



Première approche du ruissellement

Les méthodes CRUS et Exzeco

RAPPORT D'ÉTUDE

Le Cerema est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique, présent partout en métropole et dans les Outre-mer grâce à ses 26 implantations et ses 2 400 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.

Site web : www.cerema.fr

Première approche du ruissellement

Les méthodes CRUS et Exzeco

Commanditaire : DREAL Bourgogne-Franche-Comté

Auteurs : Claire FRAISSE

Responsable du rapport

Claire FRAISSE – Agence de Clermont-Ferrand – Groupe Eau et Risques
Tél. : +33(0) 4 73 42 10 01
Courrier : claire.fraisse@cerema.fr
Agence de Clermont-Ferrand – ZI du Brézet – 8 à 10 rue Bernard Palissy – 63017 CLERMONT FERRAND Cedex 2

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
V0	15/12/23	Version initiale
V1	18/01/24	Rajouts Adrien Labalme sur application locale des cartographies
V2	08/04/24	Prise en compte des remarques de la DREAL BFC
V3	13/06/24	Prise en compte des remarques de la DREAL BFC et des DDT(s) suite COPIL

Références : N° d'affaire : 22-CE-0296

Nom	Service	Rôle	Date	Visa
Claire FRAISSE	Cerema Dter Centre Est	Auteur principal		
Adrien LABALME	Cerema – Dter Est	Avec la participation de		
Sylvain MOREIRA	Cerema Dter Centre Est	Contrôlé par		
Sylvain MOREIRA	Cerema Dter Centre Est	Validé par		

Résumé de l'étude

La région Bourgogne-Franche-Comté est confrontée depuis de nombreuses années à des problématiques de ruissellement affectant des villages construits en contrebas de coteaux viticoles.

Les objectifs de la DREAL Bourgogne-Franche-Comté (BFC) sont les suivants :

- Améliorer la connaissance des phénomènes de ruissellement ;
- Communiquer et sensibiliser les acteurs du territoire (élus, aménageurs, grand public...) sur ces phénomènes de ruissellements ;
- Permettre une meilleure prise en compte de ces phénomènes de ruissellement dans l'aménagement du territoire.

Pour répondre à ces objectifs, le Cerema a proposé à la DREAL BFC d'appliquer deux de ses récentes méthodologies de cartographie :

- La première méthodologie appelée **CRUS** (Cartographie du RUissellement de Surface) permet de cartographier la sensibilité d'un sol à générer du ruissellement en fonction de sa nature, sa morphologie et son type d'occupation, en s'affranchissant des données pluviométriques (méthode dite « sèche »).
- La seconde méthodologie appelée **ExZEco** (Extraction des Zones d'Ecoulement) permet de mettre en avant les zones potentiellement affectées par des ruissellement, en localisant les axes d'écoulements potentiels.

Ces deux cartographies s'appliquent à l'échelle de grands bassins versants. Trois secteurs-test (illustration 1) ont été retenus par la DREAL BFC pour appliquer ces méthodes :

- secteur Maconnais ;
- secteur Beaunois-Chalonnais ;
- secteur Doubs.

Les cartographies ont été réalisées pour les deux premiers secteurs, mais n'ont pas pu être faites pour le secteur Doubs en l'absence de données pédologiques fiables disponibles (qui constituent des données d'entrée pour la réalisation de la carte CRUS).

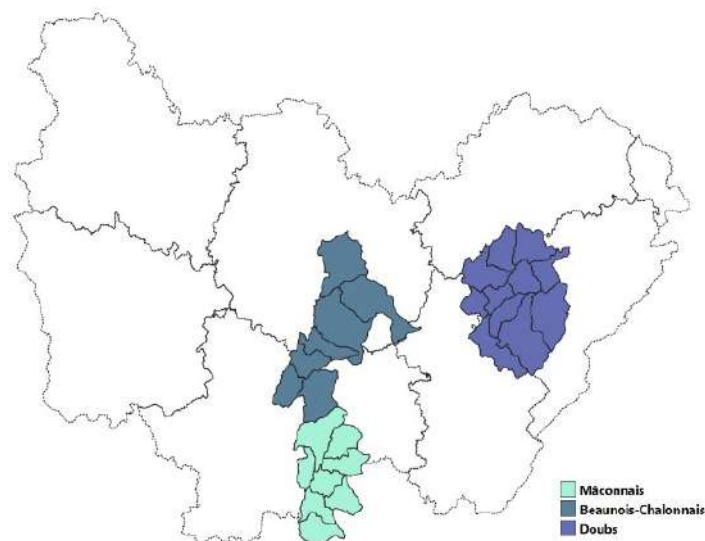


Illustration 1: Secteurs-test choisis par la DREAL BFC pour l'application des méthodes CRUS et Exzeco

Le présent rapport va décrire les méthodes utilisées pour obtenir ces cartographies.

5 à 10 mots clés à retenir de l'étude

Ruissellement	Bassin versant
CRUS	
Exzeco	

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

1 Rappels sur le ruissellement.....	9
1.1 Ruissellement et cycle de l'eau.....	9
1.2 La genèse du ruissellement.....	10
1.3 Plusieurs phénomènes résultants.....	11
1.4 Une prévision délicate.....	12
1.5 Une approche transversale de la gestion du risque de ruissellement.....	13
1.6 Les facteurs aggravants.....	14
1.6.1 Le développement urbain.....	14
1.6.2 Les pratiques agricoles.....	15
1.6.3 L'érosion des sols.....	15
1.6.4 L'effet des cumuls de pluies ou érosivité pluviale.....	16
1.6.5 Les impacts liés au changement climatique.....	16
2 Une gestion à l'échelle d'un bassin versant.....	18
2.1 La définition du bassin versant.....	18
2.2 Le rôle des talwegs.....	19
2.3 Zone production / transfert / accumulation.....	20
2.3.1 Les zones de production.....	20
2.3.2 Les zones de transfert.....	20
2.3.3 Les zones d'accumulation.....	20
3 La cartographie de sensibilité des terrains à générer du ruissellement (méthode CRUS).....	22
3.1 Principe de la méthode.....	22
3.2 Données d'entrée.....	22
3.3 L'étude de la pédologie.....	23
3.3.1 Le sol et son influence sur le ruissellement.....	23
3.3.2 Les différents types de textures d'un sol.....	24

3.3.3 La carte de battance.....	25
3.3.4 Les cartes de perméabilité.....	28
3.3.5 Les cartes des pentes.....	29
3.3.6 Les cartes de l'occupation des sols.....	29
3.4 Détermination de la sensibilité à générer du ruissellement.....	30
3.5 Les limites de la méthode CRUS.....	33
4 Le recensement des axes d'écoulement (méthode Exzeco).....	34
4.1 Principes de la méthode.....	34
4.1.1 Valeurs de bruitage.....	35
4.1.2 Calcul des endoréismes.....	35
4.1.3 Résultats obtenus.....	36
4.2 Les données utilisées.....	36
4.3 Les limites de la méthodologie Exzeco.....	37
5 Applications locales des cartographies.....	38
5.1 Secteur du Mâconnais.....	39
5.1.1 Secteur de Solutré-Pouilly.....	39
5.1.2 Secteur de Plottes.....	41
5.1.3 Secteur de Martailly-lès-Brancion.....	43
5.1.4 Secteur de Bâgé-Dommartin.....	45
5.2 Secteur du Beaunois-Chalonnais.....	48
5.2.1 Secteur de Grvrey-Chambertin.....	48
5.2.2 Secteur de Rully.....	51
5.2.3 Secteur de Mercurey.....	54
Conclusion.....	57
Annexe 1 : Note d'accompagnement des cartes CRUS et Exzeco.....	58
Annexe 2 : Cartographies du secteur Mâconnais par grands bassins versants.....	58

Annexe 3 : Cartographies du secteur Beaunois-Chalonnais par grands bassins versants.....	58
Annexe 4 : Notice des données cartographiques fournies.....	58
Annexe 5 : Bibliographie.....	59

1 RAPPELS SUR LE RUISSELLEMENT

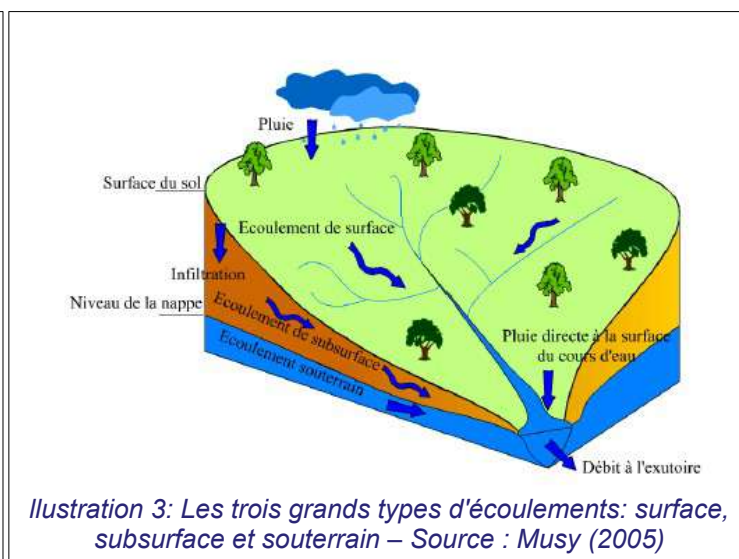
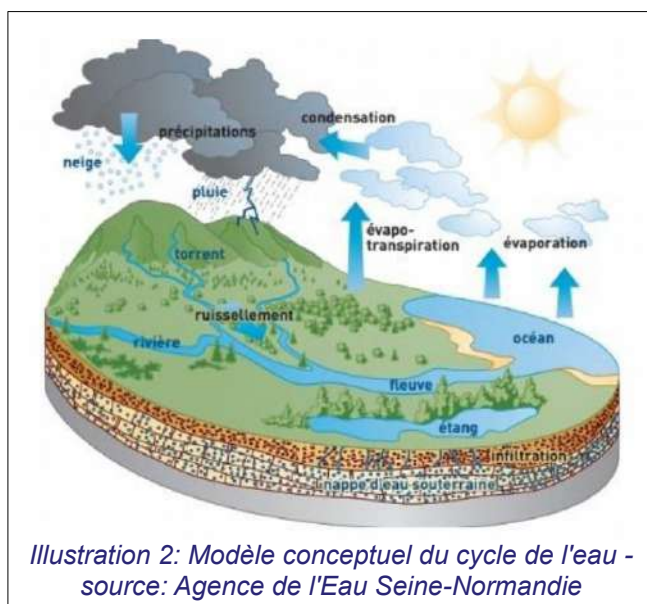
1.1 Ruissellement et cycle de l'eau

Le cycle de l'eau comporte trois processus majeurs (illustration 2) : précipitations, écoulements et évapotranspiration. Parmi les processus d'écoulements, on retrouve ceux qui peuvent se produire en surface (illustration 3), 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, jusqu'à ce qu'elle rencontre un cours d'eau ou une masse d'eau superficielle :

- ne s'infiltrer 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.

D'après la définition donnée lors du dernier colloque sur le ruissellement du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, « 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 ».

¹Feuille 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)

1.2 La genèse du ruissellement

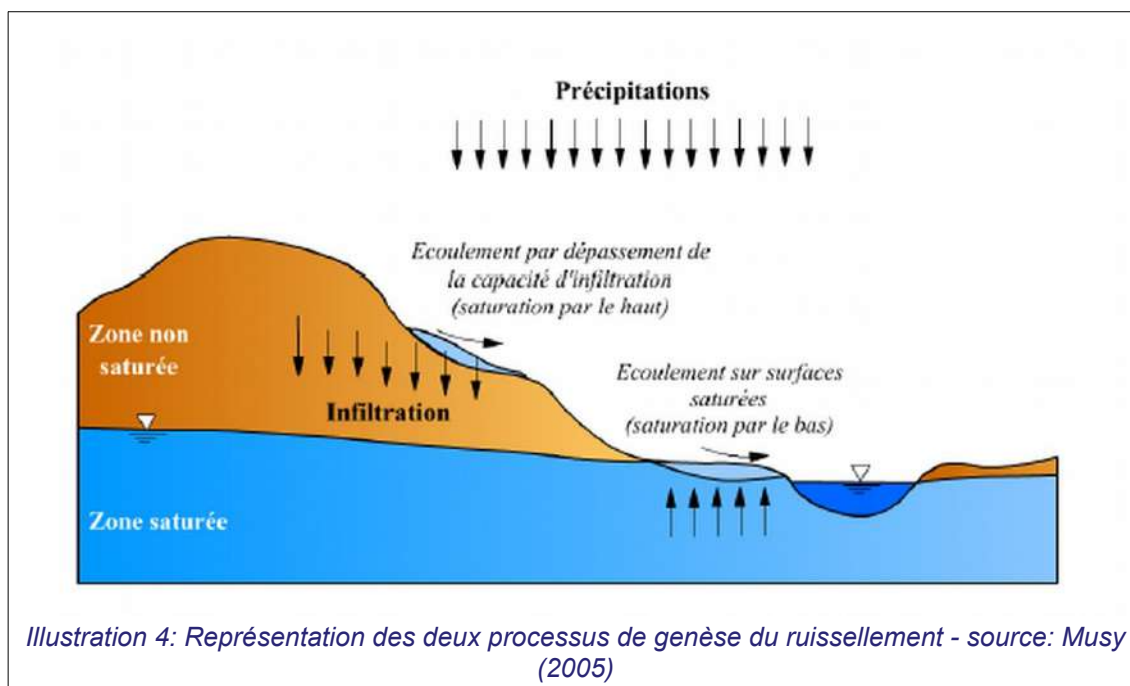
La genèse du ruissellement s'appuie sur deux paramètres :

- **les caractéristiques des précipitations** : la nature des précipitations (pluie ou grêle), l'intensité de la précipitation et sa durée...
- **les propriétés des sols** : la perméabilité contrôlant la capacité d'infiltration du sol, le degré de saturation en eau, la pente, la couverture du sol (présence ou non d'un couvert végétal)...

Le ruissellement apparaît lorsque les eaux de pluie ne peuvent pas ou plus s'infiltrer dans le sol. Ce refus apparaît dans plusieurs conditions (illustration 4), une combinaison des phénomènes étant possible :

- **ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration (dit Hortonien)**: l'intensité des pluies est supérieure à la capacité d'infiltration des sols, sachant que cette capacité d'infiltration du sol dépend à la fois des propriétés du sol (perméabilité, texture, structure) et de l'état de saturation hydrique du sol (un sol sec ayant une capacité d'infiltration très faible, quelles que soient ces propriétés) ;
- **ruissellement par saturation du sol ou du réseau pluvial** : la pluie se produit sur une surface saturée d'eau, ou sur une surface anthropisée dans une zone où les réseaux d'eau pluviale sont saturés. L'écoulement de l'eau ne peut donc s'effectuer qu'en surface, durant la période pluvieuse.

Cette étude ne prend pas en compte le phénomène dit **ruissellement retardé**, qui correspond aux deux phénomènes précédents associés à des écoulements se produisant en sub-surface et non en surface.



Il existe plusieurs types de ruissellement de surface :

- 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.

1.3 Plusieurs phénomènes résultants

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

- **des phénomènes d'érosion / incision des sols** (illustration 5). 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 de hauteur d'eau, et créer des rigoles de quelques centimètres à 10 centimètres appelées « rills », quels 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 ».



Illustration 5: 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.

1.4 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, ainsi qu'à l'état du sol au moment de cette 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 degré 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.

