figure 50 et Figure 51).

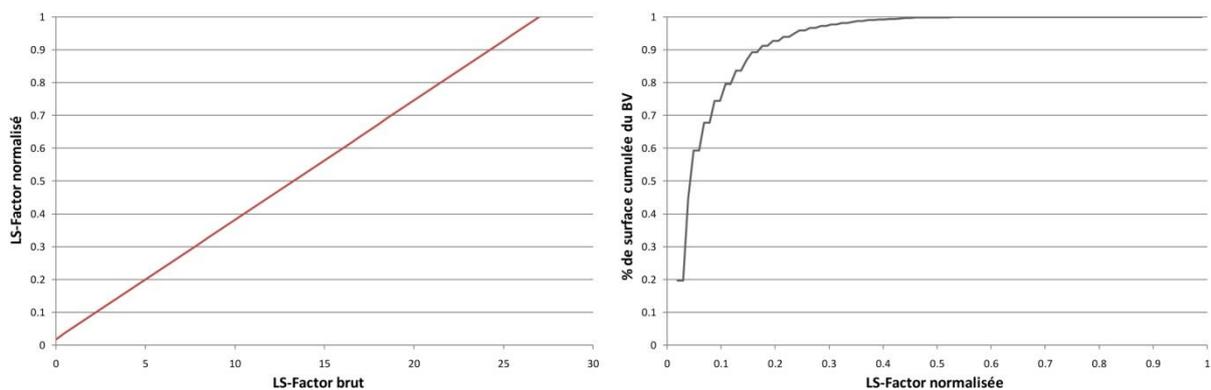


Figure 51 - Normalisation du LS-Factor (à gauche) et distribution en % de surface cumulée du LS-Factor normalisé (à droite).

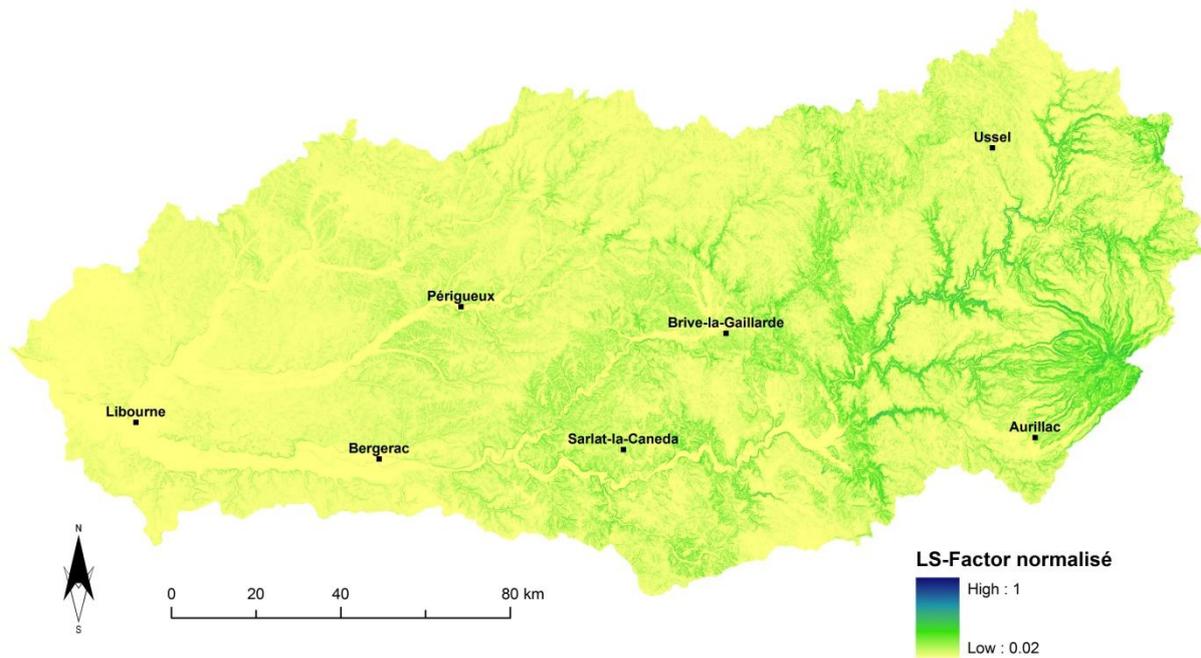


Figure 52 - Carte du LS-Factor normalisé. Plus les valeurs sont proches de 1 (bleu), plus les zones sont susceptibles au ruissellement global selon le seul facteur "LS-Factor".

5.1.4.2. Les ruptures de pente

Ce facteur est utilisé dans la méthode IRIP initiale pour la cartographie des transferts et des accumulations. La rupture de pente est calculée en fonction de la différence de pente entre le pixel concerné et la moyenne (ou médiane) des pentes des pixels amont. Dans le cas du transfert, une rupture de pente positive (la pente locale est supérieure à la pente moyenne amont) accélère le transfert et est donc considérée comme un facteur de prédisposition favorable au ruissellement. Dans le cas de l'accumulation, c'est au contraire une rupture de pente négative (pente locale inférieure à la moyenne des pentes amont). Le descriptif de la méthode reste très laconique sur l'aire considérée en amont (toute l'aire drainée par le pixel ou juste les pixels amont limitrophes) et ne prend pas en compte la pente aval au pixel considéré. **Cependant, nous avons testé en prenant en compte la moyenne de la pente de l'aire drainée pour chaque pixel à laquelle nous avons retranchée la valeur de la pente locale.** La carte obtenue est délicate à utiliser car elle exprime à la fois les transferts sur les versants par ruissellement diffus (transferts non concentrés, valeurs négatives) et les transferts concentrés dans les thalwegs (valeurs positives, d'accumulation d'eau). Selon la méthode IRIP, il ne faudrait tenir compte ici que des valeurs exprimant une accélération des flux, soit les valeurs négatives, ce qui exclut les écoulements concentrés dans les organes hydrologiques d'ordre 1 ou 2 (tête de bassin versant). Ce choix nous semble pertinent car retenir les valeurs > 0 viendrait à prendre en compte les axes d'écoulement concentrés qui sont déjà pris en compte par la donnée des axes de transfert, obtenue par le calcul d'accumulation de flux (voir après, dans la section des paramètres hydrologiques), ce qui induirait un risque de redondance d'informations. De fait, nous avons considéré une gradation linéaire de la susceptibilité au ruissellement diffus depuis la valeur 0 jusqu'à la valeur la plus petite (-60). Les valeurs > 0 ont été considérées comme ne participant pas au transfert par ruissellement diffus et nous leur avons attribué la valeur 0 (Figure 53).

La carte donne les zones bordières des entailles hydrographiques comme étant les plus susceptibles au ruissellement diffus avec l'apparition de quelques couloirs de ruissellement concentré au niveau des vallons d'ordre 1 à 2 (Figure 54).

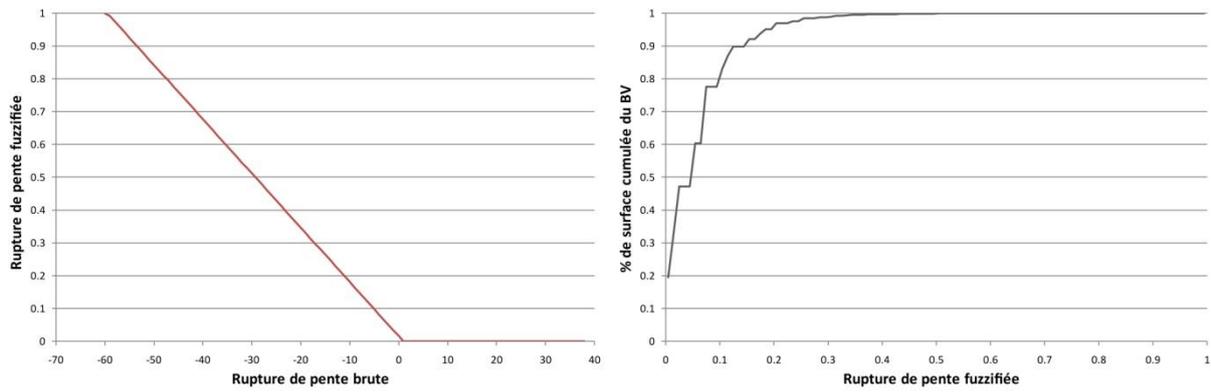


Figure 53 - Fuzzyfication du facteur Rupture de Pente (à gauche) et distribution en % de surface cumulée de la Rupture de Pente fuzzifiée (à droite).

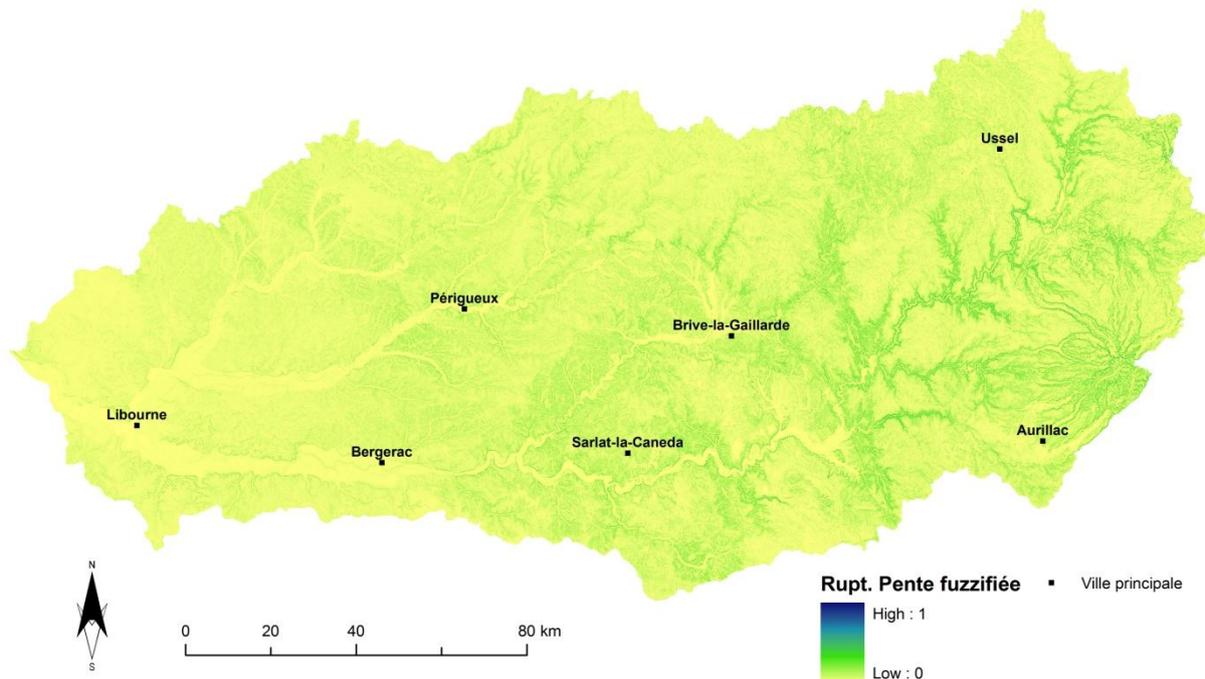


Figure 54 - Carte des Ruptures de Pente fuzzifiées. Plus les valeurs sont proches de 1 (bleu), plus les zones sont susceptibles au ruissellement global selon le seul facteur "Rupture de pente".

5.1.4.3. Les axes de transfert

Les axes de transfert sont déterminés à partir d'un traitement hydrologique du MNT visant, pour chaque pixel, à déterminer le pixel de sortie des flux (pixel le plus bas normalement). Simple sur le principe, il existe cependant plusieurs algorithmes disponibles pour générer ces axes de transfert (Gruber and Peckham, 2009). Nous avons utilisé deux algorithmes prenant en compte les effets de divergence de flux afin de mieux spatialiser les zones de concentration (transfert par concentration de flux) des zones de divergence (transfert diffus). Le modèle de type *Mass-Flux Method* (MFM) est basé sur une sectorisation de chaque pixel en 4 quartiers autorisant ainsi, pour chaque pixel, des écoulements multiples. Le résultat de cette méthode sur le BV Dordogne est intéressant, mais provoque une apparente sur-dispersion des flux avec, comme première conséquence, l'assèchement artificiel de certains thalwegs (ce qui n'est pas réaliste). La seconde méthode est de type *Multiple Flow Direction* (MFD). Elle fonctionne pixel par pixel, mais contrairement aux algorithmes classiques d'accumulation de flux comme l'algorithme D8, autorise une répartition des flux vers les 8 pixels adjacents, selon la formule suivante (Équation 6) :

$$d_{NBi} = \frac{\tan(\beta_{NBi})^v \cdot L_{NBi}}{\sum_{j=1}^8 (\tan(\beta_{NBj})^v \cdot L_{NBj})}$$

Équation 6 - Algorithme de cartographie des flux (multidirectionnel). Avec d_{NBi} , la fraction drainée vers le pixel "recevant" le flux, β la pente du pixel, L_{NBi} la longueur de drainage et v , le coefficient de dispersion

Cet algorithme donne des résultats plus satisfaisants avec une concentration "logique" des flux dans les thalwegs d'ordres 1 et 2 (selon la classification de Strahler) et les concavités, et une dispersion autour des convexités. C'est ce modèle que nous avons retenu pour la modélisation. La distribution obtenue est fortement logarithmique ce qui implique de fuzzifier la donnée par un reclassement selon une échelle logarithmique afin d'obtenir une dispersion qui ait un sens spatialement (Figure 55).

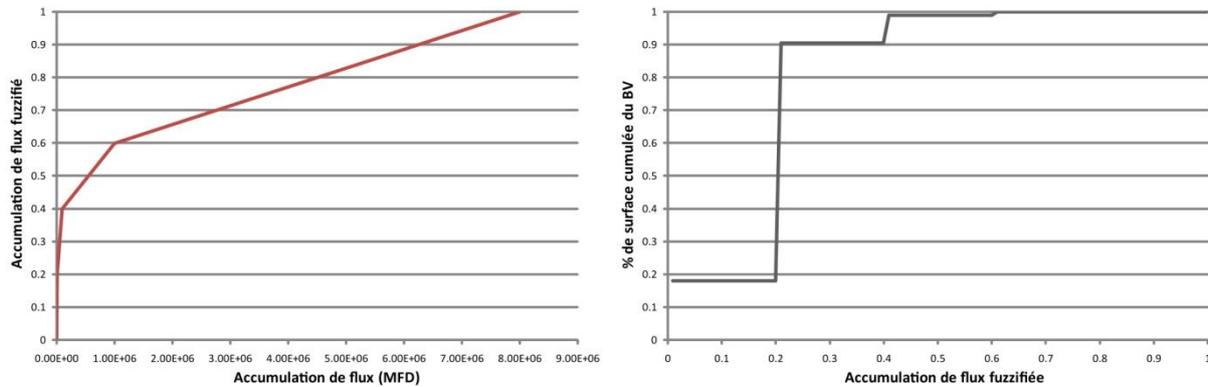


Figure 55 - Fuzzyfication du facteur d'accumulation de flux (à gauche) et distribution en % de surface cumulée de l'accumulation de flux fuzzifiée (à droite).

Globalement, les versants ont tendance à générer du ruissellement diffus ce qui fait que les zones de transfert sont limitées aux axes de thalwegs et concavités marquées (Figure 56).

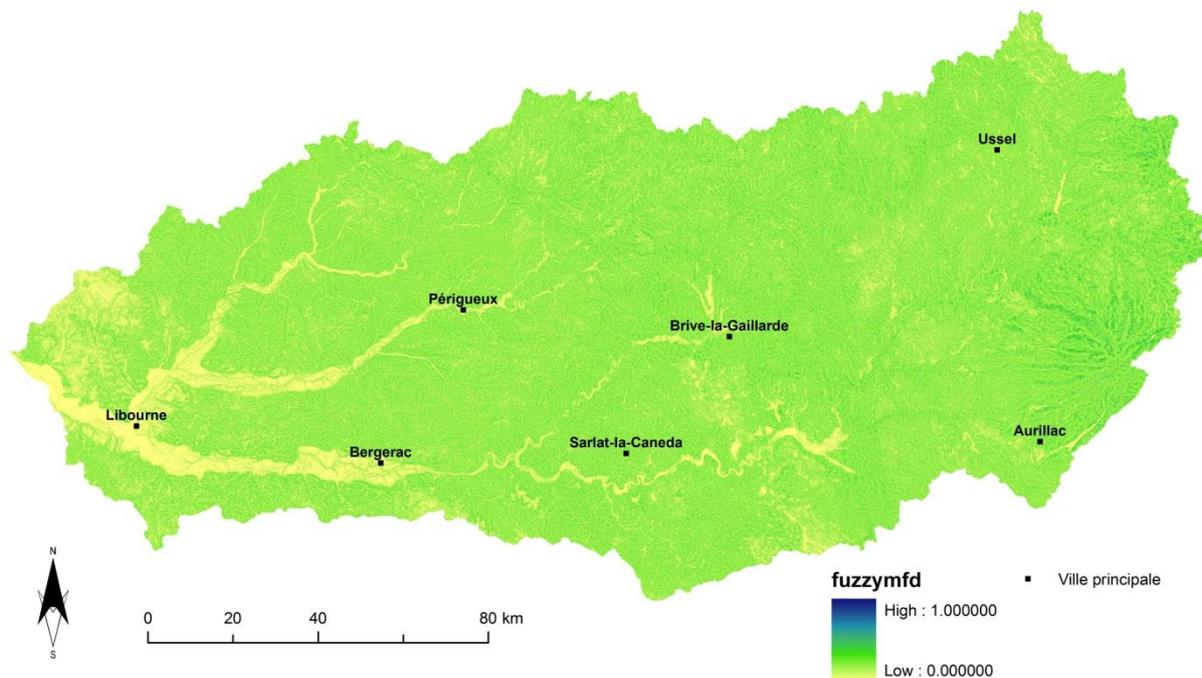


Figure 56 - Carte des accumulations de flux fuzzifiées. Plus les valeurs sont proches de 1 (bleu), plus les zones sont susceptibles au ruissellement global selon le seul facteur "Accumulation de flux".

5.1.4.4. L'indice de compacité

La méthode IRIP utilise l'indice de compacité de Gravelius (rapport du périmètre du BV au périmètre du cercle ayant la même surface que le bassin versant) qui a par la suite été remplacé par le facteur de forme de Horton (rapport de la surface du bassin versant au carré de sa longueur), plus facile à implémenter dans un SIG raster. Cependant, la méthode IRIP ne précise pas quelle est la taille du bassin versant élémentaire pour implémenter les calculs. En théorie, cet indice de compacité vise à qualifier le "temps de concentration", pas réellement la capacité à transférer qui existera toujours quelle que soit la forme du bassin versant. Nous avons donc cherché un indice plus pertinent,

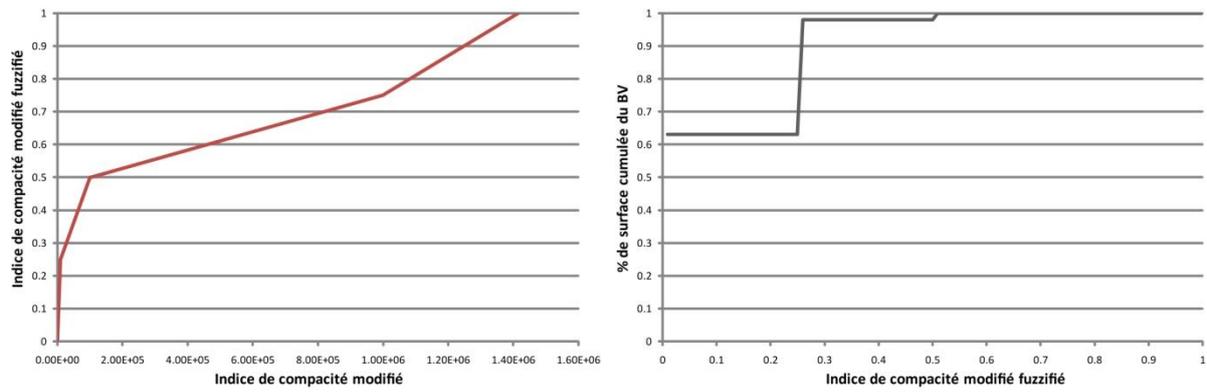


Figure 58 - Fuzzyfication de l'indice de Horton modifié (à gauche) et distribution en % de surface cumulée de l'indice de Horton modifié fuzzifié (à droite).

La distribution spatiale de cet indice se structure essentiellement autour des thalwegs d'ordre 1 à 2, voire 3, avec une augmentation de l'indice au début du thalweg et surtout des maxima observés à l'aval des confluences par augmentation soudaine de l'aire drainée et donc du potentiel de saturation de la capacité d'écoulement localement. Suite aux confluences, l'indice a tendance à décroître si les versants bordiers n'amènent pas de surface drainée significativement supplémentaire. Les grandes vallées alluviales ne sont guère prises en compte par cet indice (Figure 59).

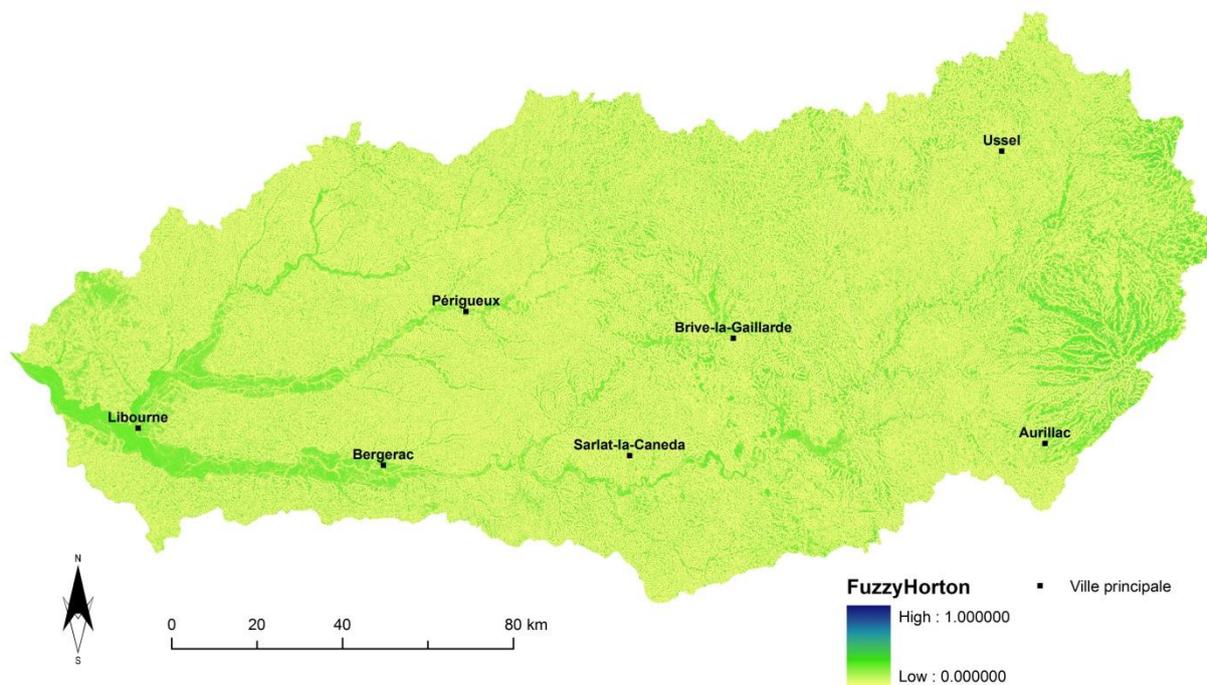


Figure 59 - Carte de l'indice de Horton fuzzifié. Plus les valeurs sont proches de 1 (bleu), plus les zones sont susceptibles au ruissellement global selon le seul facteur "Indice de Horton modifié".

5.1.5. Modification des facteurs d'entrée : l'ACCUMULATION

5.1.5.1. Le TWI

La normalisation est plus simple et consiste en une normalisation linéaire entre les valeurs minimum et maximum de la carte de TWI brut. Comme la distribution originelle est de type gaussienne, la courbe des fréquences cumulées prend une forme sigmoïde relatant bien la conservation de la distribution d'origine (Figure 60).

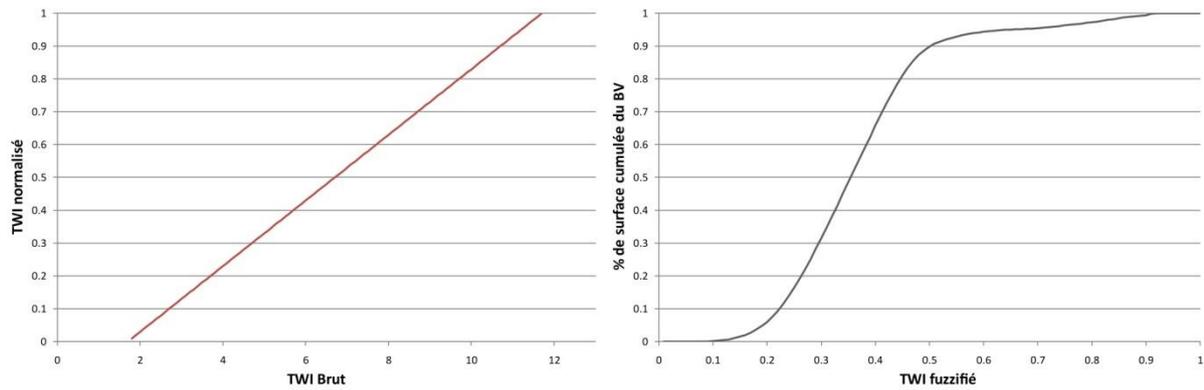


Figure 60 - Normalisation du facteur TWI (à gauche) et distribution en % de surface cumulée du TWI normalisé (à droite).

À l'échelle du BV (Figure 61), les zones basses (plaines alluviales et fond de vallée) à l'ouest du grand escarpement tectonique bordant le Massif central cristallin sont évidemment propices à l'accumulation des flux venant de l'amont. Dans le détail, toutes les dépressions formant une zone humide sont également des secteurs favorables à l'accumulation.

