

Étude des aléas ruissellement dans la Nièvre

Vallée de l'Yonne de Surgy à Chaumard

Rapport d'étude

Février 2025

Le Cerema l'expert public de l'adaptation des territoires au changement climatique

Le Cerema est un établissement public relevant du ministère du Partenariat avec les territoires et de la Décentralisation, du ministère de la Transition écologique, de l'Énergie, du Climat et de la Prévention des risques et du ministère du Logement et de la Rénovation urbaine. Premier établissement à pilotage partagé entre l'État et les collectivités territoriales, il est présent partout dans l'hexagone et dans les Outre-mer grâce à ses 27 implantations et ses 2 500 agents.

Détenteur d'une expertise nationale mutualisée, le Cerema accompagne l'État et les collectivités territoriales pour la transition écologique, l'adaptation au changement climatique et la cohésion des territoires par l'élaboration coopérative, le déploiement et l'évaluation de politiques publiques d'aménagement et de transport. Doté d'un fort potentiel d'innovation et de recherche incarné notamment par son institut Carnot Clim'adapt, le Cerema agit dans 6 domaines d'activités : Expertise & ingénierie territoriale, Bâtiment, Mobilités, Infrastructures de transport, Environnement & Risques, Mer & Littoral.

Étude des aléas ruissellement dans la Nièvre

Vallée de l'Yonne de Surgy à Chaumard

Commanditaire : DDT58

Auteur : Remi TRENKMANN

Responsable du rapport

Rémi TRENKMANN – Agence de Blois – groupe RISOM
Agence de Blois – 11 rue Laplace – CS 32912 – 41029 BLOIS - FRANCE

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
1	07/10	Version sans modèles ruissellement
2	20/12	Avec modèles hydrauliques et prises en compte de remarques de la DDT58
3	18/02	Fin des post traitements des modélisations et remise en forme des cartes

Références

N° NOVA :

Nom	Service	Rôle	Date	Visa
				Signature électronique ou initiales uniquement Ne pas mettre de signature manuscrite
TRENKMANN Rémi	GRISOM	Auteur principal	18/02/25	RT
BARRIERE Hélène	GRISOM	Relecteur		

Page de garde : dégâts liés au ruissellement sur la voirie communale – Chitry-les-Mines juin 2024 - Cerema

Résumé de l'étude

5 à 10 mots clés à retenir de l'étude

Ruissellement	Aléa
CRUS	Yonne
Modélisation	

Statut de communication de l'étude

Les études réalisées par le Cerema sur sa subvention pour charge de service public sont par défaut indexées et accessibles sur le portail documentaire du Cerema. Toutefois, certaines études à caractère spécifique peuvent être en accès restreint ou confidentiel. Il est demandé de préciser ci-dessous le statut de communication de l'étude.

- ☐ Accès libre : document accessible au public sur internet
- ☐ Accès restreint : document accessible uniquement aux agents du Cerema
- ☐ Accès confidentiel : document non accessible

Cette étude est capitalisée sur la plateforme documentaire [CeremaDoc](https://doc.cerema.fr/depot-rapport.aspx), via le dépôt de document : <https://doc.cerema.fr/depot-rapport.aspx>

SOMMAIRE

Introduction.....	7
1 Présentation de la zone d'étude.....	8
2 Le ruissellement.....	10
2.1 Ruissellement et cycle de l'eau	10
2.2 Génèse du ruissellement	11
2.2.1 Phénomènes résultants	12
2.3 Une prévision délicate.....	14
2.4 Une approche transversale de la gestion du risque de ruissellement.....	14
2.5 Les facteurs aggravants	15
2.5.1 Le développement urbain.....	15
2.5.2 Les pratiques agricoles	16
2.5.3 L'érosion des sols	17
2.5.4 L'effet des cumuls de pluie ou érosivité pluviale.....	17
2.5.5 Autres facteurs aggravants	18
3 Une gestion à l'échelle du bassin versant.....	18
3.1 La définition d'un bassin versant.....	18
3.2 Le rôle des thalweg	19
3.3 Zones de production et de transfert	20
3.3.1 Les zones de production	20
3.4 Les zones d'accumulation	21
3.5 Recensement des évènements historiques	22
3.6 Identification des axes et zones d'écoulement.....	23
3.6.1 Calcul des endoréismes.....	24
3.6.2 Résultats retenus	24
3.7 Les limites de la méthodologie utilisée pour l'identification des axes d'écoulement.....	27
4 La cartographie de sensibilité des terrains à générer du ruissellement (méthode CRUS).	27
4.1 Principe de la méthode	27
4.2 Données d'entrée.....	28
4.3 L'étude de la pédologie.....	28
4.3.1 Le sol et son influence sur le ruissellement.....	28
4.3.2 Les différents types de textures d'un sol	29
4.3.3 La carte de battance	30
4.3.4 Les cartes de perméabilité	33

4.4	Les cartes de pentes	34
4.5	Les cartes de l'occupation des sols	34
4.6	Détermination de la sensibilité à générer du ruissellement	35
4.7	Les limites de la méthode CRUS	38
5	Résultats	38
5.1	Cartes des axes de ruissellement et des endoréismes	38
5.2	Cartes CRUS	38
5.3	Retraitements et classification d'aléas	39
6	Modélisations hydrauliques	43
6.1	Secteurs modélisés	43
6.2	Construction des modèles	43
6.3	Calage des modèles et étude de sensibilité	45
6.4	Événements pluvieux utilisés	50
6.5	Résultats	53
6.5.1	Retraitements	53
6.5.2	Simplifications cartographiques	55
6.5.3	Cartes des zones inondables issues des modélisations	56
7	Annexes	95
7.1	Couches des notes CRUS au format raster	95
7.2	Couches vectorielles des axes d'écoulements par surface drainées	95
7.3	Cartes d'aléa suivant les zones de drainage et les notes crus par bassin versant	95
7.4	Carte des valeurs de CN utilisées	132
7.5	Hyétogrammes construits pour les différents pluviographes de référence	132
7.6	Modèles hydraulique utilisés	133
7.7	Couches raster et vecteurs correspondant aux hauteurs et vitesses maximales simulées	133

INTRODUCTION

La Direction Départementale des Territoires (DDT) de la Nièvre souhaite améliorer significativement la connaissance des aléas "ruissellement" afin de mettre à jour la cartographie des aléas liés au ruissellement à l'occasion de la réalisation de nouveaux Plans de Préventions des Risques Naturels Inondation.

Afin de mieux qualifier les phénomènes de ruissellement sur les secteurs concernés, la DDT a souhaité, dans un premier temps s'appuyer sur des méthodes « sèches » basées sur la topographie, ainsi que sur les données pédologiques et d'occupation des sols. Le choix de ces méthodes de qualification de l'aléa est dû au fait qu'elles permettent de couvrir de très larges territoires et que les secteurs concernés ont connu peu ou pas d'événements permettant l'exploitation généralisée de méthodes basées sur de la modélisation.

Des modélisations locales des phénomènes de ruissellement seront cependant menées dans des zones concentrant des forts enjeux ou de forts aléas.

L'étude des phénomènes de ruissellement sera menée sur trois secteurs : Clamecy, Corbigny et Tannay. Cette zone d'étude englobe les communes de :

Corbigny	Tannay	Clamecy
Mouron-sur-Yonne	Vignol	Villiers-sur-Yonne
Mhère	Saint-Didier	Surgy
Chaumard	Ruages	Pousseaux
Cervon	Monceaux-le-Comte	Dornecy
Epiry	Metz-le-Comte	Chevroches
Chitry-les-Mines	Flez-Cuzy	Brèves
Sardy-lès-Épiry	Dirol	Armes
Pazy	Asnois	
Chaumot	Amazy	
Marigny-sur-Yonne		
Montigny-en-Morvan		
Montreuillon		

Le présent rapport va décrire les différentes étapes permettant d'établir ces cartographies.

L'étude va s'articuler en deux phases :

Phase 1 : Etude de prédisposition des terrains à générer du ruissellement

Le Cerema propose d'appliquer deux méthodes afin d'identifier les secteurs les plus à même de générer du ruissellement ainsi que les axes et zones d'écoulement. La méthode CRUS (**C**artographie du **R**uissellement de **S**urface) permettra d'identifier les zones les plus sensibles à la production du ruissellement. Les axes d'écoulement seront issus d'un travail avec une méthode similaire à la méthode Exzeco (Extraction des Zones d'Écoulement).

Phase 2 : Une modélisation de plusieurs zones d'écoulements pré-identifiées impactant des enjeux et l'établissement d'une cartographie de l'aléa ruissellement détaillée, en croisant les hauteurs d'eau et les vitesses obtenues dans les secteurs d'écoulement.

Cette modélisation est réalisée avec le logiciel HEC-RAS (version 6.6) sur les secteurs de Surgy, Armes, Dornecy et Brèves, Flez-Cuzy, Monceaux-le-Comte et Chitry-les-Mines.

1 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le secteur étudié s'étend sur l'ensemble de la vallée de l'Yonne depuis le bassin de compensation de Pannecière jusqu'à la limite départementale avec l'Yonne.

Les communes concernées par l'étude sont celles situées de part et d'autre de l'Yonne sur ce linéaire. Les différents calculs prendront cependant en compte un territoire plus large correspondant aux limites des sous-bassins versants intersectant une partie des communes concernées.

La carte ci-dessous localise les périmètres d'étude.

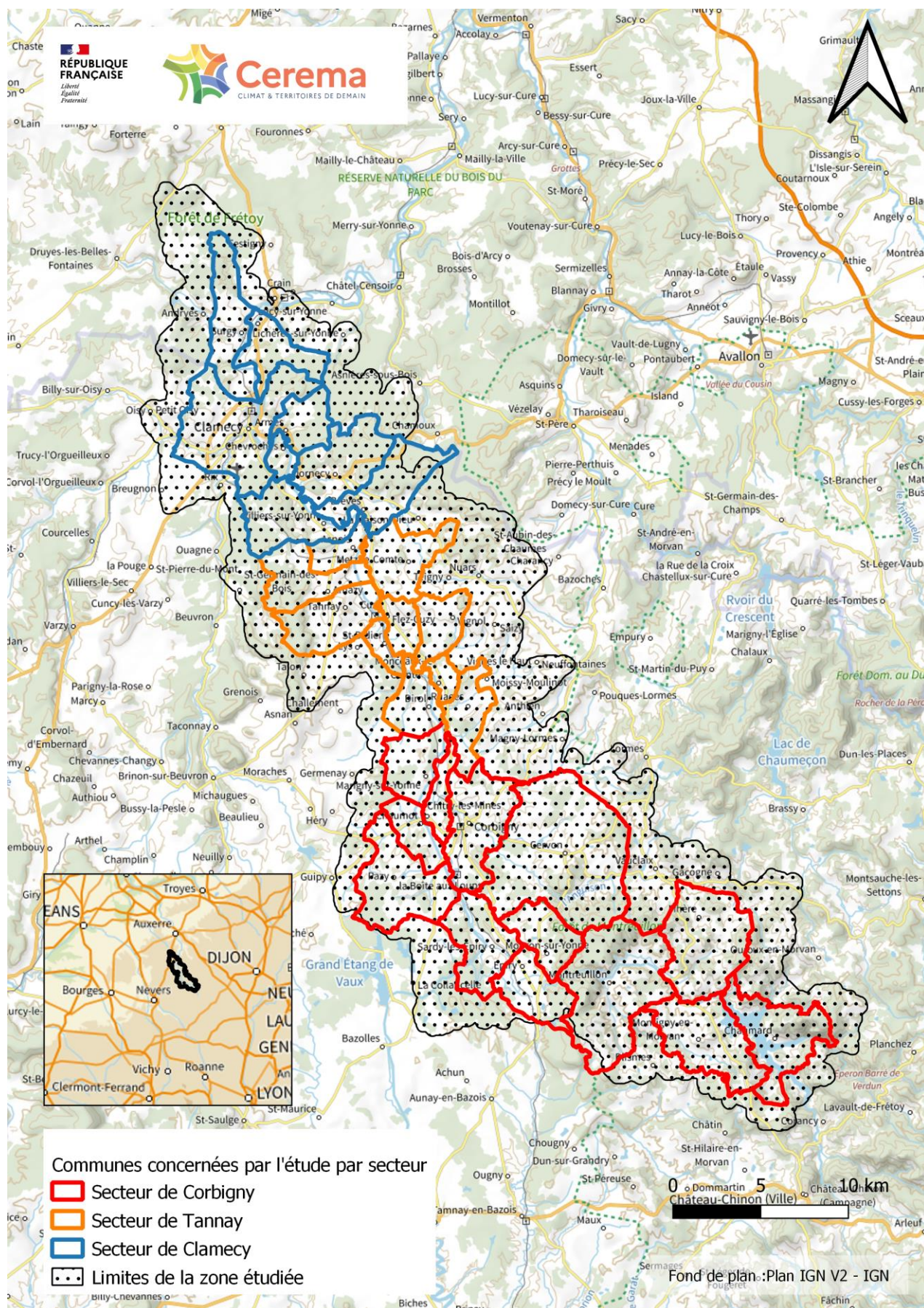


Figure 1 : Carte de la zone d'étude et des communes concernées par l'étude

La zone d'étude correspond à des espaces majoritairement agricoles et forestiers avec une faible urbanisation.

Les parcelles forestières sont généralement situées sur les sommets des plateaux et buttes calcaires dans la partie aval de la zone d'étude (de Tannay à Surgy). Les zones en pâturage, prairies ou en fourrage sont limitées aux lits majeurs des cours d'eau entre Surgy et Asnois avant de s'étendre sur les plateaux et devenir la culture prédominante à partir de Saint-Didier et Vignol et de devenir quasi exclusive en amont. Les espaces non forestiers et non pâturés sont essentiellement dévolus aux cultures céréalières (blé, orge, maïs), aux tournesols et à des protéagineux.

La géologie de la zone d'étude se décompose en deux principales zones, avec à l'aval des calcaires et marnes s'étendant de Surgy à Epiry, et à l'amont les socles granitiques du Morvan.

Des circulations karstiques locales sont présentes (ou suspectées) sur certaines parties de la zone d'étude (Surgy, Dornecy, Amazy, Tannay, Asnois, Villiers-sur-Yonne). Ces circulations karstiques peuvent localement réduire ou aggraver les phénomènes de ruissellement. Ces phénomènes ne peuvent être pris en compte dans cette étude. Afin de mieux cerner les zones susceptibles de présenter des zones karstiques la carte des tracages hydrogéologique est présentée ci-après.

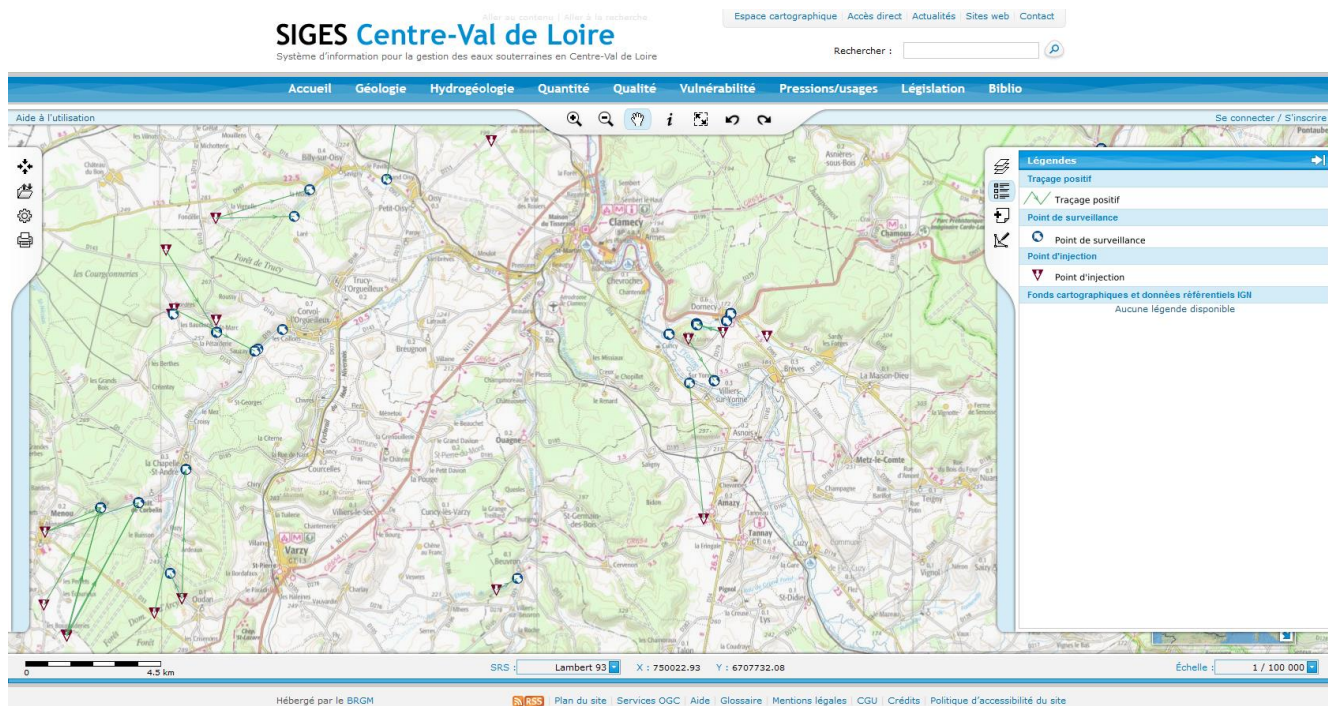


Figure 2 : carte des tracages positifs réalisés a proximité de Clamecy issue du Siges Centre-Val-de-Loire.

2 LE RUISSELLEMENT

2.1 Ruissellement et cycle de l'eau

Le cycle de l'eau comporte trois processus majeurs (Figure 3) : précipitation, écoulements et évapotranspiration. Parmi les processus d'écoulements, on retrouve ceux qui peuvent se produire en surface (Figure 4), notamment les écoulements dans les cours d'eau et le ruissellement. Les autres sont les écoulements de subsurface et les écoulements souterrains.

Le ruissellement est donc la partie des précipitations qui :

- ne s'infiltre pas dans le sol ;
- ne s'évapore pas dans l'atmosphère.

Il s'agit d'un phénomène physique d'écoulement non organisé de l'eau, sur un bassin versant, suite à des chutes de pluies. Il perdure jusqu'à sa rencontre avec un exutoire (rivière, étang ou lac, réseau

d'assainissement). Il se produit en dehors des principaux cours d'eau et ruisseaux, en milieu rural ou urbain.

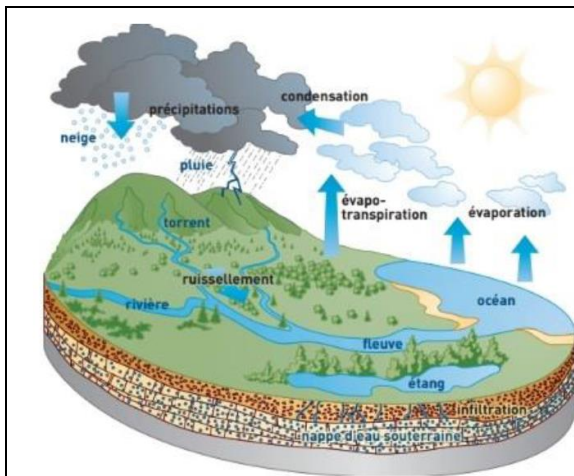


Figure 3 : Modèle conceptuel du cycle de l'eau - source: Agence de l'Eau Seine-Normandie

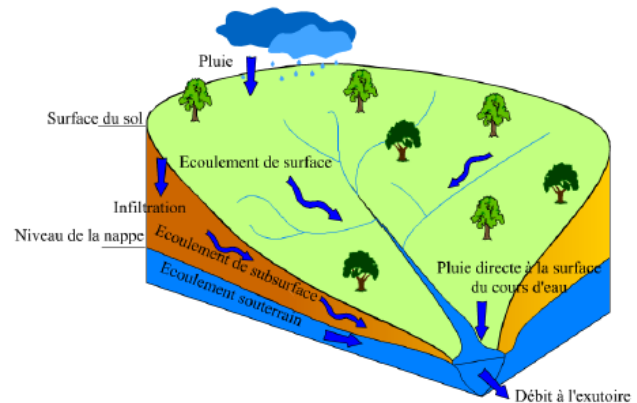


Figure 4 : Les trois grands types d'écoulements: surface, subsurface et souterrain – Source : Musy (2005)

D'après la définition donnée lors du colloque sur le ruissellement du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (2020), « est considéré comme ruissellement tout écoulement, surfacique (diffus) ou linéaire (concentré) concernant un territoire dont le bassin versant amont a un temps de réponse de moins de deux heures »¹.