1.5 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 par crue soudaine, 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 (illustration 6) :

- 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

Illustration 6: Gouvernance des politiques publiques liées au ruissellement - source: guide CEPRI (2021)

L'article L211-7 du Code de l'Environnement met en avant l'item 4 (la maîtrise des eaux pluviales et de ruissellement ou la lutte contre l'érosion des sols). Cet item ne fait pas partie de la compétence obligatoire GEMAPI attribuée aux inter-collectivités, qui choisissent ou non de l'exercer en complément de la GEMAPI. Cet item 4 peut donc être géré soit à l'échelle communale, soit à l'échelle intercommunale. Un problème d'échelle et d'immobilisme se pose alors car pour être traité dans sa

globalité, le ruissellement doit se gérer à l'échelle d'un bassin versant. Les solutions de protection mises en place doivent être réfléchies à une échelle bien supérieure à l'échelle communale pour pouvoir être efficaces et éviter d'amplifier les phénomènes de l'amont vers l'aval.

De plus, en fonction des périodes de retour, les compétences exercées ne sont pas les mêmes :

- pour les pluies de période de retour <30 ans => compétence GEPU
- pour les pluies de période de retour >30 ans => compétence GEMAPI / gestion du risque inondation

1.6 Les facteurs aggravants

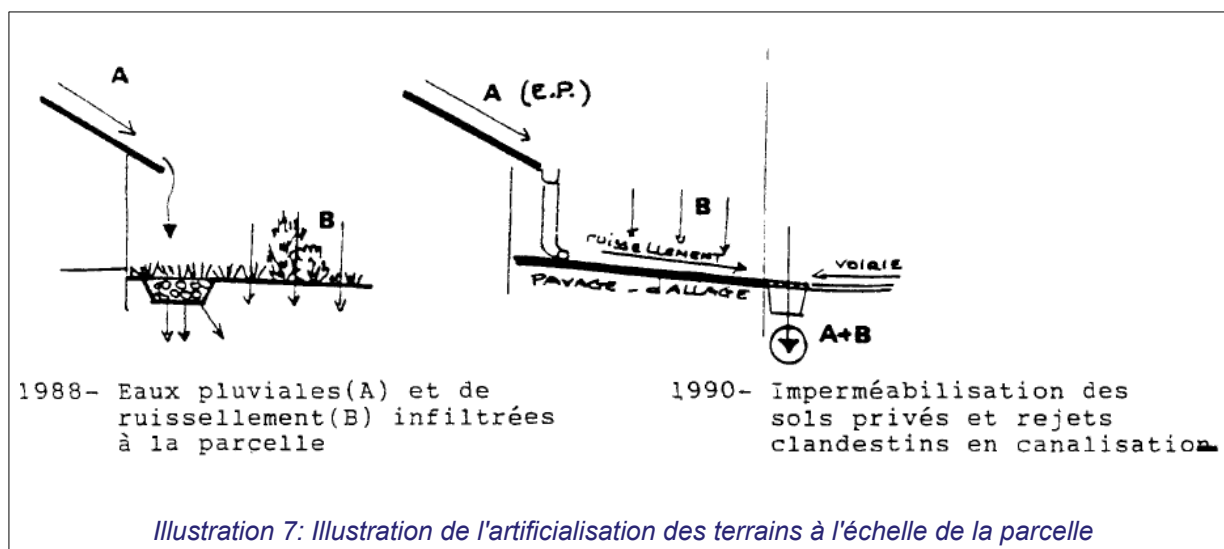
1.6.1 Le développement urbain

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 vitesses d'écoulement d'eau en surface.

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 (illustration 7), 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.



1.6.2 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 ;
- 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.

1.6.3 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 interceptant l'eau, le protégeant ainsi 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.

La croûte superficielle formée par l'action des gouttes de pluie sur les sols, qui fractionnent les agrégats à la surface et diminuent l'infiltration de l'eau, s'appelle la **croûte de battance** (voir paragraphe 3.3.3). Plus le diamètre pondéral moyen d'un agrégat sera faible, plus il sera sujet à des phénomènes de battance et plus sa stabilité structurale sera faible et le risque d'érosion élevé (illustration 8).

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

Illustration 8: Lien entre le diamètre moyen pondéral d'un grain (MWD), la stabilité structurale du sol, la battance et le ruissellement et érosion diffuse – source : LRPC Blois

1.6.4 L'effet des cumuls de pluies ou érosivité pluviale

La sensibilité du sol à l'érosion n'est pas toujours corrélée à la battance et aux propriétés intrinsèques du sol qui conduisent à ce phénomène. Quand des cumuls de pluie importants sont conjugués à des sols saturés ou au contraire à des sols très secs, des sols non battants peuvent provoquer un ruissellement important. On appelle ce phénomène l'**érosivité pluviale**.

L'érosivité pluviale, qui dépend de l'état d'humidité du sol au moment de la pluie, est donc fonction de l'état de saturation de la réserve utile.

La réserve utile d'un sol correspond aux stocks d'eau (exprimés en mm d'eau ou L/m³) que le sol est capable de retenir, puis de restituer aux plantes.

Il faut souligner que les sols secs sont tous rendus quasiment imperméables, quels que soient leur texture et leur structure. Une pluie de trop forte intensité ne permet pas de réhumidifier suffisamment le sol pour qu'il redevienne perméable et permette l'infiltration de l'eau.

1.6.5 Les impacts liés au changement climatique

Les projections climatiques semblent indiquer que des épisodes de pluies extrêmes seront plus nombreux dans les prochaines décennies et leur intensité sera plus forte. Les projections climatiques semblent aussi indiquer que les épisodes de sécheresse seront accrus en intensité et en durée. L'accroissement de ces deux phénomènes est favorable à une augmentation des phénomènes de ruissellement.

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. Cette destruction conduit à la fois :

- à une compaction du sol (perte de la porosité, donc de la capacité à infiltrer l'eau) ;
- à une modification de l'état de surface du sol (réduction de la rugosité, c'est-à-dire perte de la capacité d'interception de l'eau en surface et augmentation de la vitesse d'écoulement de l'eau).

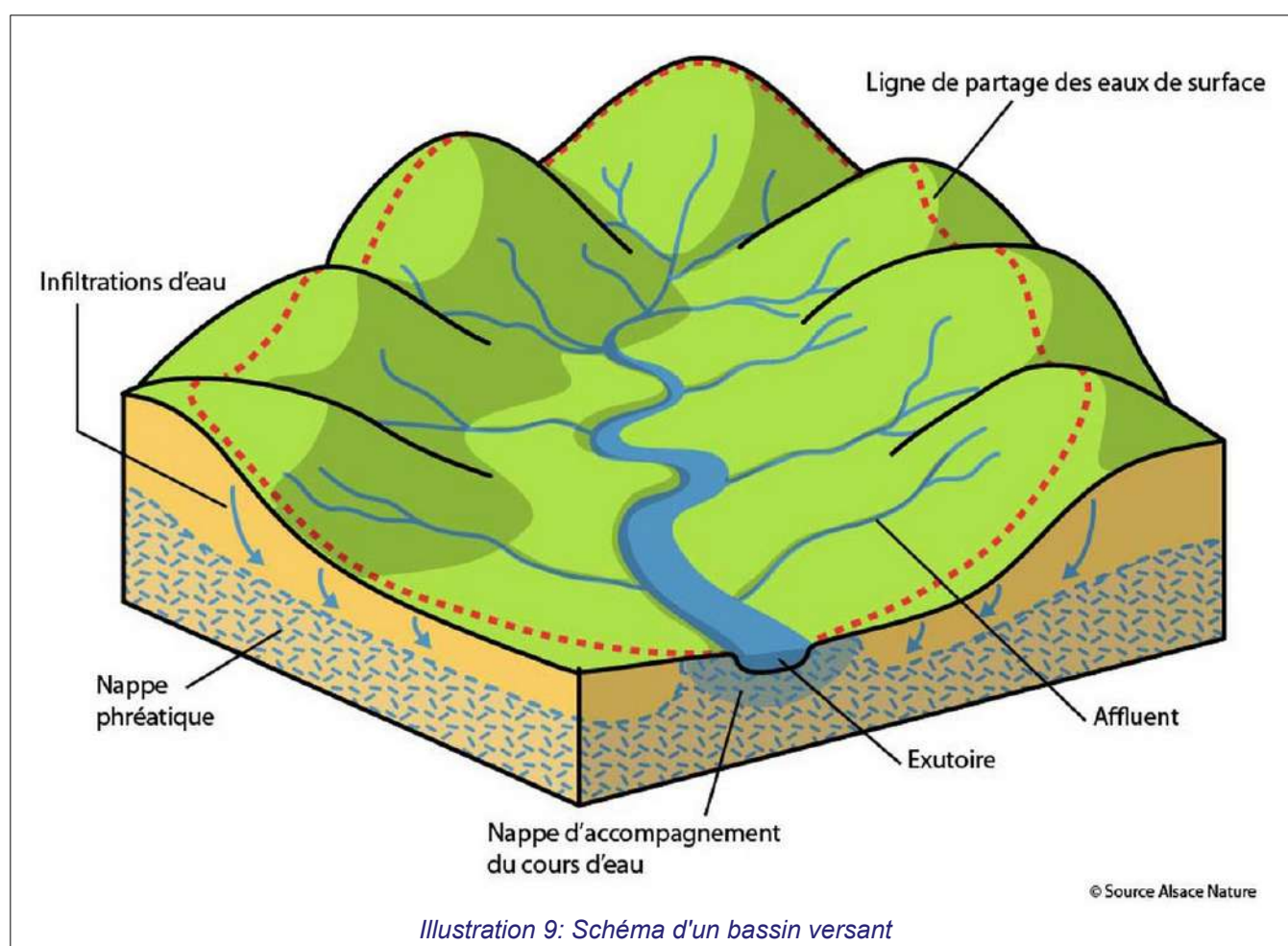
Cette mise à nu amplifie leur sensibilité à l'érosion, ce qui provoque des phénomènes de coulées de boue dès les premières précipitations post-incendies.

Le changement climatique, avec les risques accrus de feux de forêts et les fréquences de sécheresse, amplifiera les risques d'inondation par ruissellement dans le futur, ce qui invite à une vigilance particulière en matière de gestion des eaux de ruissellement.

2 UNE GESTION À L'ÉCHELLE D'UN BASSIN VERSANT

2.1 La définition du bassin versant

Le bassin versant topographique (illustration 9) 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.

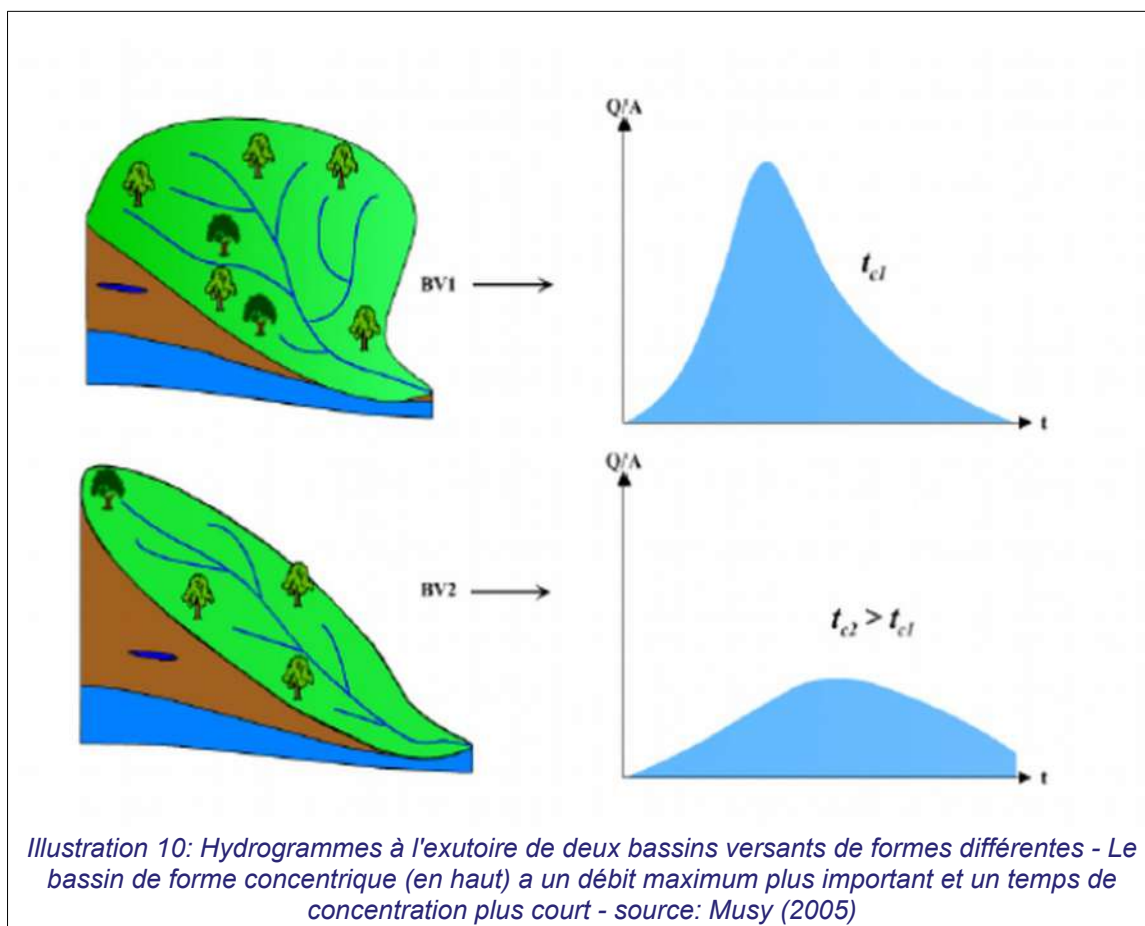


La morphologie d'un bassin versant peut être décrite par de nombreux paramètres géométriques (surface, forme, altitude, pente...).

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 (illustration 10).



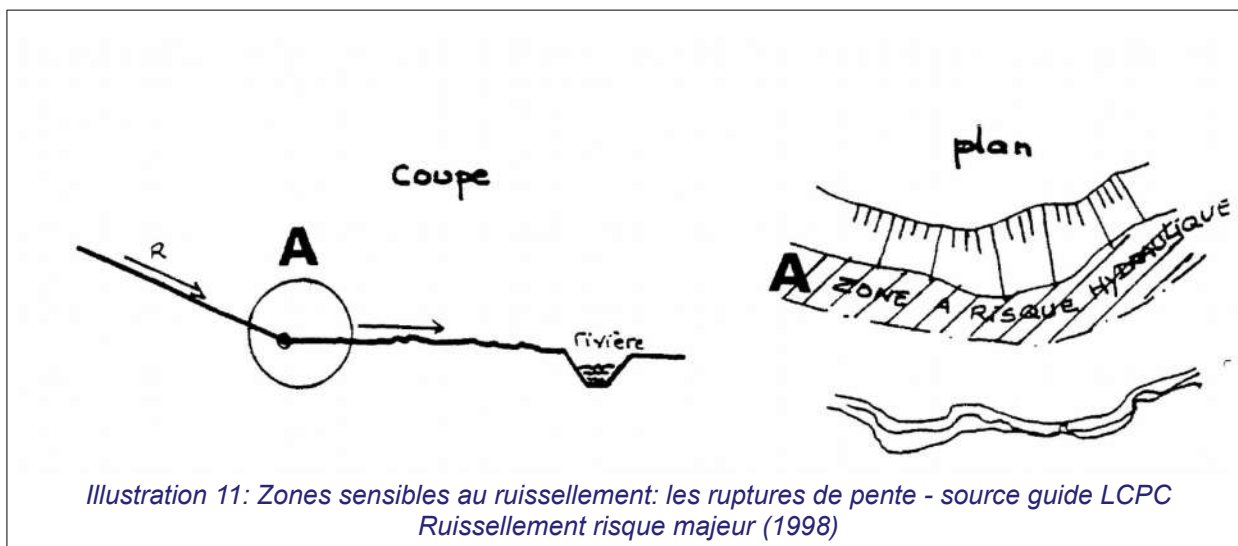
2.2 Le rôle des talwegs

Dans les zones de fortes pentes, les talwegs (chemins préférentiels de l'eau lorsqu'il pleut) représentent les espaces de concentration du ruissellement. Une cartographie des zones à risque de ruissellement passera donc en premier lieu par leur recensement (méthode Exzeco, voir paragraphe 4).