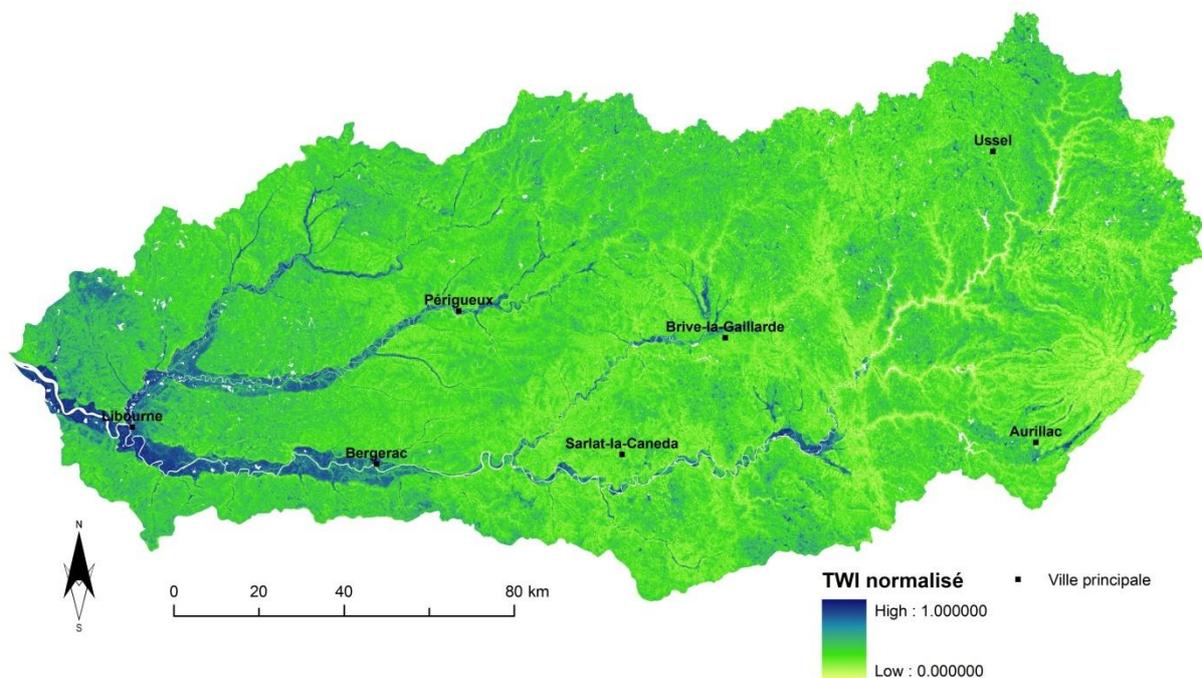


Figure 61 - Carte du TWI normalisé. Plus les valeurs sont proches de 1 (bleu), plus les zones sont susceptibles à l'accumulation du ruissellement selon le seul facteur "TWI".

5.2. IRIP : la PRODUCTION

Nous ne présenterons ici que les résultats de la période de transition été/automne, car ils sont très proches de ceux du printemps.

Le modèle originel procède à une somme du facteur pédologique (qui comprend 3 facteurs), de l'occupation du sol et de la topographie. Nous avons donc réalisé plusieurs modélisations de somme pondérée en faisant varier les facteurs de pondération. Nous avons comparé la sortie du modèle IRIP avec celle de SCS-CN, celle-ci étant considérée comme robuste – en tout cas moins volatile – car les possibilités de variations du modèle sont plus contraintes. De plus, l'objectif final étant de combiner les deux modèles, ceux-ci doivent être "comparables", c'est-à-dire donner des résultats globalement cohérents.

14 formules ont été testées. Pour chacun d'elle, nous avons comparé les résultats (i) au modèle SCS-CN correspondant (printemps ou transition été/automne) et (ii) aux données d'entrée afin de quantifier le poids réel de chaque variable sur les résultats (Tableau 12).

Tableau 12 - Poids des facteurs utilisés pour le calcul de la PRODUCTION avec IRIP. La formule générale est une moyenne pondérée.

Modèle	Somme pondéré			DIVISEUR
	SOL	TOS	TOPO	
P1 (modèle originel)	3	1	1	5
P2	1	1	1	3
P3	1	1	1	1
P4	1	1	0.5	2.5
P5	1	1	0.1	2.1
P6	2	1	1	4
P7	2	1	0.5	3.5
P8	1.5	1	1	3.5
P9	1.5	1	0.5	3
P10	1.2	1	0.5	2.7
P11	1.2	1	0.6	2.8
P12	1.2	0.9	0.5	2.6
P13	1.1	1	0.5	2.6
P14	1.1	0.9	0.5	2.5

Le modèle statistiquement le plus consensuel (statistiquement proche de SCS-CN et équilibré en termes de corrélation *a posteriori* entre résultats et facteurs d'entrée) est le P14. Les relations linéaires et corrélation de Pearson ne sont pas "bonnes", mais demeurent satisfaisantes pour le sol et l'occupation du sol ($r^2 > 0.4$) (Figure 62). Le facteur topographique est moins contraignant dans la sortie du modèle, comme pour SCS, mais permet cependant d'avoir une "tendance" à la hausse pour les valeurs élevées du facteur topographique. Ces résultats demeurent en cohérence avec la littérature pour la PRODUCTION, à savoir un poids majeur du sol et de l'occupation du sol, le facteur topographique restant à ce jour assez incertain sur sa contribution à la PRODUCTION.

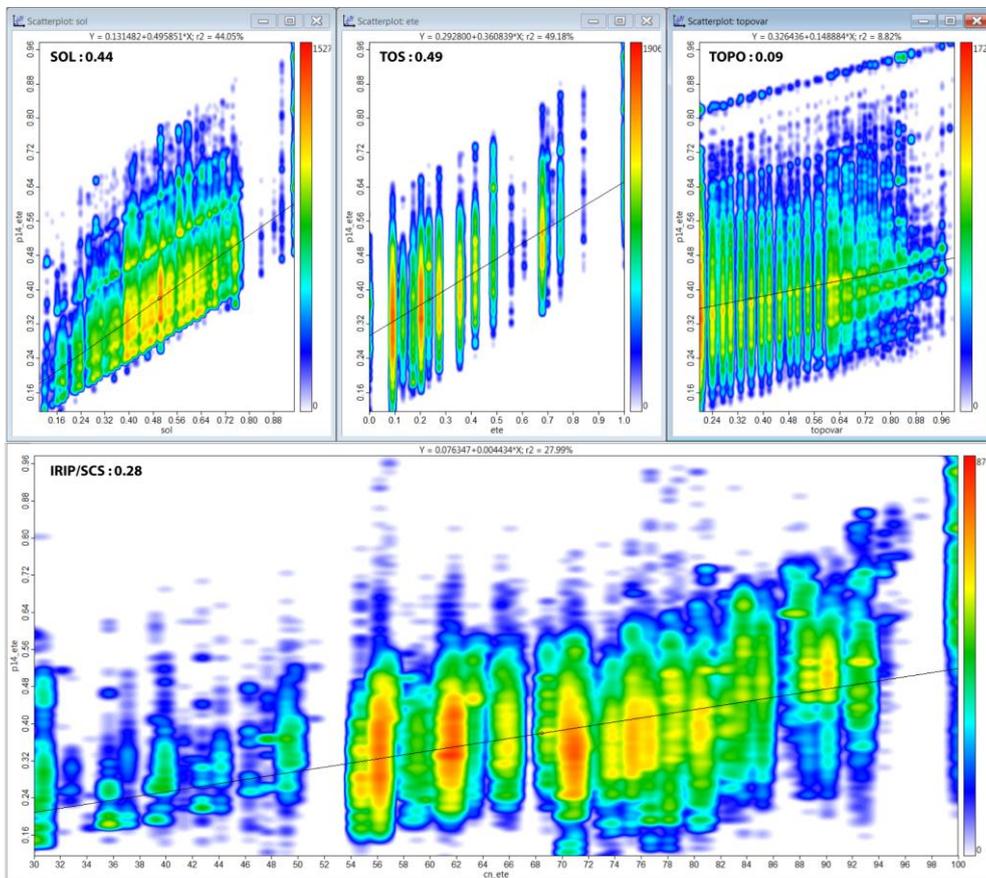


Figure 62 - Résultats des corrélations a posteriori avec SCS et les facteurs d'entrée pour le modèle P14.

Le modèle P14 est grossièrement corrélé avec le modèle SCS-CN, mais selon une corrélation linéaire faible ($r^2 = 0.28$). Le V de Cramer¹² atteint une valeur de 0.19, ce qui nous place très proche du domaine de validité. Selon cet indice, on peut dire qu'il existe une association moyenne entre les deux modèles bruts.

Le modèle P14 donne des résultats globaux convergents avec SCS (Figure 63). Les Causses charentais, la Bordure de Guyenne et le Val de Dordogne ressortent bien comme les régions à plus fort potentiel de ruissellement, tandis que les hautes terres demeurent faiblement susceptibles au ruissellement. Par contre, nous observons des écarts avec SCS notamment sur la région des Causses jurassiques et sur le bassin de Brive. Si les termes de l'occupation du sol sont les mêmes, les facteurs pédologiques sont par contre différents dans les deux modèles SCS et IRIP. Ces différences se retrouvent dans ces deux cas. Le modèle IRIP présente plus de variations intrinsèques que SCS.

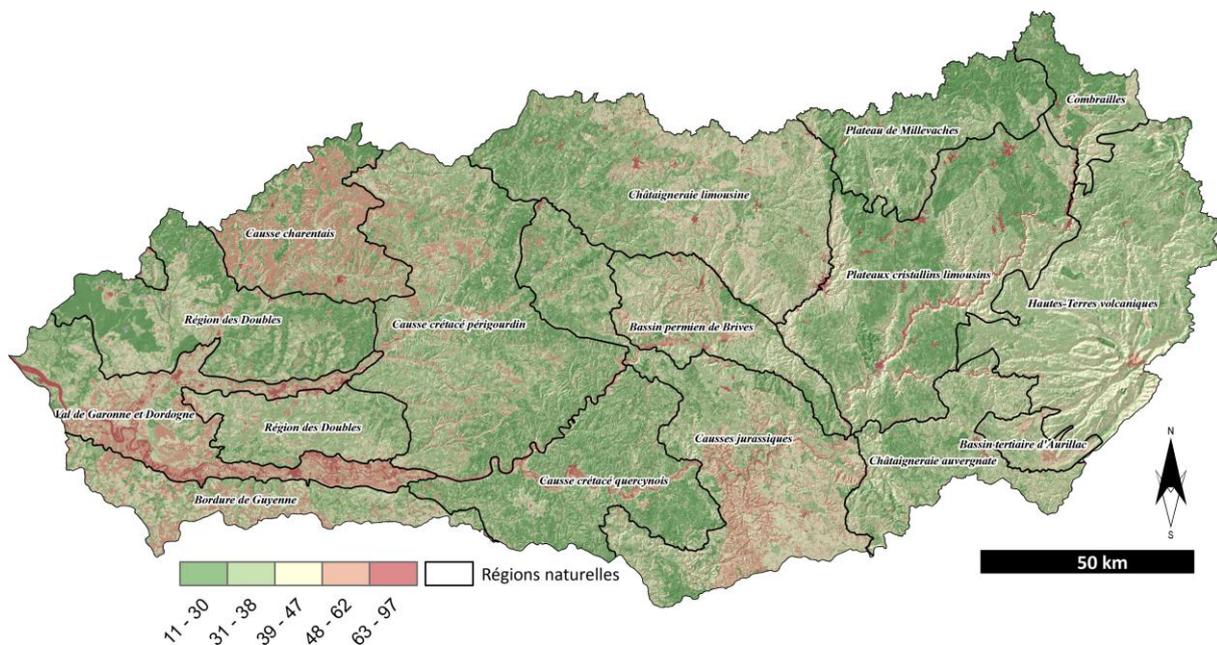


Figure 63 - Modèle P14 (IRIP).

5.3. IRIP : le TRANSFERT

La méthode originelle d'IRIP fait également la somme des facteurs utilisés pour le TRANSFERT. Au-delà des modifications apportées aux facteurs utilisées pour le TRANSFERT (5.1), nous avons légèrement modifié la formule d'agrégation des facteurs en réalisant la moyenne des facteurs topographiques et hydrographiques et en la multipliant par la PRODUCTION (Équation 7). Cette formule nous permet d'avoir un coefficient de TRANSFERT (moyenne des facteurs de 0 à 1) qui module ainsi la PRODUCTION locale en donnant une idée de la capacité de concentration du réseau hydrographique local. Le résultat est lissé par un filtre gaussien.

$$\text{TRANSFERT} = FG \left[\text{PROD} * \left(\frac{FCurve + Fmfd + FHorton + LSF}{4} \right) \right]$$

Équation 7 - Algorithme du TRANSFERT pour IRIP.

On observe une structuration des zones de transfert à l'échelle régionale avec un poids important de la topographie (Figure 64) :

¹² Cet indice a été appliqué sur les données discrètes. Le V de Cramer travaille sur le tableau de contingence entre IRIP et SCS et mesure la force de l'association des deux modèles à partir de la répartition des populations de pixels dans tableau de contingence. Classiquement, on considère une association "forte" pour des valeurs de $V > 0.4$ et une association "moyenne" pour $0.2 < V < 0.4$. Il faut aussi savoir que les résultats obtenus sur des tableaux de contingences totalisant plus de 38 millions de pixels sont fortement significatifs.

- par les grands escarpements tectoniques (Brive et Tulle),
- par les zones de gorges,
- par les érosions régressives dans les bassins sédimentaires,
- par l'exokarst (axe Sarlat/Causse charentais).

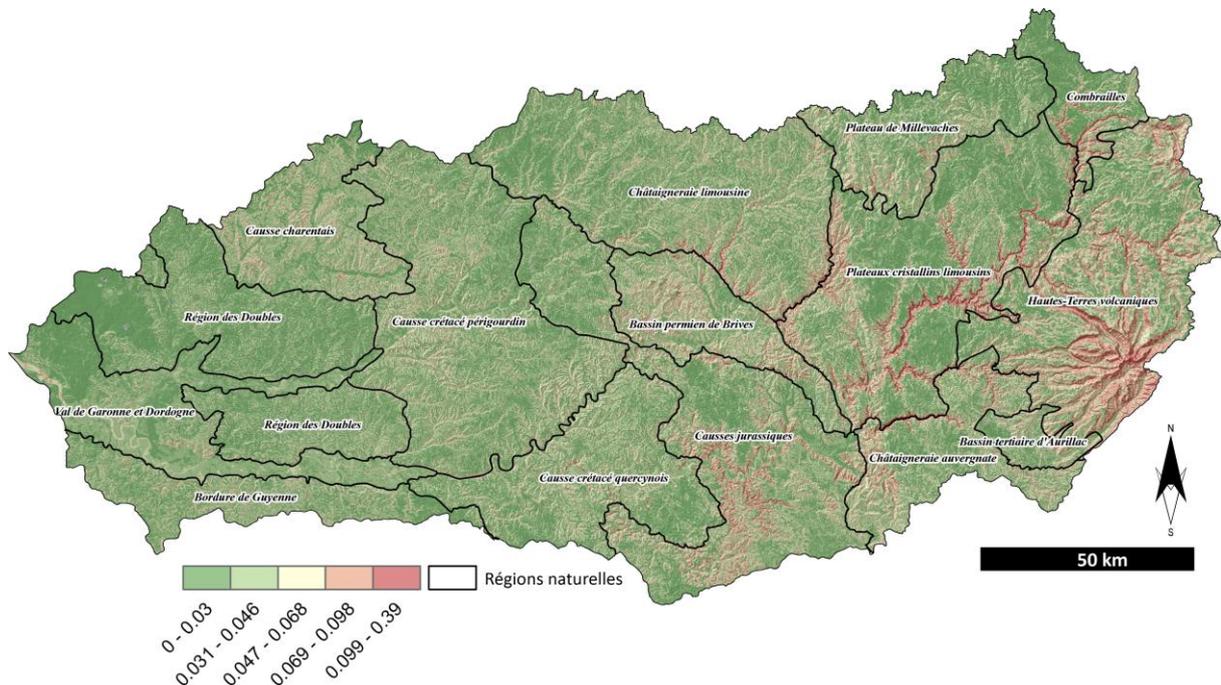


Figure 64 - Modèle de TRANSFERT pour IRIP.

Les corrélations entre SCS et IRIP sur le TRANSFERT sont meilleures avec un r^2 de Pearson proche de 0.5. Le poids de la topographie est ici flagrant et limite les écarts entre les deux modèles.

5.4. IRIP : l'ACCUMULATION

Contrairement à la méthode originelle, nous avons juste utilisé le TWI obtenu par la méthode MFD que nous avons multiplié par la PRODUCTION. En effet, le TWI obtenu par MFD est déjà un très bon indice des capacités d'accumulation topographique et de saturation des bas de versant. En ce sens, il ne nous a pas semblé utile de complexifier le calcul de ce paramètre. Les résultats obtenus sont également très proches de ceux obtenus avec SCS avec une forte susceptibilité des grandes vallées à l'échelle régionale, des vallons d'ordres 1 à 3 à l'échelle locale et des zones de convergence de flux (confluence de vallons) (Figure 65).

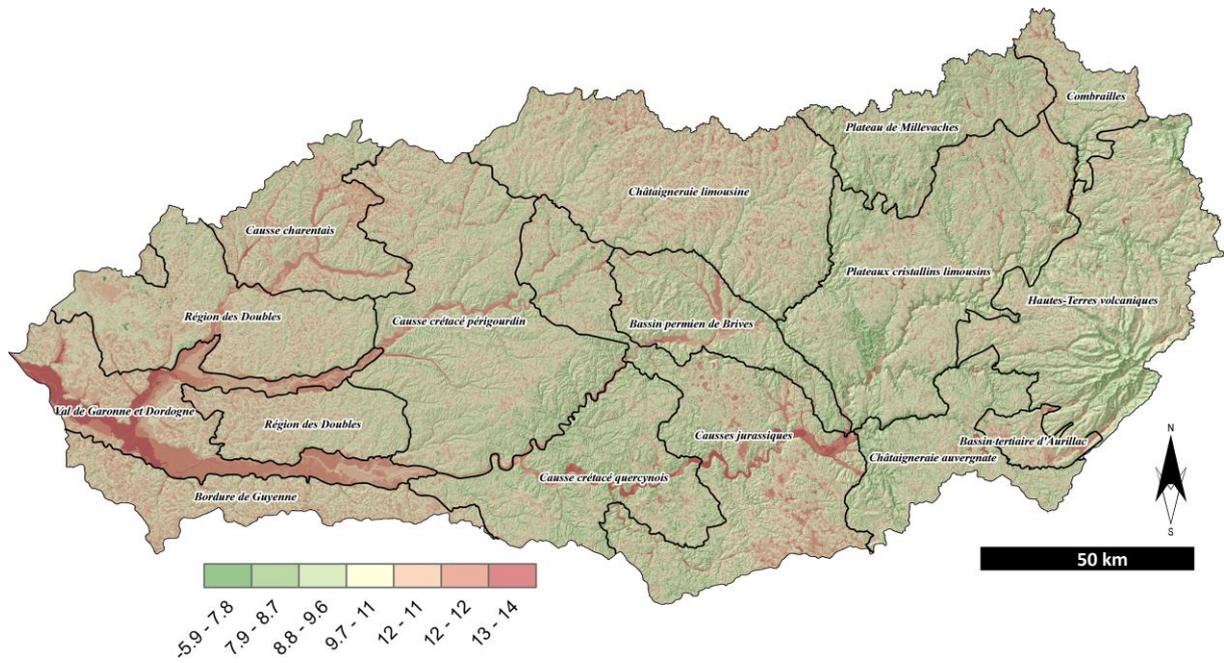


Figure 65 - Modèle d'ACCUMULATION pour IRIP.

Les modèles SCS et IRIP sur le TRANSFERT sont très corrélés (r^2 de Pearson > 0.85) ce qui est ici normal puisqu'ils sont construits de la même manière, seule la PRODUCTION initiale changeant dans la formule (PRODUCTION brute pour IRIP et PRODUCTION relative accumulée pour SCS).

Partie 6. Modélisations du ruissellement : la méthode STREAM

[STREAM est une méthode déterministe empirique mise au point et calibrée sur les plaines limoneuses du Nord de la France. Les bases conceptuelles de la méthode sont déjà anciennes (**Casenave and Valentin, 1990**) et sont les mêmes que SCS-CN. La méthode a cependant été formalisée dans les années 2000 (**Cerdan et al., 2002**) et peut être utilisée en quasi-routine grâce au plug-in réalisé par l'INRA d'Orléans. Nous avons implémenté cette méthode, mais les résultats ont été surprenants; du fait notamment de l'inadaptation du modèle aux conditions pédologiques du bassin versant de la Dordogne. En effet, le modèle ne peut prendre en compte la profondeur des sols, qui est primordiale sur le bassin versant de la Dordogne, alors que la battance, critère fondamental de STREAM, est un paramètre secondaire pour les sols du bassin versant. Nous présentons donc rapidement la démarche, mais ne nous attarderons pas sur les détails de l'implémentation.]

6.1. Adaptation des données de base

L'hypothèse de base du modèle STREAM repose sur le constat que pour la plupart des sols limoneux, le ruissellement résulte de la diminution de l'infiltrabilité en lien avec la dégradation structurale de la surface des sols, sous l'action des précipitations (croûte de battance), l'influence de la rugosité (pratiques culturales) et le couvert végétal (Lecomte, 1999 ; Cerdan et al., 2001).

Si STREAM a été conçu pour avoir peu de paramètres en entrées et pour que ces paramètres soient facilement mesurables, il s'agit d'un modèle qui fonctionne à l'échelle du petit bassin versant et de l'événement pluvieux. Ainsi, plusieurs difficultés émergent rapidement :

- si les paramètres sont facilement mesurables sur un petit versant, il est en revanche impossible de les mesurer sur un bassin versant de la taille de celui de la Dordogne, les utilisations de STREAM a de « grands » bassins versants se limitant à des bassins versants 100 fois plus petits que celui de la Dordogne (i.e. Desprats et al, 2003 ; Cerdan et al., 2005) : ainsi, l'entrée de base du modèle STREAM, à savoir la capacité d'infiltration, ne peut pas être mesurée sur l'ensemble du bassin versant ; de même, évaluer la rugosité, le sens du travail du sol... au cas par cas n'est pas réalisable.
- le modèle STREAM a été développé et calibré sur les sols agricoles limoneux du Pays Caux. Dans le bassin versant de la Dordogne, le phénomène de battance n'est pas forcément le facteur dominant de la réponse et l'évolution du faciès prend moins de sens, d'autant que les surfaces de culture ne représentent pas la même proportion que dans le Pays de Caux.
- le modèle fonctionnant par évolution du faciès au cours de pluies cumulées, il faut normalement déterminer un état initial à une date donnée et le cumul de pluie requis pour faire passer le faciès du sol vers un état plus continu. Si on peut considérer le climat et ses antécédents pluvieux comme homogènes et les dates des interventions agricoles au cas par cas au sein d'un petit bassin versant, il est inenvisageable de le réaliser sur un bassin de plus de 20 000 km².

En conséquence, les principales difficultés et questions scientifiques de l'utilisation de STREAM sur le bassin versant de la Dordogne ont trait à la disponibilité des données à fournir au modèle et à l'adaptation des règles de décisions qui déterminent le ruissellement et l'infiltration lors des événements pluvieux.

En premier lieu, l'entrée de base du modèle est la capacité d'infiltration. Théoriquement, la capacité d'infiltration ne peut être que mesurée, ou au moins calibrée par des mesures ponctuelles, car elle englobe une plus large diversité interne que la mesure de la perméabilité. Des classes de perméabilité, calibrées sur les sols du Pays de Caux existent pour STREAM et sont souvent utilisées en routine, quel que soit l'endroit de France et sans aucune calibration locale quantitative du modèle. Cette démarche ne nous a pas semblé pertinente, notamment à cause de la diversité pédogéomorphologique du bassin versant de la Dordogne. En l'absence de références externes pour tous les types de sol du bassin versant et sans possibilités de calibration ou de validation intra-bassin, nous avons donc utilisé la valeur de perméabilité calculée selon la méthodologie décrite pour le modèle IRIP (§ 5.1.3.2.).

Ensuite, il a fallu déterminer une matrice de modulation de la perméabilité pour les 2 périodes de simulation retenues puisqu'entre chaque période le faciès a pu évoluer, matrice qui donne un coefficient de division de la perméabilité en fonction du type d'occupation de sol (TOS) pour les différents faciès (**Tableau 13**).

Pour F0, la perméabilité théorique calculée par les fonctions de pédotransfert ne tient pas compte de l'influence que la végétation induit sur la perméabilité réelle du sol, *via* par exemple la modification de structure engendrée. Nous avons donc modulé cette perméabilité selon le type d'occupation du sol et selon la période de modélisation, en fonction de rares références bibliographiques et surtout de leur extrapolation à dire d'expert.

Pour la modulation de la perméabilité en fonction de l'évolution du faciès, (i) ne pouvant pas connaître et compiler la totalité des antécédents pluvieux avant des pluies de projet, et (ii) ne connaissant pas les dates des interventions agricoles qui varient de plus au sein du bassin versant à cause des variations édaphiques et climatiques, nous avons alors décidé d'extrapoler le type de faciès à partir de la battance du sol, telle que calculée pour le modèle IRIP (§ 5.1.3.2.) et selon les valeurs présentées dans le **Tableau 13**. Bien que d'impact négligeable à l'échelle du bassin versant, nous avons aussi cherché à renseigner la rugosité des différentes occupations de sol aux 2 périodes de modélisation, mais cette donnée n'a finalement pas été utilisée lors de la modélisation.

Tableau 13. Exemple pour la période d'été de la matrice de corrélation Type d'Occupation de Sol/Faciès donnant la modulation (division) de la perméabilité (calculée selon les fonctions de pédotransfert présentées dans la méthodologie d'IRIP) pour la modélisation STREAM.

TOS	TOS	Rugosité	Faciès			
Code	Type	(cm)	F0	F11	F12	F2
			Bat<2	2<Bat<3	3<bat<4	Bat>4
TUC	Tissu urbain continu	<1	1,00	5,17	14,80	34,50
ZIC	Zones industrielles et commerciales	<1	1,00	5,17	14,80	34,50
SOL	Roche nue	5	1,00	1,00	1,00	1,00
INF	Aéroports, chantiers, réseau routier et ferroviaire	<1	1,00	5,17	14,80	34,50
MAR	Légumes et fruits, semences	2	0,75	0,83	1,25	7,01
TUD	Tissu urbain discontinu	<1	0,90	4,65	13,32	31,05
VIG	Vignobles, arboriculture, fruits à coques, vergers	4	0,80	2,07	5,92	13,80
VPF	Vergers et petits fruits	2	0,80	4,14	11,84	27,60
PRT	Prairies temporaires, autres gels	2	0,70	1,20	3,45	8,05
BOC	Systèmes culturaux et parcellaires complexes	3	0,45	1,46	3,77	10,24
LAN	Estives, landes	2	0,60	2,33	6,66	15,54
ESL	Équipements sportifs et de loisirs	<1	0,90	4,65	13,32	31,05
PR	Prairies permanentes	2	0,50	2,59	7,40	17,25
SAL	Forêt et végétation arbustive	3	0,40	0,52	0,78	4,40
AFM	Surfaces essentiellement agricoles interrompues par des espaces naturels importants	2	0,72	2,73	7,41	19,14
FOU	Fourrage	1,5	0,65	3,36	9,62	22,43
FOR	Forêt de conifères, forêt de feuillus, forêt mélangée	4	0,30	0,39	0,59	3,30
PPN	Pelouses et paturages naturels	2,5	0,50	2,59	7,40	17,25
MT	Maïs, tournesol	5	0,95	4,17	11,95	27,89
SOJ	autres oléagineux (soja)	3	0,90	4,65	13,32	31,05
CI	Autres cultures industrielles	<1	0,89	4,42	12,65	30,62
CER	Autres céréales, blé tendre, orge	<1	0,85	4,39	12,58	29,33
CLZ	Colza, légumineuse à grains, protéagineux	<1	0,85	4,39	12,58	29,33
TOU	Marais, roselières, tourbières, landes et mégaphorbiaies	10	0,66	0,66	0,66	0,66
MARAIS	Marais intérieurs	<1	0,85	6,38	19,13	38,25

Assigner une valeur pour chaque TOS a été compliquée et s'est souvent bornée à une estimation grossière : en effet, il n'existe pas forcément de données disponibles, par exemple et spécifiquement, de la variation de perméabilité sous estives et landes (TOS LAN) lors des changements de faciès. Dans ce cas exemple, nous sommes donc partis des valeurs données par la littérature pour une occupation sous forêt et considérer que la couverture du sol et la présence de litière était moindre que sous forêt se rapprochant alors plus de certaines cultures (Tableau 13). De nombreuses estimations ont ainsi été réalisées à dire d'expert pour renseigner toutes les cellules de la matrice corrélative de modulation à partir de données-références obtenues dans la littérature (principalement Boiffin, 1984 ; Boiffin et al., 1988 ; Eimberck, 1989-1990 ; Valentin et Jaenau, 1989-1990 ; Trevisan et Lelong, 1992). Les valeurs assignées ont souvent été la moyenne des valeurs trouvées dans ces références qui peuvent varier du simple au triple, même si les valeurs plus élevées ou plus faibles ont pu être choisies au cas par cas lorsque cela nous a semblé fonctionnellement plus cohérent. Concernant l'évolution du faciès sous culture, nous nous sommes basés sur les périodes médianes (pour la zone climatique du bassin versant variant de « océanique aquitain » à « sous influence montagnarde ») de préparation du lit, semis, récolte, labour... trouvées dans des guides, enquêtes... qui étaient disponibles (notamment les Chambres d'Agriculture de la Gironde et de la Dordogne, le Panorama Grandes Cultures de l'AGRESTE, les documents d'Arvalis ou du CETIOM, le site <http://www.terresinovia.fr>...) afin d'évaluer approximativement les faciès aux 2 périodes de modélisation.