2.2 Génèse du ruissellement

La genèse du ruissellement s'appuie sur deux paramètres :

- les caractéristiques des précipitations (durée, pluie ou grêle, historique récent...) .
- la capacité d'infiltration des sols (présence ou non d'un couvert végétal, porosité des matériaux constituant le sol, degré d'humidité...).

Le ruissellement apparaît lorsque les eaux de pluie ne peuvent pas ou plus s'infiltrer dans le sol. Ce refus apparaît dans deux conditions (Figure 5 :), une combinaison des deux phénomènes étant possible :

- l'intensité des pluies est supérieure à la capacité d'infiltration des sols (ou à la capacité d'évacuation des réseaux d'eaux pluviales) ;
- la pluie se produit sur une surface partiellement ou totalement saturée d'eau.

¹ Feuille de route « risques liés aux ruissellements » des opérateurs du ministère de la Transition écologique et solidaire – colloque SHF « Ruissellement, Lyon – 30 novembre au 2 décembre 2020 » (Gaume E., Andreassian V., Berthet L. et al)

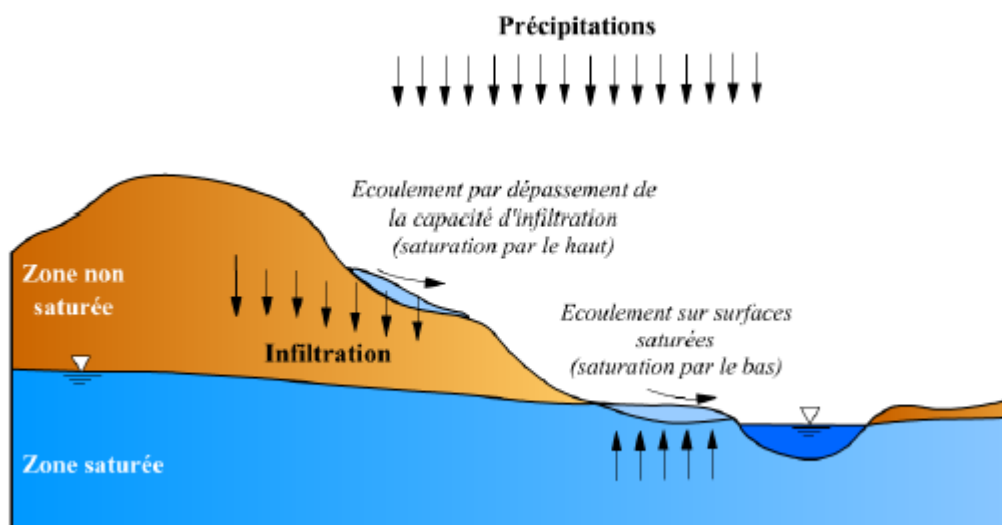


Figure 5 : Représentation des deux processus de genèse du ruissellement - source: Musy (2005)

Il existe plusieurs types de ruissellement :

le ruissellement diffus : la hauteur d'eau est faible et ces filets d'eau buttent et se divisent sur chaque obstacle rencontré ;

le ruissellement en nappe, fréquent dans les zones de pentes faibles, il occupe toute la surface d'un versant ;

le ruissellement concentré, qui s'organise en rigoles ou ravines parallèles dans les talwegs.

L'inondation par ruissellement, provoquée par les précipitations seules tombant sur un territoire, est à différencier d'une inondation par débordement de cours d'eau, même si ces débordements peuvent être dus à des apports par ruissellement.

2.2.1 Phénomènes résultants

L'écoulement des eaux de ruissellement peut induire d'autres phénomènes :

- **des phénomènes d'érosion** (i). Quand l'eau entraîne des particules de sol, on parle d'érosion hydrique. Cette érosion peut se produire à partir de 3 à 6 mm d'épaisseur de l'eau, et créer des rigoles de quelques centimètres à 10 centimètres appelées « rills », quelles que soient les pentes concernées. Ces rigoles se déversent progressivement les unes dans les autres et génèrent ensuite des incisions plus profondes, parfois supérieures à 60 centimètres appelées « gullies ».



Figure 6 : Exemples d'érosion par ruissellement: à gauche des « rills » en Seine Maritime (source: Syndicat Mixte du Pays Plateau de Caux Maritime) et à droite une « gullie » au Canada (source: AAC Agriculture et agroalimentaire Canada)

- **des écoulements plus ou moins chargés de matières en suspension et en matériaux.** Si les écoulements se produisent sur des surfaces non érodables (exemple : bitume ou zones urbanisées), le ruissellement ne concerne que de l'eau claire.

Mais quand les écoulements se produisent sur des sols agricoles, forestiers ou naturels, l'eau peut entraîner le départ des terres superficielles par érosion (on parle de lessivage). Ce lessivage emporte les éléments fertiles du sol et provoque des coulées d'eaux chargées de matières en suspension. Ce phénomène de coulées boueuses est accentué en présence de surfaces peu perméables et/ou avec une faible couverture végétale.

- **des dépôts de boues**, qu'on retrouve dans les zones traversées par les écoulements, notamment au niveau des zones de replats et derrière les embâcles.

Au-delà de l'appauvrissement des terres agricoles lessivées par les eaux de ruissellement, des impacts sur l'environnement accompagnent ces phénomènes de ruissellement. Les eaux emportent avec elles les pollutions agricoles et urbaines, ce qui peut porter atteinte à la qualité des milieux dans lesquelles elles se déposent.

2.3 Une prévision délicate

L'anticipation d'un évènement de ruissellement est complexe : le phénomène est étroitement lié à l'intensité et à la durée de la pluie. Il peut survenir partout, même loin de tout cours d'eau, et est souvent très rapide et localisé dans l'espace.

Les inondations par ruissellement peuvent provenir :

- d'une **pluie brève mais très intense**. C'est le cas des orages violents isolés, qui concernent seulement quelques kilomètres carrés dont la durée ne dépasse pas quelques heures, mais qui peuvent produire des cumuls de pluies très importants (jusqu'à 100 mm) quand la cellule orageuse stationne au-dessus d'un même territoire. C'est aussi le cas des lignes orageuses qui concernent quelques centaines ou milliers de kilomètres carrés et affectent un territoire pendant plusieurs heures. La probabilité de ces évènements est difficile à estimer et encore mal connue
=> ce type de précipitations cause la majorité des cas de ruissellement localisé et soudain;
- d'un **cumul important de pluies de faibles intensités pendant plusieurs jours sur des sols saturés en eaux**.

Pour la plupart des évènements de ruissellement, la pente, la texture du sol et son niveau de saturation ont une influence déterminante. Dans le cas d'un ruissellement causé par des pluies brèves et intenses, la couverture des sols n'aura qu'une influence réduite sur le déclenchement du phénomène.

Sur des petits bassins versants, le temps de réponse entre la pluie et l'inondation par ruissellement est très court, et aucun dispositif de surveillance n'existe actuellement au niveau national pour prévenir cet aléa.

2.4 Une approche transversale de la gestion du risque de ruissellement

La gestion de l'aléa ruissellement représente un enjeu important, à la convergence de plusieurs politiques publiques telles que la prévention des inondations, la gestion des eaux pluviales, la prévention des pollutions... Sur un plan législatif et réglementaire, la maîtrise des eaux pluviales et de ruissellement trouve dans les textes une place fragmentée et partielle, qui rend l'interprétation des textes en la matière complexe.

On retrouve le risque de ruissellement pluvial dans plusieurs interfaces (Figure 7) :

- la gestion intégrée des eaux pluviales => compétence GEPU,
- la gestion du risque inondation => compétence GEMAPI,
- la réglementation du risque inondation => compétence Etat / EPCI / communes.

Echelon territorial	Assainissement	Gestion des eaux pluviales urbaines	GEMAPI	Sécurité des personnes
Commune	Non compétence, transfert à l'intercommunalité dès 2020, ou à partir de 2026 si minorité de blocage	Compétence, sauf transfert à l'intercommunalité	Non	Compétence
Communauté de communes	Compétence obligatoire dès 2020, ou à partir de 2026 si minorité de blocage	Compétence facultative, transfert possible sur décision de la commune	Compétence obligatoire, transfert ou délégation possible à un syndicat	Non
Communauté d'agglomération	Compétence obligatoire	Compétence obligatoire	Compétence obligatoire, transfert ou délégation possible à un syndicat	Non
Communauté urbaine	Compétence obligatoire	Compétence obligatoire	Compétence obligatoire, transfert ou délégation possible à un syndicat	Non
Métropole	Compétence obligatoire	Compétence obligatoire	Compétence obligatoire, transfert ou délégation possible à un syndicat	Non

Figure 7 : Gouvernance des politiques publiques liées au ruissellement - source: guide CEPRI (2021)

2.5 Les facteurs aggravants

2.5.1 Le développement urbain

Le développement de l'urbanisation provoque une augmentation de l'imperméabilisation des sols. Cette imperméabilisation empêche l'infiltration de l'eau dans les sols, et provoque une augmentation des écoulements d'eau.



Figure 8 : Comparaisons de photographies aériennes anciennes (gauche - 1962), et récentes (droite - 2014) de Corbigny. Origine des clichés : IGN – Remonter le temps.

L'urbanisation intensive se fait parfois sans tenir compte des aléas ruissellement, ceux-ci n'étant pas toujours répertoriés et localisés.

A l'échelle d'un bassin versant, des lieux particulièrement exposés tels que des fonds de vallées et des cuvettes ont été urbanisés, exposant ainsi de nouveaux enjeux aux phénomènes de ruissellement.

A l'échelle de la parcelle (Figure 9), l'artificialisation des sols de plus en plus importante autour des habitations conduit à rejeter de l'eau qui était autrefois absorbée par les terrains dans les réseaux d'eaux pluviales, qui se retrouvent surchargés.

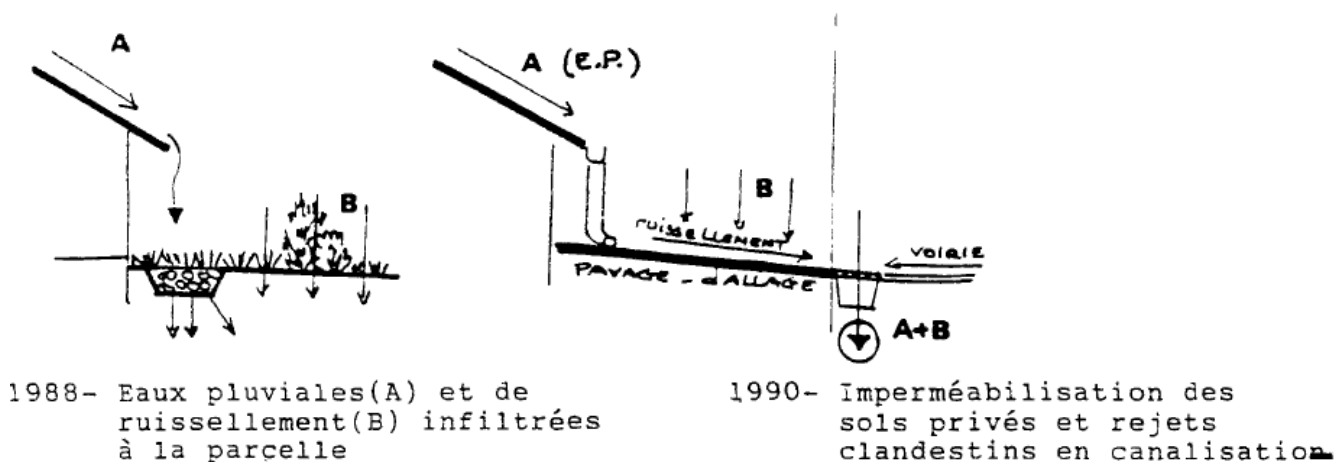


Figure 9 : Illustration de l'artificialisation des terrains à l'échelle de la parcelle

Il reste important de noter que ce phénomène d'urbanisation intensive est relativement peu présent sur la zone d'étude et l'extension des zones urbaines et l'imperméabilisation de terres agricoles concerne exclusivement les communes de Clamecy et Corbigny.

L'évolution des zones urbanisées sur les autres communes n'est pas suffisante pour avoir un impact significatif et généralisé sur les phénomènes de ruissellement.

2.5.2 Les pratiques agricoles

Dans les zones rurales, les pratiques agricoles et forestières jouent un rôle important dans la formation, l'aggravation et la dynamique du ruissellement.

A partir des années 1960, les remembrements successifs vont réorganiser le foncier agricole en transformant un parcellaire morcelé en parcelle unique, pour faciliter la motorisation de l'agriculture.

Cette évolution du paysage rural et des pratiques agricoles et forestières se traduit sur le terrain par la disparition de nombreux espaces qui avaient une influence sur les écoulements :

- déforestation : les parcelles cultivées s'imposent au détriment des zones boisées ;
- réduction du linéaire de haies : la disparition des parcelles morcelées et séparées par des haies s'est fait au profit de grandes surfaces cultivées ;
- mise en culture de pâturages.

Certaines cultures vont générer plus de ruissellement que d'autres : c'est le cas des cultures sarclées, réalisées en laissant de longs sillons de terre nues qui favorisent le ruissellement. L'uniformisation de ces cultures sur de grands pans de bassins versants est un facteur aggravant du ruissellement.

Certaines techniques culturales permettent pourtant de diminuer le ruissellement :

- la culture des parcelles perpendiculairement à la pente, pour que les sillons entre les rangs de plantes puissent retenir l'eau et favoriser son infiltration (Figure 10) ;

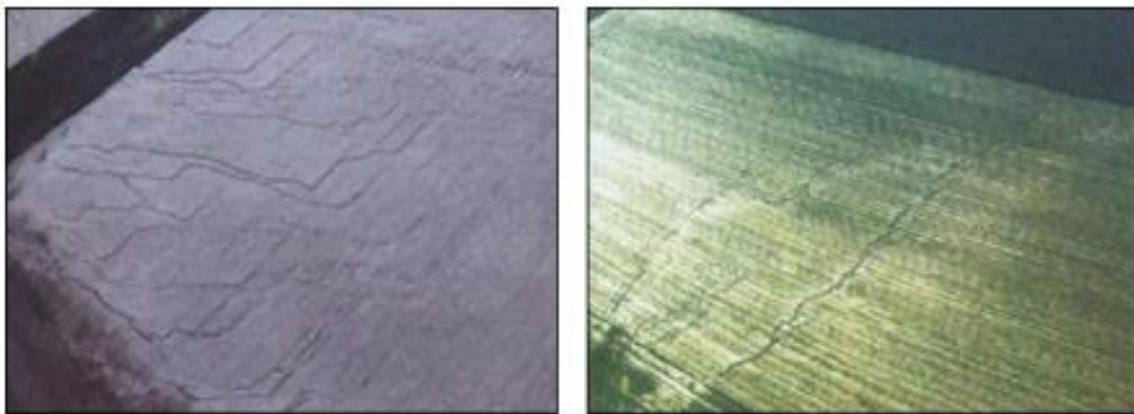


Figure 10 : Photographies aériennes qui montrent l'influence du sens du travail du sol sur la direction des écoulements - à gauche les écoulements ont été influencés, à droite ils ont suivi la ligne de plus grande pente - source: Delahaye (2002)

- l'organisation parcellaire sur un versant, qui permet en alternant les cultures et le sens de travail du sol de limiter le ruissellement ;
- les techniques culturales sans labour, qui limitent l'érosion dans une parcelle et le ruissellement ;
- le sursemement dans les axes d'écoulements, qui permet de limiter l'arrachement des particules du sol.

Dans d'autres cas, l'abandon de l'exploitation de certaines parcelles difficiles à exploiter avec les machines agricoles a conduit à une colonisation de celles-ci par des massifs arbustifs ou forestiers réduisant la génération et les effets du ruissellement.

2.5.3 L'érosion des sols

Érosion des sols et ruissellement sont liés : un sol facilement érodable est un sol qui va favoriser le ruissellement au détriment de l'infiltration.

De manière générale :

- plus la structure d'un sol sera compacte, et plus sa capacité d'infiltration sera diminuée ;
- les terrains fortement végétalisés ont tendance à moins ruisseler que les terrains nus. L'implantation d'un couvert végétal permet donc de limiter l'érosion d'un sol en le protégeant de la dégradation faite par les pluies. Ce couvert végétal permet également de réduire la charge solide dans l'eau qui ruisselle. Au contraire, un sol nu favorisera la formation de ravines et d'incisions des terrains dans lesquels se propageront les écoulements d'eau.

Le comportement des sols vis-à-vis du ruissellement et de l'érosion va également dépendre de certains facteurs :

- en période végétative, l'eau de pluie sera plus facilement absorbée par les plantes, qui vont également freiner le ruissellement ;
- après la récolte, le sol nu et tassé sera un facteur aggravant du ruissellement, surtout si cette récolte est effectuée juste avant des épisodes pluvieux intenses.

L'utilisation de véhicules agricoles lourds compacte les sols et favorise son tassement, augmentant ainsi sa sensibilité à l'érosion.

2.5.4 L'effet des cumuls de pluie ou érosivité pluviale

La sensibilité du sol à l'érosion n'est pas toujours corrélée à la notion de battance et aux propriétés intrinsèques du sol qui conduisent à ce phénomène. Quand des cumuls de pluie importants sont

conjugués à des sols saturés, des sols non battants peuvent être soumis à un ruissellement important. On appelle ce phénomène l'érosivité pluviale, qui va dépendre notamment de la réserve utile des sols.

Cette notion de réserve utile repose sur un croisement entre des données granulométriques (notamment le diamètre moyen pondéral (MWD) d'un agrégat) et la texture du sol (Figure 11). Elle est également liée à l'épaisseur des sols : on parle de réserve utile de « x » mm d'eau par centimètre d'épaisseur de sol.

MWD	Stabilité	Battance	Ruissellement et érosion diffuse
< 0,4 mm	Très instable	Systématique	Risque important et permanent en toutes conditions topographiques
0,4 - 0,8 mm	Instable	Très fréquente	Risque fréquent en toute situation
0,8 - 1,3 mm	Moyennement stable	Fréquente	Risque variable en fonction des paramètres climatiques et topographiques
1,3 - 2,0 mm	Stable	Occasionnelle	Risque limité
> 2,0 mm	Très stable	Très rare	Risque très faible

Figure 11 : Lien entre ruissellement et érosion diffuse : l'évaluation de la stabilité structurale via le diamètre moyen pondéral – source : LRPC Blois

2.5.5 Autres facteurs aggravants

L'augmentation des risques de feux de forêts, y compris dans des territoires qui étaient jusque-là peu ou pas concernés par ces problématiques, est un potentiel facteur aggravant pour le ruissellement. Les feux de forêts ont d'importantes conséquences sur les sols, dont ils détruisent la structure et suppriment le couvert végétal. Cette mise à nu amplifie leur sensibilité à l'érosion, ce qui provoque des phénomènes de coulées de boue dès les premières précipitations post-incendies. De plus, cette déstructuration de la structure superficielle du sol empêche une infiltration correcte des eaux de pluie, en raison du compactage du sol causé par les produits des cendres.