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 (illustration 11), qui augmentent significativement l'aléa car ils sont des secteurs à risques d'engorgement ;
- les formes de bassins 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).



2.3 Zone production / transfert / accumulation

2.3.1 Les zones de production

Les zones de production sont les secteurs desquels partent les ruissellements (illustration 12). 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.

2.3.2 Les zones de transfert

Ce sont les secteurs sur lesquels les écoulements se concentrent (illustration 12), dans des talwegs, et se propagent vers l'aval. Généralement situées 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).

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.

2.3.3 Les zones d'accumulation

Quand les écoulements ont suivi les talwegs et qu'ils arrivent sur des zones de rupture de pentes,

deux solutions se présentent.

- Les eaux atteignent le réseau hydrographique, ou 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 (illustration 12) correspondent à des secteurs où les hauteurs d'eau peuvent être importantes, où il est nécessaire d'éviter toute nouvelle urbanisation.

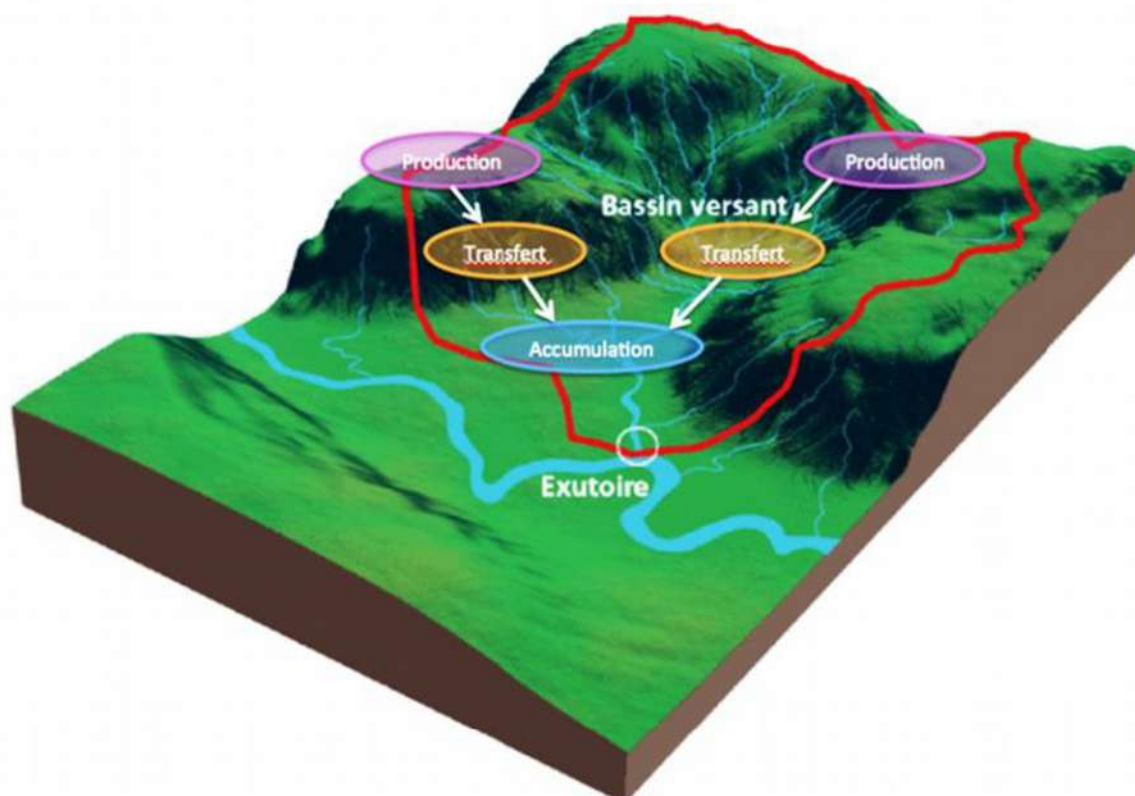


Illustration 12: Concept du ruissellement en trois processus: zones de production, transfert et accumulation – source : Lagadec (2017)

3 LA CARTOGRAPHIE DE SENSIBILITÉ DES TERRAINS À GÉNÉRER DU RUISSELLEMENT (MÉTHODE CRUS)

3.1 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.

3.2 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	Année	Organisme	Donnée récupérée	Échelle de pertinence d'analyse
RGE alti 1m / 5m	2022	IGN	MNT	communale
Référentiel Régional Pédologique (Base donesol)	2000-2010	INRAE	Base DoneSol3 Taux argile / sable / limon	intercommunale
Bassins versants		SANDRE	BD Topage	Communale à intercommunale (selon la taille du bassin versant)
BD Topo	2022	IGN	Tronçons de routes / Bâti	communale
RPG	2021	Chambres d'Agriculture	Registre parcellaire graphique	communale
Corine-Land-Cover	2018	Agence Européenne pour l'environnement	Occupation des sols	communale

3.3 L'étude de la pédologie

La pédologie est la science qui a pour but d'étudier la formation et l'évolution dans le temps de ces sols. Elle permet de caractériser la structure et la texture des sols.

3.3.1 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'infiltrer, s'évapo-transpire ou ruisselle (voir chapitre 1.1 sur le cycle de l'eau).

Un sol se compose 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.

De nombreux paramètres, pour la plupart interconnectés, 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 en renforçant la cohésion du sol ;

- la végétation va avoir une influence sur l'évapotranspiration et l'interception de l'eau de pluie, et ainsi diminuer le ruissellement ;

L'absence de couvert végétal va faciliter la formation d'une croûte de battance sur les sols sensibles à ces phénomènes (voir paragraphe 3.3.3)

- la perméabilité : qui traduit la capacité d'un sol à laisser passer l'eau. Elle est dépendante des propriétés du sol présentées ci-dessous ;
- la texture, qui décrit la taille des particules minérales au travers de la proportion relative de particules argileuses (appelées argiles dans la suite de ce rapport), de limons et de sables ;

La texture d'un sol ne change pas : elle dépend directement de la nature géologique du mode de formation du sol (il s'agit d'un caractère hérité) ;

- la structure du sol, qui décrit le mode d'agencement des constituants du sol et de la porosité et l'organisation plus globale du sol en profondeur, sous forme de couches horizontales (appelées « horizons de sol »). Dans le cadre de cette étude de ruissellement, ce sera l'horizon de surface du sol, qui est celui sur lequel le ruissellement va se produire, qui sera décrit.

La structure d'un sol est très variable et dépend de l'état d'humidité, du mode de gestion de la couverture végétale, des pratiques agricoles... ;

- 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 : son degré de saturation ou de sécheresse ;
- la teneur en matières organiques, qui augmente la capacité de rétention en eau du sol et stabilise sa structure (donc sa porosité), et qui réduit de ce fait sa sensibilité à l'érosion.

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.

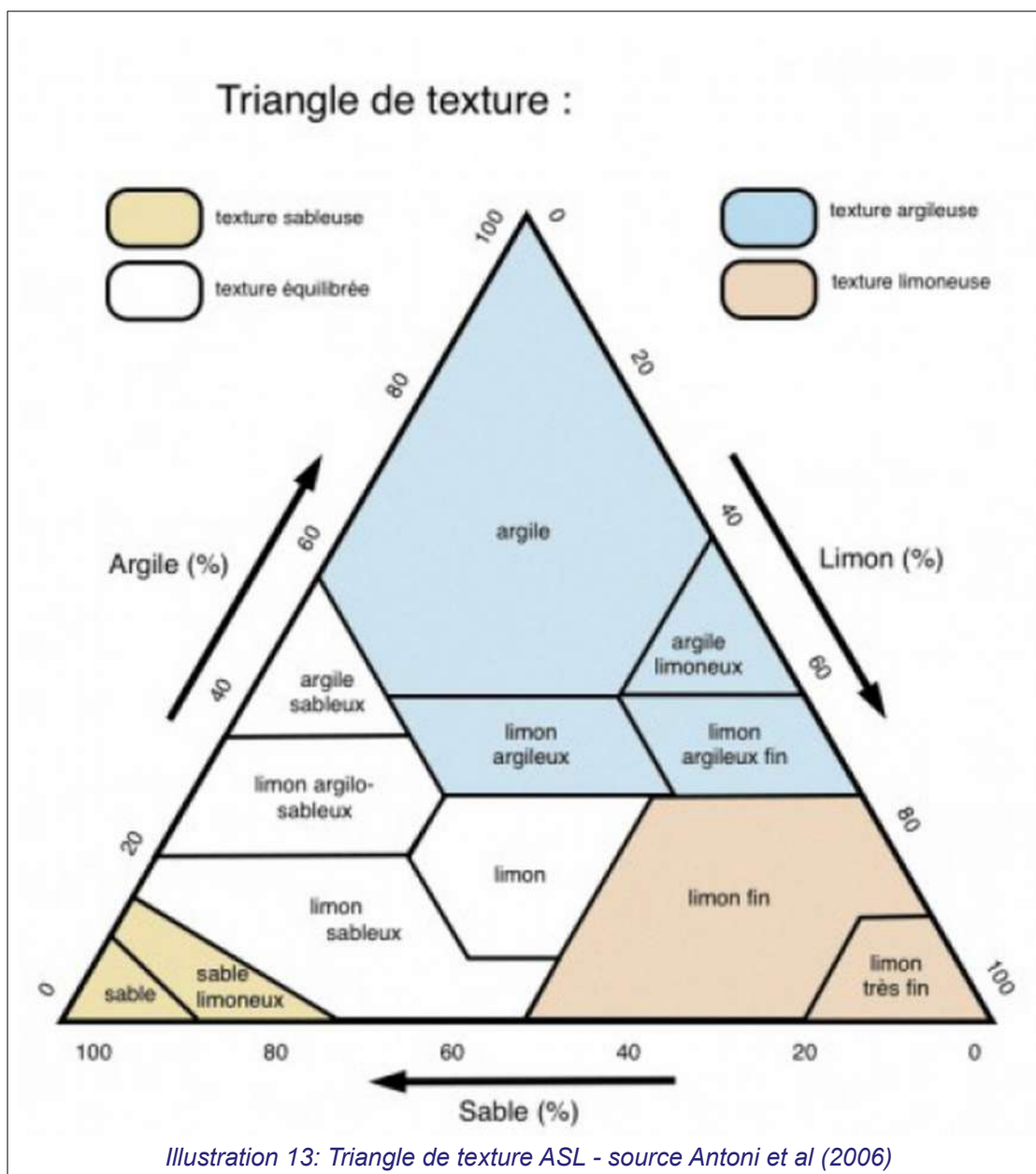
3.3.2 Les différents types de textures d'un sol

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 illustration 13) :

- 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 (illustration 13).



3.3.3 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 » (illustrations 14 et 15). Cette croûte de battance va agir comme un ciment, colmater le sol pour empêcher l'eau de s'infiltrer et accentuer le ruissellement.

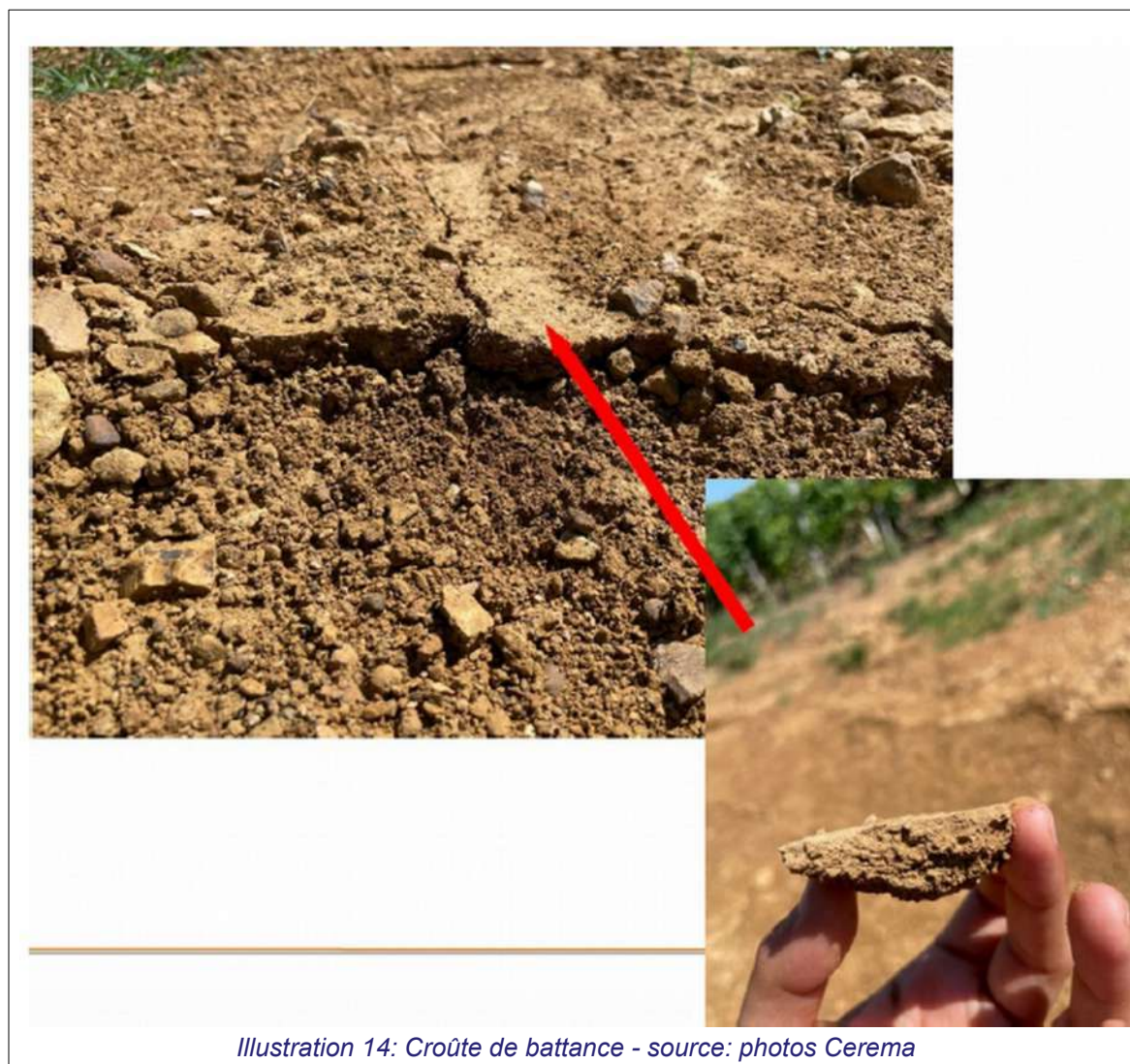
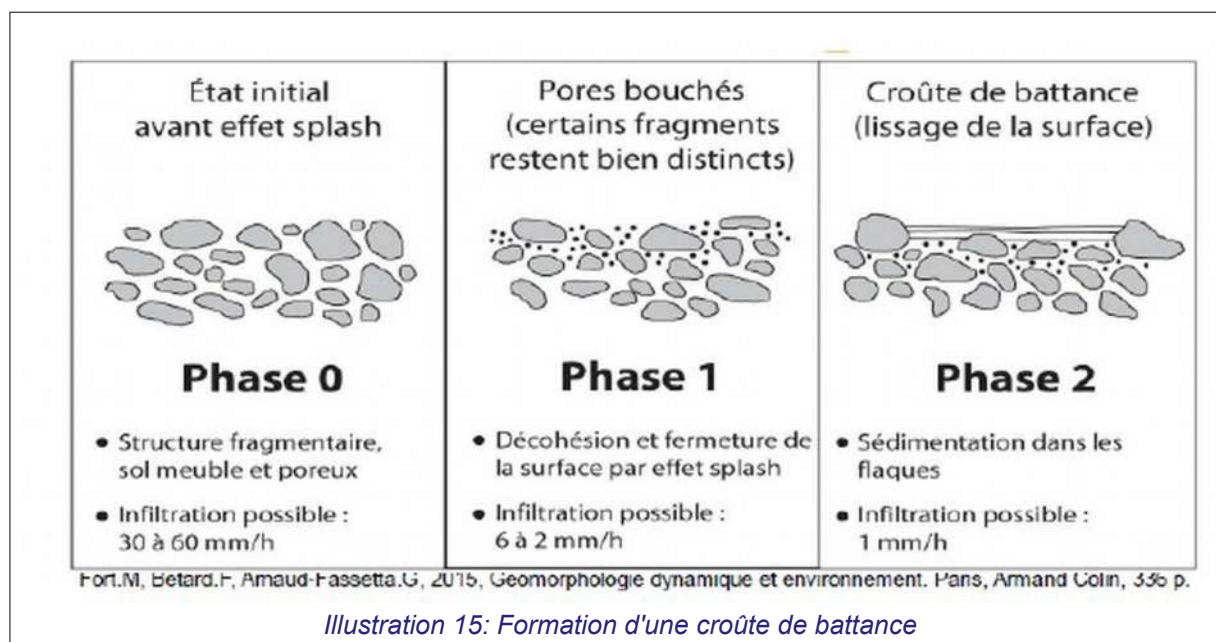