6.2. Implémentation du modèle

Le modèle a été implémenté à partir de la grille croisant l'occupation du sol et le faciès étant donné que la rugosité de surface était une donnée trop difficile à obtenir sur le bassin versant (dépend des usages et pratiques agronomiques à l'échelle de chaque parcelle agricole) (Tableau 13). Ce tableau donne la modulation qui a été appliquée à la perméabilité initiale qui était dérivée d'IRIP (Figure 66). Cette modulation est un diviseur de la perméabilité initiale en fonction du faciès, de la rugosité et de la couverture.

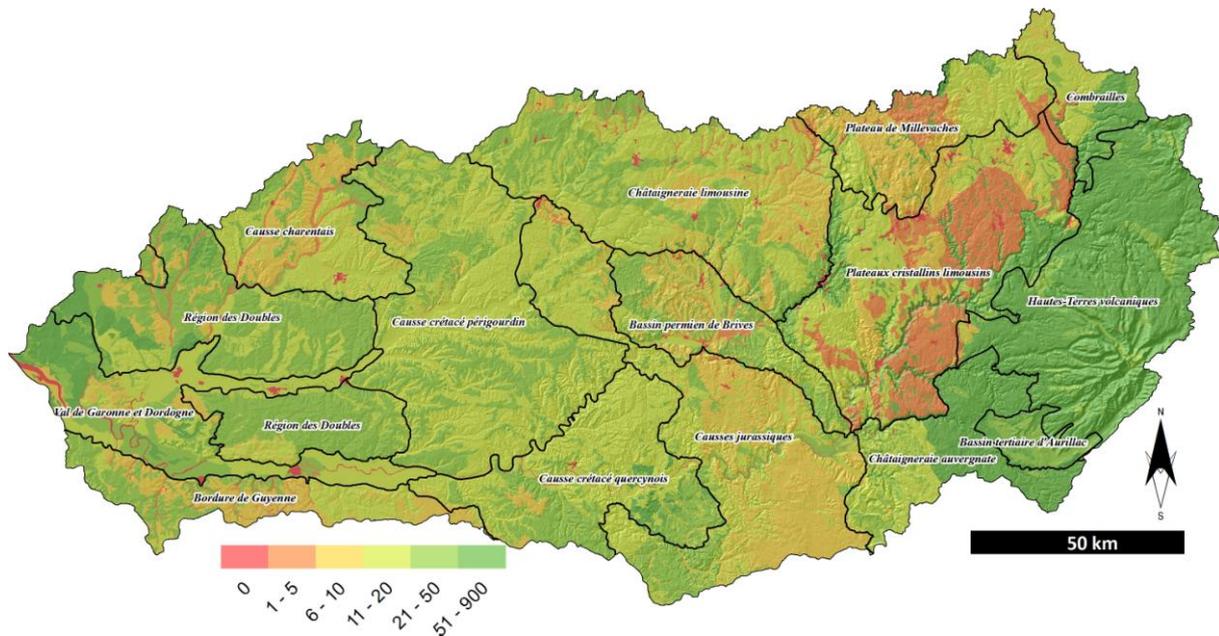


Figure 66 - Modèle de perméabilité initiale dérivée d'IRIP. Ks en mm/h.

Le modèle final, après modulation, donne visuellement des résultats proches des résultats obtenus avec SCS-CN et IRIP mais diverge quand même un peu (Figure 67, sur les Plateaux limousins par exemple). Cette sortie de modèle n'est pas du tout corrélée linéairement avec SCS et IRIP et nous avons interprété ces divergences comme une limitation de STREAM lié à 2 problèmes :

- le modèle STREAM est essentiellement basé sur l'hypothèse que le ruissellement est hortonien et s'opère sur une croûte de battance exprimée par le faciès (degré de fermeture de la surface du sol). Si cette hypothèse est tout à fait réelle sur les sols limoneux des plaines du Bassin parisien, elle n'est vraie pour le bassin versant de la Dordogne que sur les plaines agricoles à recouvrement limoneux...ce qui est finalement très rare sur la zone d'étude.
- Le corollaire de cette première hypothèse est que la profondeur du sol, et donc ses capacités de réserve et de perméabilité, n'est pas nécessaire et donc pas intégrée dans le modèle STREAM. Or, les observations de terrain montrent que cette donnée Texture/Profondeur est en fait fondamentale pour décrire le fonctionnement des couvertures pédologiques vis-à-vis des processus de ruissellement dans le bassin versant de la Dordogne.

Les tests statistiques plus poussés montrent que si STREAM peut être associé statistiquement avec IRIP et SCS quand ils sont reclassés en 5 classes (partie 7 suivante, sur les combinaisons) avec un V de Cramer de 0.3, il diverge nettement sur les classes de forte susceptibilité, ce qui est gênant, car il montre ainsi une certaine instabilité et volatilité sur les classes "stratégiques". Finalement, nous avons conclu que le modèle était inadapté en l'état puisqu'il imposait d'intégrer la profondeur et la texture des horizons profonds dès lors que le faciès était ouvert (F0 et F11, F12). De plus, les faciès F2 se trouvant sur les sols argileux devraient être modulés par la possibilité de fentes de dessiccation qui augmentent considérablement l'infiltrabilité de ces sols. Le modèle STREAM devrait donc être réadapté pour le bassin versant et nous semble délicat à utiliser comme tel. Ce recalibrage est un travail de recherche nécessitant de nombreux profils décrits et mesurés pour ajouter ces facteurs dans le modèle initial de l'INRA. Nous demeurons cependant assez confiants en ce modèle et pensons qu'il peut apporter des résultats intéressants moyennant un vrai travail d'adaptation locale.

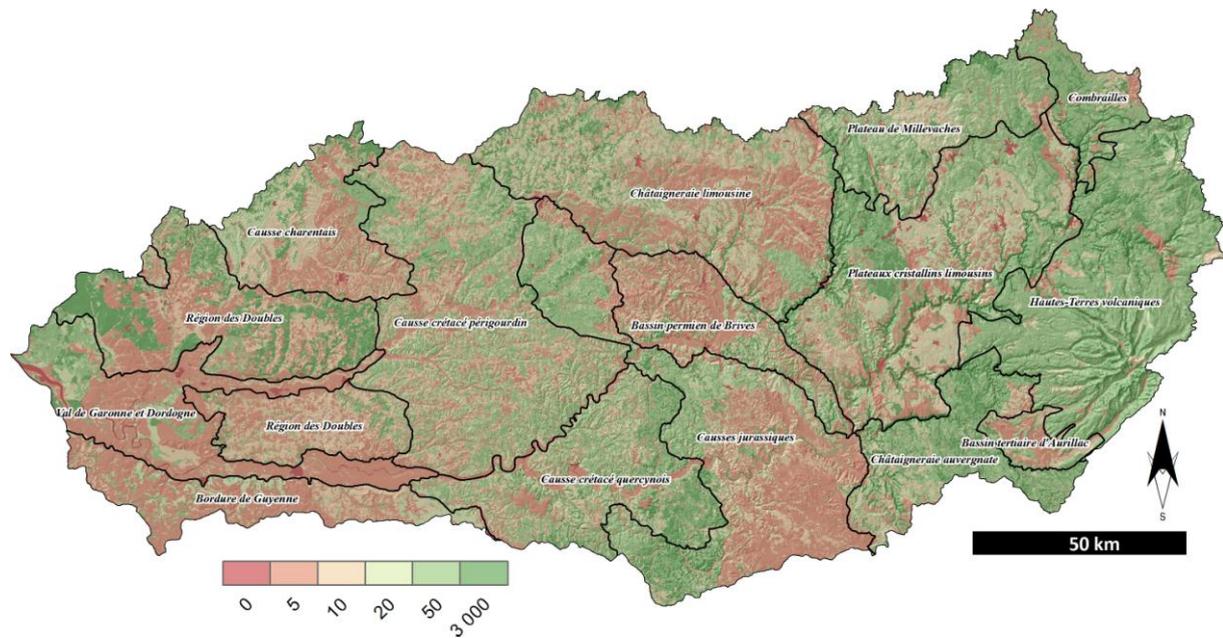


Figure 67 - Sortie de modèle pour STREAM (PRODUCTION). Les valeurs sont les perméabilités Ks obtenues en mm/h.

Sur cette sortie de modèle, on retrouve bien les zones de l'ouest très ruisselantes (Bordure de Guyenne, Val de Dordogne, Causse charentais en partie), ainsi que les Causse jurassiques et dans une moindre mesure, la Châtaigneraie limousine. Les Hautes Terres sont peu ruisselantes en général, hormis les Plateaux cristallins limousins qui présentent des zones de forte susceptibilité qui divergent nettement avec les autres modèles. Les sols y sont limoneux et c'est cette donnée qui a "forcé" le modèle vers une forte battance. En réalité, au vu de nos connaissances expertes sur la zone, les limons ne sont pas "battants" et les profondeurs des sols jouent un effet tampon sur les phénomènes de ruissellement. Le modèle est ici clairement inadapté.

Partie 7. Combinaison des modèles, cartographie de la susceptibilité au ruissellement et validation "grandeur nature" des cartes

7.1. Combinaison des modèles SCS-CN et IRIP : vers une cartographie globale de la susceptibilité au ruissellement

Nous l'avons vu précédemment, les modèles SCS-CN et IRIP sont comparables pour la PRODUCTION (en tout cas, il existe une association statistique sur les modèles bruts) et sont proches pour les compartiments de TRANSFERT et d'ACCUMULATION. Pour la PRODUCTION, nous sommes en limite statistique pour tenter une combinaison, c'est pourquoi nous avons procédé avant toute chose à une standardisation des 2 modèles de PRODUCTION et à une discrétisation afin de faire converger les distributions statistiques des deux modèles. Comme dit dans la partie 6, le modèle STREAM, bien que globalement convergent d'un point de vue statistique (V de Cramer = 0.3), et trop volatil par rapport à SCS et IRIP sur les classes de fortes susceptibilités, ce qui justifie que nous ne l'ayons pas retenu pour les procédures de combinaison.

7.1.1. Discrétisation et homogénéisation des distributions

Pour rappel, le V de Cramer entre les modèles bruts SCS-CN et P14 (IRIP) est de 0.19 et le r^2 de Pearson, de 0.28. La discrétisation a été menée par la voie statistique, puis experte. L'objectif était de faire coïncider les distributions au maximum à partir de distributions un peu différentes et décalées sur le continuum 0 à 1 (Figure 68).

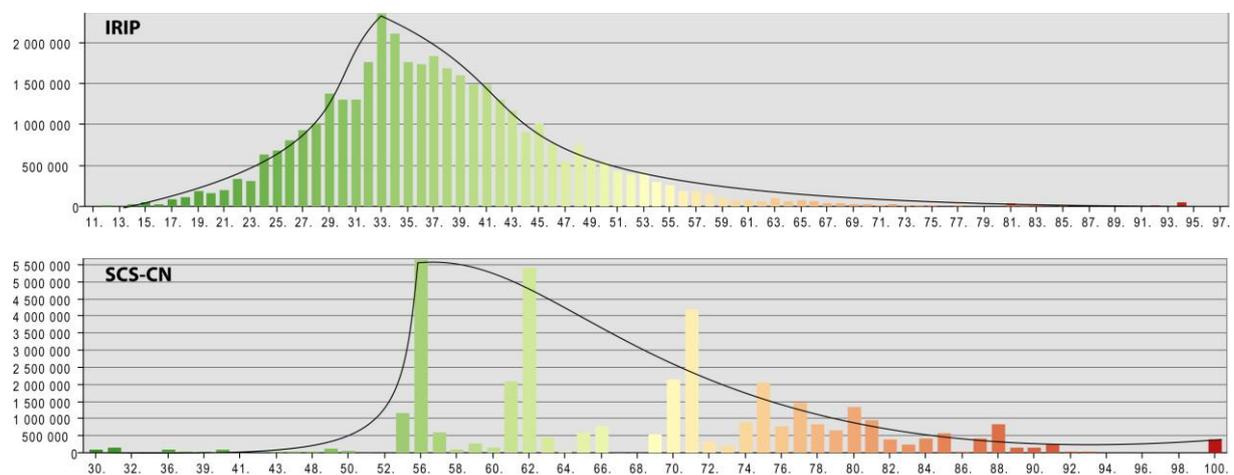


Figure 68 - Distribution des modèles bruts de PRODUCTION. En haut, IRIP ; En bas, SCS-CN.

Dans un premier temps, nous avons réalisé des discrétisations statistiques "objectives" :

- *Classement par « coupure naturelle »* => efficace et visuellement équilibré, mais distorsion des effectifs par classes avec notamment un modèle final contenant plus de 80% de pixels dans les classes moyennes. Peu de discrétisation de l'information « ruissellement » au final par un trop fort « moyennage ». Nous n'avons pas retenu cette méthode.
- *Classement par écart-type à 2 ou 3s* => problèmes un peu similaires, avec concentration des effectifs sur les classes modales. Nous n'avons pas retenu cette méthode.
- *Classement par quantiles* => permet de lisser les effectifs par classes (quasi équiprobabilité dans chaque classe) et donc de « forcer » l'explosion des classes moyennes (il y aura à peu près les mêmes effectifs dans chaque classe). Le découpage a été fait en 5 classes pour répondre à l'exigence de simplicité visuelle pour la phase de cartographie et de bascule. L'inconvénient est une surestimation « artificielle » des classes extrêmes ce qui donne un modèle final plus contrasté. Nous avons retenu cette méthode.
- *Classement par intervalle géométrique* => de la même manière, en 5 classes. Cette méthode offre un compromis entre les quantiles et les coupures naturelles. Nous avons également utilisé cette catégorisation.

Chaque modèle a été testé statistiquement afin de voir si les discrétisations permettaient une amélioration de la coïncidence des modèles, puis ajusté par la voie experte dans un jeu d'allers/retours entre tests statistiques d'association et de réajustements. Nous recherchions le meilleur consensus entre le r^2 et le V de Cramer afin d'avoir une combinaison équilibrée (Tableau 14). Finalement, la discrétisation Cp4 s'est avérée la plus équilibrée, permettant d'augmenter significativement le degré d'association des deux modèles.

Tableau 14 - Discrétisation et performances des associations.

CROISEMENT DE MODELES	CLASSES	R ² de Pearson	V de Cramer
Initial		0.28	0.19
Cp1	CN => 30-45; 45-65; 65-75; 75-95;95-100 P14 => 0.11-0.25; 0.25-0.37; 0.37-0.45; 0.45-0.75; 0.75-0.97	0.3839	0.3821
Cp2	CN => 30-55; 55-65; 65-75; 75-90;90-100 P14 => 0.11-0.25; 0.25-0.35; 0.35-0.42; 0.42-0.60; 0.60-0.97	0.3987	0.3445
Cp3	Quantiles (5)	0.3921	0.2558
Cp4	CN => 30-56; 56-65; 65-75; 75-82;82-100 P14 => 0.11-0.29; 0.29-0.34; 0.34-0.41; 0.41-0.48; 0.48-0.97	0.473	0.346

La discrétisation Cp4 permet d'obtenir des distributions quasi équivalentes entre les deux modèles avec une distribution générale de type gaussien étalé, entre les quantiles et la distribution géométrique (Figure 69).

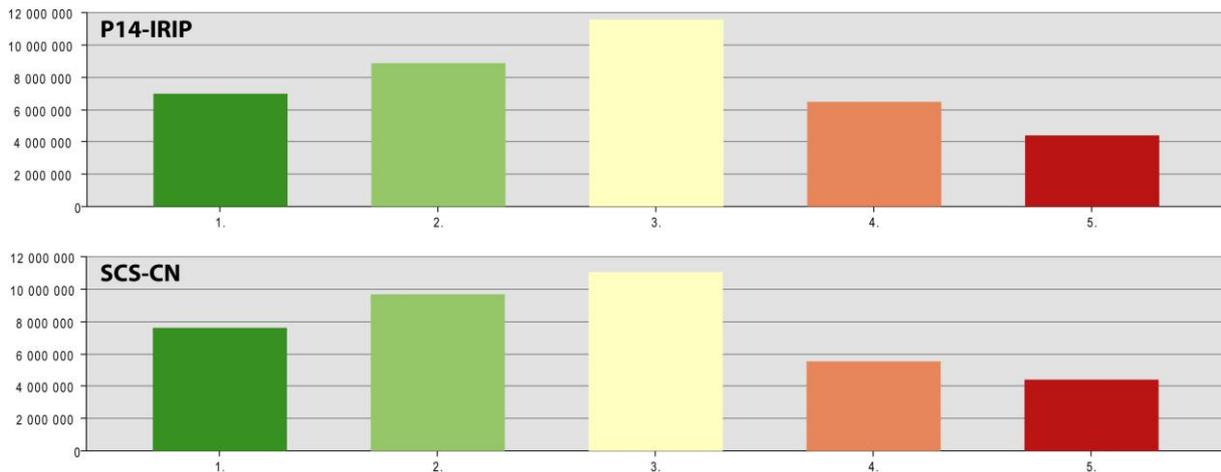


Figure 69 - Distribution des modèles discrétisés par le classement Cp4. En haut, le modèle P14 d'IRIP ; en bas, le modèle SCS-CN.

Spatialement, les deux modèles sont bien convergents avec un % de pixels communs de 37% (Figure 70). Visuellement, les deux modèles identifient bien les Causses charentais, le Val de Dordogne, la Bordure de Guyenne, le bassin d'Aurillac et partiellement les Causses périgourdins et jurassiques comme étant très susceptibles aux ruissellements. Les modèles divergent sur les Hautes Terres, notamment la planèze ouest du Cantal qui est plus susceptible pour le modèle IRIP. Les Causses jurassiques ne sont pas non plus évalués de la même manière par les deux modèles, SCS-CN prévoyant une susceptibilité plus forte au nord de la région, tandis qu'IRIP évalue plutôt le sud de la région naturelle comme étant susceptible. Il y a également des différences sur le causse quercynois et le sud-est du causse périgourdin (SCS y est plus pessimiste).

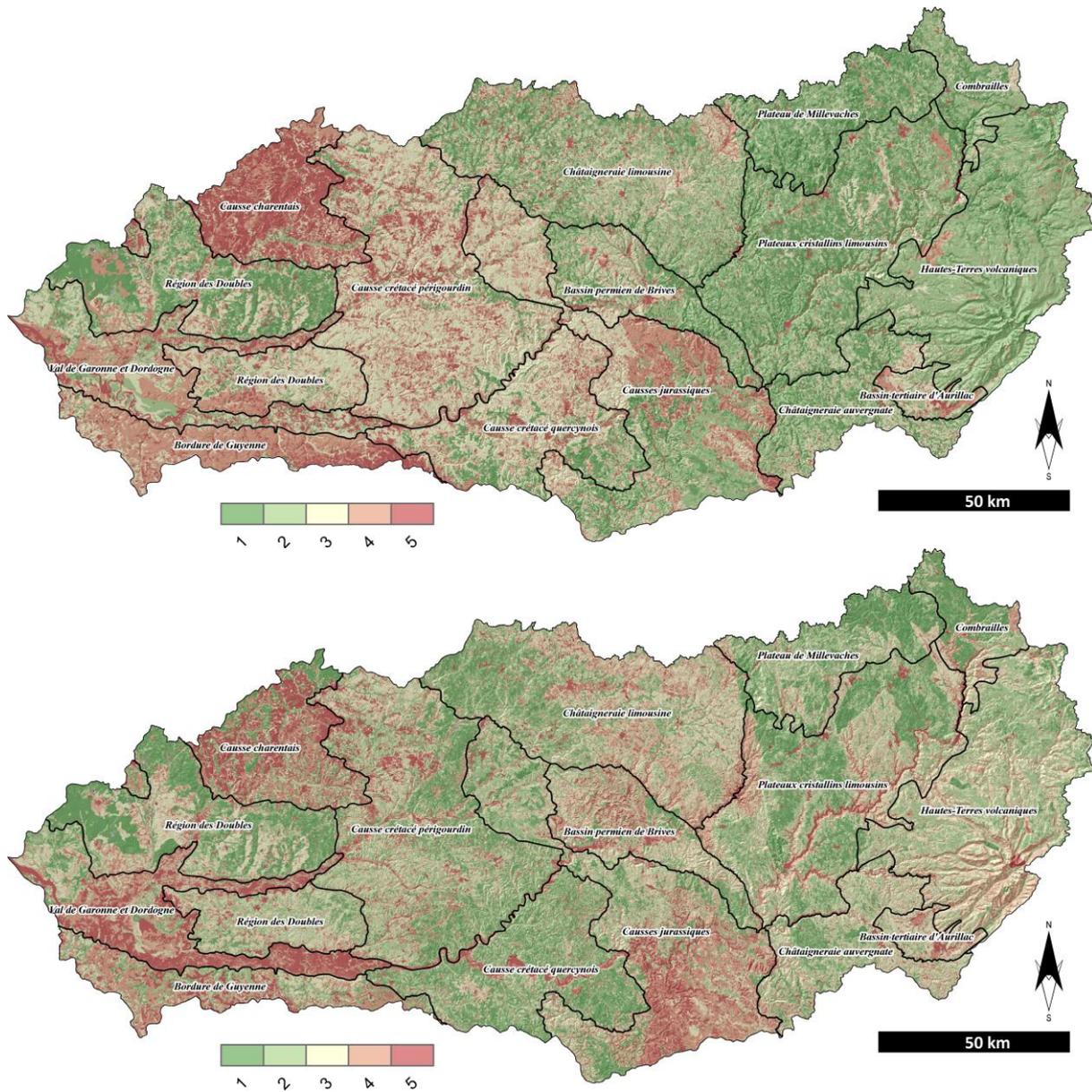


Figure 70 - Modèles catégorisés (Cp4). En haut, SCS-Cn ; en bas, P14 (IRIP).

Les catégorisations des modèles de TRANSFERT et d'ACCUMULATION ont été plus rapides étant donné que les modèles SCS-CN et IRIP pour ces compartiments sont très proches. Nous avons réalisé une classification experte à partir du classement automatique par "coupure naturelle". Les % de pixels communs sont très bons voire excellents (Tableau 15). Les valeurs de V de Cramer sont elles aussi bonnes à excellentes.

Tableau 15 - Performances des catégorisations des modèles de TRANSFERT et d'ACCUMULATION.

CROISEMENT DE MODELES	CLASSES	R ² de Pearson	V de Cramer	% correctness
TRANSFERT Initial		0.48	-	-
Ct1	Trans_CN=> 0-0.02; 0.02-0.05; 0.05-0.08; 0.08-0.15; >0.15 Trans_IRIP => 0-0.035; 0.035-0.055; 0.055-0.075; 0.075-0.11; > 0.11	0.48	0.378	58.9%
ACCUMULATION initial		0.88	-	-
Ca1	Trans_CN=> 0-150; 150-250; 250-350; 350-550; 550-1105 Trans_IRIP => 0-0.8; 0.8-1.4; 1.4-2.1; 2.1-4; 4-10.5	0.87	0.69	74.6%

7.1.2. Combinaison

La combinaison s'est faite par simple moyenne des valeurs des cartes classifiées (valeur de susceptibilité) et écart entre les deux modèles (incertitude).

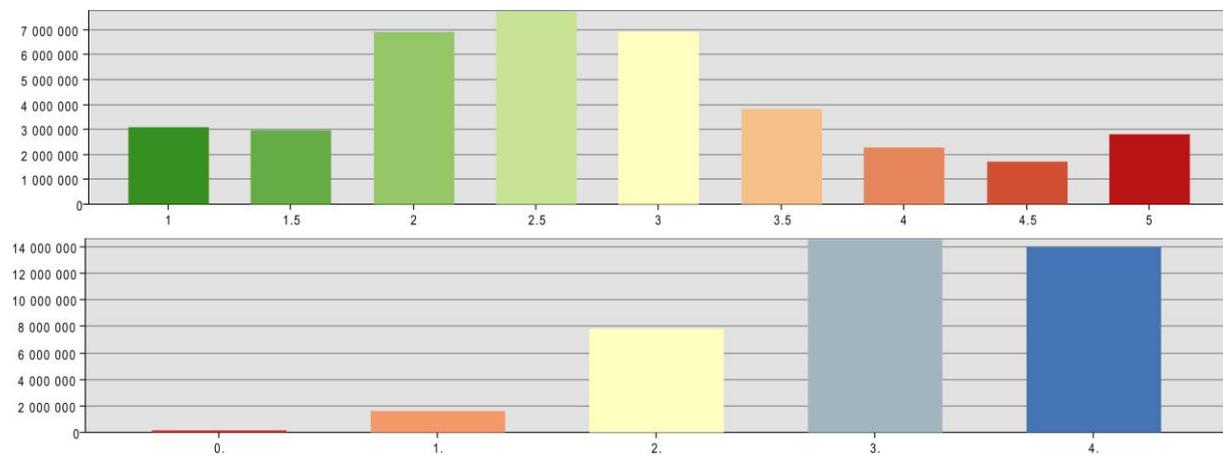


Figure 71 - Fréquence par classe de susceptibilité à la PRODUCTION et niveau de certitude. En haut, les classes de susceptibilité : plus la classe est élevée, plus la production de ruissellement est susceptible. En bas, les classes de certitude : plus la classe est élevée, plus le résultat est robuste.

Le modèle combiné est statistiquement de bonne qualité puisque 36.6% des 38 millions de pixels sont classés identiquement par les deux modèles IRIP et SCS-CN et ont donc une certitude élevée. 38.2% des pixels n'ont qu'une classe d'écart ce qui en fait aussi des pixels avec une certitude bonne à moyenne. Au final, près de 75% des pixels ont une certitude de classement assez bonne. Au-delà d'une classe de différence, les pixels deviennent plus incertains. Un peu plus de 20% ont des écarts de classement de 2 classes (certitude mauvaise à moyenne) et un peu moins de 5% des pixels sont très incertains au niveau du classement. Par contre, les classes extrêmes (susceptibilité 1, 1.5, 4.5 et 5) sont plutôt bien classées car leur niveau de certitude est toujours égal à 3 ou 4 (écart entre les modèles de 0 ou 1 classe). Le modèle est donc robuste pour prévoir les zones de faible susceptibilité et de forte susceptibilité au ruissellement.