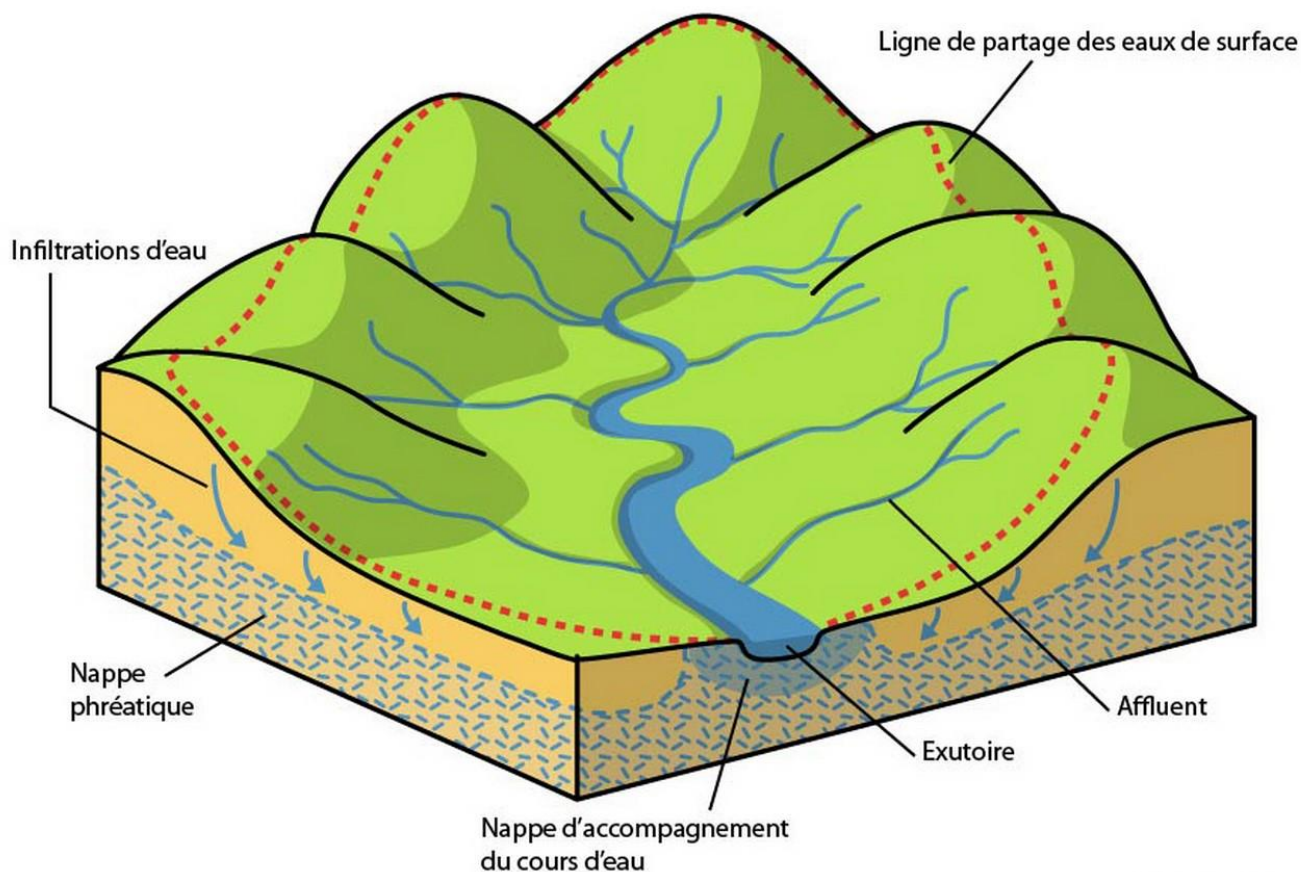
De la même manière, les projections climatiques semblent indiquer que les épisodes de pluies intenses seront plus nombreux dans les prochaines décennies, et associés à des épisodes de sécheresse.

Le changement climatique pourrait donc amplifier les risques d'inondations par ruissellement dans le futur, ce qui invite à une vigilance particulière en matière de gestion des eaux de ruissellement.

3 UNE GESTION A L'ECHELLE DU BASSIN VERSANT

3.1 La définition d'un bassin versant

Le bassin versant (Figure 12) est la surface, délimitée par une ligne de crête, sur laquelle tous les écoulements se dirigent vers un même exutoire. Il est considéré comme l'unité élémentaire de production du ruissellement.



© Source Alsace Nature

Figure 12: Schéma d'un bassin versant

La morphologie d'un bassin versant peut être décrite par de nombreux paramètres géométriques (surface, forme, altitude, pente...).

Les caractéristiques qui ont une influence sur le ruissellement sont :

- la surface du bassin versant : plus l'aire collectée est grande, et plus le volume ruisselé sera important ;
- la forme du bassin versant, qui va influencer la concentration des écoulements : plus le bassin versant aura une forme allongée et plus les écoulements mettront de temps à parcourir la distance qui les amène à l'exutoire. Les débits ruisselés seront donc moins importants et plus répartis dans le temps

3.2 Le rôle des thalweg

Dans les zones de fortes pentes, les thalwegs (chemins préférentiels de l'eau lorsqu'il pleut) représentent les espaces de concentration du ruissellement. Une cartographie des zones à risque en terme de ruissellement passera donc en premier lieu par leur recensement.

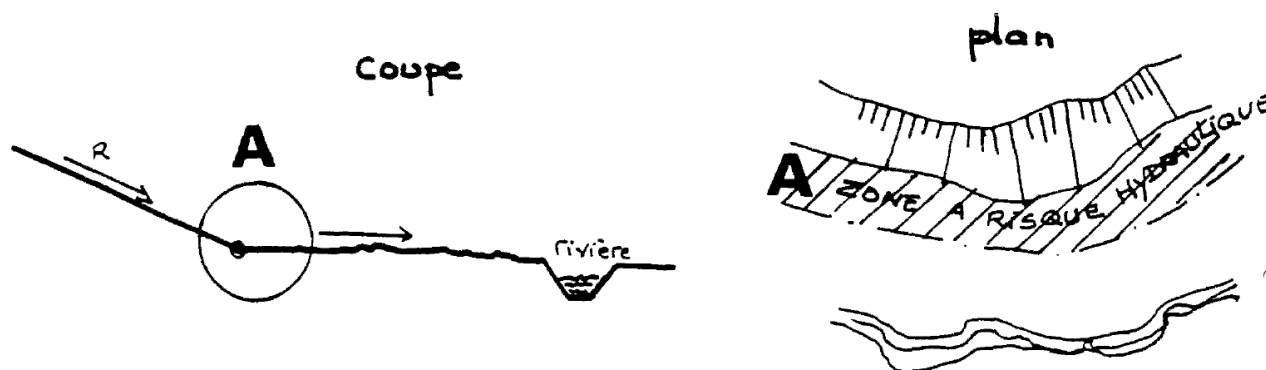


Figure 13: Zones sensibles au ruissellement: les ruptures de pente - source guide LCPC Ruissellement risque majeur (1998)

Ces talwegs ne sont pas soumis au même aléa ruissellement sur tout leur linéaire : indépendamment des enjeux, deux indices augmentent l'aléa ruissellement :

- les secteurs de ruptures de pente en pied de coteau (Figure 13), qui augmentent significativement l'aléa car ils sont des secteurs à risques d'engorgement ;
- les formes de bassin versant et leur indice morphométrique, qui déterminent sa réponse hydrologique.

Dans des zones plus planes, le ruissellement sera plus diffus, et les terrains seront moins propices à une évacuation des eaux pluviales (saturation plus rapide des sols).

3.3 Zones de production et de transfert

3.3.1 Les zones de production

Les zones de production sont les secteurs desquels partent les ruissellements (Figure 13). Généralement situées en tête de bassins versants, ces zones de production représentent l'ensemble des zones où les écoulements sont diffus et pas encore concentrés, et où ils peuvent se charger de matières en suspension.

Ce sont des secteurs où tout changement de destination des parcelles (défrichement, urbanisation, modification des modes de cultures) peut avoir des conséquences sur la sensibilité des terrains à produire du ruissellement.

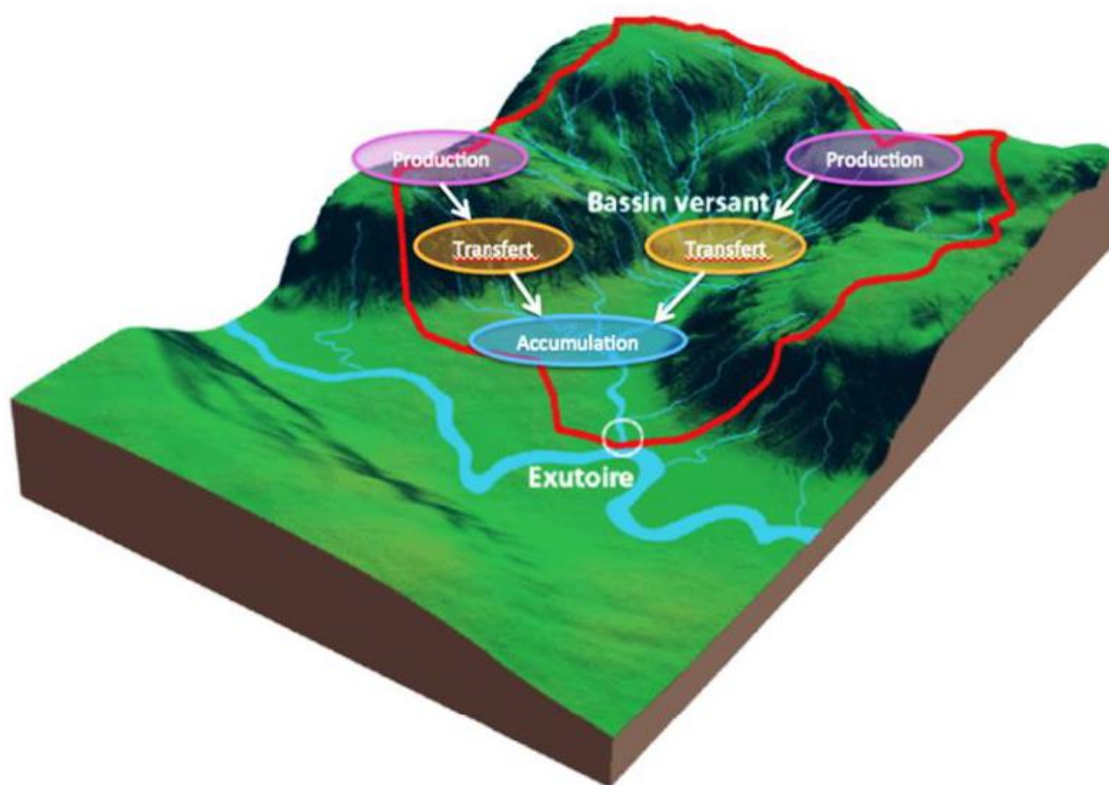


Figure 14: Concept du ruissellement en trois processus: zones de production, transfert et accumulation – source : Lagadec (2017)

Ce sont les secteurs sur lesquels les écoulements se concentrent, dans des talwegs, et se propagent vers l'aval. Généralement situés dans des zones de pentes, les zones de transfert correspondent à des secteurs où les écoulements peuvent atteindre des vitesses importantes, mais conservent des hauteurs faibles (généralement inférieures à 50 centimètres).

3.4 Les zones d'accumulation

Quand les écoulements ont suivi les talwegs et qu'ils arrivent sur des zones de rupture de pente, deux solutions se présentent.

Les eaux atteignent le réseau hydrographique, où sont évacuées vers ce réseau indirectement par le biais des réseaux d'eaux pluviales.

Les écoulements vont stagner et s'infiltrer progressivement dans les zones dites d'accumulation, qui correspondent à des cuvettes topographiques.

Ces zones d'accumulation (Figure 15) correspondent à des secteurs où les hauteurs d'eau peuvent être importantes, où il est nécessaire d'éviter toute nouvelle urbanisation.



Figure 15 : Exemples de zones de production / transfert / accumulation - source: Cerema Nancy

3.5 Recensement des événements historiques

Les événements historiques sur le secteur d'étude, dans le cas des phénomènes de ruissellement sont peu documentés. La DDT indique ne pas avoir mémoire d'événements de ruissellement significatifs. Les recherches dans la presse locale (journal du Centre) renvoient essentiellement sur des phénomènes de débordements de cours d'eau locaux et sur les événements récents de 2024 (mai, juin et juillet).

Les événements mentionnées dans la presse locale² concernant le ruissellement, hors événements de 2024, concernent essentiellement des inondations sur Nevers, son agglomération et les communes situées à proximité de la Loire au nord de Nevers.

Les témoignages recueillis auprès de riverains lors de la visite de terrain, réalisée en juillet 2024, ont indiqué dans certains cas des inondations « régulières » ou fréquentes de certaines zones ou une absence d'axe de ruissellement en particulier à Dornecy, Amazy, Villiers-sur-Yonne, Sardy-les-Epiry et Mouron-sur-Yonne.

Le témoignage recueilli à Dornecy, faisant état d'inondation fréquentes de l'avenue du général Leclerc, concerne une inondation par remous. L'inondation est causée par l'impossibilité d'évacuation vers l'Armanche des eaux pluviales conduisant à une inondation localisée. Cette inondation est aggravée par la présence de fréquentes inondations de caves par la nappe, et les eaux présentes dans les caves sont pompées vers la rue.

La présence d'un axe d'écoulement à l'est du stade de Dornecy, à proximité du puits erluyo est également confirmée par un des adjoints au maire.

Entre Sardy-les-forges et Maison-Dieu un riverain a également confirmé un axe de ruissellement important s'étendant du Vau de la Roche et des coteaux forestiers avoisinant jusqu'à la route départementale au travers des cultures situées au nord-est de Sardy. Cet habitant a également indiqué que l'inondation touche sa parcelle (située en bas de l'axe) tous les dix ans environ, la précédente inondation datant de mai 2015.

A Saligny, les deux agriculteurs rencontrés font état de fréquentes inondations de leurs bâtiments agricoles situés en bas du village. Le premier indique être impacté par les écoulements qui descendent du coteau en suivant la grande route et le second (puits de l'âne) indique être plus majoritairement touché par des phénomènes de remontée de nappe plus que par du ruissellement. Les deux agriculteurs mentionnent également que les travaux agricoles sont fortement impactés par les inondations relativement régulières qui empêchent le travail (moisson/pâturage) sur les parcelles situées à proximité de la voie ferrée tellement celles-ci sont gorgées d'eau. Les deux témoins indiquent que des axes de ruissellement sont également présents de « l'autre côté », c'est-à-dire vers Villiers-sur-Yonne.

A Creux, un résident a indiqué de fréquentes petites inondations provenant des champs et chemin au nord-est impactant le jardin de la première maison ainsi que des inondations de la route au niveau du croisement avec la rue du marquis du loup. Il indique que ces inondations sont aggravées par l'ensablement/engrèvement rapide des ouvrages assurant le drainage du pluvial. Ce résident indique également que les événements tels celui de juin 2024 sont relativement rares (tous les 5-10 ans). Il

² https://www.lejdc.fr/clamecy-58500/actualites/a-clamecy-le-beuvron-est-sorti-de-son-lit_14478652/

https://www.lejdc.fr/clamecy-58500/actualites/grele-arbres-sur-les-routes-les-images-des-violents-orages-qui-ont-frappe-le-haut-nivernais_14534424/

https://www.lejdc.fr/asnois-58190/actualites/les-agriculteurs-durement-touchees-par-les-violentes-pluies-de-la-semaine-derniere-si-ca-continue-comme-ca-jarrete_14524698/

https://www.lejdc.fr/clamecy-58500/actualites/ma-cour-ressemblait-a-une-piscine-une-trentaine-d-habitations-touchees-par-les-inondations-a-clamecy_14522117/

https://www.lejdc.fr/cervon-58800/actualites/des-degats-importants-apres-un-violent-orage-sur-le-hameau-de-lentilly-a-cervon_14504215/

indique également que la rue du marquis du loup joue aussi un rôle d'axe drainant le ruissellement jusqu'au ruisseau de la fontaine de Creux.

A Chitry-les-mines plusieurs riverains ont également confirmé l'existence de phénomènes de ruissellement (en plus des traces particulièrement visibles sur la rue Jules Renard). Les chemins et champs en amont de la rue Jules Renard drainent les écoulements vers la rue Jules Renard (photographie de couverture). Les écoulements suivent la rue puis descendent la D977bis jusqu'au pont de l'Yonne. La maison à l'angle de la rue Renard et de la RD a été protégée de l'inondation par la mise en place d'un « merlon » en graviers et tout venant. Il est fait mention par l'habitant de cette maison que « l'eau descendait la rue puis passait sur le pont avant de rejoindre l'Yonne ». Un chenal a été creusé/renforcé pendant l'événement pour assurer le passage d'une partie des écoulements vers les champs et limiter l'inondation via le rue Jules Renard. Les chemins en amont de la rue Jules Renard sont particulièrement ravinés.

Les riverains ont également mentionné que des maisons du lotissement Marceau ont également été touchées. Des traces de l'inondation ont pu être retrouvées sur les deux maisons les plus basses de ce lotissement.

A Marcilly, la personne interrogée a confirmé l'inondation du garage de la maison située dans l'alignement de la rue du 8 septembre, mais a indiqué ne pas avoir vécu l'événement. Elle a également indiqué que l'emplacement à proximité de la chapelle est régulièrement inondé bien que ces inondation soient faibles et très localisées.

Enfin, une personne rencontrée à Thaveneau (commune de Mouron-sur-Yonne) a confirmé l'inondation de jardins et parcelles situés en contrebas de l'intersection entre la Route du Morvan (RD 126) et la Route de Coulon (RD 297). Cette personne a également mentionné que les pluies de juin 2024 ont été particulièrement intenses et ont conduit à de fortes inondations nécessitant d'évacuer les chevaux de certaines parcelles.

Nous avons également recueillis des témoignages infirmant les résultats de la méthode d'analyse topographique utilisée pour identifier les axes de transfert et les zones d'accumulation ou forçant à corriger les résultats.

Ces éléments concernent les communes de Surgy et Sardy-les-Epiry. A Surgy les témoignages des riverains indiquent qu'aucun phénomène de ruissellement ne provient des parcelles agricoles au sud ouest du village. Ce témoignage est cependant rendu douteux par la présence de marques d'érosion sur la rue de Nayau. Nous concluons que ces phénomènes sont rares et peu intenses s'ils apparaissent. A Sardy-les-Epiry, le témoignage indique que les phénomènes d'inondation au niveau de Tavenay ne concernent pas les habitations mais passent dans les champs au nord des habitations.

3.6 Identification des axes et zones d'écoulement

Le Cerema a conçu une méthode appelée **Exzeco**³ (pour « **Ex**traction des **Z**ones d'**E**coulement ») afin de cartographier les espaces potentiellement inondables sur des petits bassins versants. Initialement conçue pour répondre à la problématique des inondations par ruissellement dans le sud de la France (mission MIIAM), cette méthode permet de pré-identifier les zones d'écoulements sur de larges territoires d'études. Cependant cette méthode n'a pas pu être déployée lors de cette étude suite à des incidents matériels⁴. Par conséquent une méthode similaire a été construite et utilisée en reprenant les principes de la méthode Exzeco.

Dans cette étude, la méthode utilisée se base sur la topographie pour le calcul des zones d'écoulements. La méthode utilise un modèle numérique de terrain (MNT). Ce MNT est une représentation des altitudes du sol à pas régulier. Par exemple, si on utilise un MNT à pas de 5 --m, nous disposons d'une mesure de l'altitude pour tous les carrés de 25 m² (un point de mesure tous les 5 mètres).

³ Méthodologie décrite dans le rapport Cerema « *Modélisation du ruissellement, application de la méthode Exzeco sur 8 départements de l'arc méditerranéen* »

⁴ Perte du serveur de calcul et du code exzeco dans sa version finale. Les travaux pour ré-planter le code sur un nouveau serveur de calcul n'ont pas abouti en date du 21/10/2024 et se poursuivent.