Illustration 14: Croûte de battance - source: photos Cerema

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), que l'on notera plus loin « valeurs respectives d'ASL ». Les différentes typologies de sols ne vont donc pas réagir de la même manière, en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques.

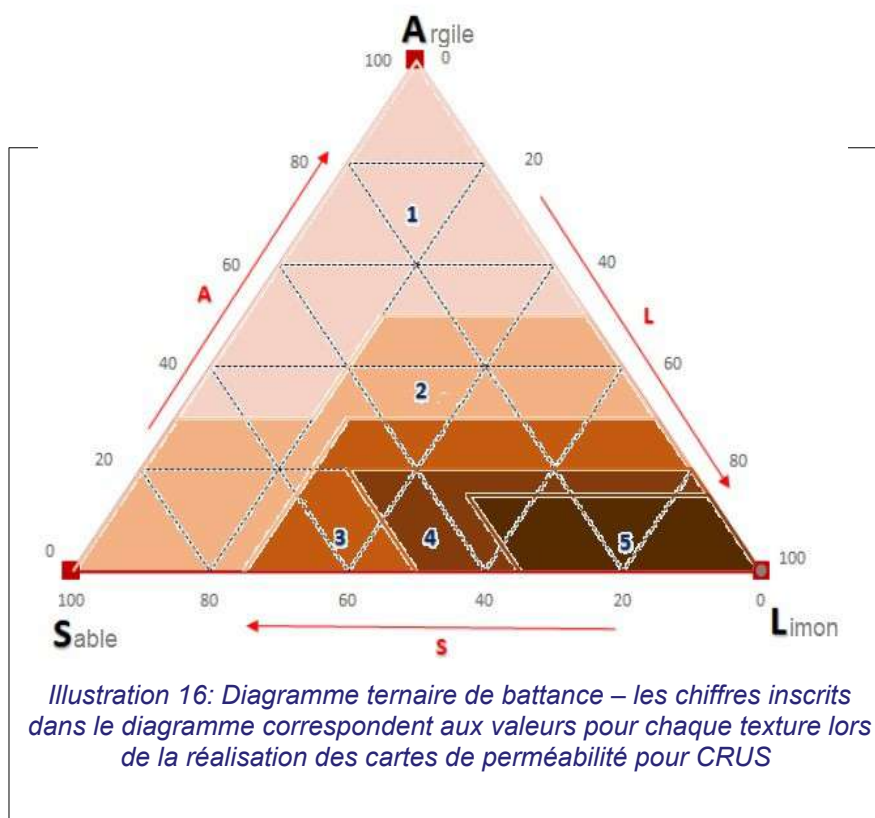
Le phénomène physique à l'origine de la formation d'une croûte de battance est très souvent l'action de la pluie (l'effet des gouttes d'eau sur les sols), mais le passage répété d'engins agricoles ou d'animaux peut avoir les mêmes effets. Certaines cultures dites « ouvertes » (maïs, tournesol, vigne, pomme de terre...) ne dissipent pas aussi bien que d'autres (cultures dites « fermées », par exemple le blé) l'énergie des gouttes de pluies. Ces cultures accentuent le phénomène de battance pour des sols déjà sensibles, et favorisent la formation d'une croûte de battance. Au contraire, la présence de matière organique dans les premiers centimètres de sol retarde la 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 (illustration 15).



Pour déterminer la valeur de la battance, un diagramme ternaire² (illustration 16) 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 (les sols qui favorisent le plus la battance sont les sols limoneux).

Diagramme de Battance



2 Diagramme ternaire du potentiel de battance [Antoni et al, 2006]

3.3.4 Les cartes de perméabilité

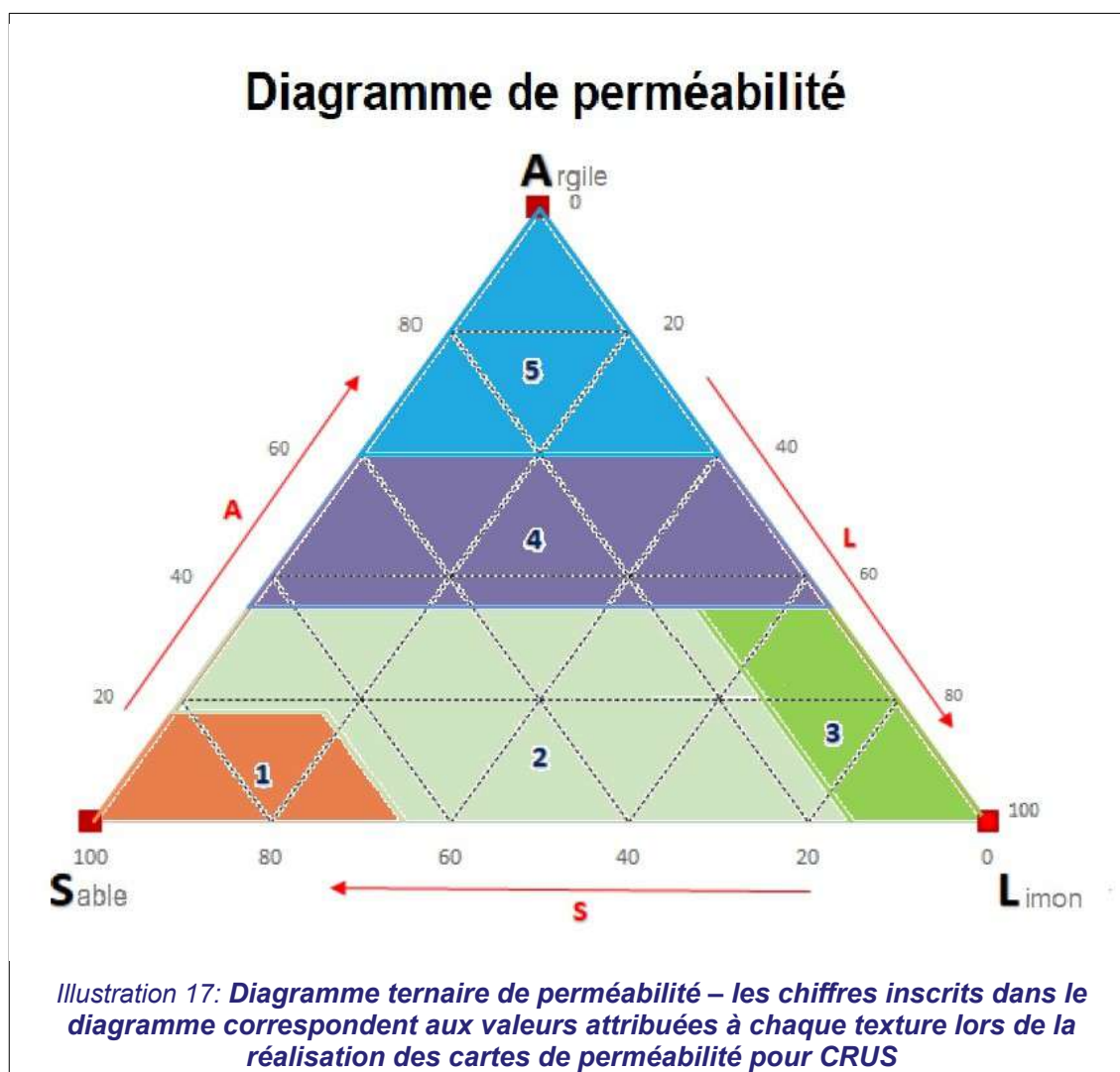
La perméabilité est définie par la capacité d'un sol à laisser passer l'eau. Cette perméabilité est dépendante de la porosité (qui dépend elle-même de la texture et de la structure du sol).

L'infiltration des eaux dans le sol (ou degré initial de saturation en eau) 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). Pour déterminer la valeur de la perméabilité, un diagramme ternaire³ (illustration 17) s'applique donc sur chaque unité typologique de sol (uts).

Une note est attribuée à la perméabilité, allant de 1 pour un sol sableux (très perméable) à 5 pour un sol très argileux (peu perméable).



³ Diagramme ternaire du potentiel de battance [Antoni et al, 2006]

3.3.5 Les cartes des 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 (exprimée en pourcentage), 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

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.

3.3.6 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 Corine 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

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. Dans le cadre de ces cartographies, on considère sur ces zones urbaines que l'infiltration de l'eau est nulle, et que toute l'eau tombée ruisselle. Cette hypothèse, qui néglige le rôle d'évacuation des réseaux pluviaux, va dans le sens d'une maximisation du risque.

Les sols agricoles montrent une grande variabilité au ruissellement : les types de cultures et pratiques

culturelles peuvent contribuer à aggraver les phénomènes. Par exemple, la vigne et les plantes sarclées telles que le maïs ou le tournesol (cultures ouvertes) absorbent beaucoup moins les pluies que les 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.

3.4 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.

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

Où NotePermea , NoteOccSol et NotePente sont les notes spatialisées obtenues lors de la construction des couches SIG expliquées ci-avant (paragraphes 5.3.4 à 5.5), 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 et aggravant (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 (illustration 18) 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	$1,60*\alpha$

Illustration 18: 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

Illustration 19: Classes de sensibilités des sols à générer du ruissellement

Illustration 20: Matrice sans battance

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

Illustration 21: Matrice avec battance

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

3.5 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, établies avec la méthode Exzeco.
- La précision spatiale de la cartographie dépend de la précision spatiale des données d'entrée. Si certaines données sont utilisables à l'échelle communale (bâti, RPG, pentes...), ce n'est pas le cas de la pédologie. La méthode CRUS n'est pas adaptée à une échelle de travail communale mais plus à l'échelle d'un bassin versant.
- Les cartes sont représentatives de la sensibilité des sols sur les secteurs plats ou à faibles reliefs. Dans les zones de montagnes 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.

4 LE RECENSEMENT DES AXES D'ÉCOULEMENT (MÉTHODE EXZECO)

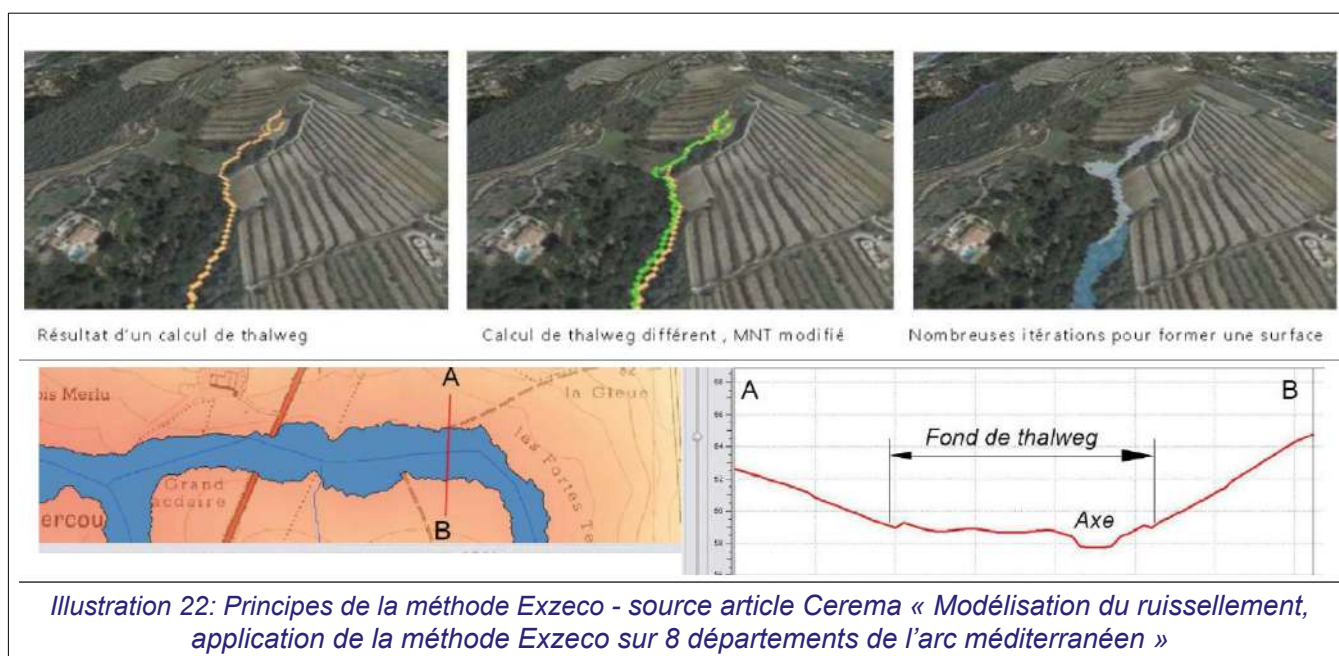
Le Cerema a conçu une méthode appelée **Exzeco**⁴ (pour « **Ex**traction des **Z**ones d'**É**coulement ») afin de cartographier les espaces potentiellement inondables sur des petits bassins versants. Initialement conçue pour répondre à la problématique des inondations par ruissellement dans le sud de la France (mission MIIAM), cette méthode permet de pré-identifier les zones d'écoulements sur de larges territoires d'études. Elle a permis, pour certaines communes⁵, de prendre en compte les risques de ruissellement pluvial dans l'élaboration des Plans Locaux d'Urbanisme (PLU).