Spatialement, le modèle respecte bien les acquis des deux modèles SCS-CN et IRIP sur les zones de forte susceptibilité (Causses charentais, Val de Dordogne, Guyenne) ou de faible susceptibilité (Plateaux limousins, Combrailles, Millevaches) (Figure 72). Par contre, on observe des zones de forte incertitude sur les Causses jurassiques et quelques zones des Causses charentais.

L'occupation du sol provenant de la même donnée de base, les incertitudes sont soit liées à la donnée pédologique, soit parfois au facteur pente (cas de l'escarpement de Tulle). Les différences entre les 2 modèles liées aux données pédologiques ont potentiellement plusieurs causes additionnables, qui découlent directement de la conceptualisation même des approches :

1. Le facteur pédologique dans le modèle IRIP est une donnée que nous avons voulue continue pour un maximum de précision, tandis que le modèle SCS-CN requiert une catégorisation en 4 classes. Si notre méthodologie de classement des UTS pour SCS-CN a justement visé à éviter les effets de seuillage liés à une catégorisation, il a bien fallu au final transformer la donnée continue (VH) en 4 classes pour chaque UCS (GSH). L'arrondi au plus proche pour les valeurs VH SCS-CN à peu près demi-entières force ainsi des basculements d'une demi-classe, qui peut alors les éloigner des valeurs d'IRIP
2. Outre cette différence induite par la discrétisation finale en 4 classes (GSH) pour SCS-CN, la discrétisation se fait également tout au long de l'évaluation de la VH : par exemple, la présence d'un horizon imperméable (ou du substrat) à faible profondeur force la VH à 4 (sols D) à partir d'un seuil (50 cm). Sous IRIP ce paramètre de faible profondeur est pris en compte de manière continue, donc non seuillée, et progressive. Il en est de même pour d'autres paramètres. Ainsi, des divergences liées au seuillage peuvent se produire et s'accumuler tout au long du processus de classement ou de notation entre SCS-CN et IRIP.
3. Le modèle IRIP ne prend pas en compte la présence d'une nappe dans les sols, tandis que le modèle SCS-CN le fait via un forçage vers un classement plus ruisselant si la nappe est suffisamment superficielle dénotant la plus faible capacité du sol à stocker l'eau qui s'infiltre. C'est là un point faible du modèle IRIP qui pourrait

prendre en compte cette donnée de manière continue¹³ et non seuillée comme SCS-CN. Cette différence de considération de la nappe participe sans doute à une certitude plus faible dans certaines vallées.

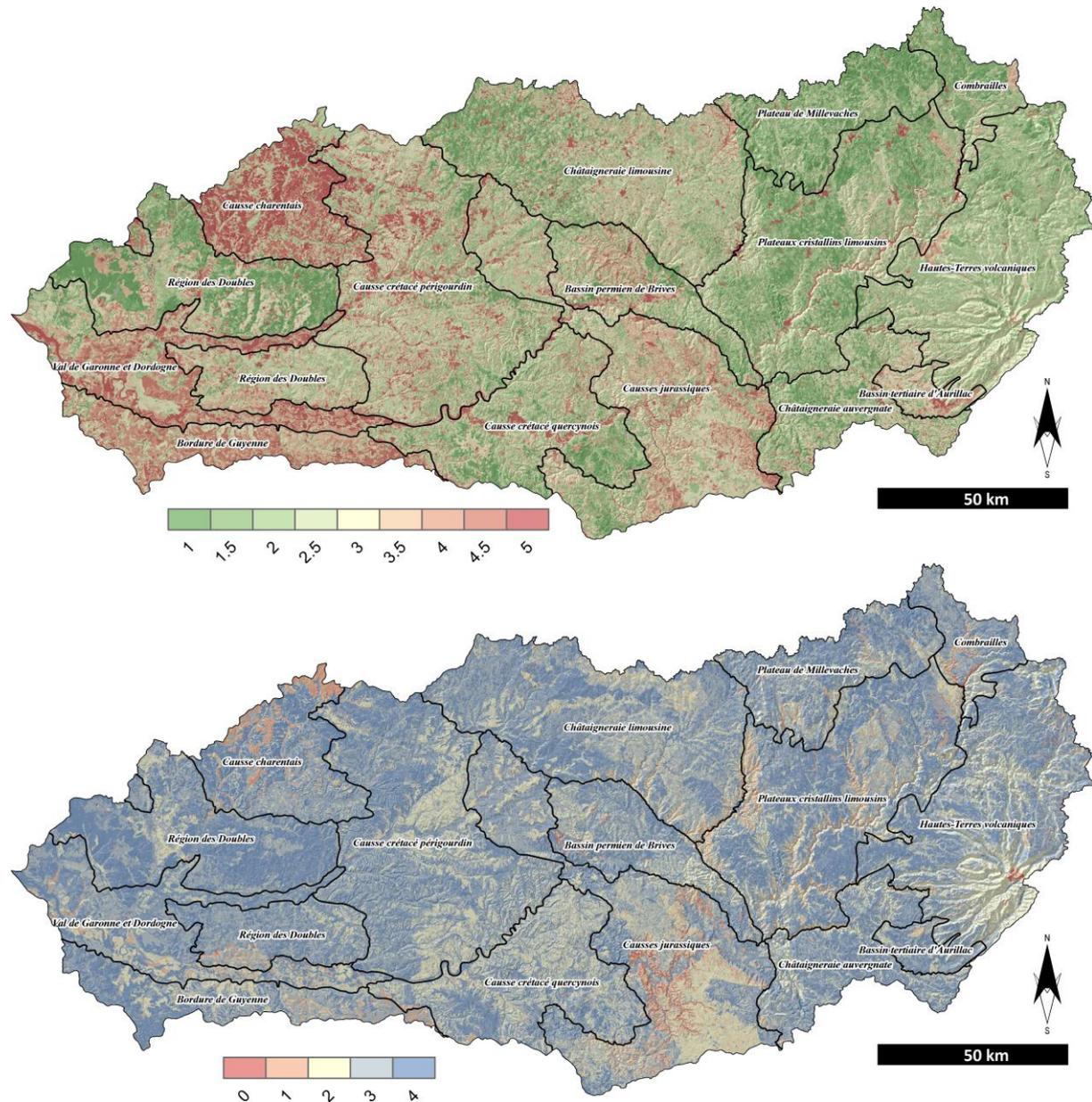


Figure 72 - Carte combinée de la susceptibilité à la PRODUCTION. En haut, carte de susceptibilité à la PRODUCTION. En bas, carte de certitude.

Le même travail a été réalisé pour le TRANSFERT et l'ACCUMULATION. La combinaison du TRANSFERT donne 58.9% de pixels qui ont un classement commun et 34.6% avec une classe d'écart, soit 93.5% de pixels possédant une bonne certitude de classement. Comme pour la PRODUCTION, les valeurs extrêmes sont bien classées (incertitude faible). La combinaison de l'ACCUMULATION est encore plus performante avec 74.6% des pixels classés de la même manière par les deux modèles SCS-CN et IRIP et 25.1% ayant une différence de classement d'une classe. Au total, 99.7% des pixels sont classés de manière identique ou à une classe près par les deux modèles. Ces très bons chiffres sont en grande partie liés au poids majeur du facteur topographique dans l'évaluation des susceptibilités de ces deux

¹³ Une solution aurait pu être de limiter la profondeur du sol à la profondeur de la nappe pour calculer le facteur d'épaisseur du sol. Par manque de temps, nous n'avons pas pu tester cette solution.

compartiments, soit une variable identique pour les deux modèles. Les résultats cartographiques sont présentés ci-dessous (Figure 73).

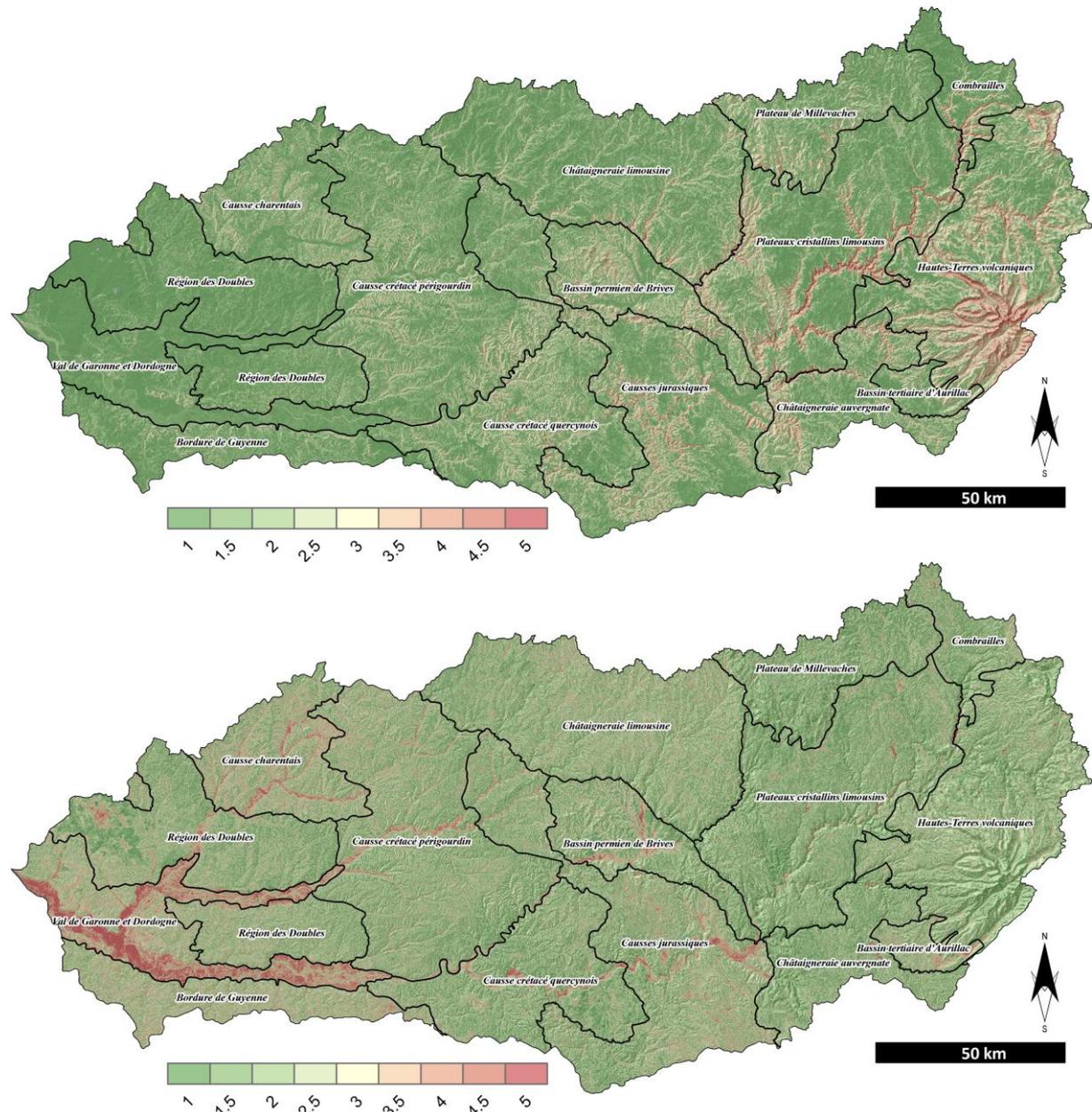


Figure 73 - Cartes combinées des TRANSFERT et ACCUMULATION. En haut, le TRANSFERT. En bas, l'ACCUMULATION.

Sur ces cartes, on retrouve bien pour le TRANSFERT, les zones de gorges, les grands escarpements, les versants cantaliens et, dans une moindre mesure, les incisions multiples dans les Causse et le bassin molassique de l'ouest comme fortement susceptibles. L'ACCUMULATION reste cantonnée aux grandes vallées alluviales et, de manière plus fine spatialement, aux vallons des têtes de bassin versant et thalwegs secondaires, ainsi qu'aux dépressions locales et bassins. Les très fortes certitudes n'ont pas justifié de présenter les cartes de répartition des certitudes car elles sont spatialement peu discriminantes (relative homogénéité des cartes).

7.2. Du modèle à la carte : catégorisation finale et problèmes sémiologiques

Les cartes produites sont présentées et commentées dans la Notice Cartographique qui accompagne ce rapport technique. Nous ne développons ici que la démarche et les choix cartographiques qui ont été faits.

La sémiologie est un ensemble de règles formelles encadrant la construction des cartographies et visant à rendre intelligibles les informations représentées. Elle pose des règles aussi bien pour les informations contextuelles et leur organisation (légende, titre, informations, annexes, structuration de l'information dans l'espace du cadre de la carte, etc.), que sur le choix des couleurs, le classement de l'information, etc. Il n'existe malheureusement pas d'écrits spécifiques aux règles sémiologiques pour les cartes de ruissellement, mais il existe une littérature sur le risque d'inondation. Afin de construire nos cartes, nous nous sommes basés sur les travaux de Chesneau (2004, 2006), qui a réalisé sa thèse de doctorat à l'IGN sur les questions de contrastes colorimétriques pour les cartes de risque, et les travaux de Graziano (2009), qui a réalisé ses travaux de fins d'études à PolyTech' Tours sur la question de la sémiologie expérimentale appliquée au risque d'inondation.

Le premier travail a cherché à simplifier l'information de la susceptibilité en 4 classes "textuelles" en se basant sur les recommandations des auteurs. Nous avons également attribué un dégradé de couleur bleu exprimant l'augmentation de la susceptibilité. Par contre, nous avons délibérément choisi de rompre le dégradé pour les classes de forte et très forte susceptibilité en adoptant une couleur froide (on reste dans les tons froids), mais qui attirent plus l'œil du lecteur (Tableau 16). Ce choix a été motivé pour mettre l'accent sur les zones sensibles auprès des personnes qui seront en charge de l'élaboration des SCoT.

Tableau 16 - Classes de susceptibilité. Les chiffres de la 1^{ère} colonne indiquent le code RGB.

Classe + RGB	Classe des cartes combinée	Libellé	Interprétation
190/232/255	1 - 1.5	Nul à faible	Aucun facteur de prédisposition favorable au ruissellement. Ces zones pourraient contribuer au ruissellement uniquement en cas de pluies incidentes extrêmes (événement centennal) ou en cas de changement important des conditions d'occupation du sol, de la topographie ou suite à une modification significative des caractéristiques pédologiques.
115/178/255	2 - 2.5	Faible à moyen	Pas de facteurs de prédisposition nettement favorables au ruissellement, mais des conditions moins bonnes que précédemment. Ces zones ne contribueraient pas pour des pluies intenses "normales", mais seraient contributrices pour des événements supérieurs à la moyenne des pluies intenses ou si les sols sont saturés avant l'événement "normal."
0/38/115	3 - 3.5	Moyen à fort	Existence d'au moins un facteur de prédisposition favorable au ruissellement. Ces zones devraient être contributrices pour des épisodes intenses "normaux". Le degré de leur contribution reste dépendant du niveau des pluies. En cas de saturation antécédente, ces zones peuvent être fortement contributrices. À noter que ces zones sont sensibles à tout changement des conditions agro-morpho-pédologiques.
230/0/169	4 - 4.5 - 5	Fort à très fort	Tous les facteurs de prédisposition sont favorables au ruissellement. Ce sont normalement des zones contributrices "chroniques" lors de chaque épisode pluvieux intense. L'activation de ces zones reste dépendante de l'existence d'un facteur déclenchant (pluie intense) et leur pertinence reste soumise à la probabilité d'une pluie cinquantennale.

L'organisation des cartes s'est basée sur les résultats expérimentaux de balayage visuel des cartes par les lecteurs (Graziano, 2009) :

- Information cartographique au milieu (premier aperçu, puis reprise de lecture après le premier balayage oblique)
- Titre en haut à gauche (début de balayage oblique),
- Légende en bas à droite (balayage oblique),
- Informations complémentaires en bas à gauche, notamment les mentions légales (moins important pour la compréhension de l'information cartographique).

Ce travail a été fait pour les 3 compartiments du ruissellement (PRODUCTION, TRANSFERT et ACCUMULATION). Un exemple est présenté en Figure 74.

Abisset, 2000). Nous notons également que, pour ce lot de communes, nous retrouvons exactement la même répartition entre CatNat et sans CatNat que pour les 1350 communes n'ayant pas répondu. Ceci veut dire que l'échantillon est bien représentatif. Concernant les communes ayant déclaré avoir subi des phénomènes de ruissellement, 38 (soit 83%) ont bénéficié d'un arrêté CatNat, ce qui est logique. On peut supposer, pour les 8 communes restantes, que les phénomènes n'ont pas entraîné de dégâts majeurs nécessitant un arrêté CatNat, comme cela a été mentionné dans les réponses (expression de "dégâts mineurs").

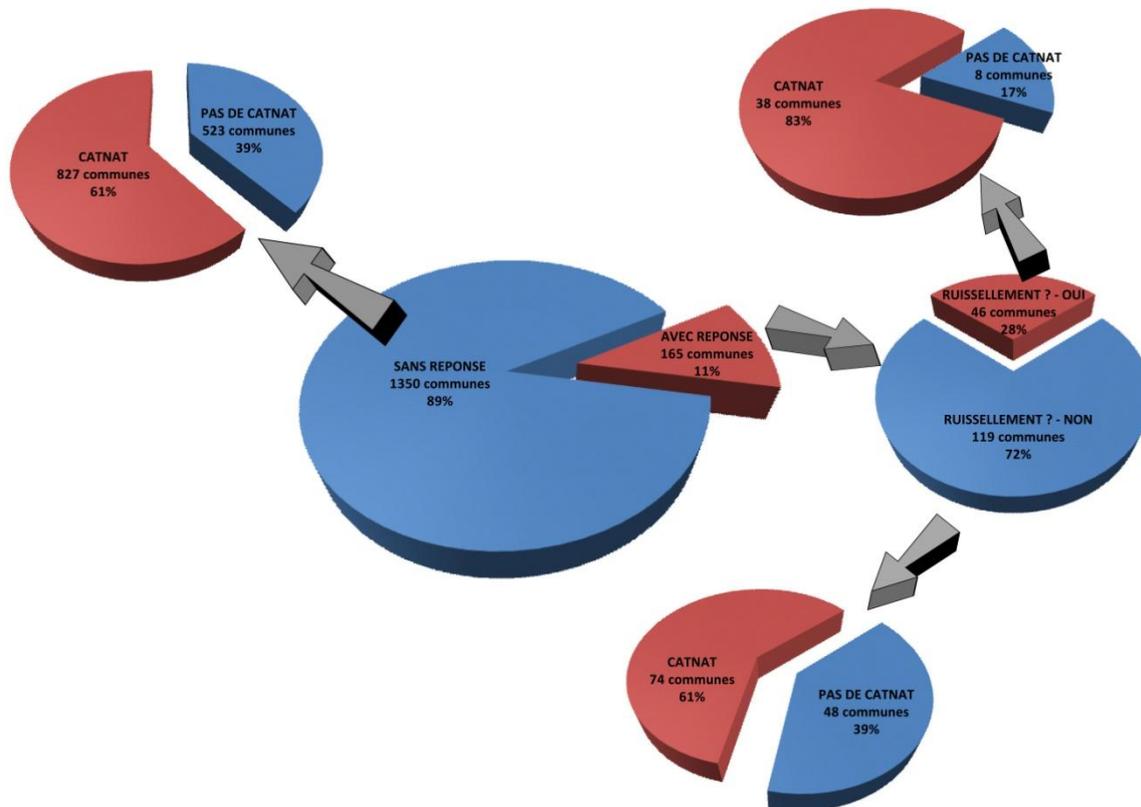


Figure 75 - Répartitions des communes selon leur statut CatNat et enquête.

Les communes ayant répondu "non" totalisent depuis 1982, 147 arrêtés CatNat (soit 2 CatNat/communes ayant bénéficié d'un arrêté CatNat, ce qui rejoint les proportions des communes n'ayant pas répondu à l'enquête) et celles ayant répondu "oui", 124 (soit 3.3 CatNat/communes ayant bénéficié d'un arrêté CatNat). Ce chiffre montre globalement que les communes ayant répondu et ayant bénéficié d'un arrêté CatNat sont touchées de manière plus récurrente par l'aléa ruissellement.

Au final, les 11% de réponses sont bien représentatifs (similarité des proportions CatNat entre les communes n'ayant pas répondu à l'enquête et celles ayant répondu "non") et plus forte récurrence statistique des événements pour les communes ayant répondu "oui" (3.3 CatNat/commune depuis 1982 contre 2 en moyenne).

7.3.2. Spatialisation et croisement avec les cartes finales

Pour les communes n'ayant pas répondu à l'enquête, on constate que la distribution spatiale des arrêtés CatNat se concentre surtout sur l'ouest et le centre du bassin versant ainsi que sur le Cantal. On remarque par contre que la Montagne limousine, la Châtaigneraie auvergnate, le Cézallier et une partie des Doubles n'ont pas eu à subir de dégâts suite à des ruissellements (Figure 76).

Les communes ayant répondu sont distribuées de manière assez aléatoire dans l'espace et couvrent à peu près tous les ensembles géographiques du bassin versant, depuis les zones de montagne et de hauts plateaux à l'est, les causses centraux et la partie des bas plateaux disséqués de l'ouest du bassin versant. Cette distribution est idéale et assure une certaine représentativité.

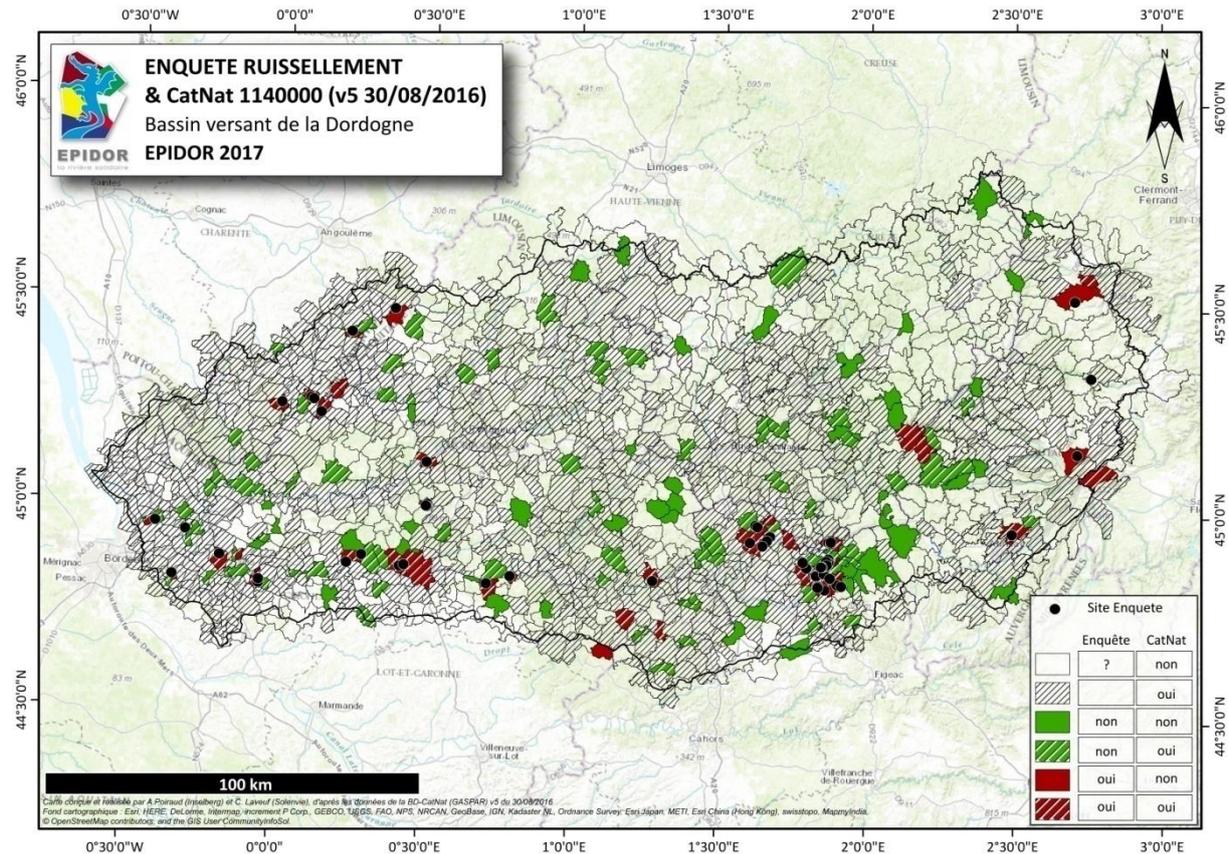


Figure 76 - Cartographie des communes ayant bénéficié d'un arrêté CatNat 1140000 et des résultats de l'enquête. Les points noirs correspondent aux lieux où des phénomènes de ruissellement ont été observés et indiqués par les communes ayant répondu à l'enquête.

7.3.2.1. Résultats et validation à l'échelle communale

Le croisement entre les communes selon leur statut CatNat et les différentes valeurs de susceptibilité à la PRODUCTION, le TRANSFERT, l'ACCUMULATION ou la SUSCEPTIBILITE TOTALE est présenté en Figure 77. Sur cette figure, on voit nettement qu'il n'y pas de différences statistiquement significatives entre les valeurs de susceptibilité modélisées entre les communes ayant bénéficié d'un arrêté CatNat et celles qui n'ont jamais eu de déclaration CatNat.

Le même croisement avec les communes enquêtées fonctionne un peu mieux (Figure 77). Si les variations de valeurs entre les communes ayant répondu "non" ou "oui" et le reste du bassin versant ne sont pas significatives pour la PRODUCTION, on observe par contre un fléchissement net pour les valeurs de TRANSFERT et d'ACCUMULATION pour les communes ayant répondu "oui". Cependant, cette variation, si elle est effective, reste statistiquement peu significative.

À l'échelle communale, nous concluons donc que i) la globalisation des valeurs de susceptibilité est peu informative et ne discrimine pas les communes relativement à l'aléa "ruissellement" et ii) la donnée CatNat ne semble pas la plus pertinente pour réaliser la validation des modèles, car les communes ne sont pas discriminées par ce critère.

