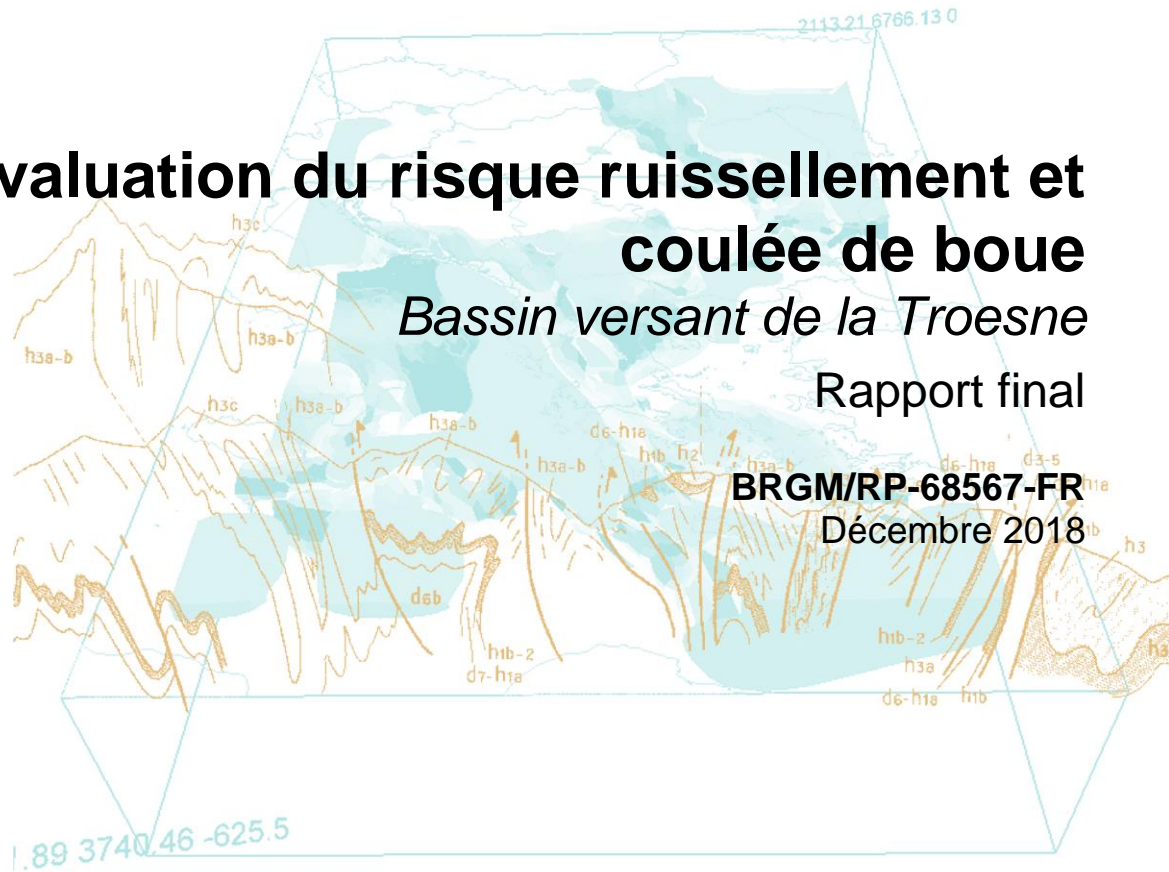




Evaluation du risque ruissellement et coulée de boue

Bassin versant de la Troesne

Rapport final



BRGM/RP-68567-FR
Décembre 2018



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document public

Evaluation du risque ruissellement et coulée de boue

Bassin versant de la Troesne

Rapport final

BRGM/RP-68567-FR
Décembre 2018

Landemaine Valentin

Vérificateur :

Nom : Olivier Cerdan

Fonction : Responsable unité risques
gravitaires

Date : 21/12/2018



Approbateur :

Nom : Pierre Pannet

Fonction : Directeur régional

Date : 21/12/2018



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : érosion ; ruissellement ; modélisation WaterSed ; coulées de boue ; aménagements ; risque.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Landemaine V. (2018) – Evaluation du risque ruissellement et coulée de boue. Bassin versant de la Troesne. Rapport final. BRGM/RP-68567-FR, 78 p.

Synthèse

Les coulées de boues et les inondations affectant les villages situés sur le bassin versant de la Troesne, dans l'Oise, sont les conséquences de plusieurs décennies de transformations des paysages ruraux, conduisant à une situation où l'agriculture conventionnelle, de type polyculture en paysage d'openfield exercée sur les plateaux limoneux, expose les bourgs s'étalant dans les fonds de vallée.

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est d'établir une cartographie du risque ruissellement et coulée de boue en vue d'identifier les zones exposées et de proposer des solutions permettant d'amoinrir le risque.