Exzeco utilise la topographie pour calculer les talwegs, c'est-à-dire les chemins préférentiels d'écoulement de l'eau lorsqu'il pleut.

4.1 Principes de la méthode

La méthode Exzeco va utiliser les reliefs, eux-mêmes modelés par les écoulements pour identifier des surfaces d'écoulement.

Exzeco utilise un modèle numérique de terrain (MNT). Ce MNT représente les altitudes d'une zone géographique par des valeurs à intervalle régulier. Dans le cas du MNT utilisé, les points d'altitude sont représentés sur une grille de carrés (pixels) tous les 5 mètres dans la direction Est-Ouest et Nord-Sud.



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

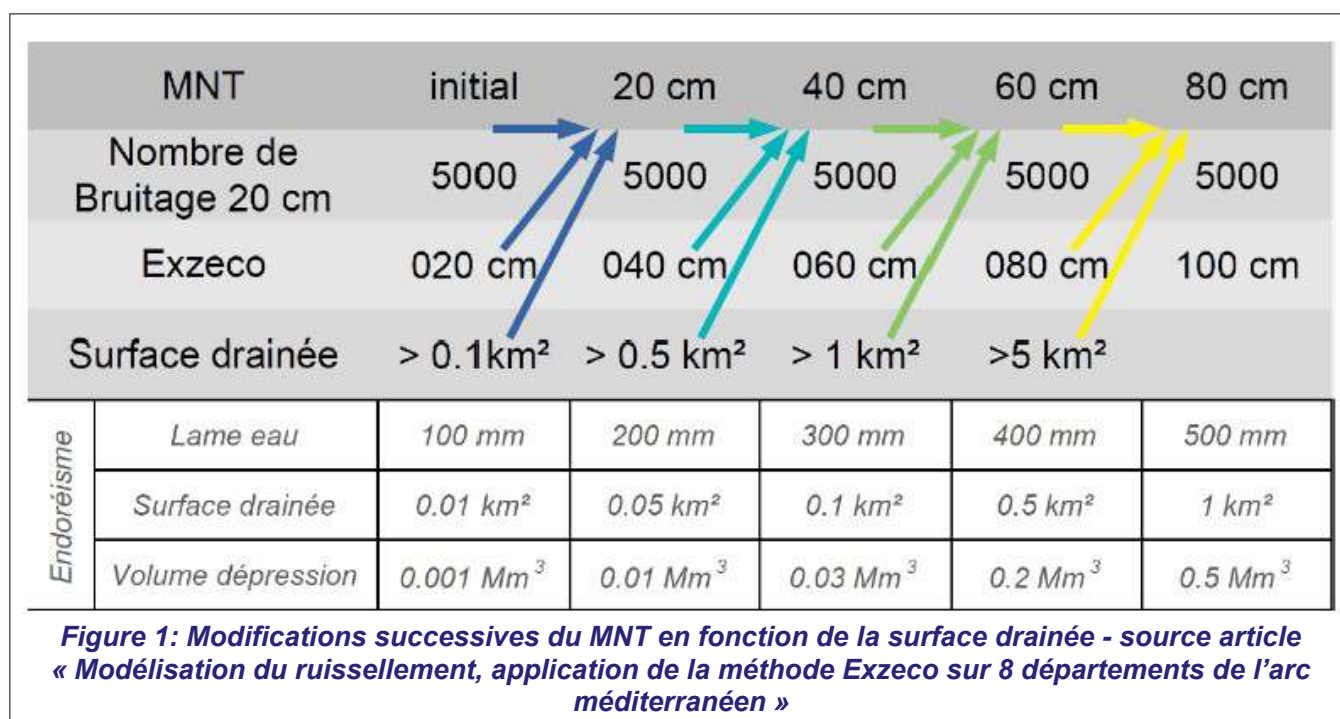
5 Exemple de la commune de Sainte Anastasie, territoire test de la méthode – étude disponible sur le site du MIIAM

En chaque pixel, Exzeco calcule les directions d'écoulement et la superficie du bassin collecté. En « bruitant » ce MNT (c'est-à-dire en ajoutant une valeur en cm aléatoirement à certains pixels) un certain nombre de fois, on obtient un ensemble de points constituant une surface et affectés d'une surface de drainage maximale collectée.

4.1.1 Valeurs de bruitage

Pour le MNT utilisé (ici au pas de 5 mètres), la valeur arbitraire de bruitage choisie est au départ de 20 cm, mais l'expérience a montré que cette valeur limite parfois l'extension latérale des emprises du ruissellement. Il ne faut donc ni limiter (cas lorsqu'on ne bruit que sur 20 centimètres), ni surestimer (cas d'un bruitage fait avec des valeurs de 1m) ce bruitage, l'objectif étant de fournir une extension latérale réaliste correspondante aux emprises des écoulements sur la zone étudiée.

Le MNT de base va donc être modifié en partant du principe que les hauteurs potentielles d'eau augmentent au fur et à mesure des écoulements vers l'aval. Lorsqu'un point collecte plus de 0,1 km², son altitude de base est augmentée de 0,20 mètres et l'ensemble des opérations présentées précédemment est réitérée en utilisant 0,40 mètres au lieu de 0,20 mètres. L'algorithme est ainsi répété tous les 20 centimètres jusqu'à 1 mètre.



4.1.2 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 endoréismes sont des zones où les eaux de ruissellement peuvent s'accumuler. Ils sont représentés par la couche spécifique issue d'Exzeco « zones d'accumulations ».

Le principe sur Exzeco est de comparer le volume des dépressions présentes sur le MNT avec un volume « capable », calculé comme la surface drainée à l'endroit de la cuvette multiplié par une lame d'eau ruisselée.

4.1.3 Résultats obtenus

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 n'est possible d'afficher que certaines classes de superficies drainées : on supprime ainsi les données trop basses et trop hautes qui sont moins pertinentes.

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

4.2 Les données utilisées

Sur les deux secteurs-test, la donnée utilisée a été le RGE Alti au pas de 5 mètres (année 2022 pour les départements de la Côte d'Or et de la Saône et Loire, 2021 pour les autres secteurs). La précision du RGE Alti est correcte sur l'ensemble du secteur étudié.

4.3 Les limites de la méthodologie Exzeco

Le principe d'Exzeco 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 emprise 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). Exzeco 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 emprises résultantes.
- 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 Exzeco 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.** En effet, la présence de bâtiments ou de certaines voiries routières peut avoir une influence sur les écoulements, et ceux-ci ne sont pas pris en compte dans le MNT).

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

5 APPLICATIONS LOCALES DES CARTOGRAPHIES

Une fois les cartographies CRUS et Exzeco réalisées, ces deux cartes ont été superposées et vérifiées par le biais de sessions de terrain. Les terrains ont été choisis en fonction de leur sensibilité à produire du ruissellement, principalement dans les zones fortes et très fortes, mais également en tenant compte de la configuration et de la topographie des lieux (vignes en aplomb direct des aménagements, village situé à l'exutoire d'un bassin versant, faible relief, etc). Les deux sessions de terrain et les secteurs visités sont les suivants :

- les 20 et 21 juillet 2022 pour le secteur du Mâconnais, les secteurs visités se situaient sur les communes de :
 - Solutré-Pouilly : Les vignes sont directement en contact avec l'aménagement urbain.
 - Plottes : Le village se situe dans le talweg et dans la zone de transfert des écoulements venant du nord, à partir des parcelles viticoles.
 - Martailly-lès-Brancion : L'exutoire de trois bassins versants, produisant du ruissellement, débouche sur le village.
 - Bagé-la-Ville : Problématique de ruissellement sur un relief peu marqué causée par la battance des parcelles agricoles.
- les 20 et 21 octobre 2022 pour le secteur du Beaunois-Chalonnais
 - Gevrey-Chambertin : La commune se situe à l'exutoire de la Combe Lavaux et possède des parcelles viticoles en contact avec l'aménagement urbain.
 - Rully : La commune est en contrebas d'un plateau générateur de ruissellement et caractérisé par de fortes pentes.
 - Mercurey : La commune est située à l'exutoire de plusieurs bassins qui ont une forme en entonnoir, ce qui concentre l'ensemble du ruissellement en un seul point.

Pour rappel : **ces cartes permettent une première lecture des phénomènes de ruissellement**, mais elles doivent être confrontées avec des données historiques dès lors que celles-ci sont disponibles. **Ces cartes ne prenant pas en compte les éléments fins de la topographie, elles ne remplacent en aucun cas une modélisation fine des axes d'écoulement.**

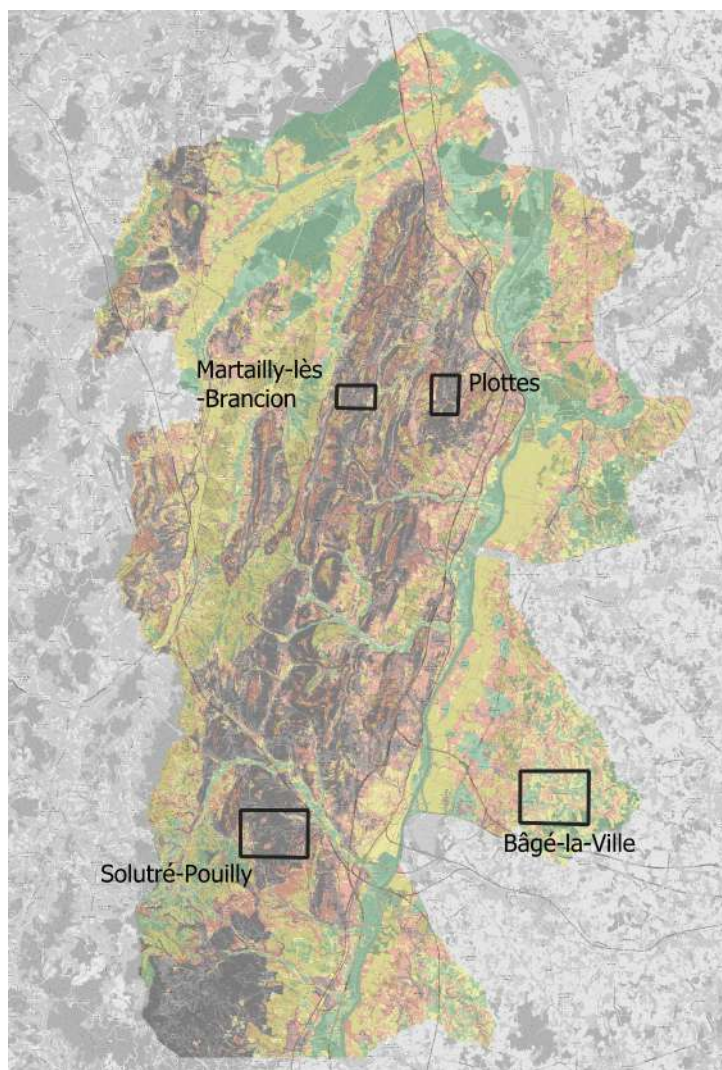


Illustration 23: Localisation des zones de terrain sur le secteur Mâconnais

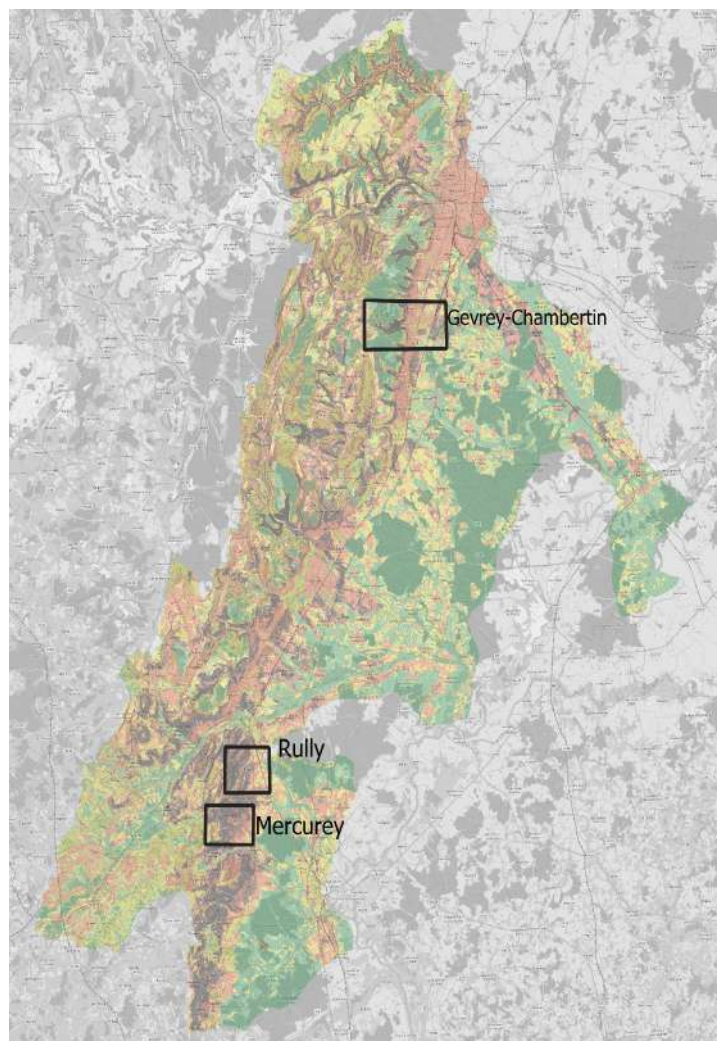


Illustration 24: Localisation des zones de terrain sur le secteur Beaunois

5.1 Secteur du Mâconnais

Les principales zones qui ont été vérifiées sont celles qui ressortent sur la cartographie CRUS comme très fortement sensibles au ruissellement.

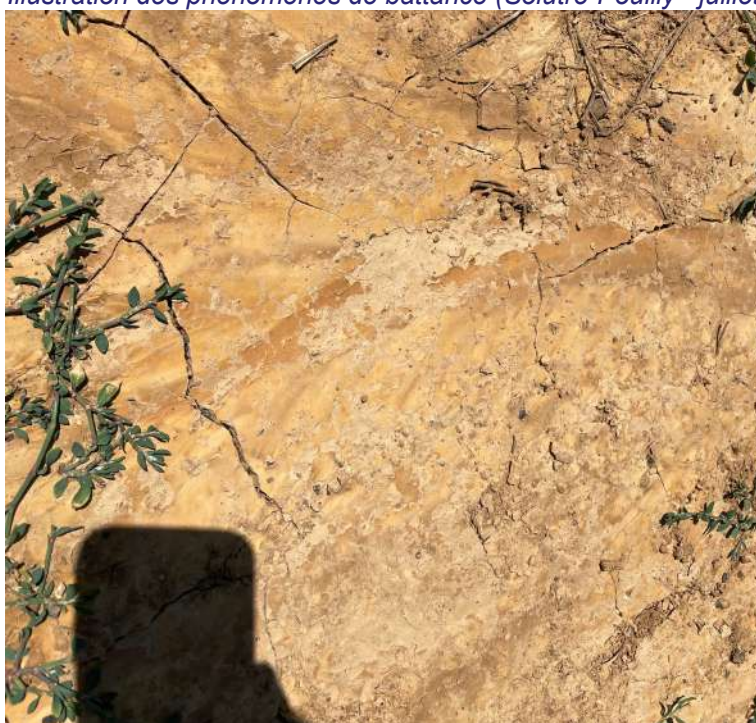
5.1.1 Secteur de Solutré-Pouilly

Pour la plupart, les zones qui ont été vérifiées sur le terrain correspondent à des secteurs de très forte pente. Des croûtes de battance s'observent régulièrement dans les vignes pour lesquelles les inter-rangs ont été laissés nus (illustrations 25, 26 et 28).