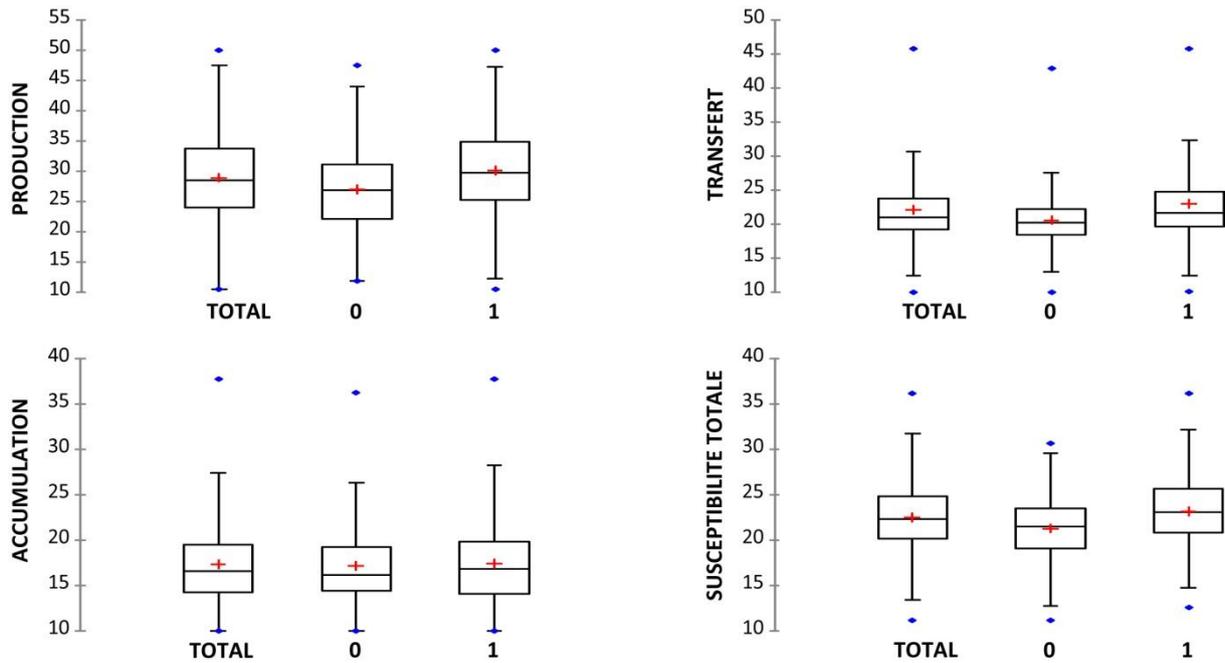


Figure 77 - Box-plot des valeurs de susceptibilité de ruissellement par commune. TOTAL = totalité des 1515 communes; 0 = sans CatNat; 1 = avec CatNat

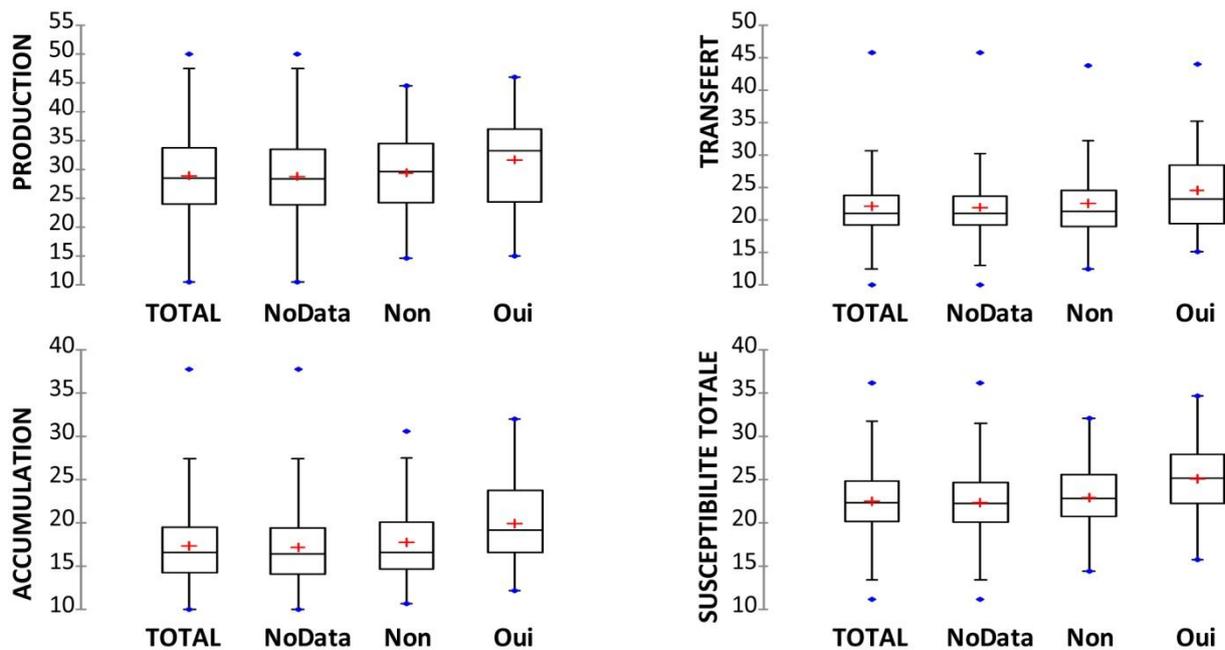


Figure 78 - Box-plot des valeurs de susceptibilité de ruissellement par commune. TOTAL = totalité des 1515 communes ; NoData = communes n'ayant pas répondu au questionnaire (1350) ; Non = communes ayant répondu qu'elles n'étaient pas concernées par le ruissellement ; Oui = communes ayant répondu qu'elles étaient concernées par le ruissellement.

7.3.2.2. Résultats et validation à l'échelle des sites et retours d'expérience

Les données de "zones touchées par les inondations" de l'étude de 2010 recensent 47 zones d'une surface moyenne de $0.2 \pm 0.5 \text{ km}^2$. Sur la Figure 79, on observe que ces zones sont significativement plus susceptibles à la PRODUCTION que la moyenne du bassin versant, cette dernière se trouvant au début du Q25 et bien en dessous de la moyenne/médiane des valeurs de PRODUCTION pour les zones touchées par les phénomènes d'inondations par ruissellement. Les valeurs de TRANSFERT sont également significativement plus élevées que dans le bassin versant, la moyenne du bassin versant restant sous la médiane et bien en dessous de la moyenne. Cette observation est également vraie pour l'ACCUMULATION. Enfin, en synthèse, la valeur de SUSCEPTIBILITE TOTALE moyenne du bassin versant est très significativement inférieure aux valeurs rencontrées dans les "zones touchées par les inondations" de

l'étude de 2010 puisque cette valeur est en dessous du Q25, indiquant que 75% des surfaces des zones touchées par les inondations ont des valeurs de SUSCEPTIBILITE TOTALE supérieures à la moyenne du bassin versant. Il reste que l'approche surfacique lisse encore les données modélisées en intégrant au sein de ces zones, des espaces non directement touchés par les phénomènes de ruissellement.

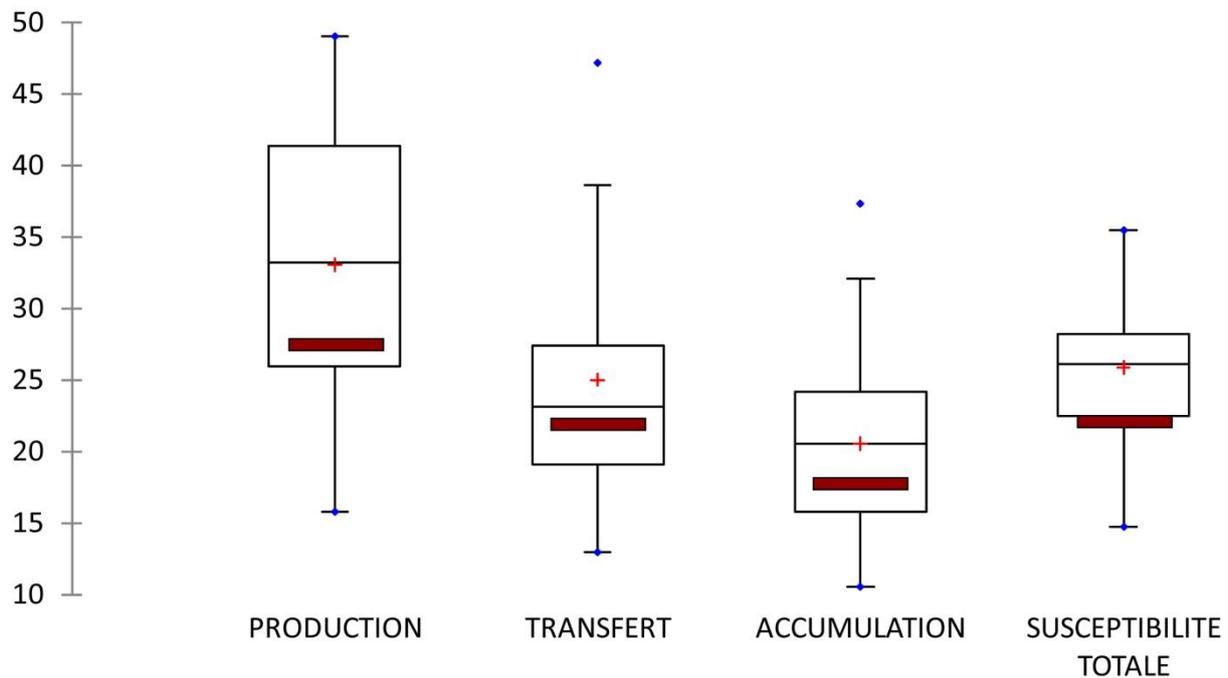


Figure 79 - Box-plot des valeurs de susceptibilité des "zones touchées par les inondations" de l'étude Haziza, 2010. Les croix rouges représentent les moyennes, les rectangles bordeaux les valeurs moyennes sur tout le bassin versant.

Cette observation est confirmée par les relations entre la surface des "zones touchées par les inondations" et l'écart-type des valeurs de susceptibilité. Si cette relation n'existe pas pour la PRODUCTION et reste moyennement significative pour l'ACCUMULATION, elle est par contre réelle et significative pour le TRANSFERT et la SUSCEPTIBILITE TOTALE ($r^2 > 0.3$ en fonction puissance). L'approche surfacique, même si elle est meilleure dans ce cas, génère toujours un biais.

Les données de "coupure de route" de l'étude de 2010 sont délicates à utiliser, car les dégâts sont souvent causés par des problèmes d'hydraulique et d'infrastructures que nous n'avons pas pris en compte dans notre modélisation qui se limitait aux caractéristiques "naturelles" des versants. Les valeurs sont assez peu significatives eu égard à leur important écart-type qui exprime la grande variabilité des valeurs de susceptibilité pour les 24 coupures de route recensées (Tableau 17). Ces valeurs indiquent bien les limites des modèles proposés pour la prédiction des "dégâts" aux infrastructures, car ces dégâts intègrent d'autres paramètres.

Tableau 17 - Synthèse des valeurs de susceptibilité pour les "coupures de pont" de l'étude Haziza (2010).

	PRODUCTION	TRANSFERT	ACCUMULATION	SUSC. TOTALE
MOYENNE	31.7	22.5	24.0	25.8
ECARTYPE	10.7	7.7	7.9	6.0

Les valeurs obtenues à partir des sites donnés au travers de l'enquête sont meilleures, même si les écarts-types demeurent élevés (Figure 80 et Figure 81). Les valeurs moyennes de PRODUCTION avoisinent les valeurs fortes de la classe "moyen à fort" avec des valeurs dans la classe "fort à très fort" (50% des effectifs). Les valeurs de TRANSFERT et d'ACCUMULATION sont dans les gammes hautes de la classe "faible à moyen" et les valeurs de SUSCEPTIBILITE TOTALE sont dans la classe de susceptibilité "moyen à fort". **Globalement, il y a une bonne adéquation, à l'échelle des sites, entre les événements recensés et les modélisations.**

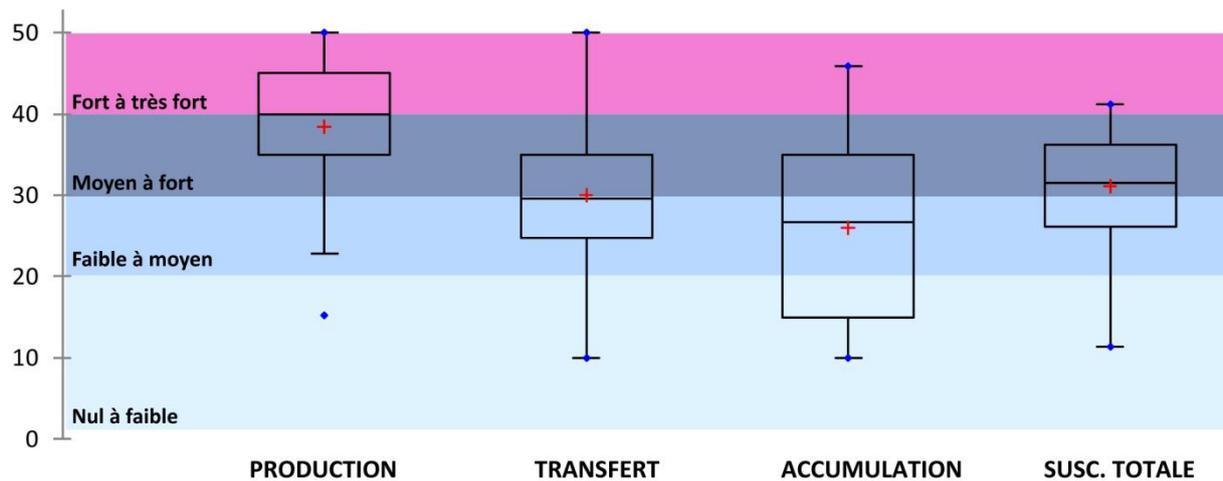


Figure 80 - Box-plot des valeurs de susceptibilité des sites récoltés avec l'enquête de 2017.

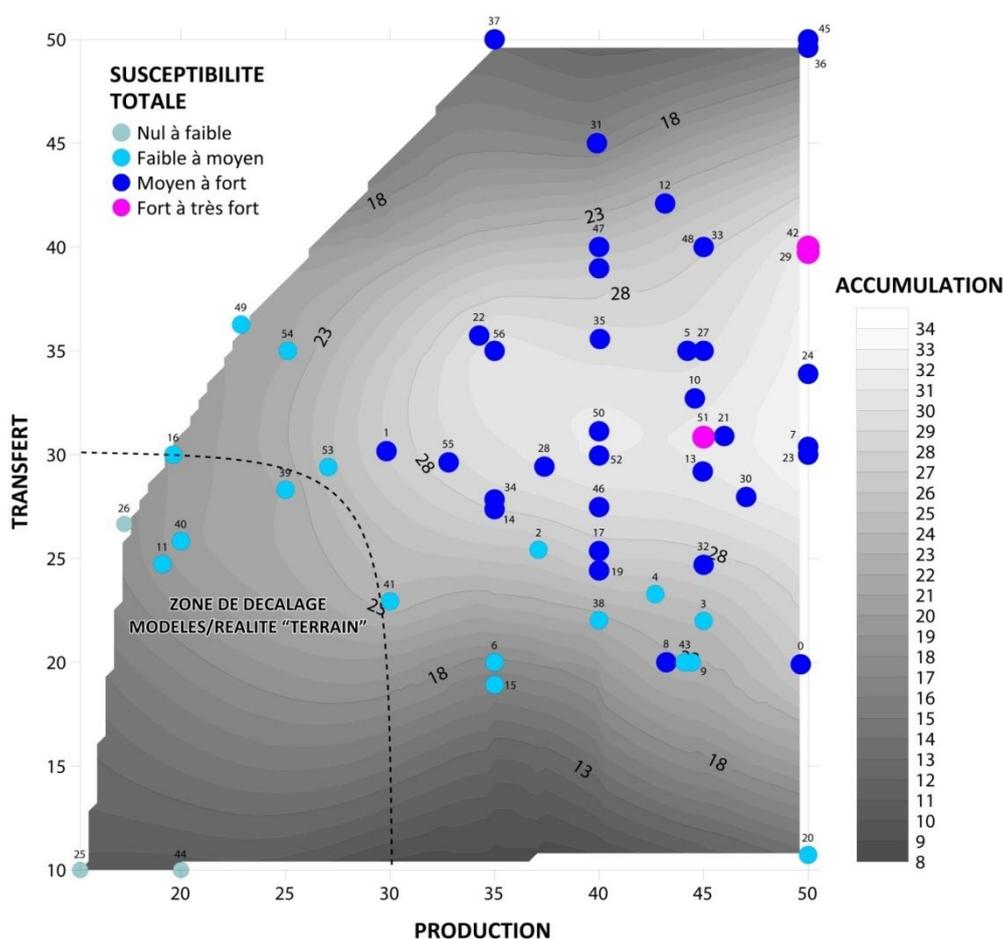


Figure 81 - Graphique à 4 dimensions de la distribution des sites obtenus avec l'enquête de 2017 dans l'espace des valeurs de susceptibilité PRODUCTION, TRANSFERT, ACCUMULATION et SUSCEPTIBILITE TOTALE.

Dans le détail, il demeure des sites qui sont "mal" classés par les modèles, car bien que recensés, ils ont des valeurs de susceptibilité faibles ("Zone de décalage modèle/réalité "terrain", Figure 81). Nous précisons ci-après les particularités des points situés dans cette zone de décalage (Tableau 18). Au final, les sites situés dans la zone de décalage sont surtout des sites pour lesquels il existe des imprécisions géographiques (positionnement imprécis) et/ou des imprécisions attributaires (phénomène autre que ruissellement). Il existe cependant deux points pour lesquels le modèle peut être faillible (la Tour d'Auvergne et St-Vincent-du-Pendit) et qui demandent des vérifications quant aux informations des points. Hormis ces deux cas, les points recensés "tombent" bien dans des zones classées à susceptibilité "moyenne à forte" ou "forte à très forte" ce qui permet de valider les modèles pour ces points. Nous

faisons cependant observer la nécessité de prendre en compte les 3 compartiments, car chaque point répond selon sa position sur les transferts amont-aval. En effet, les valeurs de SUSCEPTIBILITE TOTALE n'expriment que partiellement la susceptibilité du point, car un point peut avoir une valeur de SUSCEPTIBILITE TOTALE faible, mais élevée pour l'un des compartiments (exemple des points 49 ou 54 dont la SUSCEPTIBILITE TOTALE est faible car peu de PRODUCTION et d'ACCUMULATION, mais situés sur des voies de TRANSFERT).

Tableau 18 - Détail des points issus de l'enquête et situés dans la "zone de décalage".

N° point figure 6	Observations
26	Commune de St-Jean-Lagreste : Concentration des eaux par une route en bordure de petit vallon. Les effets des routes n'ont pas été pris dans le modèle.
25	Commune de St-Jean-Lagreste : la route est un ancien chemin "creux" dont la topographie de détail n'est pas prise en compte par la BDAlti25m. De plus, situé sur un interfluve surbaissé en contexte de bocage, il ne cumule pas les facteurs de prédisposition au ruissellement. Nous sommes là dans une situation particulière liée à la topographie de détail et à la concentration par le réseau routier. Cette configuration n'est pas prise en compte par les modèles.
44	Commune de Couze-et-St-Front : Problème de localisation imprécise, car la commune a juste donné le nom du hameau autour duquel le phénomène s'est passé (Toutifaud). Si ce phénomène s'est passé dans le vallon au sein duquel passe le GR6 et qui se situe juste en dessous du hameau, les valeurs de susceptibilité auraient été plus élevées.
11	Commune de Gagnac-sur-Cère : Les modèles sont ici en limite spatiale, car si le point était situé 10m au SE, il serait en susceptibilité moyenne à forte. Il s'agit pour cet événement d'un problème d'échelle, l'échelle pour appréhender ce cas étant du 1/5 000.
40	Commune de St-Vincent-du-Pendit : Ce point avait été intégré dans la base, mais il manque des informations, car il s'agit de phénomènes de débordement d'un affluent dont on ne sait pas s'il est canalisé ou pas. Le problème viendrait ici des informations sur le point. Dans le cas contraire, le modèle est faillible localement.
39	Commune de St-Sulpice-de-Faleyrens : Caractérisation du point imprécise (il s'agit en fait peut-être d'inondation par débordement) et localisation imprécise (bourg...).
16	Commune de la Tour d'Auvergne : Inondation d'un camping dans les années 70, situé en aval d'une cascade. Il s'agit peut-être d'inondations par débordement plus que du ruissellement. Dans le cas d'inondation par ruissellement, le modèle est alors faillible à cet endroit, car toute la zone est à faible susceptibilité.

7.7. Conclusions sur la validation

Les arrêtés CatNat ne constituent pas une donnée de validation pertinente pour le ruissellement à l'échelle du bassin versant.

La validation par des "zones" ou des surfaces n'est pas la plus pertinente non plus, car elle écrase les disparités spatiales.

La globalisation des valeurs de susceptibilité à l'échelle communale ou de zones surfaciques écrase le pouvoir informatif des modèles de susceptibilité. L'intérêt de ces modèles reste leur capacité de spatialisation qui ne doit donc pas être "moyennée" à l'échelle de découpages administratifs.

Les modèles sont en adéquation avec les sites récoltés lors de l'enquête de 2017 et du travail d'Hydratec. On peut les juger comme répondant à la demande.

Les modèles sont par contre déficients dès qu'il s'agit de prédire des cas particuliers, comme liés à la topographie de détail (limites de la BDAlti25) ou liés à des défauts d'infrastructures (ils n'ont pas été construits en intégrant cette donnée très précise).

Il est nécessaire de bien raisonner sur les 3 compartiments du ruissellement (PRODUCTION, TRANSFERT, ACCUMULATION), la SUSCEPTIBILITE TOTALE moyennant trop les valeurs spécifiques (Figure 81). L'utilisation des cartes et toute réflexion sur le phénomène de ruissellement doivent donc systématiquement prendre en compte ces 3 compartiments.

Partie 8. Essai de cartographies d'aléa et de risque

[Fort des résultats encourageants sur la susceptibilité, nous avons tenté de produire une série de cartes d'aléa et de les croiser avec des enjeux afin d'estimer le niveau de risque de certaines infrastructures au phénomène de ruissellement. Ces cartes restent "expérimentales, car i) la modélisation du facteur déclenchant (les pluies) demeure basée uniquement sur les données historiques (analyse fréquentielle expérimentale) et n'ont pas fait l'objet d'une modélisation probabiliste avec un ajustement de Gumbel et ii) les données sur les enjeux restent très "grossières", tout comme l'analyse de vulnérabilité. Cela dit, l'intérêt de l'exercice est malgré tout de précibler les zones présentant un fort aléa historique, ce qui relativise un peu les cartes de susceptibilité.]

8.1. Modélisation de l'aléa historique

L'aléa est réalisé dès lors que les facteurs de prédispositions (statiques) sont croisés avec les facteurs de déclenchement (dynamiques). Pour ce faire, nous avons croisé le modèle combiné de PRODUCTION (Figure 72) avec la pluie maximale historique enregistrée depuis 1958 (Figure 18) afin de produire l'aléa historique (Figure 82). Le croisement s'est fait par le produit de la pluie maximale historique (80 à 200mm) avec les niveaux de susceptibilité issus des cartes combinées (de 10 à 50).

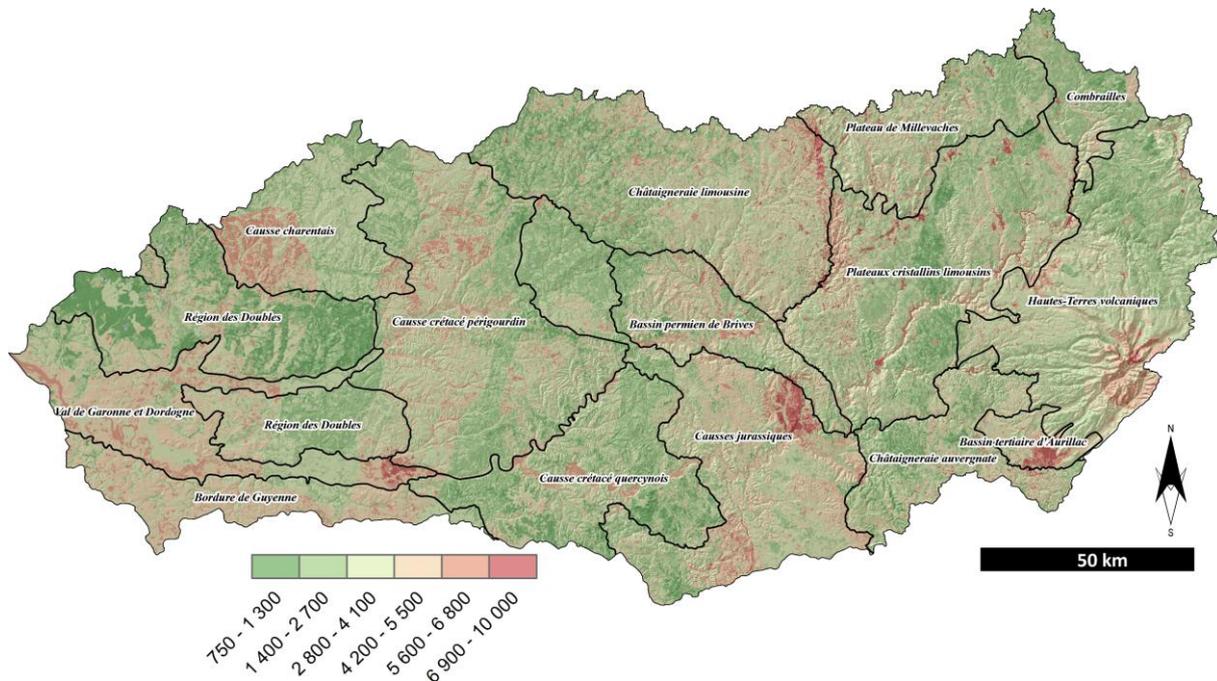


Figure 82 - Sortie de modèle pour l'aléa historique. Classement par écart-type à 1σ . Sans unités.

Cet aléa n'est pas l'aléa probable pour le futur, car il n'est pas basé sur une modélisation probabiliste du facteur de déclenchement. Cependant, il donne une bonne idée des fréquences historiques, qui ont une forte probabilité de se reproduire dans l'avenir proche, sur le bassin versant.

Le facteur "pluie" décale les zones à fort aléa vers l'est :

- **Massif du Cantal et bassin d'Aurillac** : ces deux zones cumulent les maxima de pluie sur le bassin versant de la Dordogne. Le bassin d'Aurillac s'avère être un *hotspot* potentiel avec d'ailleurs des communes qui cumulent les arrêtés CatNat pour "inondations et coulées de boues".
- **L'escarpement oriental de Tulle** : cette zone de relief concentre les éléments d'aléa (transfert rapide, cumul de pluies), avec notamment des arrêtés CatNat surtout concentrés sur la ville de Tulle (6 arrêtés depuis 1982).
- **La zone de Condat/Vayrac** : cette zone combine une forte susceptibilité de PRODUCTION et de TRANSFERT avec des maxima importants (200mm) et des récurrences avérées (entre 5 et 10 événements >50mm/24h depuis 1958). On recense de nombreux arrêtés CatNat sur les communes de cette zone.
- **Les têtes de bassin du Céou**, entre Labastide-Murat et Ginouillac : cette zone est fortement susceptible à la PRODUCTION et au TRANSFERT sur les parties amont. Il y a eu au moins un événement majeur (150mm/24h) et des arrêtés CatNat sur la zone.
- **Les périphéries de Bergerac** : Au moins un événement pluvieux majeur (150mm/24h), mais, dans les arrêtés CatNat (7 depuis 1982), il est difficile de différencier ce qui est lié aux inondations par débordement de ce qui est lié au ruissellement.
- **La Bordure de Guyenne** et le sud-ouest des **Causse charentais** : dans une moindre mesure, ces deux zones apparaissent à aléa important mais forment un vaste ensemble cohérent. Les événements pluvieux ne sont pas fréquents et la pluie maximale n'est pas des plus élevées (120mm/24h). Par contre, les fortes susceptibilités au ruissellement peuvent expliquer que ces zones soient réactives pour des pluies de moindre ampleur que dans le Cantal. De plus, la forte anthropisation du secteur favorise les dégâts. On

trouve de nombreux arrêtés CatNat dans ces deux zones, pour des communes excentrées des axes fluviaux, donc a priori, qui ont été soumises à des inondations par ruissellement.