Après une phase de collecte de données et d'expertise sur le terrain visant à bien décrire le territoire d'étude, une cartographie de l'aléa ruissellement et coulée de boue est produite par une modélisation du ruissellement et de l'érosion pour une pluie de période de retour 100 ans. La finalité de cette carte est d'aiguiller les élus dans l'établissement ou la révision de documents d'urbanisme.

Le croisement de la carte d'aléa avec les enjeux actuels a abouti à la réalisation d'une cartographie du risque ruissellement et coulée de boue, permettant de hiérarchiser les communes les plus exposées et cibler les actions à mener.

Deux scénarios de mesures sont proposés, avec un scénario d'aménagements d'hydraulique douce et un scénario cumulant aménagements d'hydraulique douce et amélioration des pratiques culturales. L'impact de ces deux scénarios est quantifié par modélisation pour des événements de pluie de période de retour 10 ans, 20 ans, 50 ans et 100 ans.

Les enseignements tirés de la modélisation montrent que la mise en place de fascines à une densité de 0.8 fascine / km² permet de réduire, au droit des enjeux, l'érosion de 24% en moyenne. L'amélioration des pratiques culturales est un levier beaucoup plus fort dans la réduction du ruissellement et de l'érosion des sols, avec des abattements de 80% sur le ruissellement et de 92% sur l'érosion. L'accompagnement des agriculteurs dans cette direction est vraisemblablement la clef pour une gestion durable du risque ruissellement et coulée de boue.

Sommaire

1. Présentation du projet	9
1.1. CONTEXTE	9
1.2. OBJECTIFS	10
2. Etat des lieux	11
2.1. PRESENTATION DU TERRITOIRE D'ETUDE	11
2.2. HISTORIQUE DES EVENEMENTS MARQUANTS.....	22
2.3. ETUDES PRECEDENTES.....	23
2.4. EXPERTISE DE TERRAIN	25
3. Modélisation du ruissellement et de l'érosion des sols	27
3.1. METHODOLOGIE GENERALE	27
3.2. COLLECTE DES BASES DE DONNEES GEOGRAPHIQUES	28
3.3. PLUIES DE PROJET	28
3.4. PRETRAITEMENT DU MNT	29
3.5. OCCUPATION DES SOLS	30
3.6. FORMATIONS SUPERFICIELLES – SOLS.....	30
3.7. PARAMETRISATION DES UNITES SOLS – OCCUPATION DES SOLS	32
3.8. DONNEES EN ENTREE DU MODELE	37
3.9. CALIBRATION DU MODELE WATERSED	38
4. Aléa ruissellement et coulée de boues	39
4.1. EVALUATION L'ALEA COULEE DE BOUES.....	39
4.2. DEFINITION DE L'ENVELOPPE D'INONDATION PAR RUISSELLEMENT	45
5. Risque ruissellement et coulée de boue.....	50
5.1. INVENTAIRE DES ENJEUX	50
5.2. HIERARCHISATION DES ENJEUX.....	50
5.3. EVALUATION DU RISQUE.....	51
6. Propositions de mesures.....	55
6.1. POSITIONNEMENT ET PARAMETRISATION DES MESURES	56
6.2. IMPACT DES SCENARIOS SUR LA PARCELLE AGRICOLE	57
6.3. IMPACT DES SCENARIOS DANS LE TALWEG	59
7. Conclusion.....	64
8. Bibliographie	65