L'identification des zones d'écoulement se fait en calculant les superficies drainées par chaque pixel du MNT. Pour cela, pour chaque pixel du raster sont définies les directions d'écoulement, ces directions sont calculées à partir de la variation entre l'altitude d'un pixel et celle de ses voisins. Ceci permet de déterminer les surfaces drainées par chaque pixel en remontant le calcul et donc de déterminer les zones d'accumulation présumées. Ce calcul est ensuite répété plusieurs fois en « bruitant » de manière aléatoire les valeurs d'altitudes du MNT. Ce bruitage permet, dans une certaine mesure, de compenser les erreurs d'altitudes présentes dans le MNT utilisé et de prendre en compte les effets liés à la « masse » d'eau qui peut s'écouler. L'effet résultat du volume d'eau ruisselé est également pris en compte en ajoutant une légère surcote aux valeurs du MNT dès que les surfaces drainées dépassent une certaine surface.

3.6.1 Calcul des endoréismes

Un endoréisme est le fait qu'un bassin versant ne se déverse pas dans un cours d'eau ou une mer, mais est clos, retenant les eaux dans une cuvette fermée. Il peut provenir de cuvettes naturelles karstiques (exemples des dolines), de cuvettes anthropiques (carrières, bassins de rétention) ou de défauts liés au MNT.

Ces cuvettes sont comblées lors du traitement et, si situées dans le passage d'un axe de ruissellement seront entièrement intégrées à cet axe. Elles seront donc systématiquement intégrées comme des zones d'accumulation d'eau par les traitements automatiques que cela tienne d'une réalité physique ou que cela corresponde à la non prise en compte de certains éléments (ponts/buses).

Ces zones sont figurées sur les résultats dès que le volume de ces endoréismes dépasse 50 m³.

3.6.2 Résultats retenus

Les emprises obtenues montrent des zones basses topographiques susceptibles d'être inondées, et à chaque surface calculée correspond une superficie de bassin versant collecté.

En fonction des besoins, il est possible de n'afficher que certaines classes de superficies drainées : on supprime ainsi les données trop basses et trop hautes qui sont moins pertinentes.

Dans le cas de notre étude, nous n'avons pas utilisé les classes de surfaces drainées correspondant à des surfaces de 10 km² ou plus car correspondant exclusivement à des cours d'eau.

Classes de valeurs de surface drainée	Correspondance
0	Valeurs aberrantes
0,005	
0,01	Ruissellement diffus
0,05	
0,1	
0,5	Ruissellement de transfert : concentration des eaux dans les thalwegs
1	
5	
10	
50	
100	
500	
1000	
10000	

Figure 16 : classes de superficies drainées en km² et types de ruissellement associés (extrait de la notice d'utilisation d'Exzeco)

Sur les communes couvertes par l'étude, la donnée utilisée a été le RGE Alti au pas de 5 mètres.

Le MNT à pas de 5 m est de qualité variable sur la zone d'étude. Les abords des lits de l'Yonne et du Beuvron sont issus de levés lidar (laser topo). Les zones plus éloignées de ces cours d'eau possèdent

une altimétrie à la précision beaucoup plus faible car issue d'interpolation à partir de points connus ou de photogrammétrie. Ainsi si l'altitude est connue avec une incertitude inférieure à 1 m sur une bande de 2 à 5 km de part et d'autre de l'Yonne, certaines zones souffrent d'une imprécision allant de 2 à 10 m.

Les communes les plus impactées par ce manque de précision sont celles de Cervon et Corbigny où l'essentiel des zones habitées et potentiellement exposées au risque ruissellement sont situées en dehors des surfaces couvertes par des levés lidar.

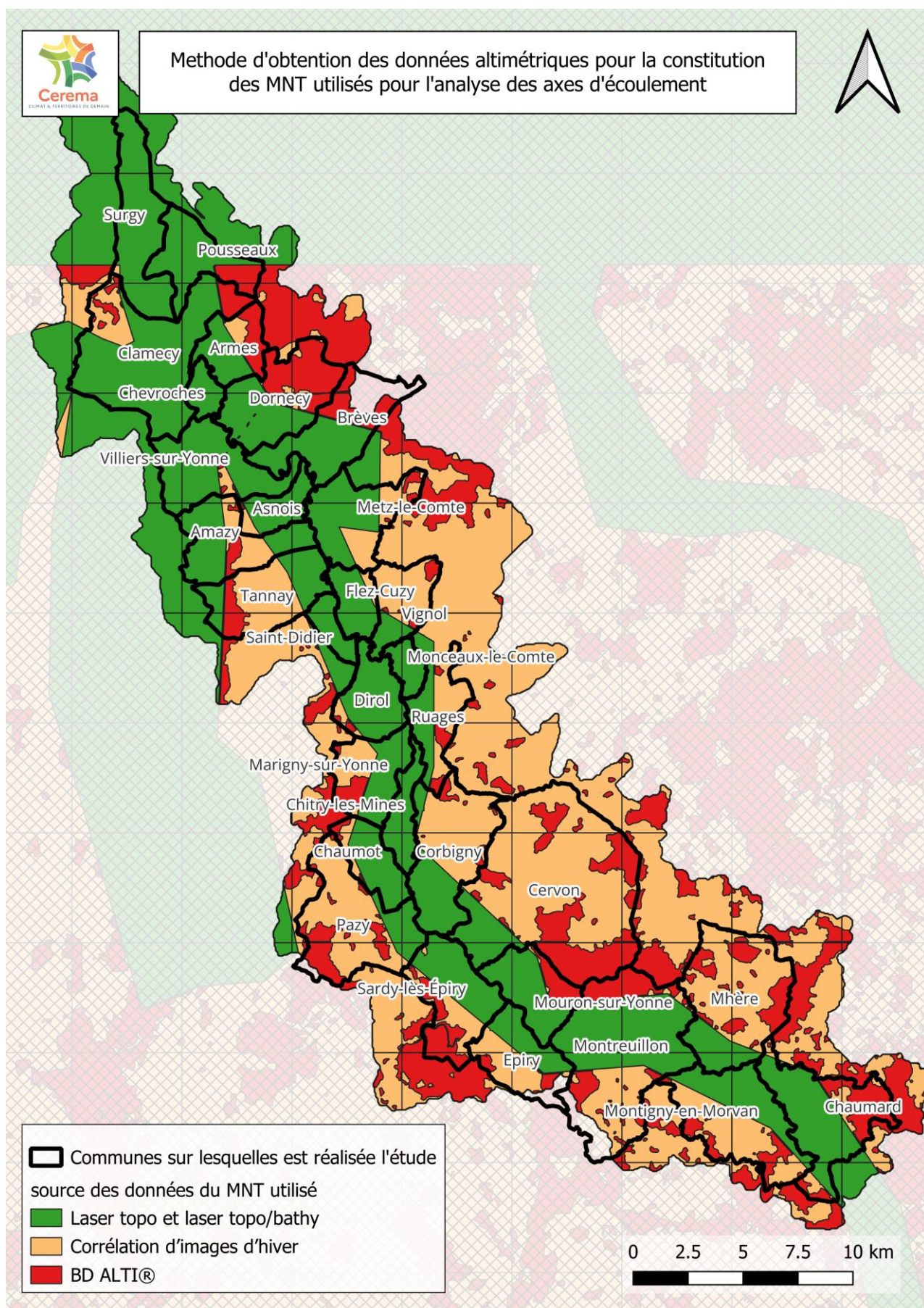


Figure 17 : types de données d'entrée pour la constitution du MNT utilisé

3.7 Les limites de la méthodologie utilisée pour l'identification des axes d'écoulement

Le principe de cette méthode est d'améliorer la connaissance des zones inondables par ruissellement, notamment sur les parties amont de bassins versants. Cette méthodologie connaît plusieurs limites :

- La méthode utilise la topographie mais ne prend en compte aucune donnée hydrologique. Les résultats sont donc issus exclusivement d'un traitement topographique, et ils représentent une empreinte susceptible d'être inondable sans notion de période de retour, de hauteur et de vitesse. Pour autant, il ne s'agit pas d'une zone inondable à proprement parler : les zones identifiées peuvent être supposées inondables dans l'attente d'éléments plus précis (modélisations). Cette méthode ne permet pas de disposer d'informations directes pour quantifier un aléa ruissellement ;
- De nombreuses précautions sont à prendre avec les MNT utilisés, dont les anomalies peuvent parfois entraîner des incohérences dans les empreintes résultantes ;
- Sur certains secteurs, les calculs d'endoréismes ne peuvent pas être effectués en raison de la qualité du MNT,
- Les valeurs utilisées pour la méthodologie sont subjectives, et le bruitage est aléatoire (le résultat ne sera pas exactement le même en lançant deux fois le calcul sur un même territoire) ;
- Le modèle fonctionne très bien dans les zones de reliefs, mais il est beaucoup moins efficace dans des zones planes ;
- Les écoulements en milieu urbain ne sont pas correctement représentés, les bâtiments ou certaines voiries étant enlevés du MNT.

De manière globale, il faut retenir que cette méthode permet une pré-identification des zones potentiellement inondables par ruissellement. Toute utilisation plus précise des résultats doit cependant être complétée par une modélisation fine.

4 LA CARTOGRAPHIE DE SENSIBILITE DES TERRAINS A GENERER DU RUISSELLEMENT (METHODE CRUS).

4.1 Principe de la méthode

La méthode CRUS (Cartographie du Ruissellement de Surface) permet de cartographier la sensibilité des sols à générer du ruissellement en s'appuyant sur des données publiques et facilement accessibles telles que la pédologie, l'occupation des sols et un modèle numérique de terrain (MNT).

Il s'agit d'une méthode dite « sèche » : elle ne s'intéresse pas aux événements pluviométriques mais seulement aux sols et à leur sensibilité à produire du ruissellement.

Cette méthode consiste à croiser plusieurs données que sont :

- la battance ;
- la perméabilité ;
- l'occupation des sols ;
- la pente.

4.2 Données d'entrée

Les cartes ont été établies à partir de données d'entrée dont la précision est variable. L'agrégation de ces données implique de tenir compte des différentes échelles de réalisation lors de la production des cartes CRUS.

Le tableau suivant récapitule l'ensemble des données utilisées pour réaliser les différentes cartes ainsi que l'échelle prise en compte.

Table source	Organisme	Donnée récupérée	Échelle / précision
RGE alti 1m / 5m	IGN	MNT	Précision de 1 à 5 mètres selon la source
Référentiel Régional Pédologique (Base donesol)	INRAE	Base DoneSol3 Taux argile / sable / limon	1/250000
Bassins versants	SANDRE	BD Topage	précise
Tronçons de routes	IGN	BD Topo	précise
Bâti	IGN	BD Topo	précise
Registre parcellaire graphique	IGN	Parcelles graphiques	pluri-départementale
Corinne Land Cover	Agence Européenne pour l'environnement	Occupation des sols	européenne

Figure 18 : données utilisées par la méthode CRUS ainsi que les échelles d'usage des données

4.3 L'étude de la pédologie

La pédologie permet de réaliser les cartes de perméabilité et de battance.

4.3.1 Le sol et son influence sur le ruissellement

Le sol est l'interface entre la roche mère (substratum) et l'atmosphère, qui sert de réceptacle aux précipitations. Le comportement de cette interface va donc avoir une influence sur la part des précipitations qui s'infiltre, s'évapotranspire ou ruisselle (voir chapitre sur le cycle de l'eau).

Un sol va se composer de plusieurs éléments : de l'air, de l'eau, de la matière minérale et de la matière organique (animale et végétale). Il résulte de la dégradation de la couche superficielle de la roche mère et d'un apport en sédiments. La pédologie est la science qui a pour but d'étudier la formation et l'évolution dans le temps de ces sols.

De nombreux paramètres sont nécessaires pour caractériser un sol, et tous ont une influence sur le ruissellement :

- le couvert végétal : la présence d'un couvert végétal va influencer le ruissellement sur plusieurs points:
 - la présence de racines va permettre de maintenir les sols et de diminuer les phénomènes érosifs ;
 - la végétation va avoir une influence sur l'évapotranspiration, et diminuer le ruissellement ;

L'absence de couvert végétal va faciliter la formation d'une croûte de battance.

- la texture, qui se décrit par les taux d'argiles, sables et limons ;
- la structure du sol, notamment la répartition de ses différents horizons ;
- l'épaisseur du sol, jusqu'au substratum ;
- la porosité ou répartition des vides dans le sol, qui va favoriser ou non l'infiltration ;
- la teneur en eau, la saturation du sol en eau favorisant le ruissellement ;
- la teneur en matières organiques, qui augmente la capacité de rétention en eau du sol et stabilise sa structure.

Dans le contexte de cette étude de ruissellement, et pour permettre la réalisation d'une cartographie de sensibilité des sols à l'échelle de plusieurs communes, c'est la texture du sol qui sera plus particulièrement examinée. Cette donnée est en effet accessible via la base de données DoneSol3 de l'INRAE.

4.3.2 Les différents types de textures d'un sol

Les sols sont constitués d'agrégats dont la disposition dans l'espace varie selon ses conditions de formation et ses divers remaniements. Les espaces existants entre ces agrégats, c'est-à-dire la porosité du sol, sont les lieux où les eaux infiltrées circulent.

Les sols superficiels sont constitués par trois composants essentiels, appelés la fraction minérale du sol (voir triangle de texture Figure 19) :

- le sable (S), constitué d'éléments d'une taille supérieure à 0,05 mm ou 50 μm ;
- le limon (L), constitué d'éléments d'une taille comprise entre 2 et 50 μm ;
- l'argile (A), constituée d'éléments d'une taille inférieure à 2 μm .

Les sols ne sont que très rarement uniquement argileux, sableux ou limoneux, et contiennent généralement une fraction de chaque composant. Leur classement se fait en fonction des quantités de chaque composant, selon un triangle de texture (Figure 19).

Triangle de texture :

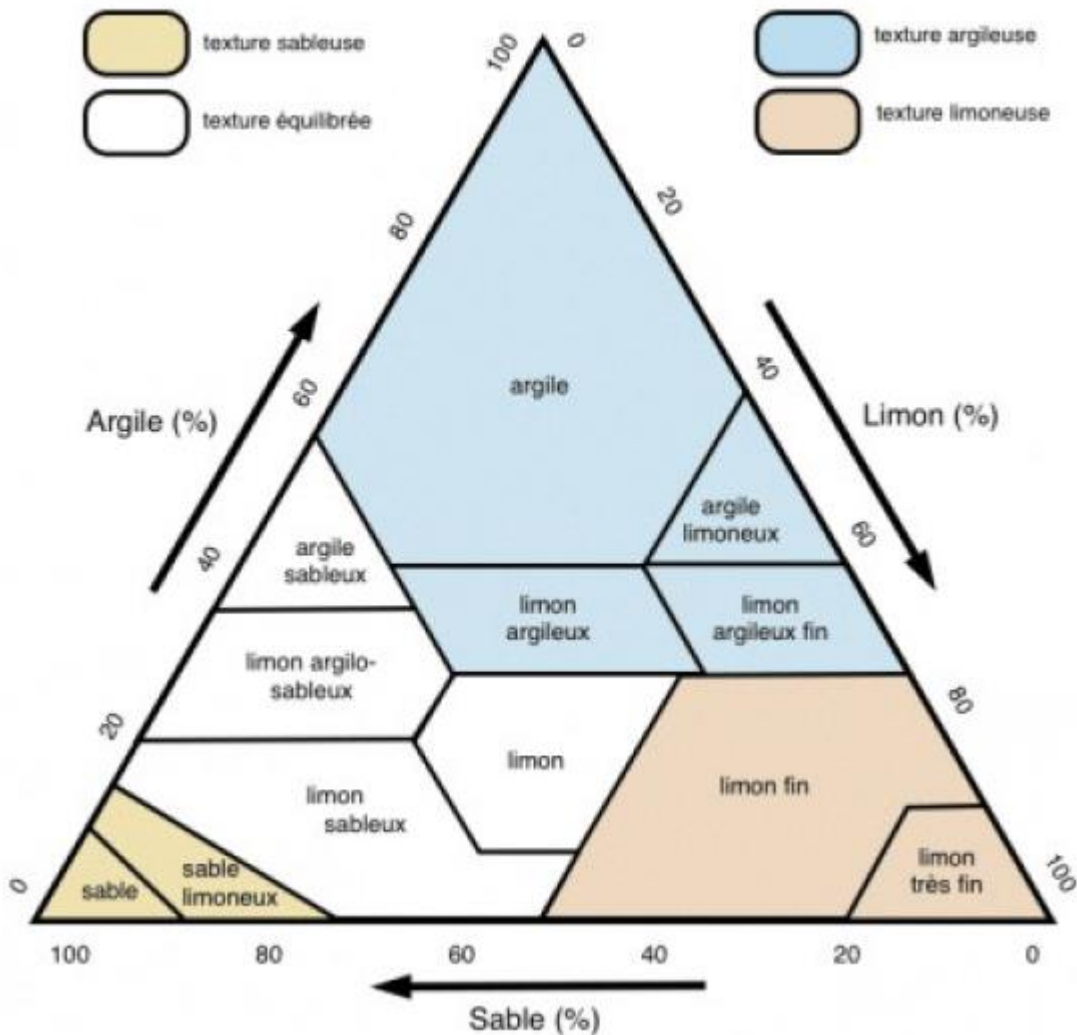


Figure 19 : Triangle de texture ASL - source Antoni et al (2006)

En première approche, les taux de sables, argiles et limons ont été récupérés sur notre zone d'étude à partir du Référentiel Régional Pédologique (RRP, base DoneSol3 de l'INRAE).

4.3.3 La carte de battance

La battance est un phénomène mécanique qui provoque la désagrégation des agrégats de certains types de sols, dont les particules plus fines vont se réorganiser pour former une croûte superficielle, dite « croûte de battance » (Figure 20Figure 21). Cette croûte de battance va agir comme un ciment, colmater le sol pour empêcher l'eau de s'infiltrer et accentuer le ruissellement.

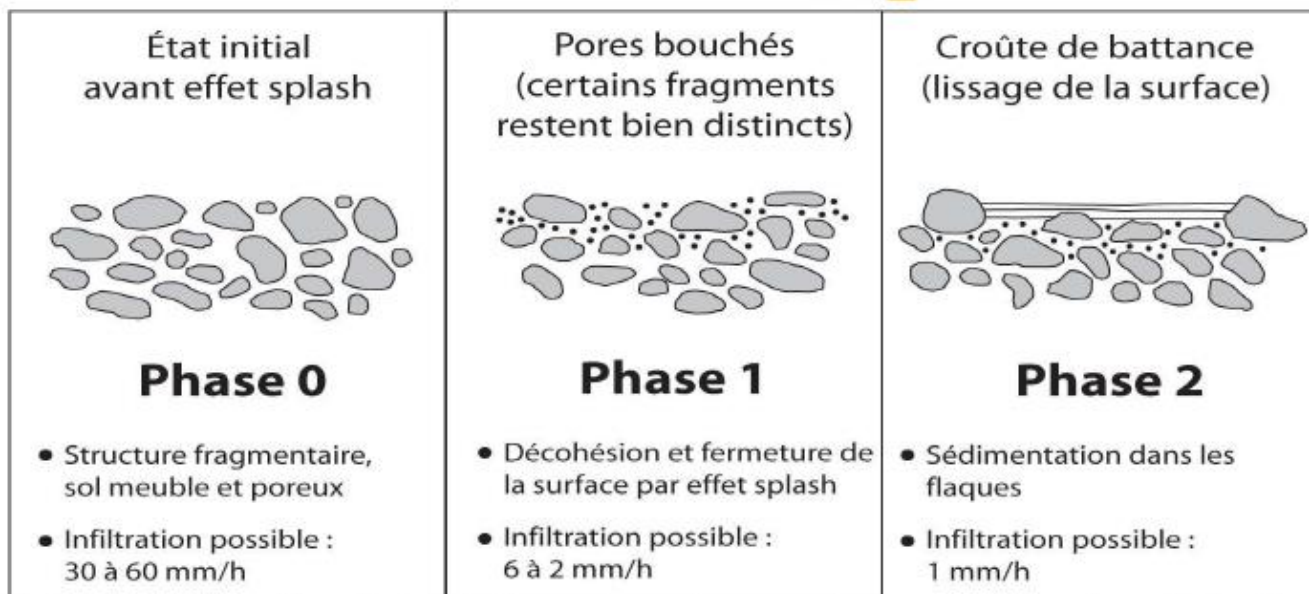


Figure 20 : croûte de battance - source : Cerema

Tous les sols ne sont pas sensibles à la battance de la même manière : cette sensibilité dépend des taux d'argiles (A), de sables (S) et de limons (L). Les différentes typologies de sols ne vont donc pas réagir de la même manière, en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques.