8.2. Modélisation du "risque" lié au ruissellement

Cette notion de "risque" n'est pas non plus celle formalisée dans les guides PPRI. En effet, nous ne sommes pas partis de l'aléa, mais des susceptibilités au TRANSFERT et à l'ACCUMULATION que nous avons croisées avec des enjeux évalués selon leur vulnérabilité théorique au phénomène de ruissellement. Il s'agit donc plutôt de cartes de sensibilités théoriques des enjeux aux divers compartiments du ruissellement considérés. Pour plus de commodités, nous dénommerons ces cartes avec le terme "risque" entre guillemets. Nous avons considéré deux enjeux (Tableau 19) :

Tableau 19 - Enjeux et susceptibilités croisées pour produire les cartes de "risque".

ENJEUX	Données de base	Compartiment	"Risque"
Routier	BD-Route 500 IGN	TRANSFERT	Coupure de route
Agglomération	Corine Landcover 2012 contraint par le RPG 2012	ACCUMULATION	Inondation par ruissellement

8.2.1. Le "risque" coupure de route

Les coupures de route sont plutôt liées au TRANSFERT du ruissellement en dehors des zones alluviales, c'est pourquoi nous avons croisé cet enjeu avec la susceptibilité au TRANSFERT. Nous avons considéré une vulnérabilité nulle pour les autoroutes étant donné que ces infrastructures sont normalement calibrées pour ne pas être soumises à ce phénomène. Nous avons par contre considéré une vulnérabilité de 1 pour les autres types de routes (nationale, départementale et communale). Nous sommes conscients que cette évaluation est très approximative, mais au vu des données de base, il nous était difficile d'aller plus loin. En théorie, il aurait fallu attribuer des valeurs de vulnérabilité à chaque tronçon en fonction des caractéristiques des fossés bordiers, de la nature de la couche de couverture, de son élévation par rapport au niveau topographique du terrain naturel, des ouvrages hydrauliques, etc., mais nous n'avions pas accès à ces données pour les 24 000km² du bassin versant. De fait, cette modélisation est pour nous très grossière et ne peut être utilisée qu'à une échelle régionale (Figure 83).

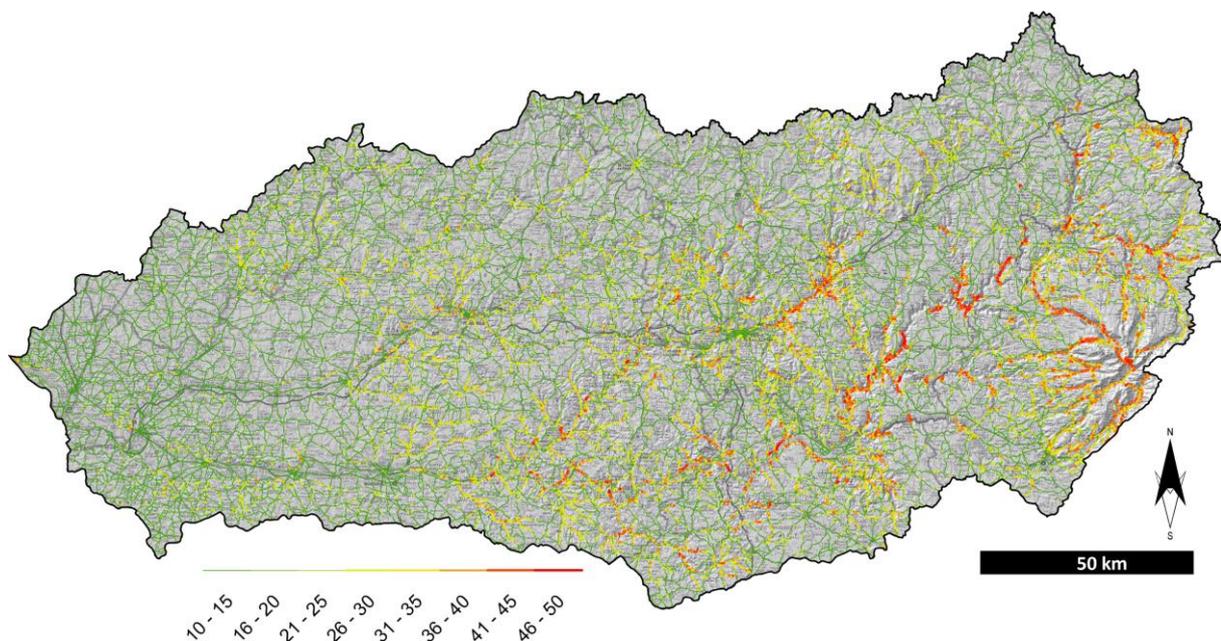


Figure 83 - "Risque" routier. Fond cartographique, Scan REGIONAL - IGN.

On voit bien que le "risque" de coupure de route est plutôt concentré sur la partie montagnarde du bassin versant (vallées glaciaires du Cantal, vallée de la Rhue, etc.) ou dans les sections en gorges de la Dordogne (Corrèze, région des Causses), là où les pentes favorisent un TRANSFERT rapide et à forte compétence théorique.

8.2.2. Le "risque" urbain

Le risque urbain est plutôt lié à l'inondabilité des zones artificialisées. Nous avons donc croisé la susceptibilité à l'ACCUMULATION avec la vulnérabilité des zones urbaines et périurbaines selon cette catégorisation (Figure 84) :

- TUC (Tissu urbain concentré) : vulnérabilité = 4. Espace urbain dense, habité, ultra-artificialisé. Vulnérabilité maximale.
- ZIC (Zone industrielle et commerciale) : vulnérabilité = 3. Espace artificialisé, avec des densités humaines importantes lors des périodes de pointe (en journée). Vulnérabilité importante.
- INF (Infrastructures diverses) : vulnérabilité = 1. Infrastructures avec risque de dégâts matériels, mais peu de risque humain.
- TUD (Tissu urbain discontinu) : vulnérabilité = 2. Espace semi-artificialisé avec des espaces infiltrants et des densités humaines variables en journée.
- ESL (Équipements sportifs et de loisirs) : vulnérabilité = 1. Espaces souvent infiltrants à infrastructures légères et à densité humaine plus faible et variable.

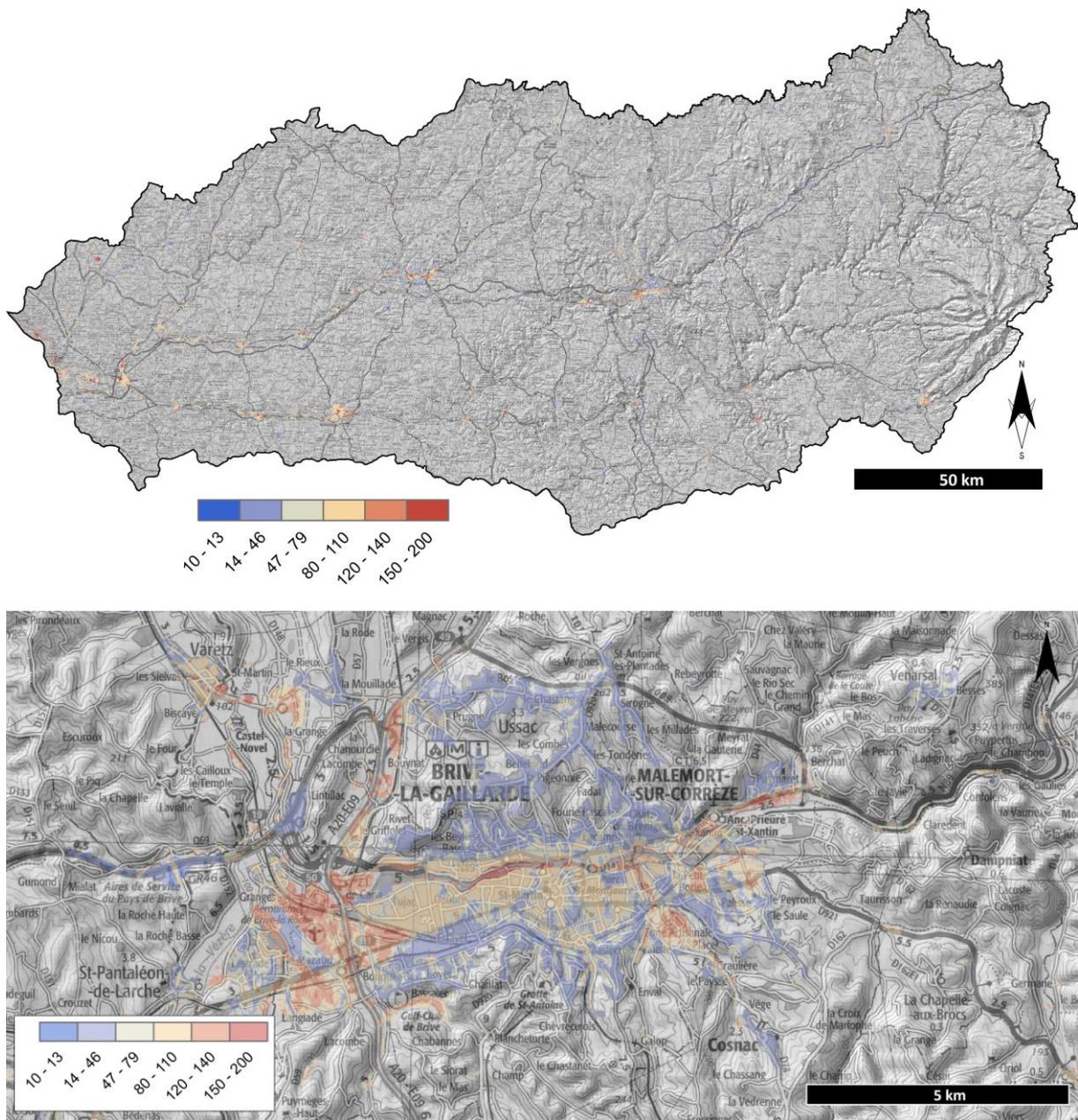


Figure 84 - "Risque" urbain. En haut, "risque" urbain à l'échelle du bassin versant, fond SCAN REGIONAL IGN; En bas, zoom sur l'agglomération de Brive-la-Gaillarde, fond SCAN100 IGN. Classement par écart-type à 1σ .

Le risque est souvent concentrique autour des aires urbaines, mais avec un risque souvent accru au niveau des zones industrielles et commerciales périphériques (zones basses à vulnérabilité importante). Nous rappelons que cette notion de "risque" urbain ne prend pas en compte la structuration des réseaux pluviaux ou autres infrastructures de remédiation possiblement existantes.

Conclusion générale de l'étude

Cette étude s'est appuyée sur un processus de modélisation lourd, issue de la recherche, avec d'importants développements du modèle IRIP. Il s'est aussi appuyé sur des données d'entrée que l'on a souhaité les plus robustes possible par rapport à la commande initiale, tout en limitant leurs coûts d'acquisition. Enfin, un effort a été fait pour rendre les cartes finales intelligibles et faciles à utiliser.

Appréciation des résultats finaux et usages recommandés

Les modèles combinés obtenus qui ont servis à réaliser les cartes finales présentées dans la notice cartographique sont jugés **robustes**, car i) ils répondent bien aux tests statistiques utilisés durant tout le processus de construction de ces modèles, et ii) leur comportement est acceptable par rapport aux données de l'enquête et des informations récoltées par Hydratec dans le cadre de l'étude complémentaire menée par le CAUVALDOR.

L'agrégation de plusieurs données d'entrée cartographiques et leurs caractéristiques nous amènent cependant à poser quelques limites :

- Le modèle est spatialement moins précis dans les zones forestières et les zones urbaines car les contours y sont ceux de Corine Landcover
- Le modèle reste très critiquable dans les espaces urbains et périurbains denses pour la simple et bonne raison que les modèles ne prennent absolument pas en compte les réseaux pluviaux. Nous restons bien sur un modèle de ruissellement de versant en contexte subnaturel et agricole. En contexte urbanisé, ce modèle reste très général.
- Construit sur le BDAlti 25m, il ne peut modéliser les comportements de ruissellement liés à la topographie de détail.
- Nous recommandons une utilisation à 1/50 000. Toutes utilisations à une échelle plus grande (1/25 000, 1/10 000, etc.) ne nous semblent pas souhaitables.

Les autres précautions d'usage de détail sont listées dans la notice cartographique.

Bibliographie

- Adhikary P.P., Chakraborty D., Kalra N., Sachdev C.B., Patra K., Kumar S., Tomar R.K., Chandna P., Raghav D., Agrawal K., Sehgal M. 2008. Pedotransfer functions for predicting the hydraulic properties of Indian soils. *Australian Journal of Soil Research*, 46 : 476-484
- Antoni V., Le Bissonnais Y., Thorette J., Zaidi N., Laroche B., Barthès S., Daroussin J., Arrouays D. 2006. Modélisation de l'aléa érosif des sols en contexte méditerranéen à l'aide d'un Référentiel Régional Pédologique au 1/250000 et confrontation aux enjeux locaux. *Etude et gestion des Sols*, 13, 3 : 201-222
- Armstrong JS. 2001. Combining Forecasts. In *Principles of Forecasting: A Handbook for Researchers and Practitioners*, (ed.) JSA (ed). Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers; 1–18.
- Arrouays D., Jamagne M. 1993. Sur la possibilité d'estimer les propriétés de rétention en eau de sols limoneux lessivés hydromorphes du Sud-Ouest de la France à partir de leurs caractéristiques de constitution. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 79, 1 : 111-121
- Base de Données Analyse des Terres. <http://estrada.oreans.inra.fr/geosol/>
- Bay RR. 1969. Runoff from small peatland watersheds. *Journal of Hydrology* 9 : 90–102. DOI: 10.1016/0022-1694(69)90016-X
- Behzad N. 2013. Evaluation des fonctions de pédotransfert d'un sol hétérogène, milieu récepteur d'eau usée traitée, sur un site pilote dédié. *Sciences de la Terre. Université Paris-Est*. 477 pp.
- Beven KJ, Kirkby MJ. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Bulletin* 24 : 43–69. DOI: 10.1080/02626667909491834
- Beven KJ. 2012. *Rainfall-runoff modelling: the primer*. 2nd ed. Wiley-Blackwell: Chichester, West Sussex ; Hoboken, NJ
- Blöschl G, Sivapalan M. 1995. Scale issues in hydrological modelling: A review. *Hydrological Processes* 9 : 251–290. DOI: 10.1002/hyp.3360090305
- Boelter DH. 1968. Important physical properties of peat materials. Quebec, Canada. 150–154 pp. [online] Available from: <http://www.treesearch.fs.fed.us/pubs/12921> (Accessed 26 September 2016)
- Boiffin J. 1984. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse de docteur-ingénieur. INA-PG, 320 p.
- Boiffin J., Papy F., Eimberck M. 1988. Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. I. Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agronomie*, 8, 8 : 663-673
- Bonnet S. 2012. Cartographie des zones potentielles de production ou d'accumulation du ruissellement de surface en région cévenole, Mémoire de Master 2, Université de Montpellier, IRSTEA Lyon
- Boulaine J. 1980. Sur la précision des cartes pédologiques. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, IV, 1 : 3-7
- Bouvier C. 2004. De la pluie à l'inondation : contribution à la compréhension et à la prévision des événements extrêmes sur petits bassins tropicaux et méditerranéens, Habilitation à Diriger des Recherches, Montpellier 2, IRD: Montpellier, 1 January [online] Available from: <https://www.mysciencework.com/publication/show/19e8e3f28065b15e43d30347dcfc27b3> (Accessed 31 January 2017)
- Brakensiek D.L., Rawls W.J., Stephenson G.R. 1984. Modifying SCS hydrologic soil groups and curve numbers for rangeland soils. *ASAE Paper No. PNR-84-203*, St. Joseph, Mich.
- Brakensiek, D.L., and W.J. Rawls. 1983. Agricultural management effects on soil water processes. Part II. Green and Ampt parameters for crusting soils. *ASAE Trans.* 26 : 1753-1757.
- Bruand A., Duval O., Cousin I. 2004. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOLHYDRO : une première proposition combinant le type d'horizon, sa texture et sa densité apparente. *Étude et Gestion des Sols*, 11 : 323-334
- Bruand A., Pérez Fernandez P., Duval O. 2003. Use of class pedotransfer functions based on texture and bulk density of clods to generate water retention curves. *Soil Use and Management*, 19 : 232-242
- Burrough PA, McDonnell R, Burrough PA. 1998. *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press: Oxford ; New York
- Burt TP, Butcher DP. 1985. Topographic controls of soil moisture distributions. *Journal of Soil Science* 36 : 469–486. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1985.tb00351.x
- Campbell C.S. 1985. *Soil Physics With Basic*. Elsevier , New York. 149 pp
- Cartier S. 2004. « Le traitement médiatique des catastrophes dans l'histoire, entre oubli et mémoire ». *Natures Sciences Sociétés* 12 : 439–441.
- Casenave A, Valentin C. 1990. Les Etats de surface de la zone sahélienne: influence sur l'infiltration . Éd. de l'ORSTOM: Bondy
- Casenave A. et Valentin C., 1989. Les états de surface de la zone sahélienne. *ORSTOM*, p. 229
- Cerdà A. 2001. Effects of rock fragment cover on soil infiltration, interrill runoff and erosion. *European Journal of Soil Science*, 52 : 59-68.
- Cerdan O, Souchère V, Lecomte V, Couturier A, Le Bissonnais Y. 2002. Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model: Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management. *CATENA* 46 : 189–205. DOI: 10.1016/S0341-8162(01)00166-7
- Cerdan O., Desprats J.F., Palvadeau E. 2005. Contexte hydrodynamique des bassins versants du Nord de la Corse (Luri, Bastia, St Florent). *Rapport BRGM RP-54217-FR*, 37 p.
- Cerdan O., Souchère V., Lecomte V., Couturier A., Le Bissonnais Y. 2001. Incorporating soil surface crusting
- Cerdan, O., Le Bissonnais, 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
- Chaplot V, Le Bissonnais Y. 2000. Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes. *Earth Surface Processes and Landforms* 25 : 145–153. DOI:

- 10.1002/(SICI)1096-9837(200002)25:2<145::AID-ESP51>3.0.CO;2-3
- Chesneau E. 2004. Propositions pour une cartographie du risque. *Revue du Comité Français de Cartographie* **181** : 55–70.
- Chesneau E. 2006. Propositions méthodologiques pour l'amélioration automatique des contrastes de couleur - application aux cartes de risque. *Cybergeo* DOI: 10.4000/cybergeo.2889 [online] Available from: <http://cybergeo.revues.org/2889> (Accessed 10 March 2017)
- Chisholm P.S., Irwin R.W., Acton, C.J. 1984. Interpretation of soil drainage groups from soil taxonomy - Southern Ontario. *Can. J Soil Sci.* **64** : 383-393
- Choi J, Oh HJ, Lee HJ, Lee C, Lee S. 2012. Combining landslide susceptibility maps obtained from frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models using ASTER images and GIS. *Engineering Geology* **124** : 12–23.
- Cosby B.J., Homberger G.M., Clapp R.B., Ginn T.R. 1984. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resour. Res.* **20** : 682-690
- Dehotin J, Breil P. 2011. Technical report of the IRIP project: mapping the flooding by runoff. IRSTEA: Lyon
- Dehotin J, Chazelle B, Laverne G, Hasnaoui A, Lambert L, Breil P, Braud I. 2015. Mise en œuvre de la méthode de cartographie du ruissellement IRIP pour l'analyse des risques liés aux écoulements sur l'infrastructure ferroviaire. *La Houille Blanche* : 56–64. DOI: 10.1051/lhb/20150069
- Dehotin, J., Breil, P., 2011. Rapport technique du projet IRIP : Cartographie de l'aléa inondation par
- Demarcin P., Sohier C., Mokadem A.I., Dautrebande S., Degré A. 2022. Essai de cartographie des classes d'infiltrabilité des sols de Wallonie (Belgique). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **15** (1) : 119-128
- Desmet PJJ, Govers G. 1996. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation* **51** : 427–433.
- Desprats J.F., Sidgwick J., Cerdan O., Linardon F. 2003. Modélisation hydrologique du bassin versant du Touch. Cartographie du potentiel d'infiltration des sols et analyses hydrologiques. Rapport intermédiaire. BRGM RP-52808-FR, 47 P.
- Douvinet J, Delahaye D, Langlois P. 2008. Modélisation de la dynamique potentielle d'un bassin versant et mesure de son efficacité structurelle. *Cybergeo* DOI: 10.4000/cybergeo.16103 [online] Available from: <http://cybergeo.revues.org/16103> (Accessed 1 March 2015)
- Duley FL, Hays O. 1932. The effect of the degree of slope on runoff and soil erosion. *Journal of Agricultural Research* **45** : 349–360.
- Eimberck M. 1989-1990. Facteurs d'érodibilité des sols limoneux : réflexions à partir du cas du Pays de Caux. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, XXV, 1-2 : 81-94
- El Kateb H, Zhang H, Zhang P, Mosandl R. 2013. Soil erosion and surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: A field experiment in Southern Shaanxi Province, China. *CATENA* **105** : 1–10. DOI: 10.1016/j.catena.2012.12.012
- European Soil Database v2.0. <http://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/european-soil-database-v20-vector-and-attribute-data>
- Famiglietti JS, Rudnicki JW, Rodell M. 1998. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas. *Journal of Hydrology* **210** : 259–281. DOI: 10.1016/S0022-1694(98)00187-5
- Fang H, Sun L, Tang Z. 2015. Effects of rainfall and slope on runoff, soil erosion and rill development: an experimental study using two loess soils: RAINFALL, SLOPE, LOESS SOIL, RUNOFF, SOIL LOSS AND RILL. *Hydrological Processes* **29** : 2649–2658. DOI: 10.1002/hyp.10392
- Favier R, Granet-Abisset A-M. 2000. Histoire et mémoire des risques naturels. Maison des Sciences de l'Homme-Alpes: Grenoble
- Ferrer-Julιά M., Estrela Monreal T., Sánchez del Corral Jiménez A., García Meléndez E. 2004. Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. *Geoderma*, **123** : pp. 275-277
- Forgy E. 1965. Cluster Analysis of Multivariate Data: Efficiency versus Interpretability of Classification. *Biometrics* **21** : 768–769.
- Fox DM, Bryan RB, Price AG. 1997. The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions. *Geoderma* **80** : 181–194. DOI: 10.1016/S0016-7061(97)00075-X
- Génie Rural, des Eaux et Forêts, Spécialité Science de l'Eau, 212 pp. annexes
- Graziano M. 2009. Sémiologie Graphique Expérimentale (SGE): pour une cartographie efficace du risque d'inondation, Polytech/Tours: Tours
- Gruber S, Peckham S. 2009. Chapter 7 Land-Surface Parameters and Objects in Hydrology. In *Developments in Soil Science*, Elsevier; 171–194. [online] Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S016624810800007X> (Accessed 7 July 2016)
- Hansen WF. 1991. Hazel pistol erosion plot study on the Siskiyou National Forest in Southwest Oregon. presented at the Fire and the environment: ecological and cultural perspectives. Asheville, NC. 107–112 pp.
- Haziza 2010. Etude de retour d'expérience de trois épisodes orageux de juin 2007 et Mai 2008 sur le bassin de la Dordogne, Emma HAZIZA pour EPDIOR, 2010
- Holden J, Burt TP. 2002. Infiltration, runoff and sediment production in blanket peat catchments: implications of field rainfall simulation experiments. *Hydrological Processes* **16** : 2537–2557. DOI: 10.1002/hyp.1014
- Holden J, Burt TP. 2003. Hydrological studies on blanket peat: the significance of the acrotelm-catotelm model. *Journal of Ecology* **91** : 86–102. DOI: 10.1046/j.1365-2745.2003.00748.x
- Huang M, Gallichand J, Wang Z, Goulet M. 2006. A modification to the Soil Conservation Service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China. *Hydrological Processes* **20** : 579–589. DOI: 10.1002/hyp.5925
- Hudson NW. 1957. Erosion control research. Progress report on Henderson Research station. *Rhodesia Agric.* **54** : 297–323.
- Hümann M, Schüler G, Müller C, Schneider R, Johst M, Caspari T. 2011. Identification of runoff processes – The impact of different forest types and soil properties on runoff formation and floods. *Journal of Hydrology* **409** : 637–649. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.08.067
- Janeau JL, Bricquet JP, Planchon O, Valentin C. 2003. Soil crusting and infiltration on steep slopes in northern Thailand.