Liste des figures

Figure 1 : Photographies illustrant la coulée de boue survenue à Valdampierre en juillet 2014 (source : Mairie de Valdampierre).....	9
Figure 2 : (A) Localisation du bassin der la Toresne ; (B) EPCI et communes sur le périmètre d'étude.	13
Figure 3 : (A) Topographie et (Pente) du bassin de la Troesne (BD ALTI 5m IGN).	14
Figure 4 : (A) Géologie et (B) occupation des sols du bassin de la Troesne	16
Figure 5 : Répartition de l'occupation des sols sur le périmètre d'étude.....	17
Figure 6 : Evolution des différentes cultures entre 1970 et 2010 (source : Registre Général Agricole).	18
Figure 7 : (A) Principaux sous-bassin de la Troesne et (B) Pente longitudinale des axes de ruissellement drainant uen superficie supérieure à 20 ha.	19
Figure 8 : Profil topographique longitudinal des principaux sous-bassins de la Troesne.	20
Figure 9 : Statistiques sur les températures mensuelles à Jaméricourt (source : infoclimat.fr)..	21
Figure 10 : Statistiques sur les précipitations mensuelles à Jaméricourt (source : infoclimat.fr)	21
Figure 11 : Nombre total d'arrêtés CatNat « inondations et coulées de boues » par commune sur la période 1984 à 2016.	22
Figure 12 : Chronologie des arrêtés CatNat relatifs aux inondations et coulées de boues par commune sur la période 1984 – 2016.	24
Figure 13 : Axes de ruissellement issues de la BD TOPO complétés par des levés sur le terrain.	25
Figure 14 : Proportion des différentes classes d'axes de ruissellement	26
Figure 15 : (A) MNT brut ne tenant pas compte de l'impact d'un chemin sur l'écoulement des eaux et (B) MNT corrigé avec prise en compte du chemin.	29
Figure 16 : Extrait de la cartographie de l'occupation des sols de la Troesne au 1/10 000ème.	30
Figure 17 : (A) Principales formations superficielles et (B) Pôle de texture du sol associé.	31
Figure 18 : Principe général de paramétrisation du modèle WaterSed.	32
Figure 19 : Méthode d'évaluation de l'état de surface d'une culture selon la couvert végétal, le faciès sédimentaire et la rugosité du sol.	33
Figure 20 : Extrait de la cartographie des masses de terre transférées simulées par le modèle WaterSed pour une pluie de 1h de période de retour 100 ans et pour une occupation des sols avec des cultures seulement représentées par des cultures d'hiver.....	39
Figure 21 : Erosion concentrée locale calculée à partir du modèle Watersed et représentée en fonction l'aire drainée.	40
Figure 22 : Masse de terre transférée et pente de chacun des 2 387 axes de ruissellement identifiés. A partir de classes de masse de terre transférée et de pente (valeurs limites en gras), l'aléa coulée de boue est déterminé selon 4 classes.	40
Figure 23 : Cartographie de l'aléa coulée de boue sur le bassin de la Troesne.	41
Figure 24 : Evolution de l'aléa coulée de boue depuis les plateaux agricoles jusque dans les talwegs secs.....	42
Figure 25 : Distribution du linéaire total d'axe de ruissellement par classe d'aire drainée avec une distinction de l'aléa coulée de boue sur le linéaire de chaque classe d'aire drainée.	43

Figure 26 : Distribution du linéaire total d'axe de ruissellement par commune avec une distinction de l'aléa coulée de boue sur le linéaire de chaque commune.	44
Figure 27 : Extrait de la cartographie des débits de pointe simulés par le modèle WaterSed pour une pluie de 1h de période de retour 100 ans et pour une occupation des sols avec des cultures seulement représentées par des cultures d'hiver.	45
Figure 28 Cartographie des 4 907 profils en travers répartis sur les principaux axes de ruissellement du bassin de la Troesne.	46
Figure 29 : Evaluation de l'emprise de l'inondation par considération des axes de ruissellement naturels et anthropiques.	47
Figure 30 : Cartographie des zones inondées sur le bassin de la Troesne.	48
Figure 31 : Largeur d'écoulement des eaux de ruissellement calculée au niveau des 4 907 profils en travers et classée en fonction de l'aire drainée.	49
Figure 32 : Surface totale inondée par commune.	49
Figure 33 : Nombre total de bâtiments par commune classé suivant le risque de ruissellement et de coulée de boue.	52
Figure 34 : Linéaire total de réseau routier et ferré par commune classé suivant le risque de ruissellement et de coulée de boue.	53
Figure 35 : Emprise de l'inondation suite à une pluie de 1h (période de retour 100 ans) et risque ruissellement et coulée de boue sur les enjeux bâti au niveau du bourg de Valdampierre.....	54
Figure 36 : Pluie nette et masse totale de terre érodée pour cha avec un détail sur la contribution de chaque classe d'occupation des sols.	58
Figure 37 : Distribution des abattements sur le débit de pointe et la masse de terre transférée pour les 4 évènements de pluie, pour le scénario 2 et le scénario 3, par rapport au scénario 1 (référence).....	59
Figure 38 : Débits de pointe au droit de 35 points de contrôle pour 4 évènements de pluie de temps de retour 10ans, 20ans, 50 ans et 100ans..	61
Figure 39 : Masse de terre transférée au droit de 35 points de contrôle pour 4 évènements de pluie de temps de retour 10ans, 20ans, 50 ans et 100ans.	62
Figure 40 : Distribution des abattements sur le débit de pointe et la masse de terre transférée par évènements de pluie et pour le scénario 2 et le scénario 3, par rapport au scénario 1 (référence).	63
Figure 41 : Procédure de construction de la cartographie de l'occupation des sols.	69