Certaines cultures favorisent la formation d'une croûte de battance : maïs, tournesol, vigne, pomme de terre... De même, la présence de matière organique dans les premiers centimètres de sol retarde la formation d'une croûte de battance.

Le phénomène physique à l'origine de la formation d'une croûte de battance est très souvent l'action de la pluie (l'effet des gouttes d'eau sur les sols), mais le passage répété d'engins agricoles ou d'animaux peut avoir les mêmes effets.



Fort.M, Betard.F, Amaud-Fassetta.G, 2015, Géomorphologie dynamique et environnement. Paris, Armand Colin, 336 p.

Figure 21 formation d'une croûte de battance

Ces différences dans les valeurs respectives d'ASL conduisent à des sols de différentes textures (limoneuse, argileuses, argilo-sableuses etc...) en fonction des pourcentages contenus dans chaque typologie de sol (Figure 19).

Pour déterminer la valeur de la battance, un diagramme ternaire (Figure 22) s'applique donc sur chaque unité typologique de sol (uts).

Une note est attribuée à la battance, allant de 1 pour un sol argileux à 5 pour un sol très limoneux.

Diagramme battance

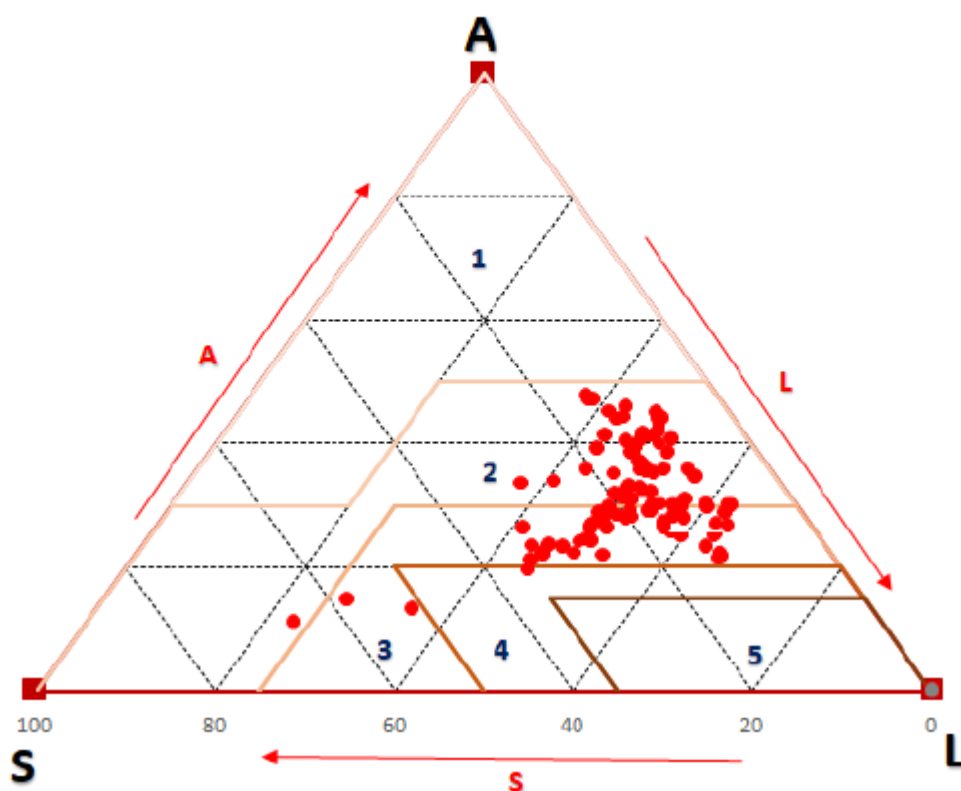


Figure 22 : Diagramme ternaire de battance – les chiffres inscrits dans le diagramme correspondent aux valeurs pour chaque texture lors de la réalisation des cartes de perméabilité pour CRUS

4.3.4 Les cartes de perméabilité

La perméabilité est définie par la capacité d'un sol à laisser passer l'eau. Cette perméabilité est dépendante de la porosité (texture et structure du sol).

L'infiltration des eaux dans le sol dépend de plusieurs paramètres : la nature du sol, son couvert végétal et son état d'humidité initial. Pour établir les cartes de perméabilité à l'échelle d'un bassin versant, c'est uniquement la nature du sol qui sera étudiée.

La perméabilité est donc liée à la texture et à la structure du sol concerné. Les espaces existants entre les agrégats des sols, c'est-à-dire la porosité du sol, sont les lieux où les eaux infiltrées circulent. Plus les espaces entre agrégats sont importants et plus l'eau va pouvoir s'infiltrer dans le sol.

Ainsi, la proportion d'argiles (A), sables (S) ou limons (L) va influencer la perméabilité d'un sol : un sol sableux (constitué de grains grossiers) sera plus perméable qu'un sol argileux (constitué de grains fins).

Une note est attribuée à la perméabilité, allant de 1 pour un sol argileux à 5 pour un sol très limoneux.

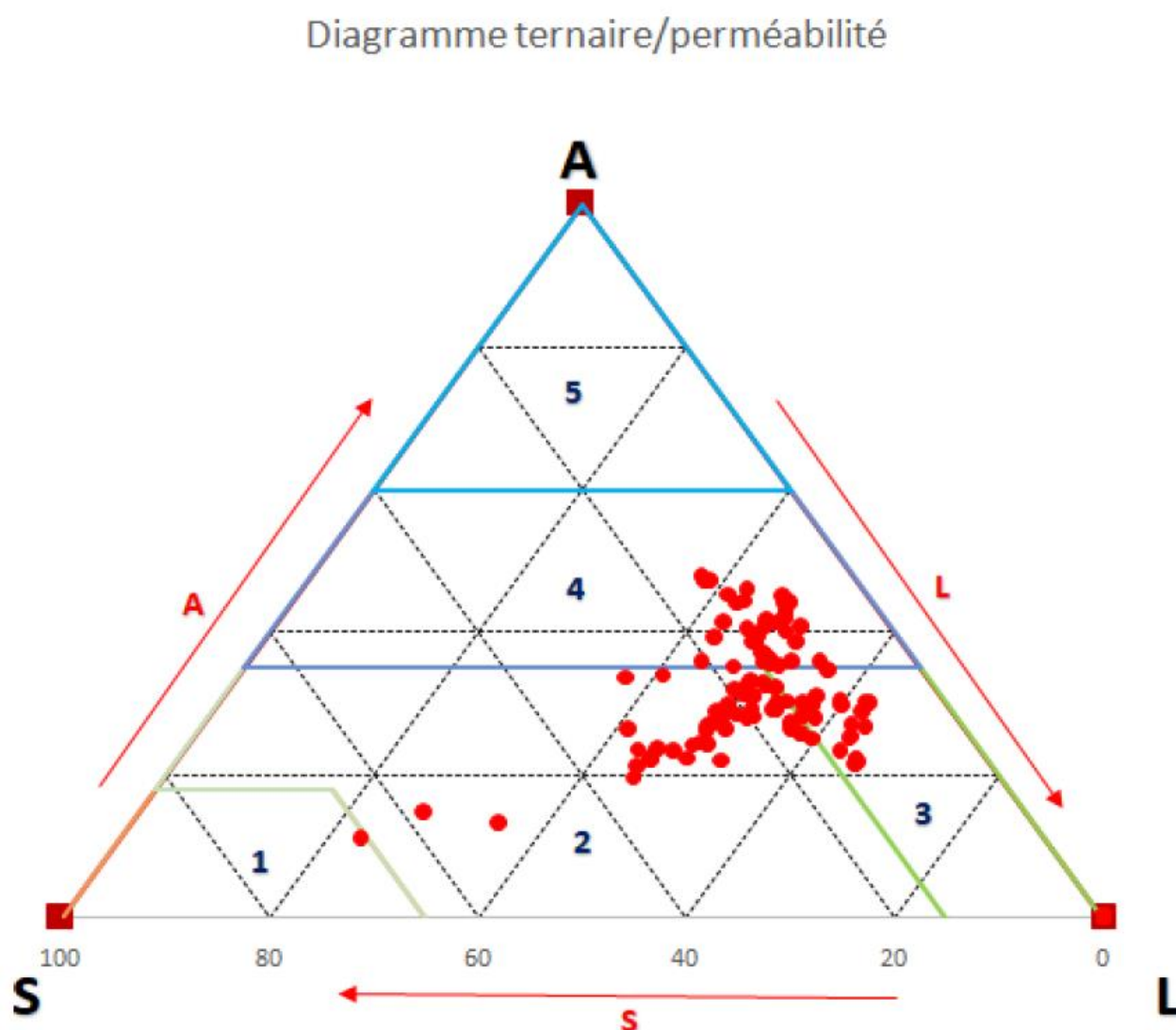


Figure 23 : Diagramme ternaire de perméabilité – les chiffres inscrits dans le diagramme correspondent aux valeurs attribuées à chaque texture lors de la réalisation des cartes de perméabilité pour CRUS

4.4 Les cartes de pentes

La carte des pentes correspond à des classes de pentes obtenues en utilisant le RGE Alti® au pas de 5 mètres, dont le maillage fin permet une bonne représentation physique du territoire.

Une note est ainsi attribuée à chaque classe de pente, allant de 5 (pentes très faibles) à 100 (pentes très fortes).

Classe de pente	Note pente
0-2	5
2-5	15
5-10	25
10-15	50
15-30	60
30-50	80
>50	100

Figure 24 : tableau de détermination de la note CRUS relative à la pente

Une pente importante est propice à la formation de ruissellement, la gravité incitant les gouttes d'eau à dévaler les pentes vers les points bas au lieu de s'infiltrer. Au contraire, sur des terrains plats ou à faible pente, les eaux ont tendance à stagner ou à s'infiltrer sous l'effet de la gravité.

4.5 Les cartes de l'occupation des sols

La carte de l'occupation des sols correspond au croisement entre différentes données : les zones de bâti et zones urbaines, les zones de cultures agricoles et zones de pâtures avec le RPG (registre parcellaire graphique), les zones naturelles (avec Corinne Land Cover).

Une note d'occupation des sols est ainsi attribuée à chaque pixel de la zone d'étude, allant de 0 (zones naturelles de forêts) à 100 (zones urbaines).

Occupation du sol	Note occupation du sol
Forêt	0
Prairies/vergers	20
Cultures fermées	40
Cultures ouvertes	80
Sol nu/zones urbaines	100

Figure 25 : tableau de détermination de la note crus relative aux occupations/usages des sols

Une surface bâtie favorisera plutôt le ruissellement : la rétention de pluie sur les surfaces urbanisées est pratiquement nulle et empêche l'infiltration de l'eau. On considère que, sur ces zones, toute l'eau tombée ruisselle.

Les sols agricoles montrent une grande variabilité au ruissellement : les types de cultures et pratiques culturales peuvent contribuer à aggraver les phénomènes. Par exemple, les plantes sarclées telles que le maïs ou le tournesol (cultures ouvertes) absorbent beaucoup moins les pluies que d'autres cultures céréalières (cultures fermées), en raison des sillons de terre nue laissés entre les pieds des plantes qui favorisent le ruissellement lorsqu'ils sont dans le sens de la pente.

Le maïs et le tournesol sont deux cultures fréquentes dans le département du Puy-de-Dôme, et ces cultures sont faites de manière tournante avec d'autres moins impactantes. Le parti pris lors de cette étude CRUS a été de recenser sur les fichiers du RPG, disponibles annuellement, les parcelles cultivées au moins une fois en cultures sarclées, sur les cinq dernières années. Par principe de précaution, l'ensemble des parcelles ainsi recensées seront affichées sur la cartographie de l'occupation des sols comme étant des cultures ouvertes, c'est-à-dire avec une note de 80.

4.6 Détermination de la sensibilité à générer du ruissellement

Un croisement des 4 cartes définies ci-dessus (perméabilité, battance, pente, occupation des sols) est opéré pour déterminer la sensibilité à générer du ruissellement.

$$\text{NoteCRUS} = [(C^{\text{Permea}} * \text{NotePermea} + C^{\text{OccSol}} * \text{NoteOccSol} + C^{\text{Pente}} * \text{NotePente})] * C^{\text{Battance}} f(\text{ValeurBattance et NoteOccSol})$$

Où NotePermea , NoteOccSol et NotePente sont les notes spatialisées obtenues lors de la construction des couches SIG expliquées ci-avant, ValeurBattance est la valeur déterminée en positionnant les taux d'ASL dans le diagramme ternaire et C^{permea} , C^{pente} et C^{occSol} les coefficients d'influence des différents paramètres sur le territoire.

Avec :

$$\begin{aligned} 0 &< \text{NotePermea}, \text{NoteOccSol}, \text{NotePente} < 100 \\ C^{\text{Permea}} + C^{\text{OccSol}} + C^{\text{Pente}} &= 1 \\ 0 &< C^{\text{Permea}}, C^{\text{OccSol}}, C^{\text{Pente}} < 1 \\ 1 &< \text{ValeurBattance} < 5 \\ 1 &< C^{\text{Battance}} < 1,6 \end{aligned}$$

Cette couche résultante est un raster dans lequel chaque pixel est caractérisé par une combinaison de valeurs perméabilité/occupation des sols/pente.

En fonction de la connaissance du territoire et de son fonctionnement, il apparaît que l'apport de chacun de ces paramètres (perméabilité, occupation des sols et pentes) n'est pas toujours homogène. Il a donc été choisi de pouvoir faire varier l'influence de ces paramètres pour correspondre au mieux à la réalité du terrain.

C'est également à ce niveau qu'il est tenu compte de la battance pour les cultures dites « fermées », les cultures dites « ouvertes » et les sols nus, dans le cas de valeurs de battance égales à 3, 4 ou 5.

L'influence de cette battance est traitée par un facteur multiplicatif (variable au sein de la zone étudiée, en fonction des valeurs de battance et de l'occupation du sol) du résultat de la combinaison :

$$[(C^{\text{Permea}} * \text{NotePermea} + C^{\text{OccSol}} * \text{NoteOccSol} + C^{\text{Pente}} * \text{NotePente})]$$

Le tableau suivant (Figure 26) reprend ce facteur multiplicatif :

Occupation du sol	Valeur battance	Combinaison Perméa/occup sol/pente	Facteur multiplicatif	Note CRUS
Cultures fermées Cultures ouvertes Sols nus	1	α	1	α
	2	α	1	α
	3	α	1,15	$1,15*\alpha$
	4	α	1,35	$1,35*\alpha$
	5	α	1,6	$1,60*\alpha$

Figure 26 : Prise en compte de la battance dans la note CRUS

A noter que pour les prairies et forêts, il est considéré que le phénomène de battance ne s'exerce pas ou est négligeable. Il est par ailleurs négligé pour les valeurs de battance de 1 et 2, comme visualisé dans le tableau ci-dessus.

A partir des valeurs obtenues dans l'arbre de décision, des matrices de sensibilité des sols à générer du ruissellement sont déterminées, avec ou sans battance, afin de bien visualiser l'influence notable de cette dernière.

Les classes définies sur la base d'une approche de terrain pour déterminer cette sensibilité sont les suivantes :

Classe	Sensibilité
Note CRUS < 32	Faible
32 =< Note CRUS < 42	Moyenne
42=<Note CRUS < 55	Forte
Note CRUS >= 55	Très forte

Figure 27 : Classes de sensibilités des sols à générer du ruissellement

Foret			Pentes en %						
			0 à 2	2 à 5	5 à 10	10 à 15	15 à 30	30 à 50	>50
			5	15	25	50	60	80	100
Sol	sableux	1							
	sablo-limoneux	25							
	limoneux	50							
	limono-argileux	75							
	argileux	100							

Prairie			Pentes en %						
			0 à 2	2 à 5	5 à 10	10 à 15	15 à 30	30 à 50	>50
			5	15	25	50	60	80	100
Sol	sableux	1							
	sablo-limoneux	25							
	limoneux	50							
	limono-argileux	75							
	argileux	100							

Culture fermée			Pentes en %						
			0 à 2	2 à 5	5 à 10	10 à 15	15 à 30	30 à 50	>50
			5	15	25	50	60	80	100
Sol	sableux	1							
	sablo-limoneux	25							
	limoneux	50							
	limono-argileux	75							
	argileux	100							

Culture ouverte			Pentes en %						
			0 à 2	2 à 5	5 à 10	10 à 15	15 à 30	30 à 50	>50
			5	15	25	50	60	80	100
Sol	sableux	1							
	sablo-limoneux	25							
	limoneux	50							
	limono-argileux	75							
	argileux	100							

Sol nu/zone urbaine			Pentes en %						
			0 à 2	2 à 5	5 à 10	10 à 15	15 à 30	30 à 50	>50
			5	15	25	50	60	80	100
Sol	sableux	1							
	sablo-limoneux	25							
	limoneux	50							
	limono-argileux	75							
	argileux	100							

Figure 28 : Matrice sans battance

Culture fermée			Pentes en %						
			0 à 2	2 à 5	5 à 10	10 à 15	15 à 30	30 à 50	>50
			5	15	25	50	60	80	100
Sol	sableux	1							
	sablo-limoneux	25							
	limoneux	50							
	limono-argileux	75							
	argileux	100							

Culture ouverte			Pentes en %						
			0 à 2	2 à 5	5 à 10	10 à 15	15 à 30	30 à 50	>50
			5	15	25	50	60	80	100
Sol	sableux	1							
	sablo-limoneux	25							
	limoneux	50							
	limono-argileux	75							
	argileux	100							

Sol nu/zone urbaine			Pentes en %						
			0 à 2	2 à 5	5 à 10	10 à 15	15 à 30	30 à 50	>50
			5	15	25	50	60	80	100
Sol	sableux	1							
	sablo-limoneux	25							
	limoneux	50							
	limono-argileux	75							
	argileux	100							

Figure 29 : Matrice avec battance

4.7 Les limites de la méthode CRUS

Le principe de la méthode CRUS est d'améliorer la connaissance des sols sensibles au ruissellement. Cette méthode connaît plusieurs limites :

- Il s'agit d'une méthode dite « sèche », qui s'intéresse aux sols mais ne prend pas l'eau en compte. Les résultats peuvent donc indiquer des zones de sensibilité élevées dans des secteurs où ne passe aucun axe d'écoulement. Ces cartes sont donc à coupler impérativement avec les cartes repérant les zones d'écoulement préférentiels de l'eau ;
- La précision de la cartographie dépend de la précision de ses données d'entrée. Si certaines données sont très précises (bâti, RPG, pentes...), d'autres comme la pédologie et Corine Land Cover manquent de précision. L'échelle théorique de réalisation de ces cartes est donc le bassin versant et non l'échelle communale ;
- Les cartes sont représentatives de la sensibilité des sols sur les secteurs plats ou à faibles reliefs. Dans les zones de montagne ou les zones au relief marqué, ces cartes sont beaucoup moins pertinentes, le critère pente prenant le dessus sur tous les autres critères pour caractériser la sensibilité au ruissellement.

5 RESULTATS

5.1 Cartes des axes de ruissellement et des endoréismes

Les cartes présentées ci-après correspondent aux traitements réalisés sur le MNT sans prise en compte des différents phénomènes pouvant aggraver ou réduire les phénomènes de ruissellements. Les calculs ont été réalisés à partir d'un MNT à pas de 5 m du RGE Alti de l'IGN. Il est donc probable que les résultats soient peu fiables dans les zones pour lesquelles ce MNT présente une forte incertitude.