- European Journal of Soil Science **54** : 543–554. DOI: 10.1046/j.1365-2389.2003.00494.x
- Jenny, H. 1941. Factors of soil formation, New-York. 281 pp. et Jenny, H. 1994. Factors of soil formation: A system of quantitative pedology. Dover Publications, Inc., New York. 281 pp.
- Kopecký M, Čížková Š. 2010. Using topographic wetness index in vegetation ecology: does the algorithm matter?: Topographic wetness index in vegetation ecology. Applied Vegetation Science **13** : 450–459. DOI: 10.1111/j.1654-109X.2010.01083.x
- Lal R. 1976. Soil Erosion Problems on an Alfisol in Western Nigeria and Their Control . Communications and Information Office, IITA [online] Available from: https://books.google.fr/books?id=RX_YAAAAYAAJ
- Le Bissonnais Y., Arrouays D. 1997. Aggregate stability and assessment of soil crutability and erodibility. II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. Eur. J. Soil. Sci, 48 : 39-48
- Le Bissonnais Y., Singer M.J. 1993. Seal formation, runoff and interrill erosion from 17 California soils. Soil Sci. Soc. Am. J, 57 : 224-229
- Lecomte V. 1999. Transfert de produits phytosanitaires par le ruissellement et l'érosion de la parcelle au bassin versant—processus, déterminisme et modélisation spatiale. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale du
- Legros J.P. 1996. Cartographie des sols : de l'analyse spatiale à la gestion des territoires, 380 pages
- MDDEP. 2009. Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs (MDDEP). Direction des politiques du secteur municipal. Service de l'expertise technique de l'eau. Guide technique sur le traitement des eaux usées des résidences isolées (Q-2, R.8), Québec
- Menberu MW, Haghghi AT, Ronkanen A-K, Kværner J, Kløve B. 2015. Runoff Curve Numbers for Peat-Dominated Watersheds. Journal of Hydrologic Engineering **20** : 04014058. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001038
- Merz B, Plate EJ. 1997. An analysis of the effects of spatial variability of soil and soil moisture on runoff. Water Resources Research **33** : 2909–2922. DOI: 10.1029/97WR02204
- Mishra SK, Chaudhary A, Shrestha RK, Pandey A, Lal M. 2014. Experimental Verification of the Effect of Slope and Land Use on SCS Runoff Curve Number. Water Resources Management **28** : 3407–3416. DOI: 10.1007/s11269-014-0582-6
- Mockus V. 1949. Estimation of total (and peak rates of) surface runoff for individual storms . U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Mockus V. 1965. Design hydrographs . U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Musgrave, G.W. 1955. How much of the rain enters the soil? In Water: U.S. Department of Agriculture. Yearbook. Washington, DC. pp. 151–159
- National Engineering Handbook, 2007, chapitre 7, partie 630-Hydrology, USDA-NRCS
- Niehoff D, Fritsch U, Bronstert A. 2002. Land-use impacts on storm-runoff generation: scenarios of land-use change and simulation of hydrological response in a meso-scale catchment in SW-Germany. Journal of Hydrology **267** : 80–93. DOI: 10.1016/S0022-1694(02)00142-7
- Norme AFNOR CARTO NF X31-560 fixant la densité d'observation en fonction de l'échelle de représentation
- O'Callaghan JF, Mark DM. 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. Computer Vision, Graphics, and Image Processing **28** : 323–344. DOI: 10.1016/S0734-189X(84)80011-0
- Ogrosky H.O. & Mockus V., 1964. Hydrology of agricultural lands. In: Ven Te Chow. Handbook of applied hydrology. New York, USA: Mc Graw-Hill Book Company, 21.1-21.97
- Pan C, Ma L, Wainwright J, Shangguan Z. 2016. Overland flow resistances on varying slope gradients and partitioning on grassed slopes under simulated rainfall: OVERLAND FLOW RESISTANCE ON VARYING SLOPES. Water Resources Research **52** : 2490–2512. DOI: 10.1002/2015WR018035
- Panagos P, Borrelli P, Meusburger K, Alewell C, Lugato E, Montanarella L. 2015. Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. Land Use Policy **48** : 38–50. DOI: 10.1016/j.landusepol.2015.05.021
- Papy F, Boiffin J, Douyer C. 1988. Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. II. Evaluation des possibilités de maîtrise du phénomène dans les exploitations agricoles. Agronomie **8** : 745–756.
- Poesen J.W.A. & van Wesemael B. 1995. Effects of rock fragments on the structural collapse of tilled topsoils during rain. Kluwer Academic Publishers, 468 : 333-343
- Poesen J.W.A., Parsons A.J., Abrahams A.D. 1992. Mechanisms of overland flow generation and sediment production on loamy and sandy soils with and without rock fragments. University College London Press,
- Poiraud A. 2014. Landslide susceptibility-certainty mapping by a multi-method approach: A case study in the Tertiary basin of Puy-en-Velay (Massif central, France). Geomorphology **216** : 208–224. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.04.001
- Porteret J. 2009. Etude du fonctionnement hydrologique d'une tourbière basse du nord-est du Massif Central français : la Prenarde dans les Monts du Forez. Publication du Centre de Recherche sur l'Environnement et l'Aménagement. Origine, dynamique et conservation des tourbières, Oct 2005, Château de Goutelas, France. Publication de l'Université de Saint-Etienne. 378 pp.
- pp. 275-305
- processes in an expert-based runoff and erosion model STREAM (Sealing Transfer Runoff Erosion Agricultural Modification). Catena, 46 : 189-205
- Quinn P, Beven K, Chevallier P, Planchon O. 1991. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. Hydrological Processes **5** : 59–79. DOI: 10.1002/hyp.3360050106
- Rawls W. J., Brakensiek D.L. 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. In: E. Jones et T. J. Ward (eds.) Watershed Management in the Eighties, Proceedings of a symposium ASCE, 30 : 293-299
- Rawls W.J., Ahuja L.R., Brakensiek D.L. & Shirmohammadi A., 1993. Infiltration and soil water movement. In: Maidment D.R. Handbook of hydrology. New York, USA: Mc Graw-Hill Book Company, 5.1-5.51
- Référentiel pédologique 2008. Association française pour l'étude du sol (Afes). Denis Baize, Michel-Claude Girard, coordinateurs
- REFERSOLS : outil de recherche d'études pédologiques. <http://acklins.ortales.inra.fr/georefersols/>

- Regazzoni C, Payraudeau S. 2012. Impact of land use, soil and DEM databases on surface runoff assessment with GIS decision support tool: A study case on the Briçon vineyard catchment (Gard, France). presented at the EGU General Assembly Conference Abstracts. 2681 pp. April [online] Available from: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2012EGUGA..14.2681R> (Accessed 3 June 2016)
- Rennes S. 2016. Statut juridique des données sols dans le cadre du programme IGCS : De la collecte à la diffusion. INRA Direction du Partenariat et du Transfert pour l'Innovation. Séminaire IGCS Caen, 27-29 avril 2016
- Roose E. 1967. Dix années de mesure de l'érosion et du ruillement au Sénégal. *Agronomie Tropicale* **22** : 123-152.
- Rubin J. 1967. Optimal classification into groups: An approach for solving the taxonomy problem. *Journal of Theoretical Biology* **15** : 103-144. DOI: 10.1016/0022-5193(67)90046-X
- ruissellement, Cemagref-Publications, rapport technique Juillet 2011 Lyon : 76 p.
- Saxton K.E., Rawls W.J., Romberger J.S., Papendick R.I. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **50** : 1031-1036
- Saxton K.E., Willey P.H. 2006. Agricultural Wetland and Pond Hydrologic Analyses Using the SPAW model. Proc. Self-Sustaining Solutions for Streams, watersheds and Wetlands Conf., Amer. Soc. Agric. Engr., Sept. 12-15, 2004, St. Paul, MN.
- SCS, 1958. Engineering handbook. Section 4: Hydrology. Chapter 5. Travel time, time of concentration and lag. Washington, DC, USA: Department of Agriculture, Soil Conservation Service, U.S. Government Printing Office, 4.5/1-4.5/20
- SCS, 1972. National engineering handbook. Section 4: Hydrology. Chapter 7: hydrologic soil groups. Washington, DC, USA: Department of Agriculture, Soil Conservation Service, U.S. Government Printing Office, 7.1-7.5
- Shen H, Zheng F, Wen L, Han Y, Hu W. 2016. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope. *Soil and Tillage Research* **155** : 429-436. DOI: 10.1016/j.still.2015.09.011
- Taillon A. 1991. Classification de l'occupation des sols à des fins hydrologiques, Mémoire de Maîtrise, Université du Québec, INRS-Eau
- Tang J, Miller PA, Crill PM, Olin S, Pilesjö P. 2015. Investigating the influence of two different flow routing algorithms on soil-water-vegetation interactions using the dynamic ecosystem model LPJ-GUESS: INVESTIGATE TWO FLOW ROUTING ALGORITHMS INFLUENCES ON SOIL-WATER-VEGETATION INTERACTIONS. *Ecology* **8** : 570-583. DOI: 10.1002/eco.1526
- Thierry Y, Malet JP, Sterlacchini S, Puissant A, Maquaire O. 2007. Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: Application to a complex mountainous environment. *Geomorphology* **92** : 38-59.
- Topsoil physical properties for Europe (based on LUCAS topsoil data). <http://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/topsoil-physical-properties-europe-based-lucas-topsoil-data>
- Trevisan D., Lelong F. 1992. Influence de la dégradation structurale superficielle sur le ruissellement enregistré sous pluies simulées. *Science du Sol*, **30**, 4 : 249-261
- United States Department of Agriculture. 1986. Urban hydrology for small watersheds. . Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division
- Valentin C., Janeau J.L. 1989-1990. Les risques de dégradation structurale de la surface des sols en savane humide (Côte d'Ivoire). *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, **XXV**, 1-2 : 41-52
- Van Wesemael B., Poesen J., de Figueiredo T. 1995. Effects of rock fragments on physical degradation of cultivated soils by rainfall. *Soil & tillage research*, **33** :229-250
- Vereecken H., Maes J., Feyen J. 1990. Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. *Soil Sci.* **149** : 1-12
- Wauchope RD, Sumner HR, Truman CC, Johnson AW, Dowler CC, Hook JE, Gascho GJ, Davis JG, Chandler LD. 1999. Runoff from a cornfield as affected by tillage and corn canopy: A large-scale simulated-rainfall hydrologic data set for model testing. *Water Resources Research* **35** : 2881-2885. DOI: 10.1029/1999WR900186
- Weaver J, Noll W. 1935. Comparison of runoff and erosion in prairie, pasture and cultivated land. *Bulletin - Agronomy and Horticulture Department* [online] Available from: <http://digitalcommons.unl.edu/agronweaver/11>
- Wishmeier WH. H, Smith D. 1960. A universal soil-loss equation to guide conservation farm planning. *Trans. Int. Congr. Soil Sci.* : 418-425.
- Wishmeier WH. H, Smith D. 1978. Predicting rainfall erosion losses—a guide to conservation planning. . *Agriculture Handbook*. U.S. Department of Agriculture
- Wishmeier WH. H. 1966. Surface runoff in relation to physical and management factors. Sao Paulo, Brazil. 237-244 pp.
- Wösten J.H.M. 1997. Pedotransfer functions to evaluate soil quality. In: Gregorich, E.G., Carter, M.R. (Eds.), *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health*. Developments in Soil Science. **25** : 221-245
- Wösten J.H.M., Lilly A., Nemes A., Le Bas C. 1999. Development and use of database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*, **90** : 169-185

Références des cartes pédologiques

GIRONDE

Richer de Forges A.C. (2015). Base de données du Référentiel Régional Pédologique de la région Aquitaine : carte des pédopaysages de Gironde à 1/250 000, en format DoneSol. INRA InfoSol

Richer de Forges A.C. et Arrouays D. (2015). Couverture graphique du Référentiel Régional Pédologique de la région Aquitaine : carte des pédopaysages de Gironde à 1/250 000 en format shapefile. INRA. - DORDOGNE : © Bordeaux Sciences Agro, programme IGCS Aquitaine, version provisoire non validée, oct. 2015.

Jalabert S., Larché J.-F., Armitage-Lee A., Karpezo, M. et Chéry P. (mai 2015). Base de données du Référentiel Régional Pédologique de la région Aquitaine : carte des pédopaysages de Dordogne à 1/250 000, en format DoneSol (Access®). Bordeaux Sciences Agro. Version provisoire du 05/10/2015, données non validées par le GIS Sol.

Jalabert S., Armitage-Lee A., Larché J.-F., Commagnac L. et Chéry P. (mai 2015). Couverture graphique du Référentiel Régional Pédologique de la région Aquitaine : carte des pédopaysages de Dordogne à 1/250 000, en format shapefile, Bordeaux Sciences Agro. Version provisoire du 04/11/2015, données non validées par le GIS Sol.

POITOU-CHARENTES

Programme IGCS Poitou-Charentes, Chambre Régionale d'Agriculture Aquitaine Limousin Poitou-Charentes.

LOT

Guirette M., Cambou E., Collin Bellier C., Denjean A., Falba P., Guigues E., Mouclier M., Muller N., Nesling E., Party J.P., Rigou L., Schneider A., Toiser A., Vauthier Q., Yken E. et Revel J.C. (2014). Etude et Gestion des Sols, 21, pages 77-84.

LIMOUSIN

Programme IGCS Limousin, Chambre Régionale d'Agriculture Aquitaine - LIMOUSIN-POITOU-CHARENTES : Base de données géographiques et sémantiques des sols de Brive au 1/100000 (étude n°480)

Base de données géographiques et sémantiques des sols de Saint Léonard au 1/100000 (étude n°3158)

PUY-DE-DOME

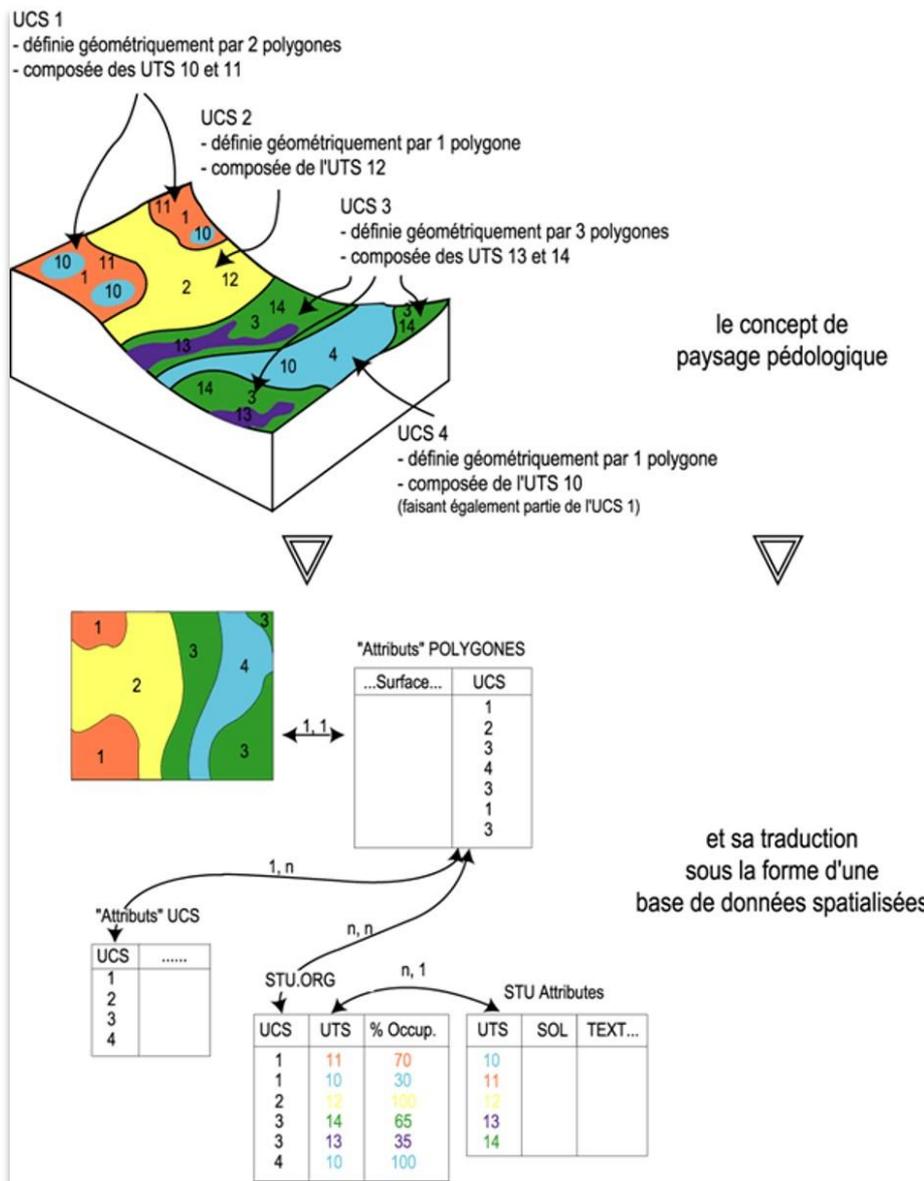
Profils du Puy-de-Dôme du programme IGCS Auvergne disponibles sous DONESOL, VetAgroSup.

Annexes.

Annexe 1.

Format des bases de données géographiques de sols

La base de données géographique de sols est un modèle numérique de la compréhension et de la connaissance de l'organisation des sols dans le paysage (paysage pédologique) acquise par les pédologues via les informations recueillies sur le terrain ou via l'interprétation des données connexes (géologie, géomorphologie, topographie, végétation...). Le schéma ci-dessous explicite la conception et l'organisation des bases de données géographiques de sols.



Principe des bases de données géographique de sols (source : <http://acklins.orleans.inra.fr/programme/bdgsf/contenu.php>)

Ainsi, le paysage pédologique est un continuum qui est discrétisé en objets physiques distincts identifiables dans le paysage : les types de sols. L'inventaire de ces types de sols forme une liste d'Unités Typologiques de Sols (UTS). Selon le degré d'analyse du paysage pédologique (i.e. l'échelle d'étude cartographique), la localisation et la délimitation précises de toutes les UTS n'est pas toujours faisable et suffisamment robuste. Des regroupements d'UTS sont donc effectués afin de définir objets cartographiques localisables dans l'espace et composés d'UTS bien identifiées : les Unités Cartographiques de Sols (UCS).

Chaque UTS et les horizons (nommés strates) qui les composent sont décrits par un ensemble d'attributs (dans des tables) caractérisant la nature et les propriétés des sols, attributs descriptifs, qualitatifs, quantitatifs ou complexes. Par exemple et respectivement :

- le nom du sol qui constitue une synthèse descriptive de l'ensemble des paramètres qui décrivent une UTS
- la texture qui donne une synthèse qualitative de la granulométrie
- la granulométrie qui explicite quantitativement les pourcentages d'argile/limon/sable
- le régime hydrique est une information complexe, élaborée à partir d'informations pédologiques simples (texture, profondeur du sol...)

Les UTS ne sont donc pas des objets géométriques cartographiques, car on n'en connaît pas la position géographique exacte. Par contre, les UCS, comme leur nom l'indique, sont des objets géométriques cartographiques (un ensemble de polygones décrits chacun par leur forme et leur position géographique) qui sont définis par leur composition (pourcentages) en UTS.

Annexe 2.

Analyse morphométrique en vue d'optimiser les sondages pédologiques de terrain et d'aider à la généralisation

Cette analyse morphométrique vise à produire un modèle censé spatialiser les situations morphologiques "type" contraignantes pour la pédogénèse. Il permet d'affiner la cartographie des sols issue du RRP. Le concept sous-tendant cette démarche est que le RRP fournit des indications de sols "moyens" sur une zone (UCS), intégrant une certaine hétérogénéité de types de sols (UTS). De fait, il est possible de réintégrer dans ces sols "moyens" (UCS), une variable topographique (basée sur le concept de toposéquence) visant à faire dévier le sol "moyen" en fonction de "contraintes topographiques" suffisamment significatives pour qu'elles affectent le profil moyen.

Méthodologie

Nous avons utilisé 3 dérivées du MNT (BDAlti25m) :

- La pente : ce facteur joue notamment sur les processus de décapage, d'érosion et de circulation oblique dans les profils pédologiques.
- Le TWI : ce facteur exprime la capacité d'accumulation ou de départ de matériel. Il est utile pour spatialiser les zones de départ de flux (sols peu épais) et les zones d'accumulation de flux (colluvionnement, hydromorphie, plus forte épaisseur).
- La hauteur normalisée : c'est un indice de position sur le versant. Les valeurs proches de 0 indiquent une position de bas de versant et fond de vallon, tandis que les valeurs proches de 1 indiquent une position haute, en sommet de versant.

L'exposition n'a pas été prise en compte car, sur le terrain, SOLENVIE nous a indiqué qu'ils n'avaient pas observé d'influence significative sur la profondeur des sols ou leur texture.

Ces trois cartes en format raster ont ensuite été traitées par une méthode de clustering combinée comprenant la technique de *Minimum Distance* (Forgy, 1965) et le *Hill-Climbing* (Rubin, 1967). Ces deux techniques sont intégrantes des techniques de classification et regroupement de type *K-mean*. Nous avons contraint les classifications selon ces 3 facteurs en 6 à 10 classes. Au final, le regroupement en 8 classes est celui qui, à dire d'expert, nous semblait le meilleur compromis entre synthèse et détail.

Résultats et interprétations

Le tableau ci-dessous présente les valeurs barycentrales de chaque groupe (ou cluster).

Statistiques générales de chaque cluster.

Cluster	N pixels	Std.Dev.	Pente	TWI	Versant
0	6 415 846	0.568	4.818	5.387	0.475
1	3 896 415	0.752	13.095	3.973	0.663
2	6 653 898	0.541	5.615	4.689	0.808
3	4 820 388	0.701	1.968	6.190	0.746
4	1 848 334	1.225	25.429	3.566	0.447
5	4 770 643	0.745	10.803	4.716	0.238
6	7 744 111	0.644	3.143	6.135	0.190
7	2 131 779	0.728	0.024	9.918	0.180

Cluster 0 : assez homogène et bien représenté (>6M de pixels), c'est un cluster regroupant les zones de milieu de pente, de transfert de flux et à pente modérée. A priori, ces contextes topographiques seraient à considérer comme "neutres" d'un point de vue pédogénétique (pas de contraintes majeures pour la pédogénèse affectant significativement les profils "moyens").

Cluster 1 : un peu plus hétérogène et moins bien représenté, ce groupe est plutôt situé sur le 1/3 supérieur du versant (versant > 0.6), en contexte de départ de flux (TWI < 4) et sur des pentes élevées (> 12°). A priori, ces contextes topographiques sont plutôt favorables à une réduction des épaisseurs de sols et à des granulométries qui tendraient à se rapprocher de celle de l'altérite sous-jacente (dépend de la nature de l'altérite).

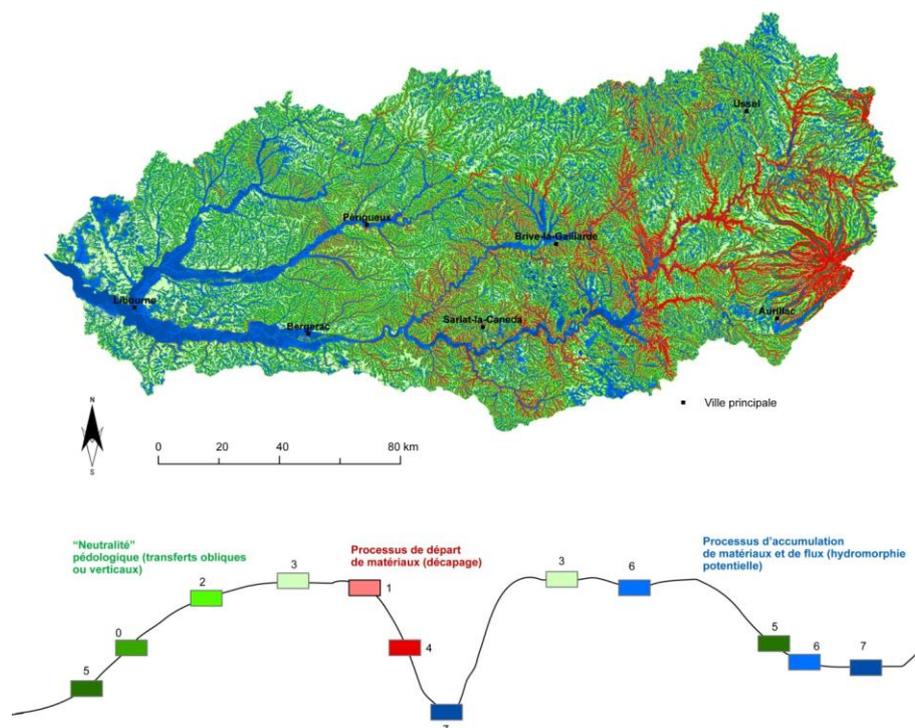
Cluster 2 : groupe très homogène, situé en haut de versant, assurant la transition entre les plateaux ou les zones sommitales et les versants ou surface abaissée bordière. La pente est modérée et la situation topographique exprime plutôt des processus de transferts diffus de flux et de matériel. A priori, il s'agirait de bordures convexes à grand rayon de courbure, donc à conditions tendant vers la neutralité d'un point de vue pédogénétique.

Cluster 3 : groupe assez homogène avec de faibles pentes, situé essentiellement sur des interfluves ou des surfaces élevées, planes à quasiment planes avec un faible déplacement des matériaux et des flux. A priori, hormis certaines zones d'accumulation d'eau entraînant des hydromorphies ponctuelles ($TWI > 6$), la topographie influe peu ici sur la pédogénèse qui est surtout dépendante de l'altitude, du substrat et des conditions locales (couvert végétal, etc.). Ce groupe rassemble donc les hautes surfaces résiduelles à couverture d'altérite essentiellement préservée et à sols polycycliques potentiellement profonds. Dans la région des Causses ou sur substrat très fissuré, par contre, on aura affaire plutôt à des surfaces de possibles affleurements du substrat avec des sols lithiques. La géologie est ici à prendre sérieusement en compte.

Cluster 4 : groupe hétérogène et peu représenté mais marqué par de fortes pentes ($> 25^\circ$) et plutôt à départ de matériel. On y trouve les versants des gorges, des vallons raides, les extrados des grandes vallées sapant les bas de versant et les versants des grandes vallées glaciaires. La valeur de la position sur le versant est ici moyenne et peu représentative (fort écart-type). On retiendra surtout pour ce groupe la forte pente, qui, selon les régions naturelles, peut influencer sur la profondeur du sol ou non (cf. les sols des versants du Sancy sur fortes pentes mais avec d'importantes profondeurs).

Cluster 5 : Groupe assez homogène à pente modérée mais significative, dominé par des processus de transfert et occupant plutôt le quart inférieur des versants. Les processus d'accumulation commencent mais ne sont pas encore pleinement exprimés. Nous sommes à la naissance des prismes et cônes colluviaux. A priori, ce groupe est encore "neutre" d'un point de vue pédogénétique bien qu'il puisse y avoir une légère tendance au colluvionnement.

Clusters 6 et 7 : ces deux groupes sont assez homogènes, avec de faibles pentes, en bas de versant ou en fond de vallon et vallée. Ils correspondent aussi aux dépressions sur les plateaux. Ils se différencient surtout par leur valeur d'accumulation. A priori, le cluster 6 correspondrait plutôt aux prismes et cônes colluviaux ou encore aux dépressions de plateau, tandis que le cluster 7 exprimerait plutôt les fonds de vallée. Il existe de nombreux artefacts sur ces fonds de vallée liés à la planéité mal représentée par la BDAlti25m. Il est possible de fusionner ces deux clusters. A priori, ces conditions topographiques sont favorables aux sols à accumulation (Colluviosol, Alluviosol) ou hydromorphe, donc à priori, plutôt profond, mais à granulométrie variée.



Carte des clusters topographiques et schéma simplifié présentant les contextes topographiques généraux de chaque cluster.

Annexe 3.