Liste des tableaux

Tableau 1 : Communes du bassin versant de la Troesne	11
Tableau 2 : Communes limitrophes du bassin versant de la Troesne	11
Tableau 3 : Liste des bases de données nécessaires à la modélisation	28
Tableau 4 : Liste des bases de données annexes	28
Tableau 5 : Cumul pour une pluie de 1h et pour différentes période de retour à la station de Jaméricourt (source : Météo-France).....	28
Tableau 6 : Principales formations superficielles sur le bassin de la Troesne et pôle de texture du sol associé	32
Tableau 7 : Calendrier cultural spécifiant par type de culture et type de sol, l'état de surface du sol. Le mois de juillet correspond au mois où sont effectuées les simulations. Les mois de semi et de récolte sont surlignés par type de culture, en jaune et en vert respectivement.....	35
Tableau 8 : Table de détermination des pertes initiales (imbibition) au début d'un événement pluvieux par croisement de la capacité d'infiltration mensuelle et de la hauteur de pluie antécédente à 48h.....	35
Tableau 9 : Table de détermination des propriétés hydrodynamiques et érosives de chaque unité sol-occupation des sols.....	36
Tableau 10 : Hiérarchisation des enjeux face selon leur importance face à une crise provoquée par du ruissellement et des coulées de boues.....	50
Tableau 11 : Méthode d'évaluation du risque de ruissellement et de coulée de boue à partir du niveau d'importance des enjeux et de l'aléa.....	51

Liste des annexes

Annexe 1 Cartographie de l'occupation des sols	67
Annexe 2 Clef de conversion formation superficielle – texture de sol.....	70
Annexe 3 Atlas des axes de ruissellement.....	72
Annexe 4 Atlas de l'aléa ruissellement et coulée de boue	73
Annexe 5 Atlas du risque de ruissellement et coulée de boue.....	74
Annexe 6 Atlas des propositions d'actions	75

1. Présentation du projet

1.1. CONTEXTE

L'érosion hydrique est un des processus majeurs de la dégradation des sols, à l'origine d'une perte annuelle de sol estimée en moyenne en France à 1,5 t/ha/an avec une très forte hétérogénéité spatiale suivant les interactions existant entre la topographie, les sols, l'occupation des sols, le climat et les activités anthropiques.

La dégradation des sols par le ruissellement et l'érosion des sols est la conséquence de plusieurs décennies de modifications des paysages ruraux depuis les années 1960. Le passage d'une agriculture extensive à une agriculture intensive mécanisée s'est traduite par une augmentation de la surface des terres arables au détriment des prairies, un agrandissement des parcelles agricoles par l'arrachage des haies et la suppression de talus, une simplification des systèmes culturaux, ou encore le drainage des fonds de vallées. Ces transformations favorisent alors le départ de terre arable, provoquant une dégradation des propriétés agronomiques des sols (fertilité, biodiversité, etc.) et une dégradation de la qualité des eaux et des habitats aquatiques des masses d'eaux réceptrices situées plus à l'aval (rivières, lacs, etc.). Lors d'évènements pluviométriques intenses, ces transferts peuvent prendre la forme d'inondations et de coulées de boues dévastatrices, mettant en péril les personnes et les biens, mais aussi l'équilibre écologique des zones humides impactées.

L'exposition des enjeux à ces phénomènes violents est également la conséquence de plusieurs décennies d'étalement urbain et de grignotage des terres agricoles, notamment dans des zones exposées (proximité immédiate de cours d'eau, fond de vallée sèche, etc.). L'imperméabilisation des sols modifie les processus d'écoulement des eaux, favorisant un ruissellement rapide en surface au détriment de l'infiltration de l'eau dans le sol.

L'ensemble de ces transformations favorise en conséquence les risques d'inondations et de coulées de boue. Ce risque est aggravé par un contexte de changement global où les scénarios climatiques indiquent une augmentation de la fréquence et de l'intensité des épisodes pluvieux violents au cours des prochaines décennies.



Figure 1 : Photographies illustrant la coulée de boue survenue à Valdampierre (60) en septembre 2014 (source : Mairie de Valdampierre)

Le département de l'Oise ne fait pas exception. Ces dernières années ont été marquées par un nombre significatif d'inondations et de coulées de boues suite à de fortes pluies, avec de nombreux villages sinistrés, comme celui de Valdampierre en 2014.

1.2. OBJECTIFS

Face à ces catastrophes, la Direction Départementale des Territoires de l'Oise (DDT60) souhaite disposer d'une cartographie des ruissellements et de l'érosion des sols dans le secteur du bassin versant de la Troesne où une sensibilité importante à ces aléas a déjà été établie (Rapport BRGM/RP-55103-FR, 2006).

A travers cette étude, la DDT60 souhaite identifier les zones de risque (talweg et exutoire) pour une intégration dans les documents de planification (SCoT¹, PLUi², etc.) et définir les aménagements à réaliser pour assurer la gestion du risque coulée de boue à l'échelle du bassin versant.