Ces résultats sont présentés classés suivant les superficies drainées et colorisés suivant si ce ruissellement correspond à un phénomène diffus ou à des axes de transferts. Les classes correspondant à des superficies drainées supérieures à 50 hectares n'ont pas été utilisées car elles n'apportent rien de plus si ce n'est l'identification des cours d'eau.

Les cartes sont présentées par commune, l'échelle est modifiée suivant chaque carte pour pouvoir présenter le meilleur ajustement pour inclure l'ensemble de la commune sur une unique carte.

Les cartes présentées ici sont ensuite corrigées manuellement pour prendre en compte les témoignages, les éléments recueillis sur le terrain, les résultats des cartes CRUS ainsi que les secteurs plus représentatifs de débordements de cours d'eau que de ruissellement.

5.2 Cartes CRUS

Les cartes CRUS étant basées sur des données à grande échelle (Corine Land Cover et les registres pédologiques), nous recommandons une utilisation à l'échelle de la commune ou du bassin versant uniquement. Bien que les données Corine Land Cover aient été retravaillées avec les données occupation du sol de Bourgogne, cela ne permet pas de se séparer des généralisations qui sont réalisées sur la constitution et l'exploitation de la couche pédologique.

Également, nous recommandons de ne pas utiliser les cartes « avec battance » pour la partie Morvantaise du secteur d'étude. En effet dans cette dernière, les zones pour lesquelles la note CRUS augmente significativement correspondent à des zones agricoles (systèmes agricoles complexes) comportant essentiellement des prairies pâturées ou fauchées qui sont peu susceptibles de générer une croûte de battance.

5.3 Retraitements et classification d'aléas

Le premier retraitement opéré sur les couches d'aléas est issu d'une distinction des sources de l'aléa. Dans les cas où deux aléas coexistent il a été décidé de ne conserver que l'aléa débordement de cours d'eau afin de pas complexifier l'interprétation des cartes. Enfin, ma méthode étant automatique, un retraitement humain est réalisé afin d'extraire les résultats incohérents. Ce traitement est réalisé à l'issue d'une visite de terrain.

Les cartes d'identification des axes d'écoulements ont été modifiées pour tenir compte des éléments identifiés lors de la visite de terrain et des zones qui sont soumises à l'aléa débordement de cours d'eau. Sont ainsi retirés des zones et axes pré-identifiés comme axe de ruissellement les lits majeurs de l'Yonne, de l'Armanche, du Beuvron, du Sauzay, de l'Auxois, l'Anguisson ainsi que du Bruy. D'autres ruisseaux identifiés sur le terrain ou présent dans la liste des cours d'eau au sens de la Loi sur l'Eau et tels que définis par la DDT ont également fait l'objet de retraitements.

Une fois les couches d'axes de ruissellement présumés retraitées pour en exclure les artefacts et les zones correspondants aux aléas « débordement de cours d'eau », un croisement avec les couches de sensibilité au ruissellement est réalisé.

Deux propositions de classification d'aléa ont été faites. La première a déjà été appliquée dans une étude similaire sur les coteaux viticoles champenois. La seconde est une variation pour mieux prendre en compte l'échelle d'application de la méthode CRUS et les principes de calculs des méthodes de type Exzeco.

Le transfert des informations sur la sensibilité des sols à générer du ruissellement et concernant les axes d'écoulement en couches d'aléa n'est pas un processus évident. Ce transfert des informations « brutes » en couches d'aléa se fait en utilisant une méthode (parmi deux proposées) décrite ci-après.

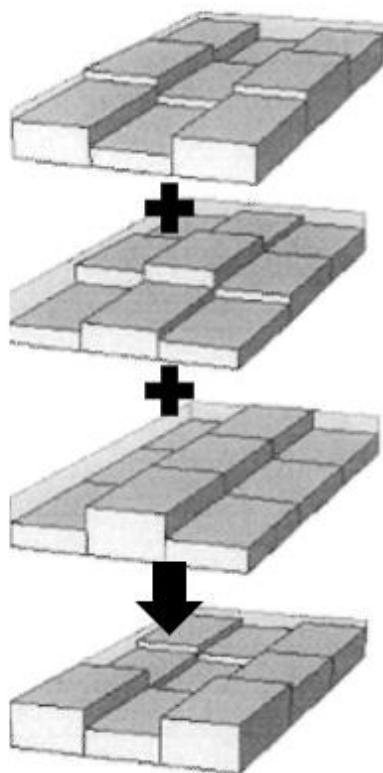
La première méthode est issue de travaux précédents appliqués dans les départements de l'Aube et des Vosges. Si elle n'a pas été retenue, elle est présentée afin de souligner les différences avec sa variation. Ce premier classement d'aléa est une addition des données issues de la méthode CRUS, des surfaces issues d'Exzeco ainsi que de l'application du calcul des thalwegs via l'outil Watershed⁵ de GRASS.

Dans cette méthode, pour chaque pixel de la zone étudiée une somme pondérée des valeurs de CRUS, Exzeco et Watershed est réalisée. C'est cette somme pondérée qui donnera l'aléa.

Cette méthode accorde un poids important aux axes d'écoulements via les poids associées dans le calcul aux valeurs des couches Exzeco et watershed. Du fait de son application pixel à pixel, le poids de la méthode CRUS est réduit à une valeur « locale » et donc de faible importance.

⁵ Watershed est un outil de la suite SIG GRASS servant dans l'analyse des bassins versants à partir d'un modèle numérique de terrain. Cet outil calcule, à partir des valeurs altimétriques, les directions d'écoulements en chaque pixel, les superficies drainées par chaque pixel, les axes d'écoulements (thalwegs) ainsi que les limites des bassins versants.

Manuel et description disponible sur : <https://grass.osgeo.org/grass83/manuals/r.watershed.html>



Valeur de la classe CRUS (de 1 à 4)

Zone Exzeco (superficie drainée de 0.5 à 1km²)
Valeur 5 si le pixel est dans la zone, 0 sinon.

Drainage Watershed (le pixel est il situé sur un thalweg calculé via l'outil watershed)
Valeur 10 si oui, 0 sinon.

Résultat, valeurs allant de 1 à 19

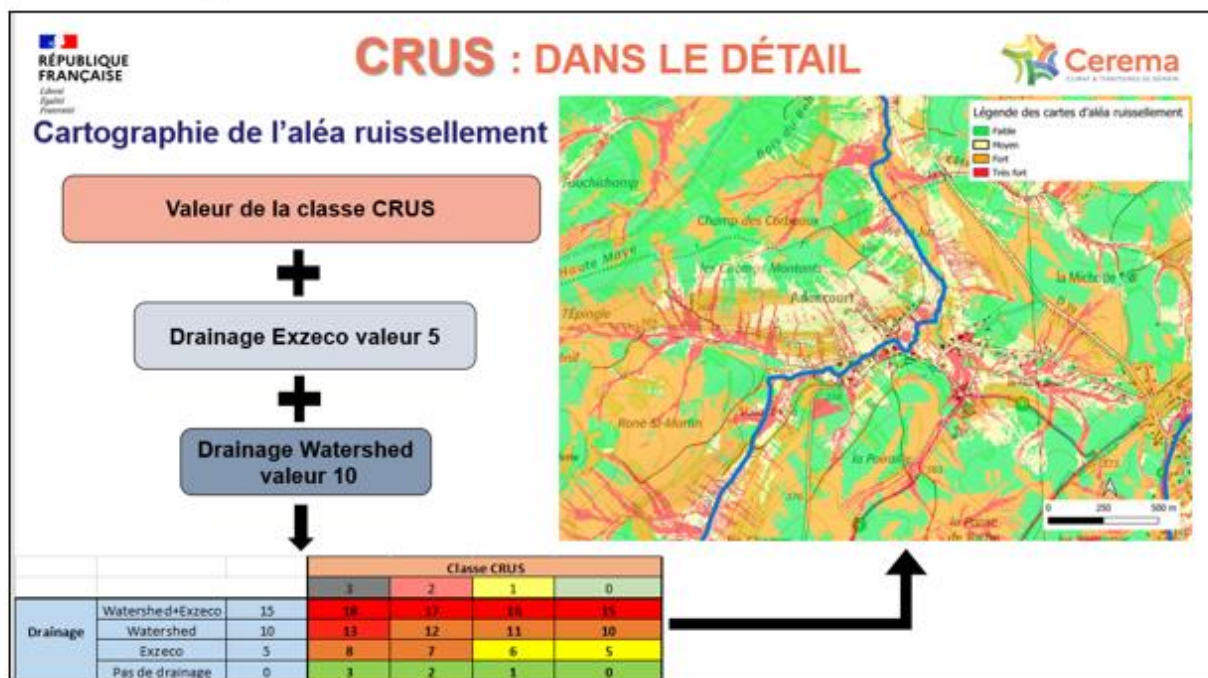


Figure 30 : méthode de classification de l'aléa ruissellement selon la méthode employée dans l'Aube et les Vosges

Cette classification a cependant deux défauts majeurs. L'utilisation de watershed et d'Exzeco de manières différenciées et la non prise en compte des valeurs CRUS sur le fonctionnement global du bassin versant.

L'utilisation différencié de watershed et d'Exzeco (ou méthode analogues) peut être considérée comme un doublon d'information. En effet ces deux outils utilisent le même processus de calcul et représentent (partiellement) la même chose. Les considérer séparément revient donc à compter deux fois le même phénomène.

Les calculs watershed et Exzeco reposent tous deux sur l'identification des thalwegs à partir des données topographiques et des directions d'écoulements. La déférence provient du fait que le calcul Exzeco est réalisé plusieurs milliers de fois en ajoutant du « bruit » et du remplissage au modèle de terrain. Le « bruit » sert à représenter les incertitudes sur la valeur de l'altitude et les effets liés aux parcours de l'eau et à son accumulation. Le calcul watershed correspond donc à une itération parmi plusieurs milliers exécutées par Exzeco. Additionner les deux n'a donc pas de sens.

Le second défaut concerne la transposition de la méthode CRUS dans l'aléa.

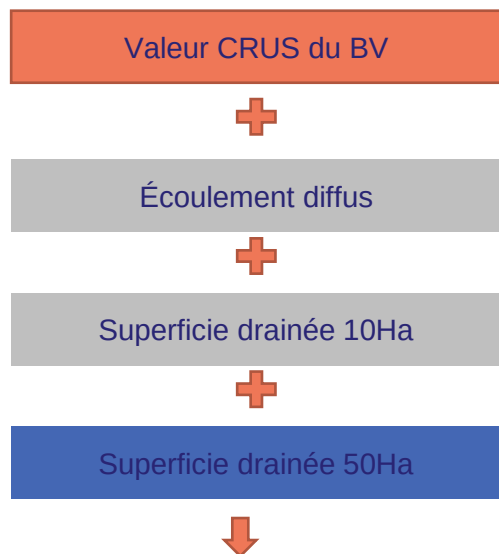
La méthode CRUS permet de déterminer la propension d'un terrain à générer du ruissellement. Cette méthode est donc complémentaire du calcul Exzeco qui lui se concentre uniquement sur le transfert. Le problème est situé dans l'association des deux méthodes.

Le calcul Exzeco considère que tous les surfaces élémentaires (pixels de 1m² ou 25m²) contribuent uniformément aux écoulements. Cette hypothèse n'est acceptable que dans les cas de très fortes sollicitations ou de sols relativement homogènes sur tout le bassin versant (que des prairies, ou que des terrain urbains...). Le calcul CRUS vient compléter ce manque en distinguant les terrains générant plus ou moins de ruissellement. Cependant, cette information ne peut pas être intégrée au calcul Exzeco directement et doit être « raccordée » manuellement. Afin de faire cette jonction, une analyse à l'échelle du bassin versant est essentielle mais complexe. Une étude par pixel (comme réalisée dans l'Aube et les Vosges) peut dans certains cas générer des résultats absurdes car ne considérant pas les effets provenant de l'amont du bassin versant.

Par exemple, un bassin rural mais pour lequel le thalweg emprunte une chaussée sera classé comme en aléa fort (thalweg et surface imperméabilisée) mais un bassin totalement urbanisé de ma même surface pour lequel le thalweg sera végétalisée et sableux aura un classement en aléa moyen. Or dans le second cas, il est attendu des volumes écoulés bien plus importants à événement pluvieux égal.

Afin de réduire cette problématique de « jonction » entre Exzeco et CRUS une variation de cette méthode de classification d'aléa a été proposée, et acceptée par la DDT. Cette variation généralise les notes CRUS à l'échelle des bassins versants élémentaires et utilité, en lieu et place de watershed, différents niveaux de drainage Exzeco.

Le territoire étudié est divisé en sous-bassins versants et les valeurs de la méthode CRUS sont moyennés par sous bassin versant. Le résultat de la méthode CRUS est ainsi « observé » à l'exutoire du bassin versant. Le but de cet assemblage au niveau du bassin versant est de pouvoir différencier les axes d'écoulements situés dans des secteurs générant « plus » de ruissellements de ceux situés dans des secteurs générant « moins » de ruissellement.



Les notes sont modifiées en remplaçant la valeur de la note CRUS au pixel par la valeur de la note attribuée au BV et le critère watershed est remplacé par un niveau « plus élevé » de superficie drainée.

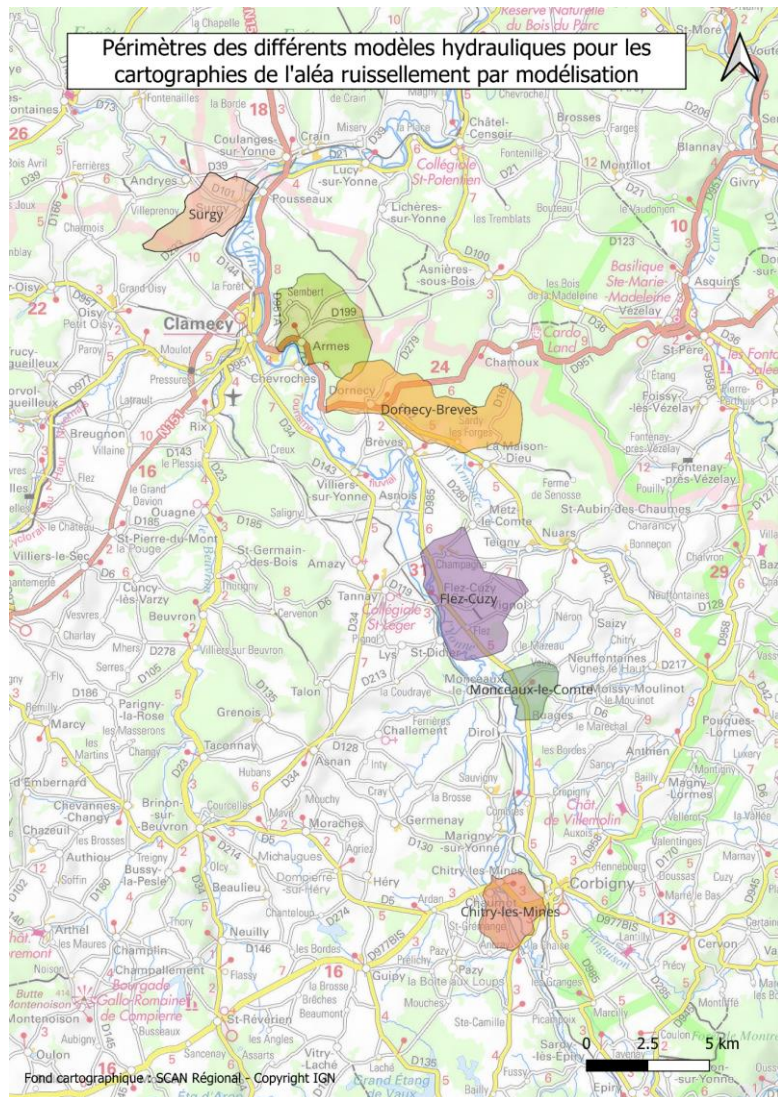
Ces modifications permettent de conserver la grille et le raisonnement développée lors de l'élaboration de celle-ci en intégrant au mieux les incertitudes et méthodes associées aux paramètres utilisés.

			Note crus pour le bassin versant			
			4	3	2	1
Drainage	Drainage >=50Ha	15	19	17	16	15
	Drainage >=10Ha	10	14	13	12	11
	Drainage diffus	5	9	8	7	6
	Pas de drainage	0	4	3	2	1

Les résultats cartographiques de ce croisement sont présentés en annexe.

6 MODELISATIONS HYDRAULIQUES

6.1 Secteurs modélisés



La modélisation hydraulique lors de cette étude ne concerne pas l'ensemble de la zone d'étude. Elle se concentre sur certaines zones à forts enjeux bâtis, pour lesquelles de la donnée topographique fiable existe et pour lesquelles des « cônes de déjection » existaient dans le précédent PPRI. Ces zones ont été choisies par le service risques naturels de la DDT58.

Ces zones concernent les secteurs de :

- Surgy,
- Armes,
- Brèves & Dornecy
- Chitry-les-mines
- Monceaux-le-comte
- Flez-cuzy

Les modélisations ne couvrent généralement pas l'ensemble des communes citées mais seulement les bassins versants drainant les « cônes de déjections » identifiés du coteau au cours d'eau. Ainsi l'essentiel des modèles se terminent au niveau du lit mineur de l'Yonne ou de l'Armanche.

Figure 31 : emplacement des zones pour modélisées

6.2 Construction des modèles

Les modèles hydrauliques pour la modélisation des phénomènes de ruissellement sont réalisés en utilisant le logiciel Hec-RAS de l'USACE (US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center – River analysis system) ⁶. Ce logiciel permet la modélisations d'écoulements monodimensionnels et bi-dimensionnels, de transport sédimentaire et de qualité de l'eau. L'ensemble des capacités du logiciel est détaillé sur les pages de L'USACE de même que la documentation associée au code ainsi que des manuels ⁷.

⁶ <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

⁷ <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/features.aspx>

Ce logiciel permet de modéliser les écoulements hydrauliques via un réseau de mailles entre lesquelles sont calculées les échanges en résolvant numériquement les équations classiques de l'hydraulique à surface libre. Ce logiciel est également capable de représenter des événements pluvieux et intègre des calculs de transformation de la pluie en écoulement (lois d'interception et d'infiltration).

Le logiciel permet trois modes de représentation de la pluie :

- Elle peut être uniforme sur l'ensemble de la zone étudiée (la pluie sera la même en tout point de la zone d'étude),
- Issues de stations météo ponctuelles entre lesquelles la pluie est interpolée ou,
- Variable spatialement et temporellement en exploitant des données de pluie radar.

Les configurations utilisées lors de cette étude sont des pluies radar et des pluies uniformes. Les pluies radar sont utilisées pour rejouer les inondations de juin 2024. Les pluies uniformes correspondent elles aux simulations pour l'événement pluvial de référence.

Les lois utilisables dans le logiciel pour représenter la quantité d'eau de pluie transformée en ruissellement se basent sur trois modèles. Ces modèles sont les modèles SCS-CN, Deficit and constant et la Green & Ampt.

- La méthode SCS-CN est une méthode empirique développée par le Soil Conservation Service du département de l'agriculture des Etats-Unis d'Amérique. Cette méthode repose sur l'attribution d'un numéro de courbe (CN – curve number) représentant la capacité d'un sol à ruisseler. Ces CN sont définis en fonction des capacités de drainages du sol et de la couverture du sol.
- La méthode déficit and constant (Déficit et valeur constante) est une méthode plus simple qui repose sur l'humidité du sol et les capacités drainantes du sol. La méthode conduit à générer du ruissellement après que la pluie ait été suffisante pour saturer le sol et qu'elle est supérieur aux capacités de drainage du sol. Cette méthode, couplée à une évaporation est recommandée pour représenter plusieurs événements au cours du temps avec des périodes sèches les séparant.
- La méthode Green & Ampt est une méthode basée sur une représentation des processus physiques d'écoulements des eaux dans une colonne de sol non saturée ou partiellement saturée. Cette méthode nécessite cependant une connaissance et une caractérisation fine des sols existants.

La méthode choisie pour cette étude est la méthode SCS-CN pour sa mise en œuvre simple, sa capacité à mieux représenter les événements uniques (un seul événement pluvieux), et le caractère relativement robuste de la méthode et son usage extensif dans le domaine du ruissellement.