Correspondances des occupations du sol du bassin versant de la Dordogne avec celles de la typologie SCS-CN

Cover description	Treatment	ZDH-Epidor	RPG	Corine	CODE	Hydrologic condition	Curve numbers for hydrologic soil group				Moy	Et
							A	B	C	D		
Fallow (jachère)	Bare soil (sol nu)			Roche nue	SOL	—	77	86	91	94	87.0	6.4
	Crop residue cover (CR) - couverture résiduelle		Maïs, Tournesol		MT	Pratiques ruissellantes	76	85	90	93	86.0	6.4
							Pratiques infiltrantes	74	83	88	90	83.8
Row crops (culture d'alignement)	Straight row (SR)		Autres oléagineux		SOJ	Pratiques ruissellantes	72	81	88	91	83.0	7.3
			Légumes et fruits, semences		MAR	Pratiques infiltrantes	67	78	85	89	79.8	8.3
	SR + CR		Autres cultures industrielles, autres oléagineux	Terres arables hors périmètres d'irrigation	CI	Pratiques ruissellantes	71	80	87	90	82.0	7.3
						Pratiques infiltrantes	64	75	82	85	76.5	8.1
	Contoured (C)					Pratiques ruissellantes	70	79	84	88	80.3	6.7
						Pratiques infiltrantes	65	75	82	86	77.0	8.0
	C + CR					Pratiques ruissellantes	69	78	83	87	79.3	6.7
						Pratiques infiltrantes	64	74	81	85	76.0	8.0
	Contoured & terraced (C&T)					Pratiques ruissellantes	66	74	80	82	75.5	6.2
						Pratiques infiltrantes	62	71	78	81	73.0	7.3
	C&T + R					Pratiques ruissellantes	65	73	79	81	74.5	6.2
					Pratiques infiltrantes	61	70	77	80	72.0	7.3	
Small grain (céréales)	SR		Autres céréales, Blé tendre, orge		CER	Pratiques ruissellantes	65	76	84	88	78.3	8.8
						Pratiques infiltrantes	63	75	83	87	77.0	9.2
	SR + CR					Pratiques ruissellantes	64	75	83	86	77.0	8.5
						Pratiques infiltrantes	60	72	80	84	74.0	9.2
	C					Pratiques ruissellantes	63	74	82	85	76.0	8.5
						Pratiques infiltrantes	61	73	81	84	74.8	8.9
	C + CR					Pratiques ruissellantes	62	73	81	84	75.0	8.5
						Pratiques infiltrantes	60	72	80	83	73.8	8.9
	C&T					Pratiques ruissellantes	61	72	79	82	73.5	8.1
						Pratiques infiltrantes	59	70	78	81	72.0	8.5
	C&T + R					Pratiques ruissellantes	60	71	78	81	72.5	8.1
					Pratiques infiltrantes	58	69	77	80	71.0	8.5	
Close-seeded or broadcast legumes or rotation meadow (légumineuse, cultures de rotation, etc.)	SR		Colza, légumineuses à grains, protéagineux		CLZ	Pratiques ruissellantes	66	77	85	89	79.3	8.8
						Pratiques infiltrantes	58	72	81	85	74.0	10.4
	C					Pratiques ruissellantes	64	75	83	85	76.8	8.3
						Pratiques infiltrantes	55	69	78	83	71.3	10.6
	C&T					Pratiques ruissellantes	63	73	80	83	74.8	7.7
					Pratiques infiltrantes	51	67	76	80	68.5	11.1	
Pasture, grassland, or range—continuous forage for grazing (prairie permanente)	<50% ground cover or heavily grazed with no mulch						68	79	86	89	80.5	8.1
	50-75% ground cover and not heavily grazed		prairies temporaires, autres gels		PRT		49	69	79	84	70.3	13.4
	>75% ground cover and light or only occasionally grazed		Prairies permanentes	Prairies	PR		39	61	74	80	63.5	15.7
Meadow—continuous grass, protected from grazing and generally mowed for hay (pré)			Fourrage		FOU		30	58	71	78	59.3	18.3

Brush—brush-weed-grass mixture with brush the major element (végétation pionnière herbacée avec buissons)	<50% ground cover		Estives, landes	Landes & broussailles, Végétation clairsemée	LAN	Poor	48	67	77	83	68.8	13.3
	50-75% ground cover					Fair	35	56	70	77	59.5	16.0
	>75% ground cover			Pelouses et pâturages naturels	PPN	Good	30	48	65	73	54.0	16.5
Woods—grass combination (orchard or tree farm)				Vergers et petits fruits	VPF	Poor	57	73	82	86	74.5	11.1
				Systèmes culturaux et parcellaires complexes, Vergers et petits fruits	BOC	Fair	43	65	76	82	66.5	14.9
				Surfaces essentiellement agricoles interrompues par des espaces naturels importants	AFM	Good	32	58	72	79	60.3	18.0
Woods	Forest litter, small trees, and brush are destroyed by heavy grazing or regular burning					Poor	45	66	77	83	67.8	14.5
	Woods are grazed but not burned, and some forest litter covers the soil	Boisements artificiels, plantations		Forêt et végétation arbustive	SAL	Fair	36	60	73	79	62.0	16.5
	Woods are protected from grazing, and litter and brush adequately cover the soil	Boisements humides		Forêt de conifères, Forêt de feuillus, Forêt mélangée	FOR	Good	30	55	70	77	58.0	18.0
Farmsteads—buildings, lanes, driveways, and surrounding lots.						—	59	74	82	86	75.3	10.3
Herbaceous—mixture of grass, weeds, and low-growing brush, with brush the minor element	<30% ground cover (litter, grass, and brush overstory)					Poor	—	80	87	93	86.7	5.3
	30 to 70% ground cover					Fair	—	71	81	89	80.3	7.4
	>70% ground cover		prairies permanentes (causses), prairies temporaires (causses)			Good	—	62	74	85	73.7	9.4
Oak-aspens—mountain brush mixture of oak brush, aspen, mountain mahogany, bitter brush, maple, and other brush	<30% ground cover (litter, grass, and brush overstory)					Poor	—	66	74	79	73.0	5.4
	31 to 70% ground cover					Fair	—	48	57	63	56.0	6.2
	>70% ground cover					Good	—	30	41	48	39.7	7.4
Pinyon-juniper—pinyon, juniper, or both; grass understory	<30% ground cover (litter, grass, and brush overstory)					Poor	—	75	85	89	83.0	5.9
	32 to 70% ground cover					Fair	—	58	73	80	70.3	9.2
	>70% ground cover					Good	—	41	61	71	57.7	12.5
Sagebrush with grass understory	<30% ground cover (litter, grass, and brush overstory)					Poor	—	67	80	85	77.3	7.6
	33 to 70% ground cover					Fair	—	51	63	70	61.3	7.8
	>70% ground cover					Good	—	35	47	55	45.7	8.2
Desert shrub—major plants include saltbush, geasewood, creosotebush, blackbrush, bursage, palo verde, mesquite, and cactus.	<30% ground cover (litter, grass, and brush overstory)					Poor	63	77	85	88	78.3	9.7
	34 to 70% ground cover					Fair	55	72	81	86	73.5	11.8
	>70% ground cover					Good	49	68	79	84	70.0	13.4
Newly graded areas (pervious areas only, no vegetation)							77	86	91	94	87.0	6.4
Open space (lawns, parks, golf courses, cemeteries, etc.)	Poor condition (grass cover <50%)						68	79	86	89	80.5	8.1

	Fair condition (grass cover 50 to 75%)						49	69	79	84	70.3	13.4
	Good condition (grass cover >75%)			Équipements sportifs et de loisirs	ESL		39	61	74	80	63.5	15.7
Impervious areas	Paved parking lots, roofs, driveways, etc. (excluding right of way)						98	98	98	98	98.0	0.0
Streets and roads	Paved; curbs and storm sewers (excluding right-of-way)						98	98	98	98	98.0	0.0
	Paved; open ditches (including right-of-way)						83	89	92	93	89.3	3.9
	Gravel (including right of way)						76	85	89	91	85.3	5.8
	Dirt (including right-of-way)						72	82	87	89	82.5	6.6
Western desert urban areas	Natural desert landscaping (pervious area only)						63	77	85	88	78.3	9.7
	Artificial desert landscaping (impervious weed barrier, desert shrub with 1- to 2-inch sand or gravel mulch and basin borders)						96	96	96	96	96.0	0.0
Urban districts	Commercial and business (85% imp.)			Tissu urbain continu	TUC		89	92	94	95	92.5	2.3
	Industrial (72% imp.)			Zones industrielles & commerciales	ZIC		81	88	91	93	88.3	4.5
Residential districts by average lot size	1/8 acre or less (town houses) (65% imp.)			Aéroports, Chantiers, Réseau routier et ferroviaire	INF		77	85	90	92	86.0	5.8
	1/4 acre (38% imp.)	Zones humides urbanisées		Tissu urbain discontinu	TUD		61	75	83	87	76.5	9.9
	1/3 acre (30% imp.)	Zones humides urbanisées					57	72	81	86	74.0	11.0
	1/2 acre (25% imp.)						54	70	80	85	72.3	11.8
	1 acre (20% imp.)						51	68	79	84	70.5	12.7
	2 acres (12% imp.)						46	65	77	82	67.5	13.9
			Vignobles, Arboriculture, Fruits à coques, Vergers	Cultures annuelles associées aux cultures permanentes, Vignobles	VIG		62	71	78	81	73.0	7.3
		Eaux courantes, annexes hydrauliques			supprimé		100	100	100	100		
		Terres arables			Degré de saturation							
	hydrologie : capacité d'encasement des crues	Plans d'eau		Plans d'eau	supprimé		100	100	100	100		
		Prairies humides			Degré de saturation							
		Marais, roselières, tourbières		marais intérieurs, tourbière	supprimé							
		mosaïque d'entités de moins de 1ha			Degré de saturation							
				Extraction de matériaux	supprimé							

Liste des figures

Figure 1 - Cartographie des capacités d'infiltration dans le bassin versant. in PAPI, 2006. Cette carte a été obtenue avec un calcul via le modèle STREAM (INRA) en utilisant les données pédologiques de la BDAT (échelle cantonale) et les données d'occupation du sol de CORINE Landcover (1/100 000). Échelle d'utilisation < 1/100 000. On remarque tout de suite la forte susceptibilité de la partie aval du bassin versant en général, et notamment des coteaux viticoles de Gironde.	6
Figure 2 - Distribution des processus hydrologiques selon leurs caractéristiques spatio-temporelles. In Blöschl and Sivapalan (1995). Sur cette figure, le ruissellement hortonien (infiltration excess overland flow) s'étend sur des surfaces de quelques mètres à 1km sur des temporalités inférieures à l'heure, tandis que le ruissellement hewlettien (saturation excess overland flow) est légèrement plus inertiel (distance un peu plus longues et temporalité pouvant s'étendre sur plusieurs heures). La plage de recouvrement de ces deux types de ruissellement reste quand même très large, ces deux phénomènes étant la plupart du temps subsynchrones à l'échelle d'événements pluvieux de plusieurs heures.	10
Figure 3 - Schéma conceptuel de la répartition des 3 compartiments fondamentaux du ruissellement le long d'un versant. Sur ce schéma, on voit bien la réduction des emprises spatiales des compartiments.	11
Figure 4 - Carte géologique et des grandes unités géomorphologiques. Fond cartographique : carte géologique à 1/1 000 000, BRGM.	14
Figure 5 - Cartographie de l'occupation du sol. Corine Landcover 2012 + RPG 2012.	15
Figure 6 - Cartes antérieures sur le potentiel de ruissellement sur le bassin versant de la Dordogne. À gauche, carte issue du PAPI (modélisation avec STREAM et données de la BDAT et Corine). À droite, modèle RUSLE partiel fourni par l'UE (indices K et C uniquement). Échelle d'utilisation < 1/100 000.	16
Figure 7. Couverture du bassin versant avec les cartes pédologiques acquises (couches graphique et sémantique, excepté Puy-de-Dôme).	21
Figure 8. Triangle de texture de l'Aisne.	22
Figure 9. Fond géologique au 1/50 000 des 2 parties du Lot-et-Garonne incluses dans le bassin versant de la Dordogne.	24
Figure 10. Localisation des observations pédologiques dans le Cantal, le Puy-de-Dôme et leurs bordures sur fond géologique de l'Auvergne colorisé par grands types de formation.	27
Figure 11 - Précision altimétrique de la BD Alti 25m donnée par l'IGN. Cette carte concerne la V1.0, mais est en cohérence avec les données de précision de la V2.0.	28
Figure 12 - Carte des échelles sur l'information "occupation du sol".	29
Figure 13 - Distribution des types d'occupation du sol (TOS) sur le bassin versant de la Dordogne. Les surfaces sont en km ² . TOU, tourbière ; PPN, pelouse et pâturage naturels ; FOR, forêt ; FOU, fourrage ; AFM, espaces mixtes agricole et forestier ; SAL, saltus ; ESL, équipements de loisirs de plein air ; PR, prairie permanente ; LAN, landes ; BOC, bocage ; PRT, prairie temporaire ; VPF, vergers ; VIG, vigne ; TUD, tissu urbain discontinu ; MAR, maraîchage ; SOJ, culture de soja ; CER, culture de céréales ; CI, cultures industrielles ; CLZ, culture de colza ; MT, culture de maïs ou tournesol ; INF, infrastructure ; SOL, sol nu ; ZIC, zone industrielle et commerciale ; TUC, tissu urbain continu ; EAU, surface d'eau libre ; EXT, extraction de pierre, carrière (non pris en compte dans les modélisations).	32
Figure 14 - CN moyen des TOS sur le BV de la Dordogne. Sur cette carte, on retient 4 régions concentrant des TOS potentiellement ruisselants. REGION 1 : le Causse charentais. Cette région concentre les cultures de céréales et de maïs avec d'importantes surfaces mises à nues à certains moments de l'année. Toutes conditions égales par ailleurs, cette zone mérite une prise en compte des variations de la couverture intra-annuelle, en relation avec les événements météorologiques enregistrés. REGION 2 : La Bordure de Guyenne et le Val de Dordogne. Cette zone basse aval est surtout dominée par la culture de la vigne et du maraîchage qui sont des TOS assez ruisselants mais, a priori, sans effet trop important de la saisonnalité. Cependant, il conviendra également de privilégier les récurrences d'événements météorologiques qui sont plus fréquents sur cette zone. REGION 3 : les Causses jurassiques, quercynois et périgourdins. Ces régions présentent des TOS avec des formations végétales éparsees et clairsemées et quelques ensembles parcellaires de culture. Cette région est plus hétérogène d'un point de vue du potentiel de ruissellement lié aux TOS et semble moins soumise au problème de saisonnalité des cultures. REGION 4 : les axes des grandes vallées, en aval de l'escarpement tectonique séparant les domaines cristallins de celui des causses. Les TOS de ces vallées sont plutôt ruisselants avec des cultures et de l'arboriculture.	33
Figure 15 - Exemple de cartes brutes téléchargées sur le site de Météo France. Ici, les événements de mai 2008 et septembre 1989.	34
Figure 16 - Total des précipitations moyennes annuelles dues à des épisodes extrêmes.	39
Figure 17 - Coefficient de variation des pluies apportées par les événements pluvieux extrêmes.	40
Figure 18 - Carte des maxima de précipitations liées à des événements extrêmes de 1958 à 2014. Cette carte peut être considérée comme l'aléa pluvieux historique dans le sens des PPR.	40
Figure 19 - Carte des temps de retour fréquentiel pour des événements >50mm/24h sur la période 1958-2014.	41
Figure 20 - Carte des temps de retour fréquentiel pour des événements >80mm/24h sur la période 1958-2014.	41
Figure 21 - Carte des temps de retour fréquentiel pour des événements >120mm/24h sur la période 1958-2014.	42
Figure 22 - Répartition des TOS de cultures annuelles. Ces TOS comprennent, le maïs, le tournesol, le blé, le soja, le colza et les autres cultures industrielles. Ces TOS sont essentiellement répartis sur la partie ouest du BV et le long des grandes vallées.	43
Figure 23 - Structure des pluies extrêmes à l'échelle mensuelle sur le BV (période de 1958 à 2014).	44
Figure 24 - Relation entre les périodes de mise à nu du sol de certains types de culture et les structures mensuelles des événements pluvieux extrêmes. Source des cycles culturaux : AGRESTE.	45
Figure 25. Triangle de corrélation entre la texture du sol et la perméabilité (MDDEP, 2009)	51
Figure 26. Arbre de décision de la méthodologie SCS pour le calcul des VU des UTS et des GHS des UCS.	53
Figure 27. Déviation de la VH pour une même UCS entre 2 bases de données (exemple de la Charente et de la Charente-Maritime).	55

Figure 28 - Cartes des CN. En haut, valeur du printemps ; En bas, valeur à la transition été/automne. On remarque bien l'augmentation des valeurs de CN pour les Causses charentais et en limite entre la Guyenne et le causse quercynois. _____	57
Figure 29 - Cartes des CN modifiés par la pente. En haut, valeur du printemps ; En bas, valeur à la transition été/automne. _____	58
Figure 30 - Carte de TRANSFERT SCS-CN. Exemple pour l'été/automne. _____	59
Figure 31 - Modèle d'ACCUMULATION SCS-CN. _____	60
Figure 32 - Nuage de points de la relation entre la pente et le TWI (indice topographique) sur le bassin versant de la Dordogne avec les résultats d'une binarisation hypothétique. _____	63
Figure 33 - Relation entre probabilité de présence de zones humides et TWI. L'Odds Ratio est le rapport entre les zones humides cartographiées et les autres zones pour chaque valeur de TWI. Les valeurs autour de 0 ne sont pas significatives. Les valeurs < -1 signifient que le TWI est défavorable à la présence de ZH; Les valeurs > 1 signifient que le TWI est favorable à la présence de zones humides. _____	64
Figure 34 - Exemple de processus de reclassement de la pente pour la modélisation _____	65
Figure 35 - Fuzzification du facteur pente (à gauche) et distribution en % de surface cumulée de la pente fuzzifiée (à droite). _____	66
Figure 36 - Carte de la pente fuzzifiée. Plus les valeurs sont proches de 1 (bleu), plus les zones sont susceptibles au ruissellement de surface selon le seul facteur "pente". _____	66
Figure 37 - Relation TWI/Pente et fixation des seuils. _____	67
Figure 38 - Fuzzification du facteur TWI (à gauche) et distribution en % de surface cumulée du TWI fuzzifié (à droite). _____	68
Figure 39 - Carte du TWI fuzzifié. Plus les valeurs sont proches de 1 (bleu), plus les zones sont susceptibles au ruissellement global selon le seul facteur "TWI". _____	68
Figure 40 - Graphique croisé entre la pente et le TWI. En haut, les valeurs brutes; En bas, les valeurs fuzzifiées. _____	69
Figure 41 - Carte du facteur topographique (en haut) et distribution des valeurs (en bas). _____	70
Figure 42. Organigramme des règles de pédotransfert permettant d'obtenir les valeurs des classes de battance B à partir de la teneur en éléments grossiers (EG), la texture et la teneur en matière organique (MO). _____	71
Figure 43. Règle de pédotransfert donnant la classe de battance en fonction de la texture. _____	72
Figure 44. Différence entre la battance affinée et la battance d'après le triangle de texture (exemple pour la base de données de la Gironde incluse dans le bassin versant de la Dordogne). _____	73
Figure 45. Valeur de PERM selon le Ks. Noter l'échelle non linéaire. _____	75
Figure 46. Organigramme du principe de pondération des facteurs pédologiques battance, perméabilité et profondeur pour le calcul du facteur pédologique SOL _____	76
Figure 47. Effectifs et fréquences cumulées des combinaisons possibles BAT/PERM/PROF par gammes de valeurs de SOL d'amplitude 0,1. _____	77
Figure 48. Distribution des valeurs de SOL selon les facteurs BAT, PERM ET PROF. _____	78
Figure 49 - Normalisation des valeurs CN. _____	79
Figure 50 - C-Factor normalisé de 0 à 1. _____	80
Figure 51 - Normalisation du LS-Factor (à gauche) et distribution en % de surface cumulée du LS-Factor normalisé (à droite). _____	80
Figure 52 - Carte du LS-Factor normalisé. Plus les valeurs sont proches de 1 (bleu), plus les zones sont susceptibles au ruissellement global selon le seul facteur "LS-Factor". _____	81
Figure 53 - Fuzzyfication du facteur Rupture de Pente (à gauche) et distribution en % de surface cumulée de la Rupture de Pente fuzzifiée (à droite). _____	82
Figure 54 - Carte des Ruptures de Pente fuzzifiées. Plus les valeurs sont proches de 1 (bleu), plus les zones sont susceptibles au ruissellement global selon le seul facteur "Rupture de pente". _____	82
Figure 55 - Fuzzyfication du facteur d'accumulation de flux (à gauche) et distribution en % de surface cumulée de l'accumulation de flux fuzzifiée (à droite). _____	83
Figure 56 - Carte des accumulations de flux fuzzifiées. Plus les valeurs sont proches de 1 (bleu), plus les zones sont susceptibles au ruissellement global selon le seul facteur "Accumulation de flux". _____	83
Figure 57 - Exemple de l'indice de forme de Horton modifié appliqué au bassin du ruisseau de Feysaguet. _____	84
Figure 58 - Fuzzyfication de l'indice de Horton modifié (à gauche) et distribution en % de surface cumulée de l'indice de Horton modifié fuzzifiée (à droite). _____	85
Figure 59 - Carte de l'indice de Horton fuzzifié. Plus les valeurs sont proches de 1 (bleu), plus les zones sont susceptibles au ruissellement global selon le seul facteur "Indice de Horton modifié". _____	85
Figure 60 - Normalisation du facteur TWI (à gauche) et distribution en % de surface cumulée du TWI normalisé (à droite). _____	86
Figure 61 - Carte du TWI normalisé. Plus les valeurs sont proches de 1 (bleu), plus les zones sont susceptibles à l'accumulation du ruissellement selon le seul facteur "TWI". _____	86
Figure 62 - Résultats des corrélations a posteriori avec SCS et les facteurs d'entrée pour le modèle P14. _____	87
Figure 63 - Modèle P14 (IRIP). _____	88
Figure 64 - Modèle de TRANSFERT pour IRIP. _____	89
Figure 65 - Modèle d'ACCUMULATION pour IRIP. _____	90
Figure 66 - Modèle de perméabilité initiale dérivée d'IRIP. Ks en mm/h. _____	94
Figure 67 - Sortie de modèle pour STREAM (PRODUCTION). Les valeurs sont les perméabilités Ks obtenues en mm/h. _____	95
Figure 68 - Distribution des modèles bruts de PRODUCTION. En haut, IRIP ; En bas, SCS-CN. _____	97
Figure 69 - Distribution des modèles discrétisés par le classement Cp4. En haut, le modèle P14 d'IRIP ; en bas, le modèle SCS-CN. _____	98

Figure 70 - Modèles catégorisés (Cp4). En haut, SCS-Cn ; en bas, P14 (IRIP).	99
Figure 71 - Fréquence par classe de susceptibilité à la PRODUCTION et niveau de certitude. En haut, les classes de susceptibilité : plus la classe est élevée, plus la production de ruissellement est susceptible. En bas, les classes de certitude : plus la classe est élevée, plus le résultat est robuste.	100
Figure 72 - Carte combinée de la susceptibilité à la PRODUCTION. En haut, carte de susceptibilité à la PRODUCTION. En bas, carte de certitude.	101
Figure 73 - Cartes combinées des TRANSFERT et ACCUMULATION. En haut, le TRANSFERT. En bas, l'ACCUMULATION.	102
Figure 74 - Exemple de cartographie finale. Ici, la susceptibilité à la PRODUCTION.	104
Figure 75 - Répartitions des communes selon leur statut CatNat et enquête.	105
Figure 76 - Cartographie des communes ayant bénéficié d'un arrêté CatNat 1140000 et des résultats de l'enquête. Les points noirs correspondent aux lieux où des phénomènes de ruissellement ont été observés et indiqués par les communes ayant répondu à l'enquête.	106
Figure 77 - Box-plot des valeurs de susceptibilité de ruissellement par commune. TOTAL = totalité des 1515 communes; 0 = sans CatNat; 1 = avec CatNat	107
Figure 78 - Box-plot des valeurs de susceptibilité de ruissellement par commune. TOTAL = totalité des 1515 communes ; NoData = communes n'ayant pas répondu au questionnaire (1350) ; Non = communes ayant répondu qu'elles n'étaient pas concernées par le ruissellement ; Oui = communes ayant répondu qu'elles étaient concernées par le ruissellement.	107
Figure 79 - Box-plot des valeurs de susceptibilité des "zones touchées par les inondations" de l'étude Haziza, 2010. Les croix rouges représentent les moyennes, les rectangles bordeaux les valeurs moyennes sur tout le bassin versant.	108
Figure 80 - Box-plot des valeurs de susceptibilité des sites récoltés avec l'enquête de 2017.	109
Figure 81 - Graphique à 4 dimensions de la distribution des sites obtenus avec l'enquête de 2017 dans l'espace des valeurs de susceptibilité PRODUCTION, TRANSFERT, ACCUMULATION et SUSCEPTIBILITE TOTALE.	109
Figure 82 - Sortie de modèle pour l'aléa historique. Classement par écart-type à 1σ . Sans unités.	112
Figure 83 - "Risque" routier. Fond cartographique, Scan REGIONAL - IGN.	113
Figure 84 - "Risque" urbain. En haut, "risque" urbain à l'échelle du bassin versant, fond SCAN REGIONAL IGN; En bas, zoom sur l'agglomération de Brive-la-Gaillarde, fond SCAN100 IGN. Classement par écart-type à 1σ .	114

Liste des tableaux

Tableau 1 - Récapitulatif des données de base pour l'implémentation des modèles. P, PRODUCTION ; T, TRANSFERT ; A, ACCUMULATION. (*) données acquises par EPIDOR dans le cadre du projet (payante). (**) données partiellement payantes (frais de mise à disposition).	19
Tableau 2. Études pédologiques – avec a minima la couche graphique – existant sous Donesol (d'après REFERSOL au 12/2015 et vérification d'Infosol). Pour la colonne N° étude : en vert, les cartes accessibles facilement ; en jaune les cartes accessibles avec difficultés ; en orange, les cartes accessibles non retenues ; en rouge les cartes non accessibles.	20
Tableau 3. Temps nécessaires l'obtention des données auprès des différents propriétaires.	21
Tableau 4. Calculs de précision cartographique sur le site d'étude. D'après Legros (1996) et Boulaine (1980).	25
Tableau 5 - Hiérarchisation des couches d'occupation du sol.	29
Tableau 6 - Choix des points de l'étude Hydratec pour le CAUVALDOR.	35
Tableau 7 - Valeurs de CN pour les cultures pour la période de transition été/automne	48
Tableau 8- Valeurs de CN pour les cultures pour la période printanière	48
Tableau 9 - Valeurs de CN retenues pour les modélisations. TOU, tourbière ; PPN, pelouse et pâturage naturels ; FOR, forêt ; FOU, fourrage ; AFM, espaces mixtes agricole et forestier ; SAL, saltus ; ESL, équipements de loisirs de plein air ; PR, prairie permanente ; LAN, landes ; BOC, bocage ; PRT, prairie temporaire ; VPF, vergers ; VIG, vigne ; TUD, tissu urbain discontinu ; MAR, maraîchage ; SOJ, culture de soja ; CER, culture de céréales ; CI, cultures industrielles ; CLZ, culture de colza ; MT, culture de maïs ou tournesol ; INF, infrastructure ; SOL, sol nu ; ZIC, zone industrielle et commerciale ;TUC, tissu urbain continu ; EAU, surface d'eau libre.	49
Tableau 10. Tableau des seuils pour la conversion de BAT en BAT*.	77
Tableau 11. Statistique des valeurs du facteur SOL au sein du BV de la Dordogne.	78
Tableau 12 - Poids des facteurs utilisés pour le calcul de la PRODUCTION avec IRIP. La formule générale est une moyenne pondérée.	87
Tableau 13. Exemple pour la période d'été de la matrice de corrélation Type d'Occupation de Sol/Faciès donnant la modulation (division) de la perméabilité (calculée selon les fonctions de pédotransfert présentées dans la méthodologie d'IRIP) pour la modélisation STREAM.	93
Tableau 14 - Discrétisation et performances des associations.	98
Tableau 15 - Performances des catégorisations des modèles de TRANSFERT et d'ACCUMULATION.	99
Tableau 16 - Classes de susceptibilité. Les chiffres de la 1 ^{ère} colonne indiquent le code RGB.	103
Tableau 17 - Synthèse des valeurs de susceptibilité pour les "coupures de pont" de l'étude Haziza (2010).	108
Tableau 18 - Détail des points issus de l'enquête et situés dans la "zone de décalage".	110
Tableau 19 - Enjeux et susceptibilités croisées pour produire les cartes de "risque".	113

Liste des équations

Équation 1 - Formule intégrant la pente dans les valeurs de CN. D'après Huang et al. (2006). Avec α , la valeur de pente en %.	57
Équation 2 - Algorithme du TRANSFERT pour SCS-CN.	58
Équation 3 - Algorithme de l'ACCUMULATION pour SCS-CN.	59
Équation 4 - Équation du TWI. A, aire contributive amont ; β , pente locale.	62
Équation 5 - Équation de normalisation.	65
Équation 6 - Algorithme de cartographie des flux (multidirectionnel). Avec dNbi, la fraction drainée vers le pixel "recevant" le flux, β la pente du pixel, LNbi la longueur de drainage et v, le coefficient de dispersion	82
Équation 7 - Algorithme du TRANSFERT pour IRIP.	88

Notes