Pour atteindre cet objectif, cette étude se décline en cinq phases distinctes :

- 1) Un état des lieux des bassins versants étudiés avec un recueil des données physiques, administratives et réglementaires ;
- 2) Un diagnostic de terrain visant une bonne description des chemins d'écoulement des eaux au sein des bassins versants pour la quantification de l'aléa ruissellement / érosion et visant à une bonne évaluation des enjeux sur le territoire concernés ;
- 3) Une quantification du ruissellement et de l'érosion pour différents temps de retour en période hivernale et estivale aboutissant à une cartographie de l'aléa coulée de boue à une échelle de 1/10 000ème sur fond topographiques agrandis des scans 25 de l'IGN ;
- 4) Une cartographie des enjeux à une échelle de 1/10 000ème sur fonds topographiques agrandis des scans 25 de l'IGN permettant d'identifier les zones de risque sur l'ensemble du bassin de la Troesne ;
- 5) Un schéma d'aménagement dimensionné à l'échelle du bassin versant utilisant des techniques alternatives (aménagements d'hydraulique douce, mares, pratiques culturales) limitant les transferts hydro-sédimentaires à l'amont et réduisant ainsi le risque d'inondation et de coulée de boues des villages situés à l'aval.

¹ SCoT : Schéma de Cohérence Territoriale

² PLUiH : Plan Local d'Urbanisme intercommunal

2. Etat des lieux

2.1. PRESENTATION DU TERRITOIRE D'ETUDE

2.1.1. Situation géographique

Le bassin versant de la Troesne est situé à environ 25 km au sud-ouest de Beauvais, dans le département de l'Oise (Région des Hauts-de-France) (Figure 2). La superficie du bassin versant est de 300 km², concerne principalement 41 communes réparties sur trois EPCI (Tableau 1). La population totale est d'environ 22 500 habitants (BD TOPO IGN), avec 3 217 habitants à Chaumont-en-Vexin, chef-lieu de canton (INSEE, 2015). Le bassin versant de la Troesne intègre partiellement 13 communes limitrophes (

Tableau 2).

Tableau 1 : Communes du bassin versant de la Troesne

Nom Commune	EPCI	Nom Commune	EPCI
Trie-Château	CC du Vexin-Thelle	Monneville	CC du Vexin-Thelle
Trie-la-Ville		Tourly	
Enencourt-Léage		Liancourt-Saint-Pierre	
Boutencourt		CC du Pays de Bray	Le Vaumain
Jaméricourt			Labosse
Chaumont-en-Vexin			Le Vauroux
Enencourt-le-Sec		CC des Sablons	Villotran
Hardivilliers-en-Vexin			La Neuville-Garnier
Jouy-sous-Thelle			Beaumont-les-Nonains
Thibivillers			Valdampierre
Porcheux			Ressons-l'Abbaye (La Drenne)
La Houssoye			Fresneaux-Montchevreuil
Troussures			Pouilly
Le Mesnil-Théribus			Saint-Crépin-Ibouvillers
Bachivillers			Ivry-le-Temple
Boissy-le-Bois			Villeneuve-les-Sablons
Loconville			Hénonville
Fay-les-Etangs	Neuville-Bosc		
Senots			
Fresne-Léguillon			
Fleury			

Tableau 2 : Communes limitrophes du bassin versant de la Troesne

Nom Commune	EPCI	Nom Commune	EPCI
Gisors	CC du Vexin-Thelle	Auneuil	CA du Beauvaisis
Chambors		Auteuil	
Delincourt		La Neuville-d'Aumont (La Drenne)	CC du Pays de Thelle
Reilly		Chavençon	
Troussures		Amblainville	CC des Sablons
Flavacourt	CC du Pays de Bray	Berville	CC de la Vallée du Sausseron
Lalandelle			