Les modèles de ruissellement se structurent en un maillage qui sert au calcul des écoulements et en couches qui déterminent l'infiltration, le frottement et l'altimétrie. Le maillage assure un calcul des écoulements aux faces des mailles et un calcul des volumes dans les mailles. Ainsi, afin de représenter au mieux les phénomènes il est adapté par le modélisateur afin de fournir la meilleure information possible dans les zones à enjeux sans alourdir de manière significative le calcul. Ainsi les zones urbaines, les talwegs et les zones d'accumulations identifiées sont maillées avec de petites mailles afin de disposer d'un calcul fin assurant une bonne représentation des phénomènes locaux. Dans ces secteurs les mailles ont des côtés de 2 à 5 mètres. Les zones en tête de bassins et particulièrement le haut des coteaux et les zones forestières et agricoles ne comportant pas d'axes d'écoulements significatifs et qui jouent uniquement sur la production d'une lame ruisselée diffuse sont maillées en utilisant des cellules plus grandes, de l'ordre de 25m de côté.

Les couches paramétrant l'infiltration (en tout point des modèles) ont été définies à partir des couches issues de calculs CRUS (perméabilité et battance) ainsi que des différentes informations sur l'occupation et l'usage du Sol.

6.3 Calage des modèles et étude de sensibilité

Les modèles hydrauliques décrivant le ruissellement ont été calés sur l'événement pluvieux de juin 2024. Cet événement est le seul événement pluvieux récent ayant significativement impacté la région et pour lequel des informations sont disponibles de manière suffisante. Le calage consiste en la modification, en l'ajustement, de paramètres rentrés par le modélisateur jusqu'à ce que les modèles reproduisent le plus fidèlement possible les événements passés pour lesquels des informations sont disponibles. Dans le cas de cette étude, les informations disponibles sont généralement peu nombreuses et renseignent seulement sur l'existence du phénomène, si celui-ci était suffisamment intense⁸. Nous ne disposons que de deux points pour lesquelles l'altitude atteinte par l'eau a pu être mesurée. Toutes les autres informations sont issues de l'observation de dégâts causés par le ruissellement (chaussées abîmées, sédiments déposés, ravines, témoignages...).

Les paramètres calés seront les valeurs de CN car ces valeurs sont celles qui ont la plus grande influence. Le calage a été réalisé sur les modèles de « Breves Dornecy » et « Chitry-les-Mines » car ces secteurs sont ceux sur lesquels des données sont disponibles. Le calage visera principalement à reproduire les axes d'écoulements observés et les zones inondables car les informations de cotes atteintes par les eaux étant peu nombreuses.

Les valeurs de CN ont été prédéterminées en utilisant des grilles disponibles dans les publications de l'USDA et USACE (United States department of agriculture & US. Army Corp of Engineers) (TR-55 et EM 110-2-1417).

Cover			Hydrologic Soil Group			
Land use	Treatment or practice	Hydrologic Condition	A	B	C	D
Fallow	Straight row		77	86	91	94
Row crops	Straight row	Poor	72	81	88	91
		Good	67	78	85	89
	Contoured	Poor	70	79	84	88
		Good	65	75	82	86
	Contoured and terraced	Poor	66	74	80	82
		Good	62	71	78	81
Small grain	Straight row	Poor	65	76	84	88
		Good	63	75	83	87
	Contoured	Poor	63	74	82	85
		Good	61	73	81	84
	Contoured and terraced	Poor	61	72	79	82
		Good	59	70	78	81
Close-seeded legumes ¹ or rotation meadow	Straight row	Poor	66	77	85	89
		Good	58	72	81	85
	Contoured	Poor	64	75	83	86
		Good	55	69	76	83
	Contoured and terraced	Poor	63	73	80	83
		Good	51	67	76	80
Pasture or range	Contoured	Poor	68	79	86	89
		Fair	49	69	79	84
		Good	39	61	74	80
		Poor	47	67	81	88
		Fair	25	59	75	83
		Good	5	35	70	79
Meadow		Good	30	58	71	78
Woods		Poor	45	66	77	83
		Fair	36	60	73	79
		Good	25	55	70	77
Farmsteads			59	74	82	86
Roads (dirts) ² (hard surface) ²			72	82	87	89
			74	84	90	92

¹ Closed-drilled or broadcast.
² Including right-of-way.

Note: For a more detailed table of CN's, see SCS (1966) or SCS (1972).

Figure 32 : extrait (scan) de la page 6-19 du Flood-Runoff Analysis EM110-2-1417 de l'USACE Affectant une valeur de CN par type de sol, de cultures et de pratiques culturales.

⁸ Les informations disponibles sont généralement associées à des dégâts sur le bâti ou les chaussées. Ils ne sont retrouvés que dans les cas où les écoulements dus au ruissellement ont été suffisamment forts pour causer des dégradations. Mais ils ne renseignent aucunement sur la durée du phénomène, les hauteurs ou vitesses atteintes par les eaux.

Ces valeurs de CN ont ensuite été modulées pour que les événements simulés correspondent au mieux aux témoignages. La carte des valeurs de CN retenus est disponible en annexe.

Le calage des modèles a été considéré comme acceptable au regard des éléments présentés ci-après.

Pour le modèle de Dornecy-Brève, au niveau de Sardy-les-Forges le modèle reproduit bien l'axe indiqué inondé par un riveain situé sur la route du Morvant. Ce riveain indique que lors d'événements forts les écoulements proviennent de deux thalveg et convergent dans les champs en amont de son habitation. L'inondation représente également bien les niveaux atteints au niveau de sa propriété (bord de la maison, jardin inondé, eau affleurante au niveau du portail piéton donnant sur la route).

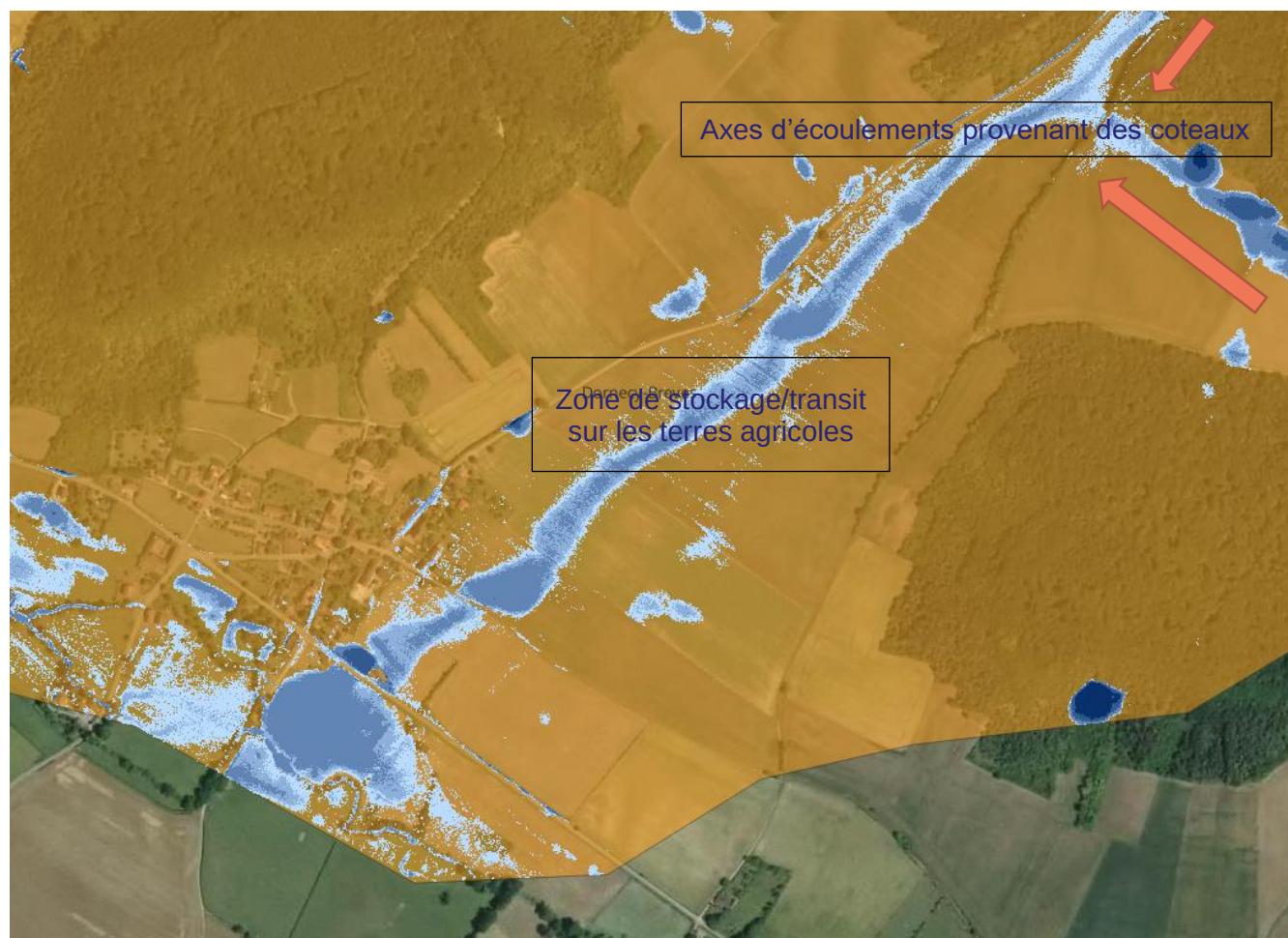


Figure 33 : Vue des zones inondées maximales simulées brutes (sans post-traitement) sur la partie Est de Sardy-les-Forges pour l'événement de juin 2024

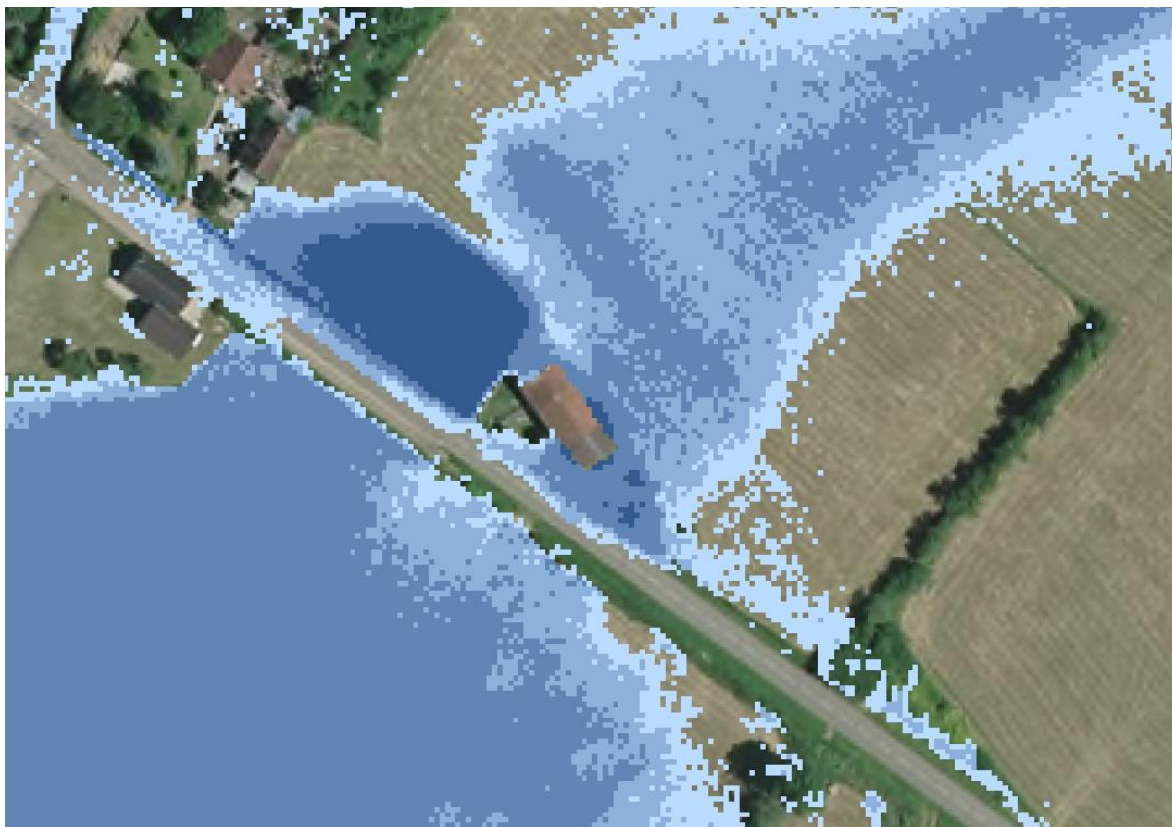


Figure 34 : Zoom sur les résultats de modélisation au niveau de la maison pour laquelle un témoignage a été obtenu (maison entourée d'eau) route du morvant à la sortie de Sardy-les-Forges direction Est

Le témoignage de l'habitant de la maison au centre de la figure ci-dessus correspond sensiblement aux résultats de la simulation. Le témoin a indiqué que l'eau a atteint le bas des cuves de stockage d'eaux pluviales, a cerné la maison sans pour autant atteindre le haut du terre-plein sur laquelle elle est située et que l'accès à la route n'a pas été coupé depuis sa porte.

L'absence de représentation des ouvrages traversant la route contribue cependant sans doute à la surverse de la route qui n'a pas eu lieu selon le témoin.

Le modèle représente également les deux axes d'écoulements situés à proximité du stade et en sortie de source sur les parties Ouest de Dornecy. Ces deux éléments ont été communiqués par un élu de Dornecy rencontré sur place.



Figure 35 : Résultats de simulation sur le secteur Ouest de Dornecy

Sur le secteur de Chitry-les-Mines les modélisations permettent de reproduire des phénomènes présentant des similitudes importantes avec les témoignages recueillis. Ces affirmations concernent particulièrement la rue Jule Renard.



Figure 36: Résultats (bruts) de modélisation pour le bourg de Chitry-les-Mines

Sur la carte des résultats, la rue Jules Renard est encerclée de rouge et la flèche orange indique le positionnement approximatif des trois photographies suivantes.



Figure 37 : Photographies post-événement de la rue Jules Renard sur sa partie haute, correspondant à plusieurs angles de vue

Les axes d'écoulement correspondent également aux déclarations des personnes rencontrées sur place. Les écoulements proviennent du haut de la colline, suivent les chemins, débouchent dans la rue Jules Renard et sont canalisés par celle-ci avant de descendre la route de Nevers jusqu'à l'Yonne.

6.4 Événements pluvieux utilisés

Les événements pluvieux utilisés sont de deux types. Le calage utilise des pluies radar et les cartes d'aléa sont construites à partir de pluies de projet théoriques.

Les pluies radar sont issues du produit Antilope J1 de Météo-France. Elles permettent de disposer d'une valeur de cumul pluviométrique horaire et discrétisée par km². Le produit Antilope J1 est privilégié aux autres produits d'images radar car issu d'une réanalyse des images radar en utilisant les pluviographes au sol. L'évènement utilisé pour le calage est l'évènement pluvieux ayant eu lieu les 19 et 20 juin 2024. Les images radar utilisées s'étendent du 18 juin 2024 06h00 TU (8h00 heure locale) au 22 juin 2024 05h00 TU.

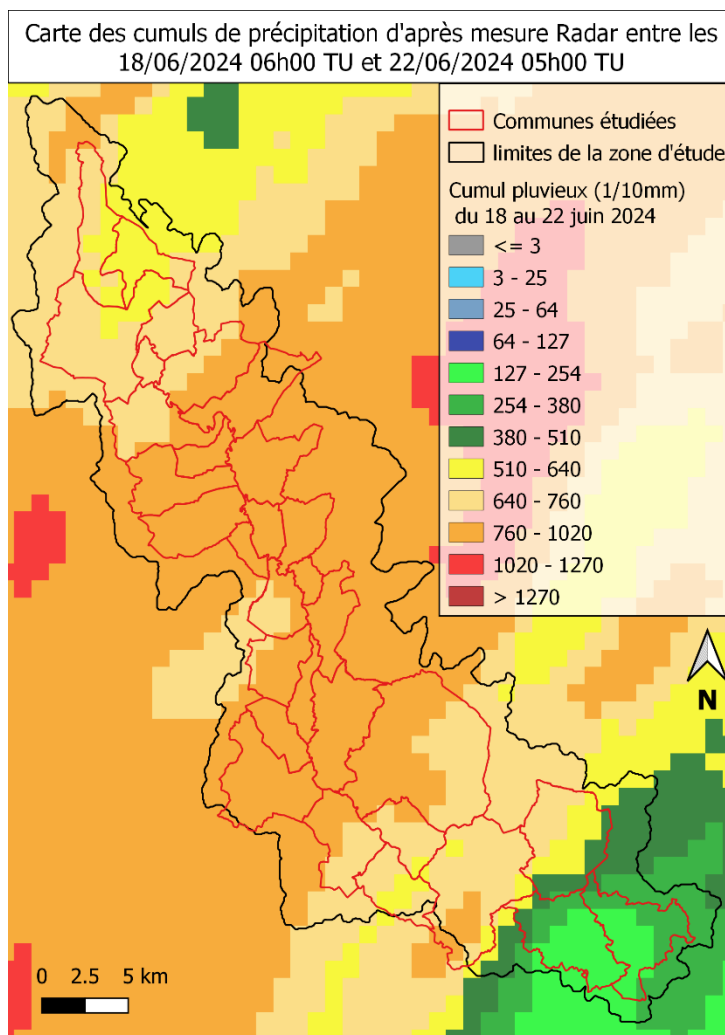


Figure 38: cumul pluviométriques utilisés pour le calage des modèles

L'usage de pluie radar au lieu de l'utilisation d'observations au sol permet de mieux prendre en compte la variabilité spatiale et temporelle de l'évènement. Ainsi les précipitations sur les modèles de Surgy, Brèves-Dornecy et Chitry sont bien différentes (allant de 50-60mm (Surgy) à 100mm (Chitry)) alors que le point de mesure haute fréquence le plus proche est celui de l'aérodrome de Clamecy pour l'ensemble de ces modèles.

Les événements théoriques sont eux conçus à partir d'analyse statistiques sur les pluies horaires mesurées aux pluviographes Météo-France du département de la Nièvre. Pour chaque pluviographe proche et comportant suffisamment d'années d'enregistrement un ajustement statistique est réalisé pour définir le cumul correspondant à une pluie centennale sur une à douze heures. La loi d'ajustement statistique utilisée sera la loi GEV (généralisée des valeurs extrêmes) qui présente des ajustements

légèrement meilleurs que la loi de Gumbel. L'échantillon des valeurs utilisées est basé sur une analyse des cumul maximaux par année (échantillon MAXAN).

Les pluviomètres utilisés pour le calcul des événements centennaux sont ceux de Clamecy, Lormes, Montigny-en-Morvant et Château-Chinon, ayant respectivement 24, 32 18 et 32 ans de chroniques enregistrées.

Le code de calcul utilisé pour réaliser les ajustements de loi statistiques est une réutilisation des codes hydro3 de l'Inrae développés pour l'hydroportail (disponibles sur la forge logicielle de l'Irstea : <https://forge.irstea.fr/projects/hydro3>). Ces ajustements sont donc automatiques et des anomalies peuvent apparaître dus à l'incertitude de ces ajustements et leur application à des événements de probabilité de non dépassement très élevée.

Les pluviomètres de Corbigny et Tannay ne sont pas utilisés car ils ne permettent pas d'obtenir de données infra-journalière.