Sur la commune de Solutré-Pouilly, des phénomènes de battance ont été observés sur des parcelles viticoles positionnées le long des axes d'écoulement. La plupart des aménagements urbains sont en dehors de ces zones et ne devraient donc pas poser de problème. Néanmoins, les quelques maisons situées dans le talweg pourraient être exposées au risque de ruissellement provenant des vignes (photo) en cas d'orage.



Illustration 25: Illustration des phénomènes de battance (Solutré-Pouilly - juillet 2022)



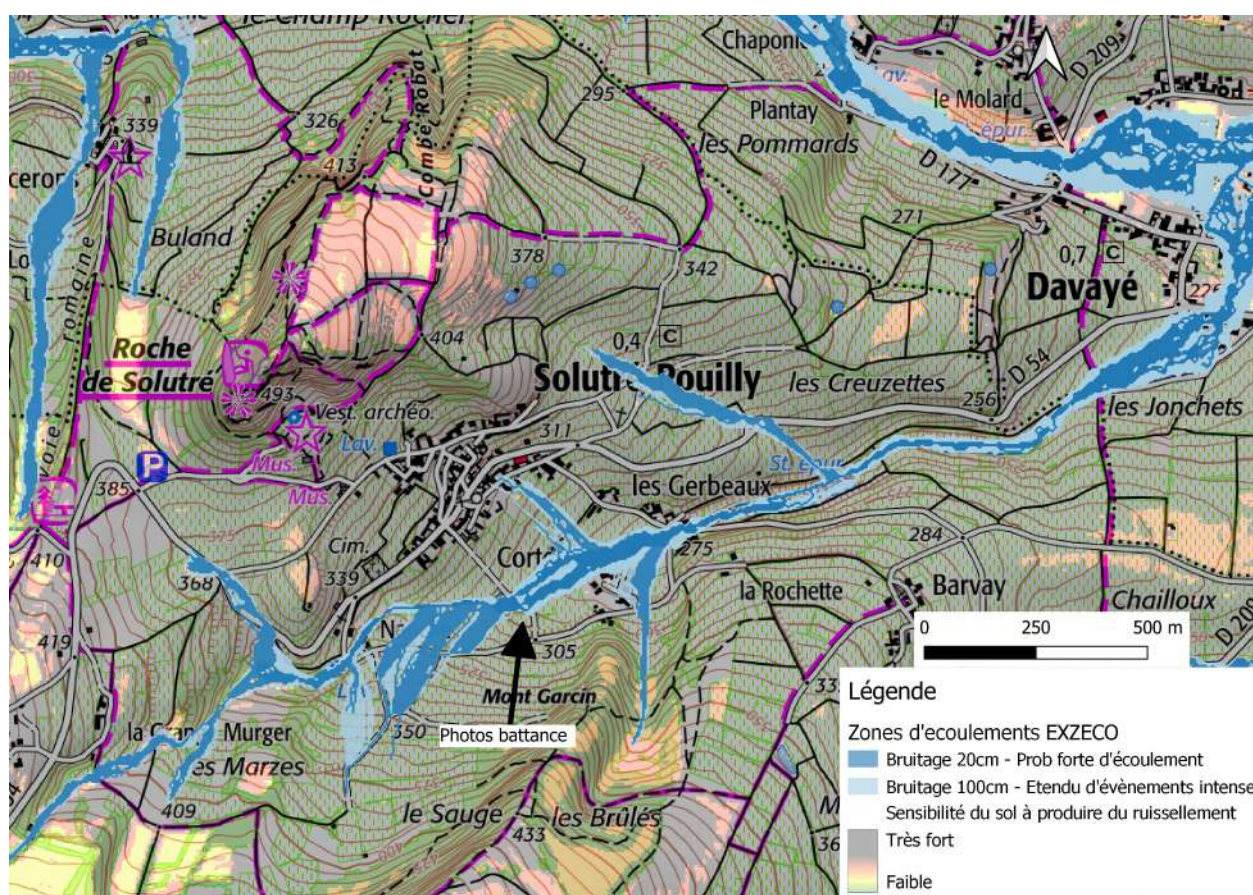


Illustration 27: Cartographie CRUS sur la commune de Solutré-Pouilly.

5.1.2 Secteur de Plottes

La topographie de la commune de Plottes est singulière, avec une route s'inscrivant dans le talweg au nord de la localité, bordée de coteaux couverts de vignes de part et d'autre.

La sensibilité très forte à produire du ruissellement s'explique par la nature pentue et battant du terrain et par l'occupation viticole. Le problème est amplifié par le fait que les écoulements des coteaux convergent vers la route, où ils sont canalisés et accélérés, sans pouvoir s'infiltrer. En cas d'orage, le village de Plottes, proche de l'exutoire, est exposé au risque de subir l'intégralité du ruissellement issu des coteaux.



Illustration 28: Illustration des phénomènes de battance en pied des vignes (Plottes - juillet 2022)

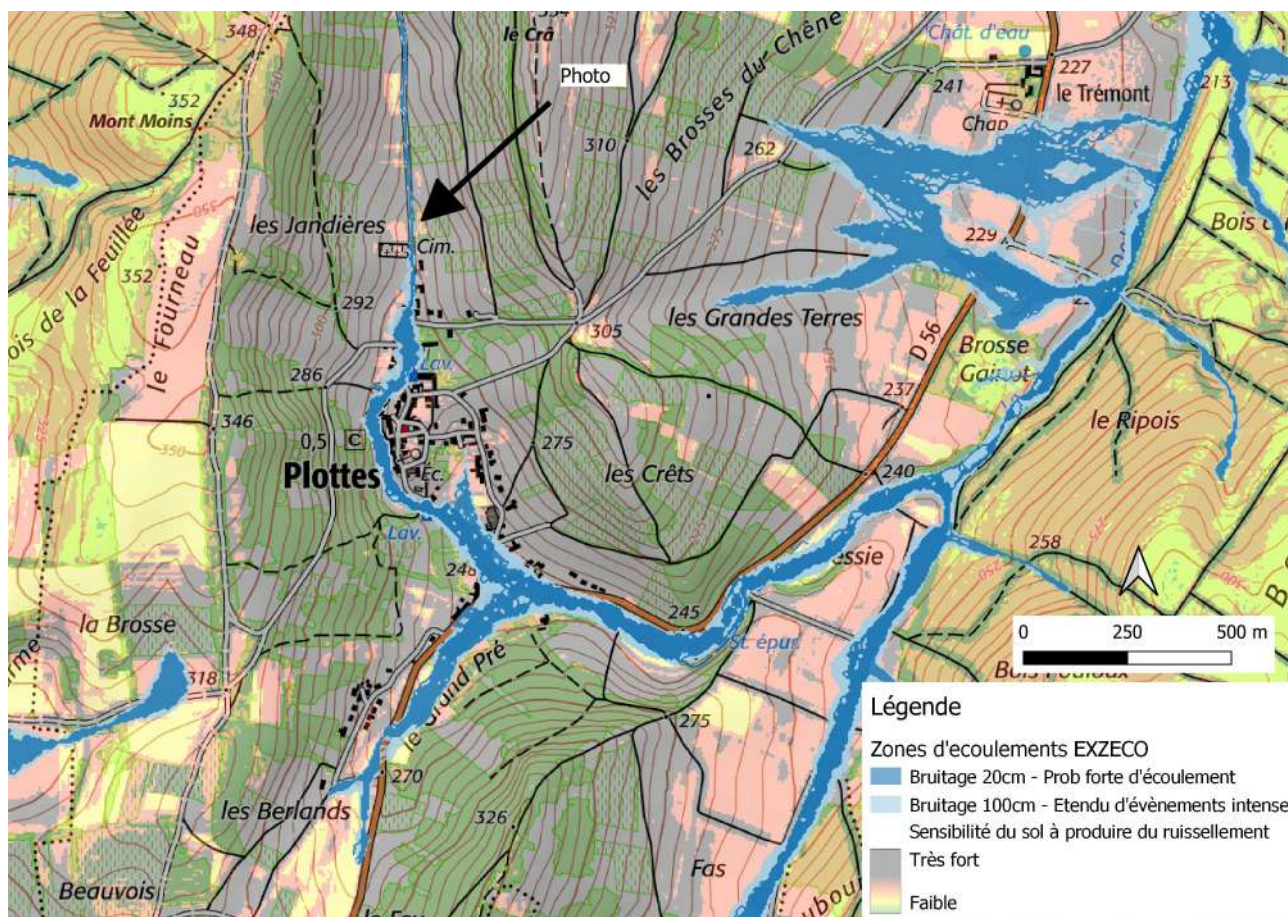


Illustration 29: Cartographie CRUS sur la commune de Plottes.

5.1.3 Secteur de Martailly-lès-Brancion

La localité de Martailly-lès-Brancion est située à l'interface de trois bassins versants qui ont une forme en entonnoir, débouchant directement dans la commune. Les coteaux à forte pente, recouverts de vignes, contribuent à la forte sensibilité de ces bassins versants. La configuration des lieux est propice à la génération de ruissellement, susceptible d'impacter la commune.

Au niveau des premières habitations, un bassin d'orage (illustration 30) a été mis en place, témoignant des problématiques de ruissellement provoquées par les parcelles viticoles situées dans les coteaux en amont.



Illustration 30: Bassin d'orage dans l'axe des écoulements, au dessus du village (Martailly lès Brancion - juillet 2022)

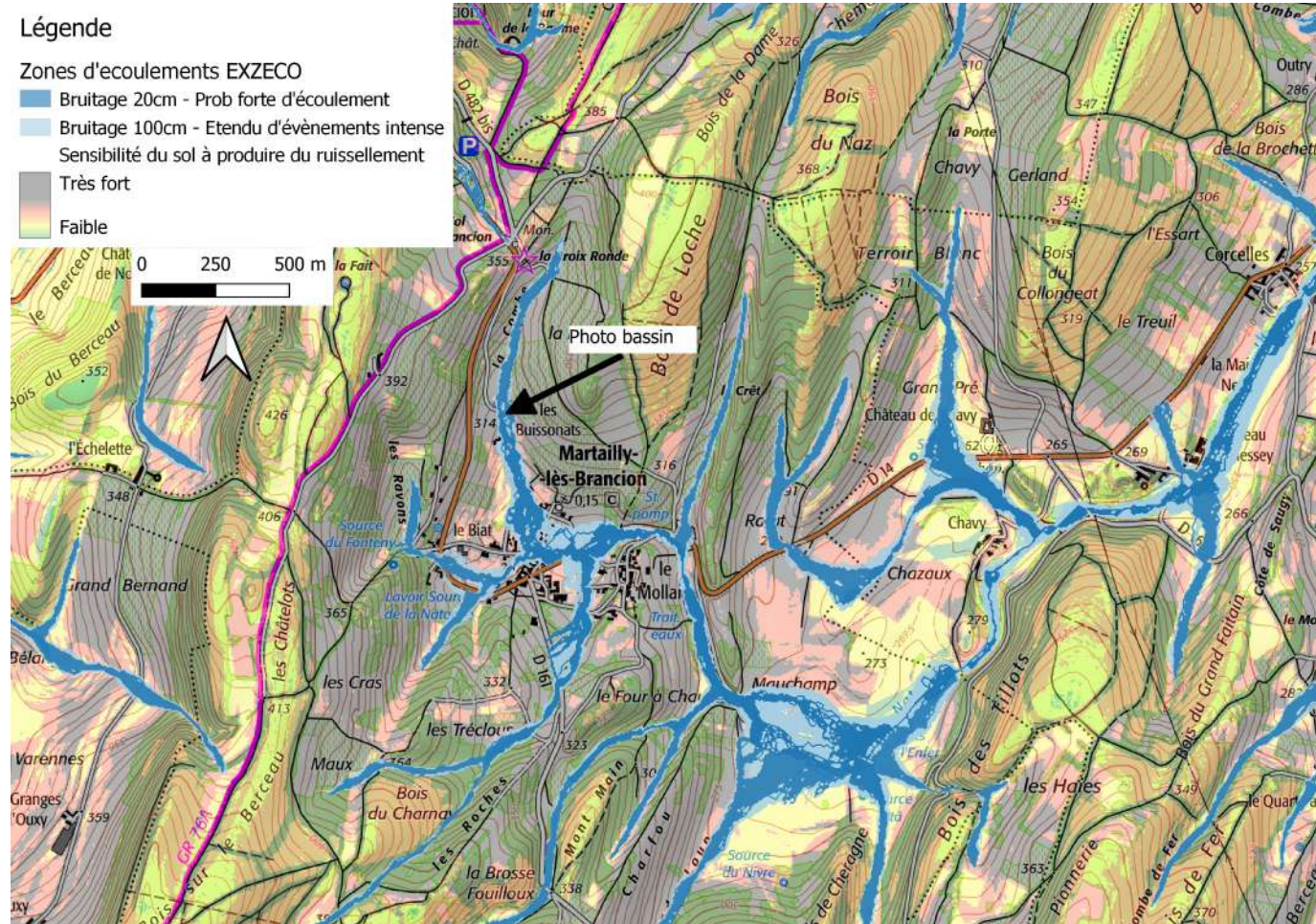


Illustration 31: Cartographie CRUS sur la commune de Martailly-lès-Brancion

5.1.4 Secteur de Bâgé-Dommartin

Un secteur a été tout particulièrement vérifié, celui de Charlemagne sur la commune de Bâgé-Dommartin, qui se trouvait sur une zone très plane, soumise à d'importants phénomènes de battance. Sur place, le Cerema a pu constater la présence de plusieurs petits bassins d'orage (illustration 32) et de fossés bien marqués au niveau du lotissement le plus récent. Les habitants consultés ont mentionné le remplissage des fossés et des bassins lors des fortes précipitations, et l'utilité de ces dispositifs.

Ici, la problématique diffère de celle vue précédemment. La topographie presque plane ne contribue pas à créer du ruissellement, d'où les sensibilités « faible » et « moyenne » présentes sur la carte CRUS. Seule l'occupation du sol, qui est agricole (le phénomène de battance se produit de la même manière que pour des vignes, avec des cultures plus ou moins propices à créer de la battance), ainsi que la battance génère du ruissellement. Ce secteur montre que même sans forte pente, il peut y avoir du ruissellement, mettant en évidence le rôle prépondérant de la battance dans sa création.