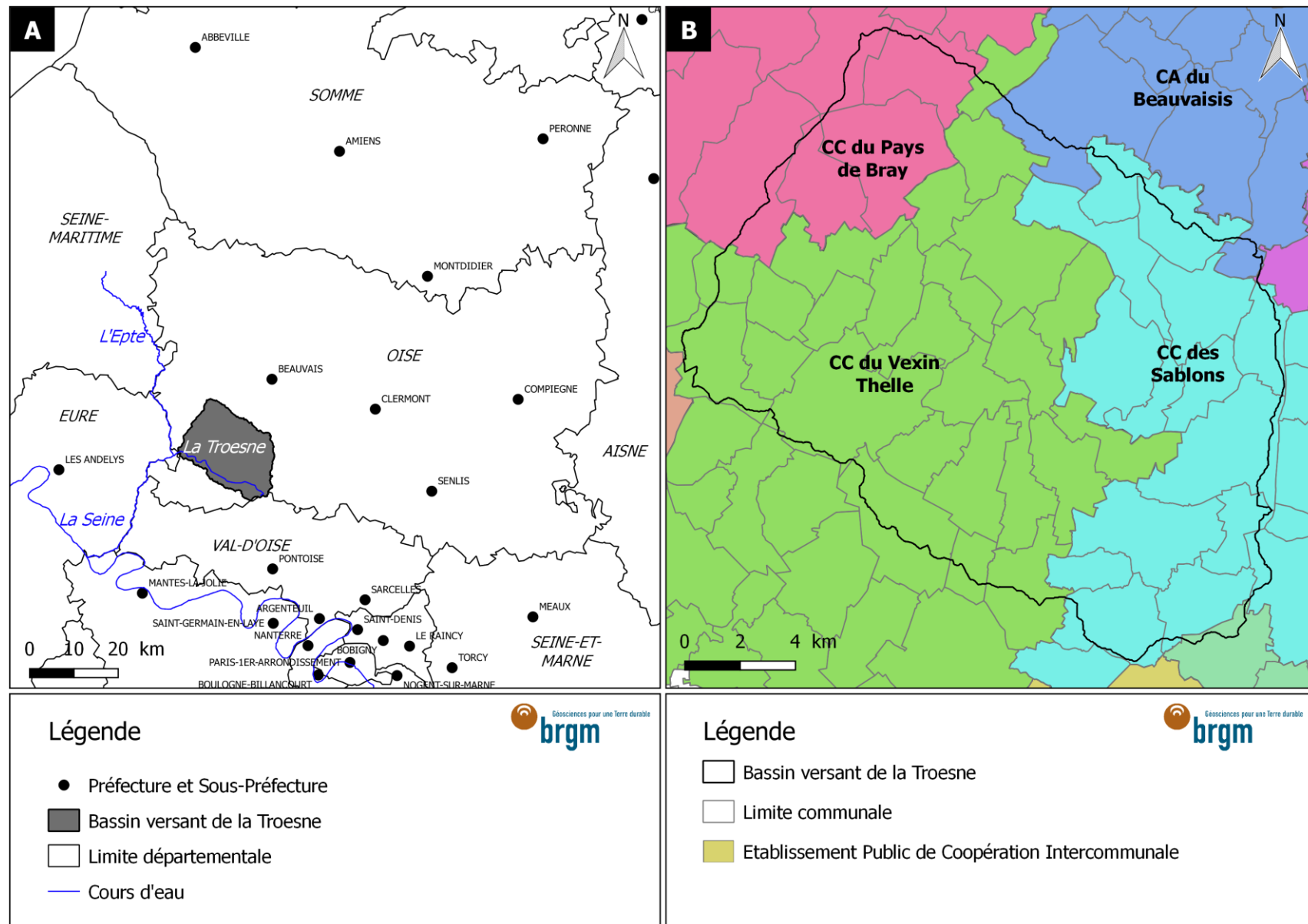


Figure 2 : (A) Localisation du bassin de la Troesne ; (B) EPCI et communes sur le périmètre d'étude.