Figure 39 : emplacement des pluviographes de la Nièvre pour lesquels plus de 15 années de données existent

Pour chacun de ces pluviomètres les cumuls pluviométriques par période de retour et par durée sont les suivants :

Poste - durée	1h	2h	3h	4h	6h	12h
Clamecy	48.10	60.49	71.16	72.07	80.14	82.75
Lormes	43.42	57.56	59.79	55.05	55.70	76.97
Montigny	48.30	52.27	58.72	62.53	77.02	94.86
Château-Chinon	55.26	55.13	53.99	60.48	67.97	89.76

Figure 40 : cumuls pluvieux centennaux sur différentes durées en mm

Ces valeurs de cumul permettent de reconstituer des hyétogrammes de projet à affecter à chaque secteur modélisé. Ces précipitations de projet seront uniformes sur l'ensemble du secteur modélisé pour chaque modèle. Les hyétogrammes injectés dans les modèles hydrauliques sont symétriques et construits de façon à respecter le cumul calculé pour les différentes durées. Les hyétogrammes calculés peuvent être marginalement différents des ajustements pour garantir une cohérence entre les différentes durées utilisées et pour assurer une pluie minimale de 0.5mm/heure.

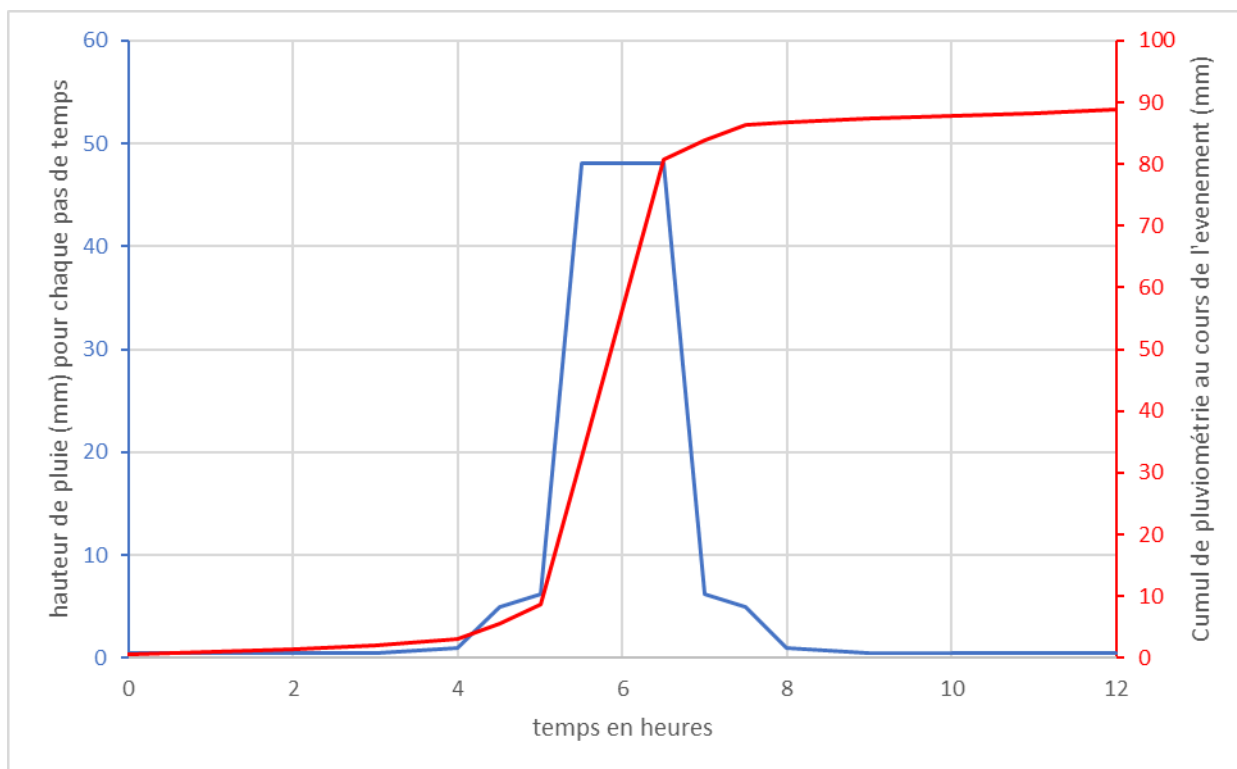


Figure 41 :HyétoGramme construit à partir des ajustements calculés pour Clamecy

A titre de comparaison les ajustements statistiques sur les pluies journalières donnent les valeurs suivantes pour les pluviomètres du secteur. Les différences et le fait que les valeurs de cumul sur 6 ou 12 heures soient supérieures aux données journalières proviennent de la construction des mesures. Les pluies journalières correspondent à un cumul de pluie entre 6h00 TU du jour et 6h00TU du lendemain. Par conséquent un certain nombre d'événement sont répartis sur deux jours, ce qui fait que le cumul journalier de l'évènement sera plus faible que la mesure sur 12h glissantes.

Tableau 1 : Valeurs des pluies journalières pour une période de retour $t=100$ ans selon trois lois statistiques

Poste	PJ(T=100) Gumbel	PJ(T=100) GEV	PJ(T=100) GPD3
Château-Chinon	84mm	83mm	77mm
Lormes	74mm	67mm	61mm
Montigny en Morvan	76mm	83mm	79mm
Clamecy	77mm	75mm	68mm
Corbigny	82mm	77mm	70mm
Tannay	68mm	64mm	58mm

L'usage des paramètres issus du calage sans modification implique que l'état des sols tels que préalable aux pluies de juin 2024 sera celui utilisé par défaut pour l'ensemble des calculs. La représentation des événements sera donc réalisée avec une hypothèse de sol humide, hypothèse issue du calage, ce qui conduit à des ruissellements plus importants qu'un cas de « sol moyen » pour une même pluie.

6.5 Résultats

Les cartes présentées ici sont issues des simulations réalisées et d'un post-traitement visant à réduire la présence des scories et éléments non pertinents des cartographies. Ainsi les zones inondées correspondant aux frontières des modèles ont été retirées, ainsi qu'un certain nombre d'anomalies cartographiques liées à la représentation des résultats dans les situations de très forte pente. Un second tri est également réalisé pour ne conserver que les résultats présentant une superficie suffisante. Ainsi aucun aléa ne sera représenté si l'emprise de cette zone d'aléa est inférieure à 500m².

6.5.1 Retraitements

Les cartographies suivantes sont établies en utilisant les modèles calés précédemment et les différents événements pluvieux disponibles.

La différenciation des zones inondables par ruissellement et des zones inondables par débordement de cours d'eau n'a pas été réalisée pour les résultats de simulations. Cependant un retraitement est effectué afin d'éliminer les valeurs non pertinentes. Dans les « valeurs non pertinentes » se retrouvent les axes pour lesquels la modélisation n'apporte aucun intérêt (cas des zones pour lesquelles la topographie est trop imprécise) et les petits stockages locaux et des artéfacts de calculs (essentiellement des effets sur les bords des modèles).

Ces effets sont illustrés page suivante.

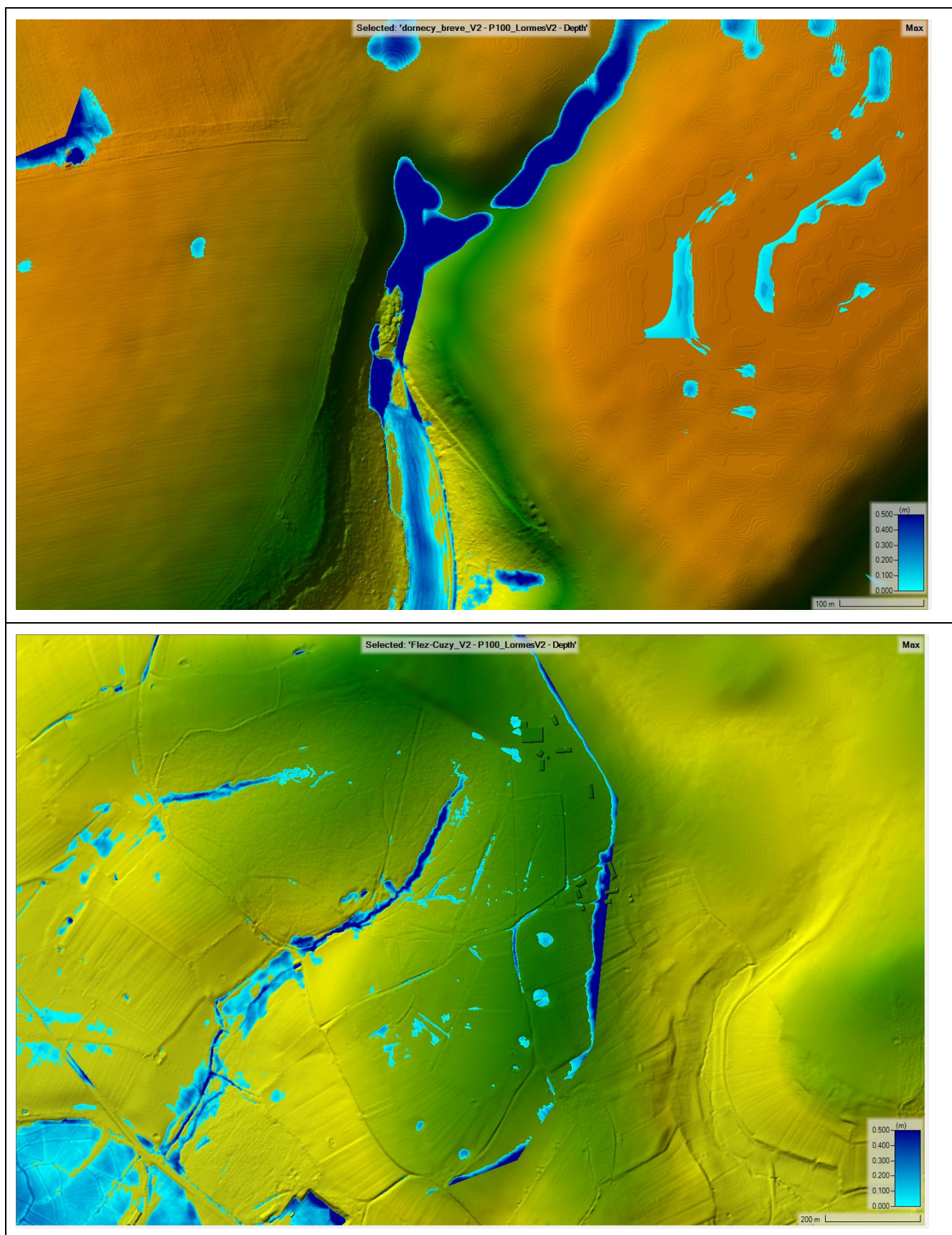


Figure 42 : haut : effets liés à l'imprécision topographique, bas : accumulations des eaux de ruissellement aux frontières du modèle générant une inondation "fausse"

6.5.2 Simplifications cartographiques

Dans l'optique d'une réutilisation de ces fichiers, les formats raster, avec un niveau de précision métrique ou inférieur doivent être associés à des versions simplifiées, permettant une meilleure exploitation des résultats et un niveau de précision plus adéquat vis-à-vis des incertitudes associées aux modèles et à la variabilité naturelle du phénomène étudié.

Les étapes avant simplifications vectorielle sont les suivantes :

- Nettoyage des données raster brutes – conservations des seuls axes d'écoulements utiles,
- Transformation des valeurs continues de hauteurs et vitesses en classes,
- Simplification et vectorisation des classes de hauteurs et de vitesses.

Les classes employées pour les hauteurs et vitesses sont les suivantes :

Hauteurs d'eau (en m)		
	valeur basse	valeur haute
classe 1	0	0.05
classe 2	0.05	0.1
classe 3	0.1	0.2
classe 4	0.2	0.5
classe 5	0.5	1
classe 6	1	1.5
classe 7	1.5	2
classe 8	2	Inf

Vitesses (en m/s)		
	valeur basse	valeur haute
classe 1	0	0.2
classe 2	0.2	0.5
classe 3	0.5	1
classe 4	1	Inf

La simplification des raster de hauteur et vitesse d'eau classés vers des formats vecteurs est réalisée en utilisant le plugin QGIS cartoZI version 2.7.0 (contact : cartozi@developpement-durable.gouv.fr).

Les paramètres de simplifications ont été conservés sur les valeurs par défaut. Les critères de conservation des polygones et trous ont été fixés à 50m². Ainsi toute zone inondée supérieure à 50m² est conservée et toute zone dont la superficie est inférieure à 50m² isolée dans une zone inondée est rattachée à cette zone.

6.5.3 Cartes des zones inondables issues des modélisations

Les cartes des zones inondées pour un évènement pluvieux correspondant à une période de retour de 100 ans sont présentées ci-après.

Les cartes présentées, sont centrées sur les axes d'écoulements visibles à l'issues de la modélisation. Les zones sur lesquelles des phénomènes de ruissellement ne sont pas significatifs (écoulement diffus sans regroupement) ou pour lesquels la modélisation n'apporte pas de plus-value (données topographiques insuffisantes) ne sont pas incluses.

Les cartes suivantes sont établies en utilisant les classes de hauteurs et de vitesses indiquées dans le Guide PPRI 2024. (page 71)

GUIDE MÉTHODOLOGIQUE POUR L'ÉLABORATION DES PLANS DE PRÉVENTION DES RISQUES D'INONDATION PAR DÉBORDEMENT DE COURS D'EAU (HORS COURS D'EAU TORRENTIELS) - Édition 2024

7 ANNEXES

7.1 Couches des notes CRUS au format raster

Les couches raster sont disponible ici : <https://cerema.box.com/s/m4yrt0rp6rtijlilznuj6g6vpynqqzne>

7.2 Couches vectorielles des axes d'écoulements par surface drainées

Les couches shapefiles sont disponibles ici :
<https://cerema.box.com/s/o753y5ipaqajoe5rurxp6h0adrn2wy20>

7.3 Cartes d'aléa suivant les zones de drainage et les notes crus par bassin versant

7.4 Carte des valeurs de CN utilisées

Les valeurs de CN sur l'ensemble de la zone étudiée sont disponibles au format raster ici :

<https://cerema.box.com/s/hocg3qno3590cw5guvoikaikaonvjflv>

7.5 Hyétoigrammes construits pour les différents pluviographes de référence

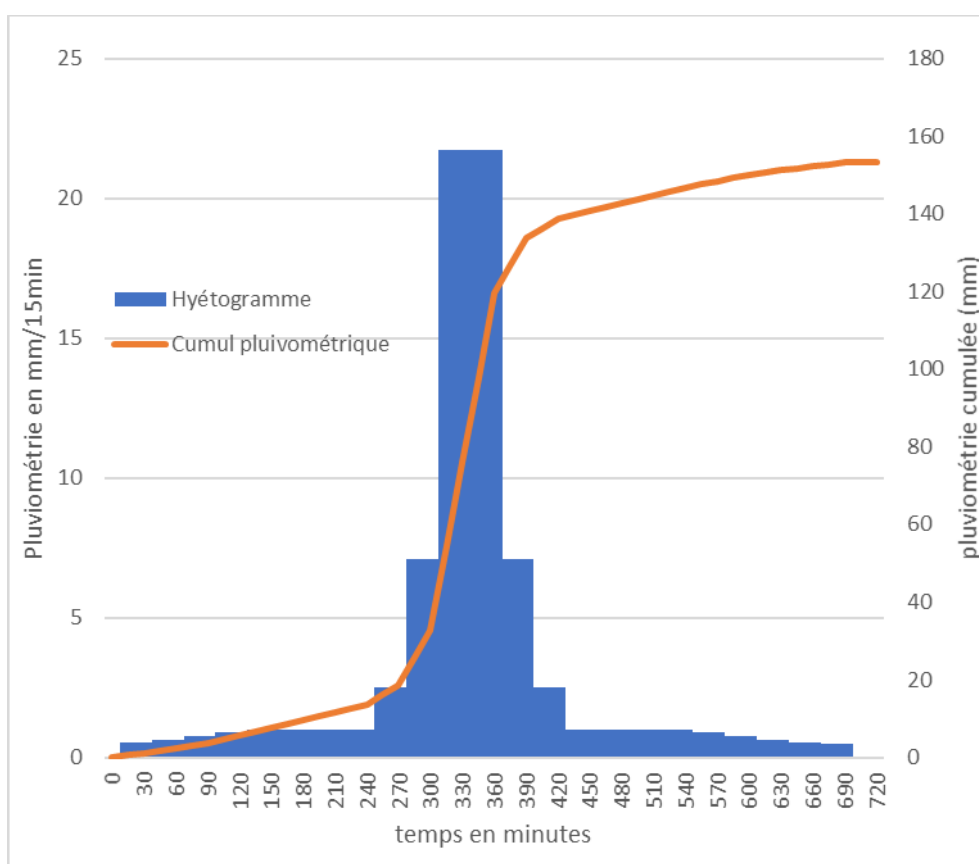


Figure 43 : pluie de projet sur la base des données de Lormes

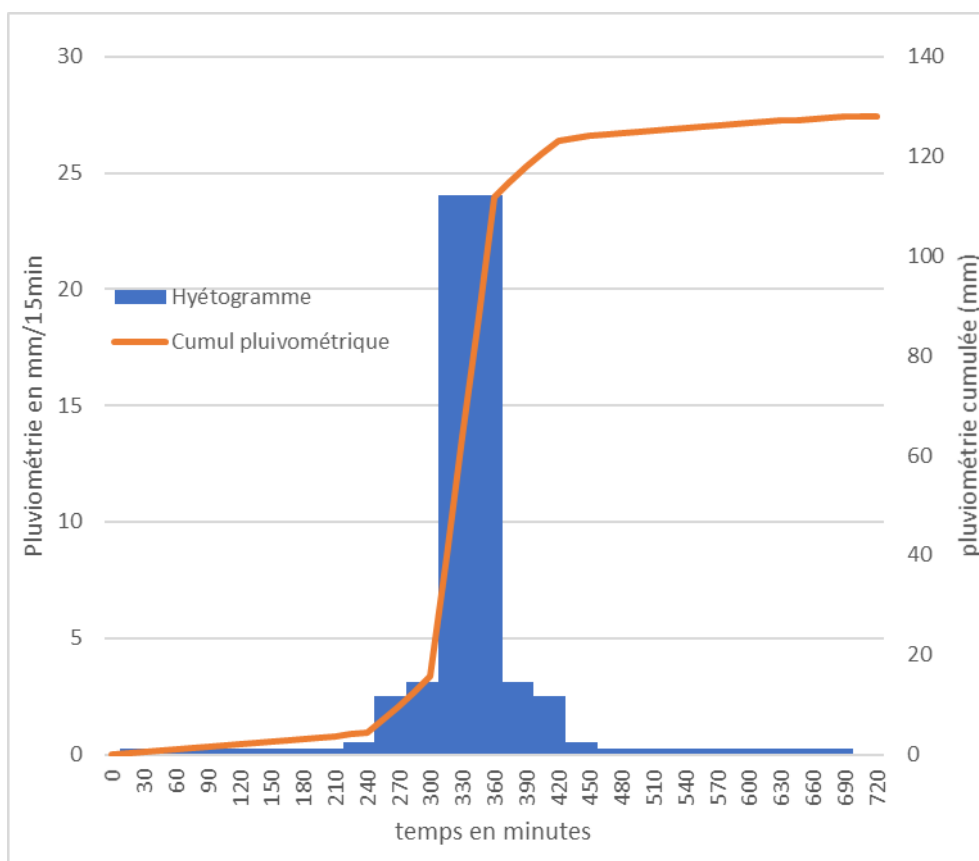


Figure 44 : pluie de projet sur la base des données de Lormes

7.6 Modèles hydraulique utilisés

Le modèle hydraulique exploité est disponible ici :

<https://cerema.box.com/s/fw1qkuydgcphas78lqlw32f05ozojdi8>

Il s'agit d'un dossier compressé reprenant l'ensemble des données de géométrie, de conditions aux limites et de plan (paramètres de calcul). Il contient également les résultats de modélisation.

Le modèle a été construit et exploité avec la version 6.6 d'HECRAS. Le logiciel est téléchargeable sur le site de l'USACE. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/download.aspx>

7.7 Couches raster et vecteurs correspondant aux hauteurs et vitesses maximales simulées

Les données retraitées issues de la modélisation sont disponibles dans les répertoires associés au lien suivant :

<https://cerema.box.com/s/f1yztbrpjemeyct12ic6hgxfaoengj58>