Illustration 32: Exemple de petit bassin d'orage construit lors de l'aménagement d'un lotissement sur la commune de Bâgé la Ville (juillet 2022)

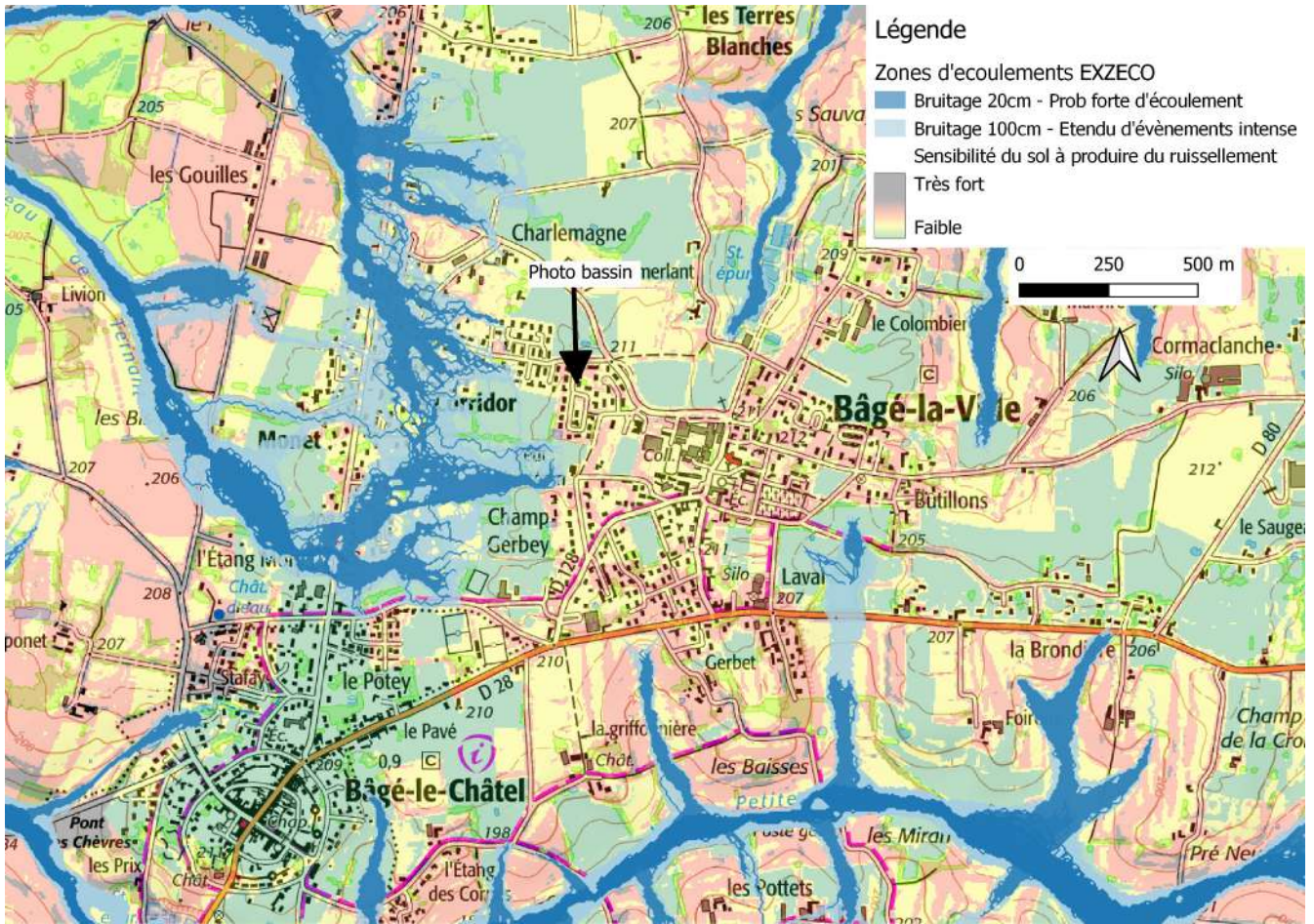


Illustration 33: Cartographie CRUS sur la commune de Bâgé-la-Ville.

5.2 Secteur du Beaunois-Chalonnais

Sur le même principe que pour le secteur du Mâconnais, nous sommes allés vérifier les zones qui ressortaient comme très sensibles à la production de ruissellement.

5.2.1 Secteur de Gevrey-Chambertin

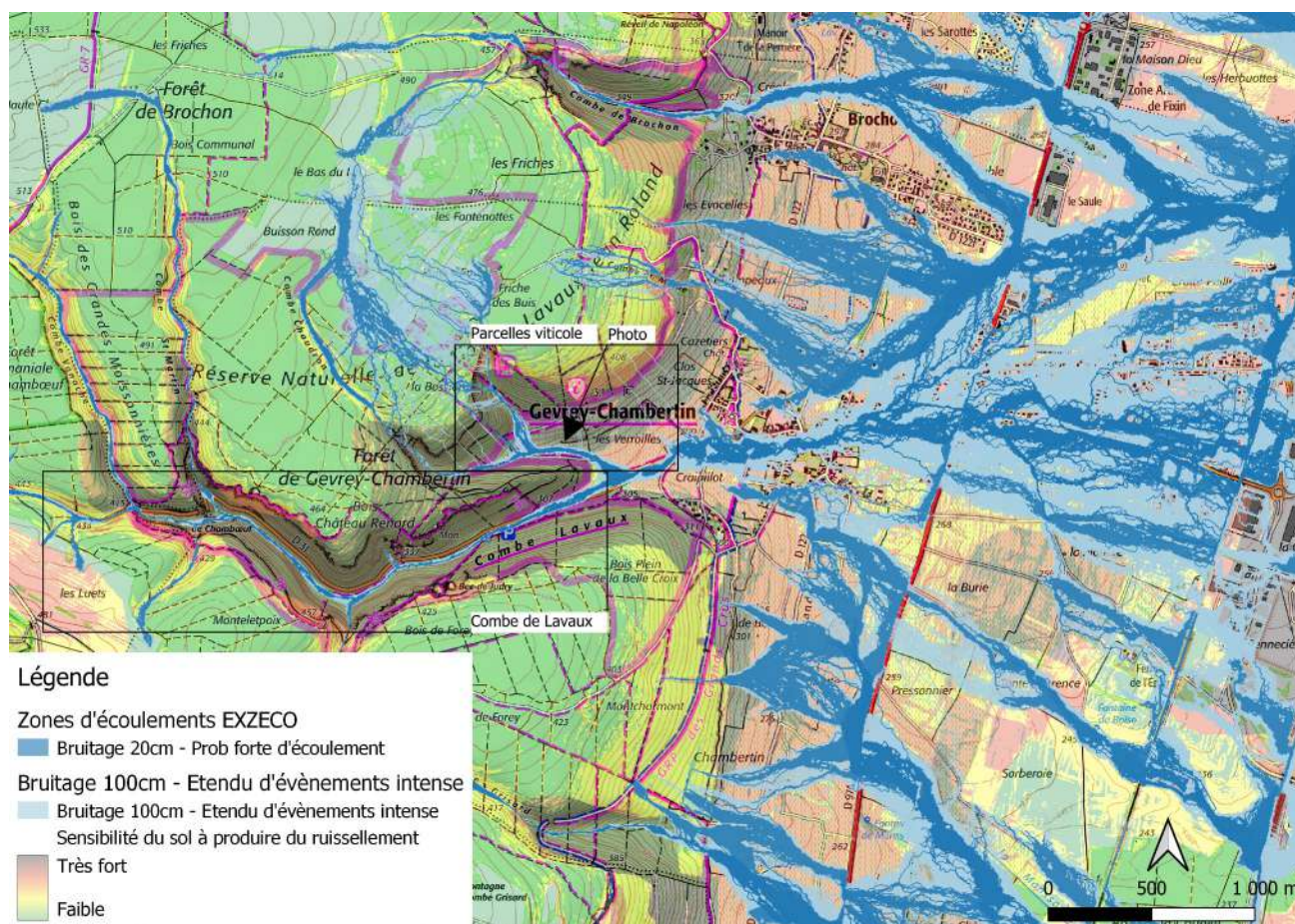


Illustration 34: Cartographie CRUS sur la commune de Gevrey-Chambertin.

La première zone sensible vérifiée sur notre cartographie est localisée à Gevrey-Chambertin. La commune se situe à l'exutoire de la Combe Lavaux, débutant au niveau de l'aiguillon de Chamboeuf (route RD31), et présente des parcelles viticoles directement en surplomb des aménagements urbains.

Les zones fortement et très fortement sensibles dans la Combe Lavaux résultent de la forte pente des gorges, mais elles ne participent pas à la création de ruissellement. Les parois des combes étant quasiment verticales, l'eau de pluie s'écoule directement dans le talweg, qui est recouvert par une forêt assurant un rôle de tampon et empêchant la formation de ruissellement, contrairement aux parcelles viticoles en amont qui sont propices au ruissellement.

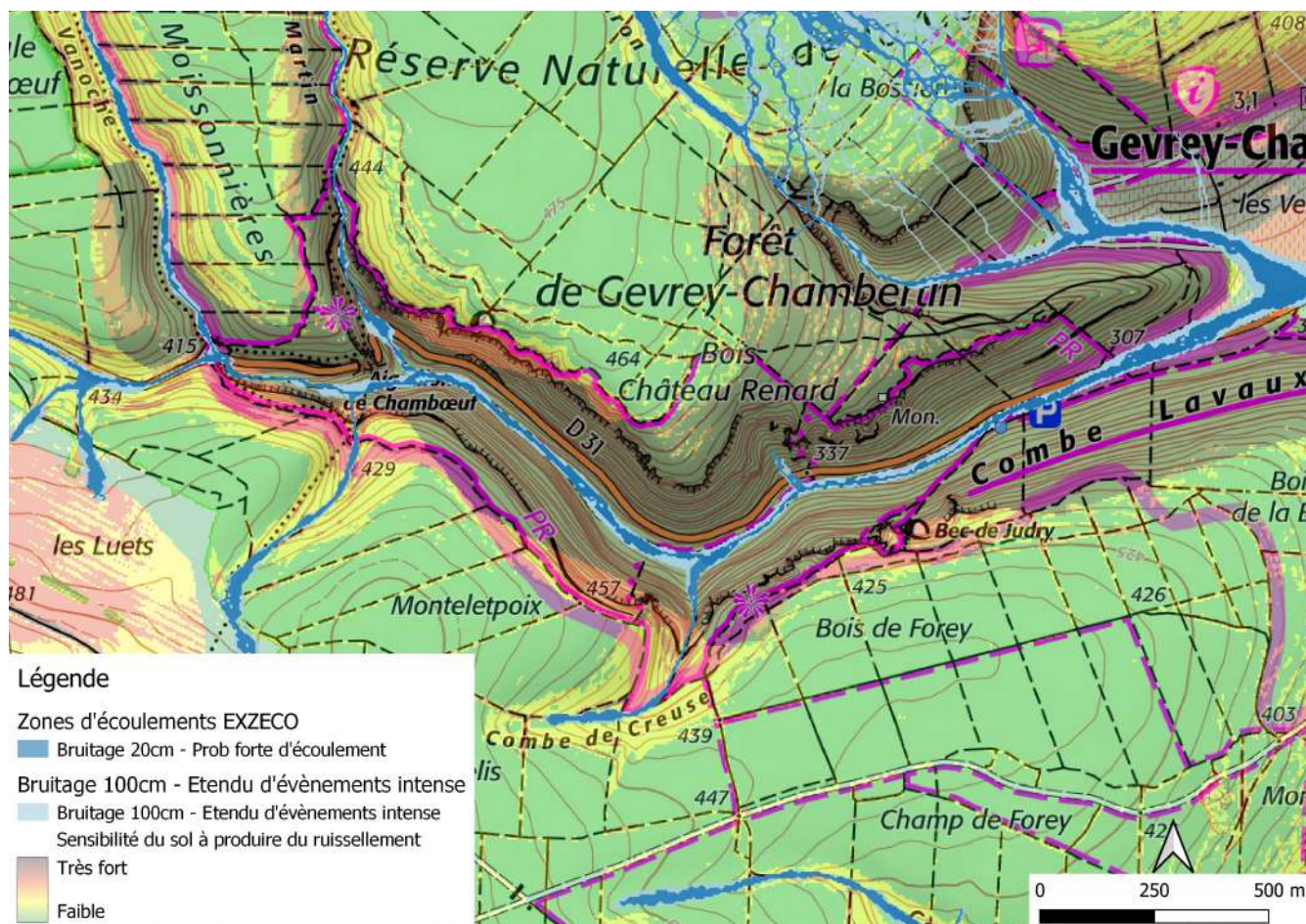


Illustration 35: Cartographie CRUS, zoom sur la Combe de Lavaux

Les parcelles viticoles en aplomb de Gevrey-Chambertin sont caractérisées par une pente marquée et une occupation du sol défavorable. En effet, la distance importante entre les rangs de vignes augmente les phénomènes de battance, ce qui favorise le ruissellement. De plus, les rangées de vigne sont plantées parallèlement au sens de la pente, favorisant ainsi, en cas de pluie, la mise en charge des sédiments et le ruissellement, ce dernier étant également « guidé » et accéléré par les inter-rangs.

Le ruissellement est généré sur le haut des parcelles viticoles là où la pente est la plus forte. La suite des parcelles viticoles situées dans la zone de transfert contribue à l'accélération de l'eau et à la mise en suspension des sédiments, amplifiant le phénomène de ruissellement jusqu'à la commune située à l'exutoire du bassin versant, où s'accumule l'eau.

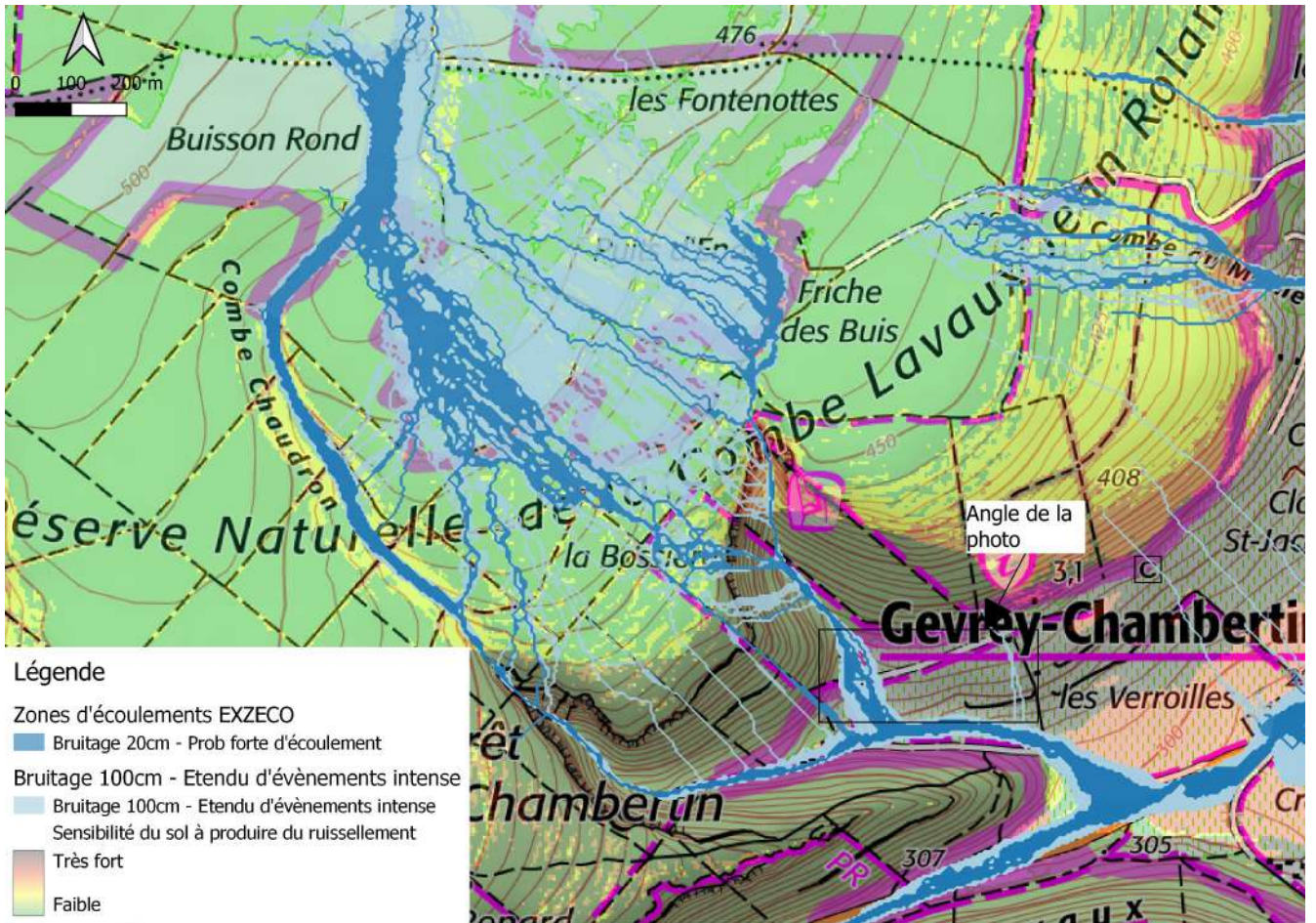


Illustration 36: Cartographie CRUS, zoom sur les parcelles viticoles en amont de Gevrey-Chambertin



Illustration 37: Photo de parcelles viticoles en amont de Gevrey-Chambertin (sur la D31).