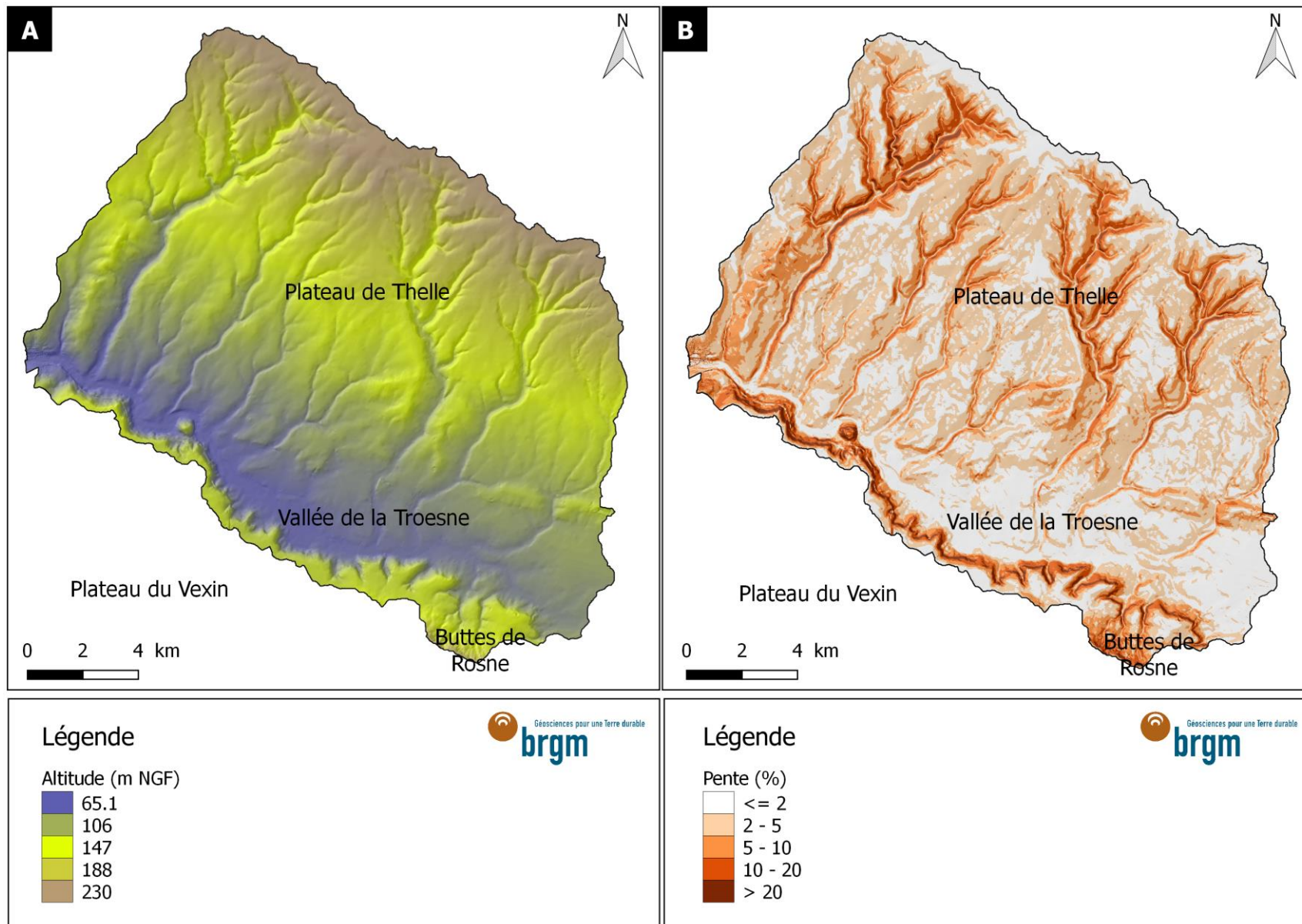


Figure 3 : (A) Topographie et (Pente) du bassin de la Troesne (BD ALTI 5m IGN).

2.1.2. Topographie et géomorphologie

Le relief du bassin versant de la Troesne est caractéristique d'un relief dissymétrique de cuesta (cuesta du Vexin). Différentes unités peuvent être identifiées (Figure 3) :

- Le Plateau du Thelle au nord : large plateau à pente douce (0-5%) incliné vers le sud-ouest en direction de la vallée de la Troesne. Ce plateau est marqué par un réseau de vallée et vallons étroits à forte pente, parallèles les uns aux autres et orientés perpendiculairement à la vallée de la Troesne. Dans ces vallées, les pentes peuvent atteindre 20%. A la limite nord du bassin, à la frontière avec le Pays de Bray, l'altitude atteint environ 230 m.
- Les versants au sud : versants courts à forte pente (> 20%) occupant la frange sud du bassin. Au sommet de ces versants, l'altitude atteint environ 140 m et grimpe au sud-est à 217 m au niveau des Buttes de Rosne. Ces reliefs marquent la ligne de partage des eaux du bassin versant de la Troesne et la limite avec le Plateau du Vexin.
- La vallée de la Troesne : vallée de direction est-ouest où s'écoule la Troesne, coincée entre le Plateau du Thelle et les Buttes de Rosne.

2.1.3. Géologie et pédologie

La cartographie des formations géologiques sur le territoire d'étude est représentée sur la Figure 4A et une description est présentée ci-dessous depuis les formations les plus anciennes vers les plus récentes.

Le substratum géologique du plateau de Thelle est représentée par des formations marno-craeuses d'âge Crétacé. Dans le détail, il s'agit de craie glauconieuse (Cénomanién), de craie marneuse (Turonien) et de craie blanche à silex (Sénonien, Coniacien, Santonien et Campanien). Ces formations affleurent essentiellement sur les flancs orientaux des nombreuses vallées dissymétriques orientées nord - sud. Sur les plateaux, la craie saine n'est généralement atteinte qu'à un ou plusieurs mètres de profondeur, car elle est altérée et fragmentée en surface.

Sur le plateau, les formations d'âge Tertiaire (Paléocène à Oligocène) correspondent à des dépôts détritiques remaniant les produits de démantèlement de la craie (silex). Il s'agit de calcaires et de conglomérats de Jaméricourt, de faible épaisseur (0 à 2m) d'âge Montien et les sables de Bracheux d'âge Thanétien de plus forte épaisseur (0 à 10m). Un placage d'argile beige d'âge Sparnacien est également observé entre Flavacourt et Boutencourt.

Les formations superficielles sont principalement représentées par des limons à silex à forte charge caillouteuse, reposant sur les argiles à silex. La charge caillouteuse comprend des galets thanétiens et des silex roulés et brisés de toutes dimensions. Les limons peuvent prendre un caractère argileux en présence d'argile Sparnacienne ou sableux sur les sables Thanétien. Les formations colluviales se retrouvent principalement dans les fonds de vallée sèche, issue d'une accumulation limoneuse hétérogène pouvant contenir des silex, des sables et des galets. Plus à l'aval, les alluvions anciennes et modernes tapissent les vallées.