5.2.2 Secteur de Rully

Nous avons effectué notre deuxième arrêt sur la route des grottes d'Agneux vers Bouzeron, sur les hauteurs d'Agneux, où nous avons constaté la présence d'un bassin de rétention.

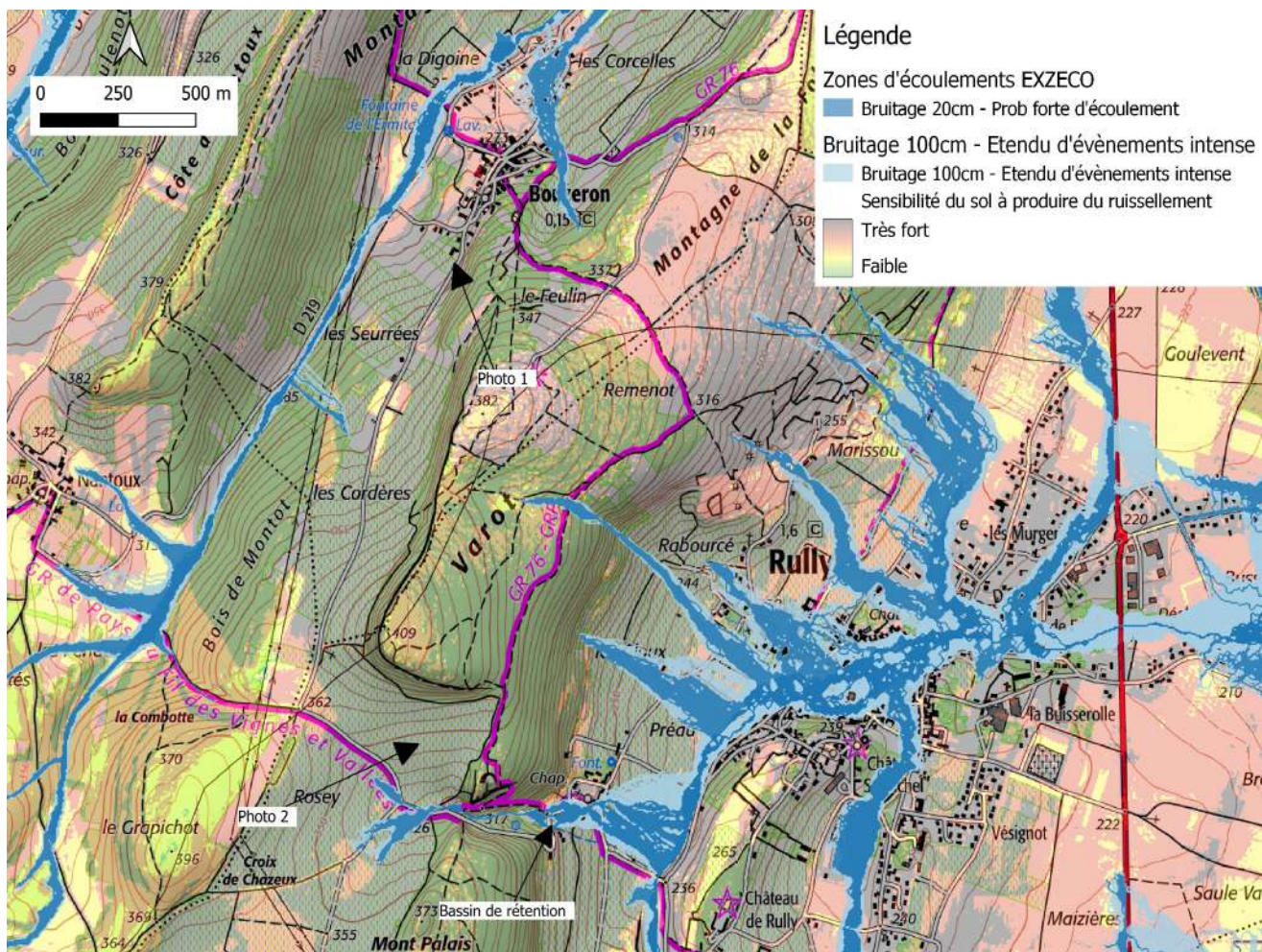


Illustration 38: Cartographie CRUS avec les axes de drainage entre les communes de Rully et de Bouzeron.

La première photo a été prise sur la RD219 en direction de Bouzeron. Bien que la cartographie indique une sensibilité élevée au ruissellement du sol (sensibilité très forte), les travaux de déforestation visant à implanter de nouvelles parcelles viticoles sur les hauteurs (zones les plus propices à générer du ruissellement) ont une forte probabilité d'accroître encore plus la sensibilité du sol.



*Illustration 39: Photo d'implantation de parcelle viticole sur la commune de Bouzeron.
(photo 1)*

Sur les hauteurs d'Agneux, la cartographie révèle des zones sensibles au ruissellement, allant de fort à très fort. Cette susceptibilité est expliquée par la présence de vastes parcelles viticoles dont les rangs suivent la pente, comme illustré sur la photo 2. À quelques centaines de mètres en aval, la présence d'un bassin de rétention atteste de possibles problèmes de ruissellement, une vérification qui se confirme à travers les zones d'écoulements provenant des parcelles et longeant la route jusqu'au bassin de rétention.



Illustration 40: Photo des parcelles viticoles en amont d'Agneux.



Illustration 41: Photo du bassin de rétention d'Agneux

5.2.3 Secteur de Mercurey

Le dernier arrêt dans cette région a eu lieu à Mercurey, près de l'étang Le Giroux. Selon la cartographie, une sensibilité moyenne à forte est observée au nord et à l'ouest de l'étang.

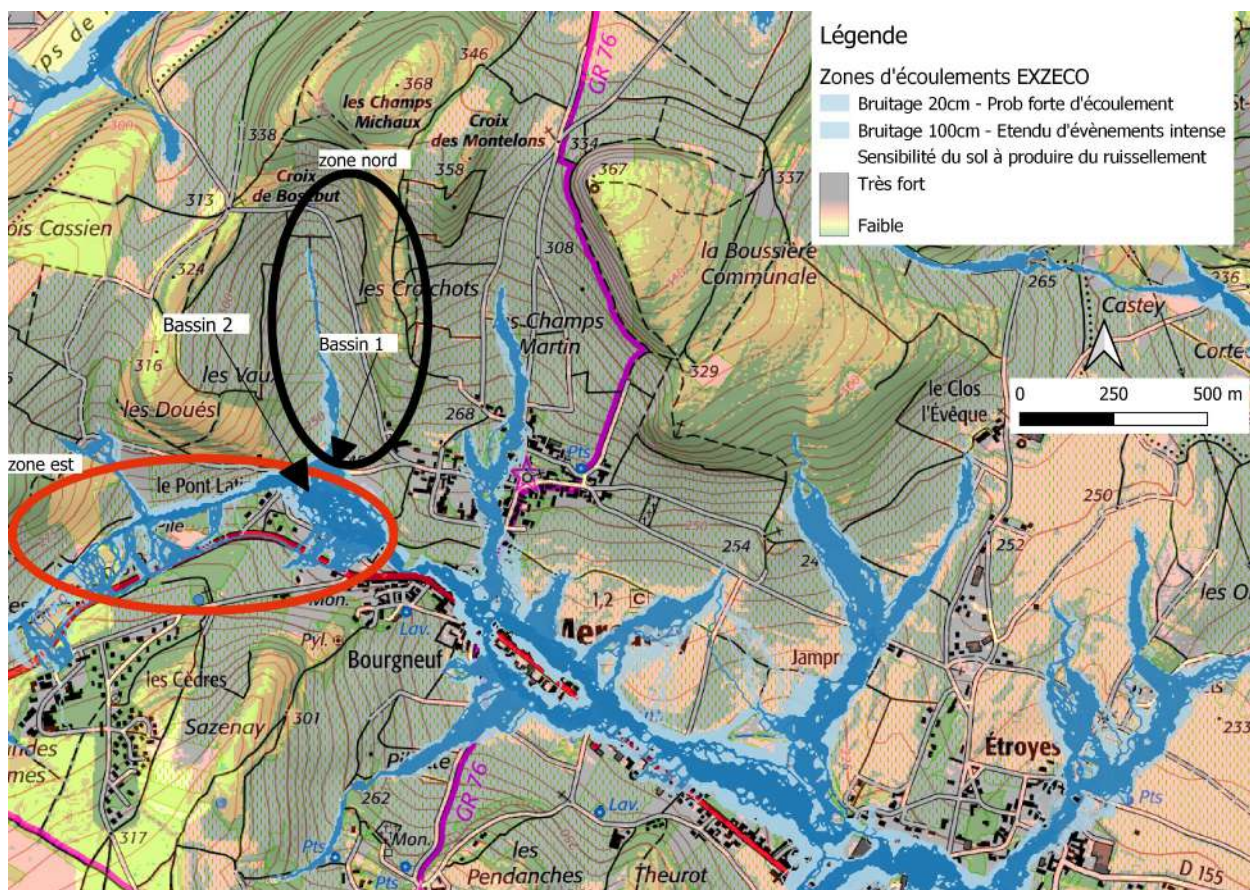


Illustration 42: Cartographie CRUS avec les axes de drainage sur la commune de Mercurey (zone nord dans le cercle noir et la zone est dans le cercle rouge)

La cartographie a été à nouveau vérifiée, dans la zone nord, nous avons pu observer la présence d'un bassin de rétention des eaux (bassin 1) visant à ralentir les écoulements et favoriser la décantation. La configuration du bassin-versant en forme « d'entonnoir », avec l'ensemble des écoulements se regroupant au niveau de l'exutoire, est propice à provoquer des inondations en cas de fortes pluies. La réalisation d'un bassin de rétention des eaux sur ce secteur atteste des problèmes rencontrés.



*Illustration 43: Photo du bassin (zone nord) à
Mercrey*



*Illustration 44: Photo depuis le haut du bassin versant en forme « d'entonnoir », avec en aval le village de
Mercrey. (source : google street view)*

La zone Est est également représentée comme une zone à sensibilité moyenne et forte. Cette sensibilité s'explique par la topographie et l'occupation du sol par des vignes directement en aplomb de l'aménagement urbain. On note à nouveau la présence d'un bassin (bassin 2) qui a pour objectif d'effectuer un premier stockage et une première décantation avant de rejoindre l'étang Le Giroux.



Illustration 45: Photo du bassin de rétention dans la zone est de Mercurey.

Les observations de terrain nous ont permis de confirmer la cartographie, où nous avons fréquemment constaté la présence d'aménagements visant à prévenir les inondations par ruissellement et les coulées d'eau boueuse, ce qui témoigne de problèmes déjà rencontrés.

CONCLUSION

L'étude réalisée pour le compte de la DREAL BFC a permis de mettre en évidence sur deux zones-tests, Mâconnais et Beaunois-Chalonnais, les secteurs prédisposés au ruissellement.

Les cartes CRUS ont mis en évidence la sensibilité des sols à la production du ruissellement, en utilisant à la fois les caractéristiques physiques et chimiques du sol (perméabilité et battance, issues de la pédologie), l'occupation des sols et la pente.

Les cartes Exzeco ont permis de mettre en évidence les principaux axes d'écoulements, identifiées grâce à un modèle probabiliste basé sur l'utilisation du modèle numérique de terrain RGE Alti au pas de 5 mètres. Une seconde donnée, issue d'Exzeco, permet d'identifier les zones d'accumulation des eaux de ruissellement les plus marquées, correspondant aux points bas topographiques (zones de cuvettes).

Ces cartographies ont vocation à être utilisées pour permettre une première approche du ruissellement à l'échelle de bassins versants. Elles permettent de visualiser géographiquement les interactions naturelles entre les secteurs du bassin versant produisant et recevant le ruissellement.

En fonction des zones du bassin versant (production, transfert ou accumulation), des solutions de réduction de la vulnérabilité peuvent être adoptées. Elles consistent à :

- limiter le ruissellement, permettre l'infiltration et le stockage de l'eau et ralentir la vitesse de l'eau dans les zones de départ du ruissellement ;
- ralentir l'eau et permettre la décantation des sédiments transportés dans les zones de transfert du ruissellement ;
- diriger et évacuer les eaux de ruissellement dans les zones de dépôts du ruissellement.

Des solutions spécifiques sont listées en annexe 1 (note d'accompagnement des cartes), et permettent de choisir les aménagements à réaliser, en fonction de la localisation du secteur étudié sur le bassin versant et de l'occupation des sols.

Pour conclure, il est rappelé que **ces cartes permettent une première lecture des phénomènes de ruissellement**, mais qu'elles doivent être confrontées avec des données historiques dès lors que celles-ci sont disponibles. **Ces cartes ne prenant pas en compte les éléments fins de la topographie, elles ne remplacent en aucun cas une modélisation fine des axes d'écoulement.**

ANNEXE 1 : NOTE D'ACCOMPAGNEMENT DES CARTES CRUS ET EXZECO

ANNEXE 2 : CARTOGRAPHIES DU SECTEUR MÂCONNAIS PAR GRANDS BASSINS VERSANTS

ANNEXE 3 : CARTOGRAPHIES DU SECTEUR BEAUNOIS-CHALONNAIS PAR GRANDS BASSINS VERSANTS

ANNEXE 4 : NOTICE DES DONNÉES CARTOGRAPHIQUES FOURNIES

ANNEXE 5 : BIBLIOGRAPHIE

- Cartographie du ruissellement de surface – Vincent Rémy, Manuel Collonges, Delphine Porcheron – Cerema (2020)
- Ruissellement sur l’Arc Méditerranéen, application de la méthode Exzeco – Notice – Cerema / DREAL PACA (2019)
- Les inondations par ruissellement - Guide CEPRI (2021)
- Guide de l’érosion, lutter contre l’érosion – Auteurs multiples (Agence de l’Eau Artois Picardie, chambre d’agriculture de région du Nord-Pas-de-Calais, Conseil Général du Nord, SOMEA) (2013)
- Gérer les inondations par ruissellement pluvial – guide de sensibilisation – CEPRI (2014)
- Plans de prévention des risques naturels (PPR) – les risques d’inondation, le ruissellement péri-urbain – Ministère de l’Ecologie et du Développement Durable (2003) + note d’information (2004)
- Les territoires face au ruissellement – Analyse des dispositifs et enseignements tirés de 4 études de cas – rapport Cerema (2018)
- Ruissellement et risque majeur – crue centennale en milieu urbanisé – Thèse de M. Guiton (1994)
- Évaluation et développement de la méthodologie IRIP de cartographie du ruissellement – application au contexte ferroviaire – Thèse de L.R. Lagadec (2016)
- Ruissellement dans l’arc Méditerranées – territoire test – Sainte Anastasie – rapport d’étude Cerema (2017)