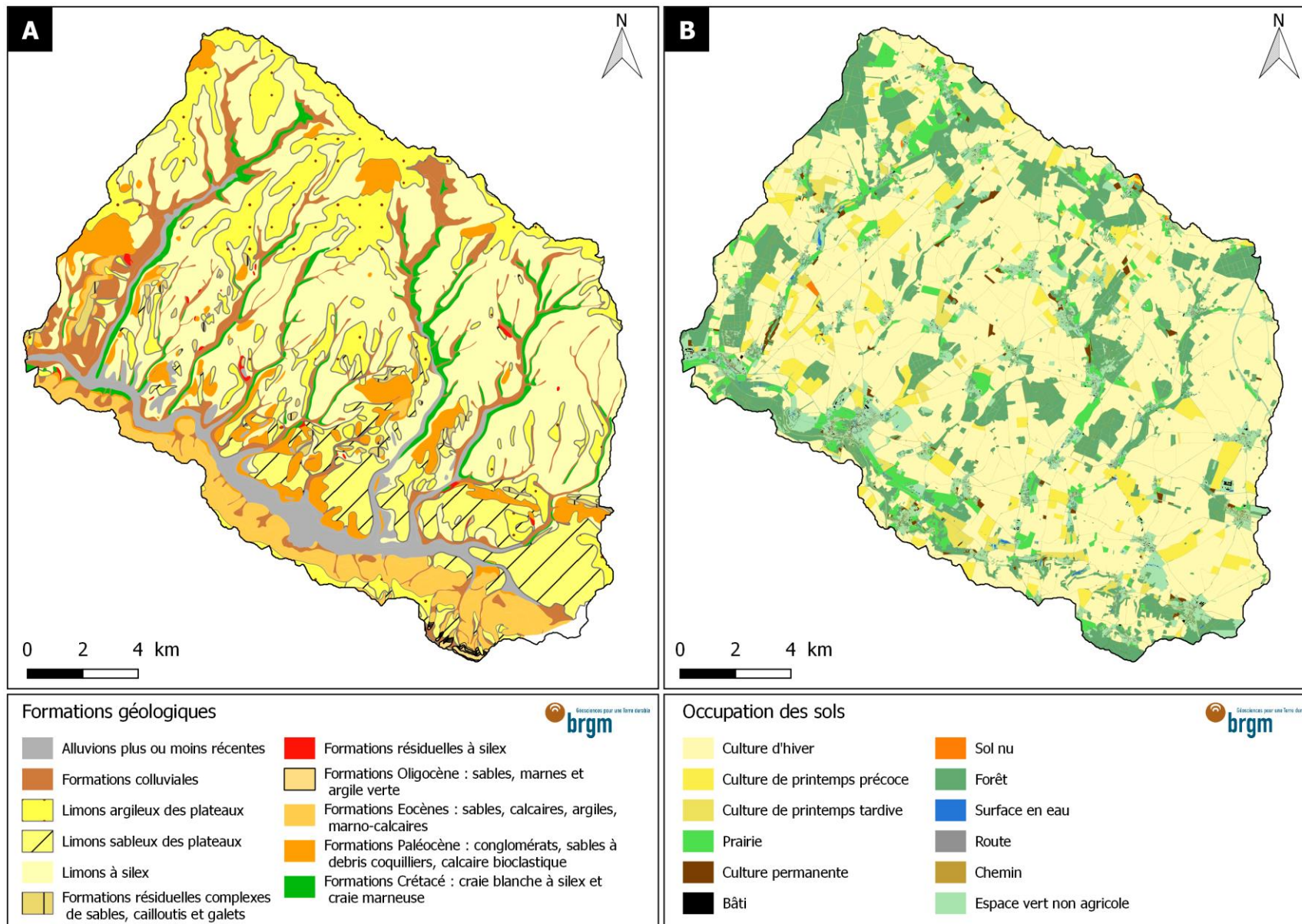


Figure 4 : (A) Géologie et (B) occupation des sols du bassin de la Trosne

2.1.4. Occupation des sols

Les paysages du plateau de Thelle sont caractérisés par l’alternance d’espaces cultivés ouverts et de boisements. Les villages et hameaux sont nombreux et reliés par un réseau dense de petites routes. Ils sont généralement implantés en rive droite des rus, sur le versant en pente douce des vallées qui est cultivé dans sa partie supérieure. Au sud, sur les buttes de Rosne, les coteaux pentus sont majoritairement boisés tandis que des villages occupent les fonds de vallée.

Une cartographie de l’occupation des sols a été réalisée par croisement de différentes bases de données nationales (Registre Parcellaire Graphique, BD TOPO, THEIA) (Figure 4B). La méthodologie de construction de cette cartographie est détaillée dans le volet modélisation.

L’analyse de cette cartographie donne les proportions des différents types d’occupation des sols (Figure 5), avec 67% de cultures dont 60.1% de cultures d’hiver, 4.6% de prairies, 0.6% de cultures permanentes, 0.7% de bâtis, 0.1% de sols nus, 17.3% de forêts, 0.1% de surfaces en eau, 1.4% de routes et chemins et 8.2% d’espaces verts non-agricole.

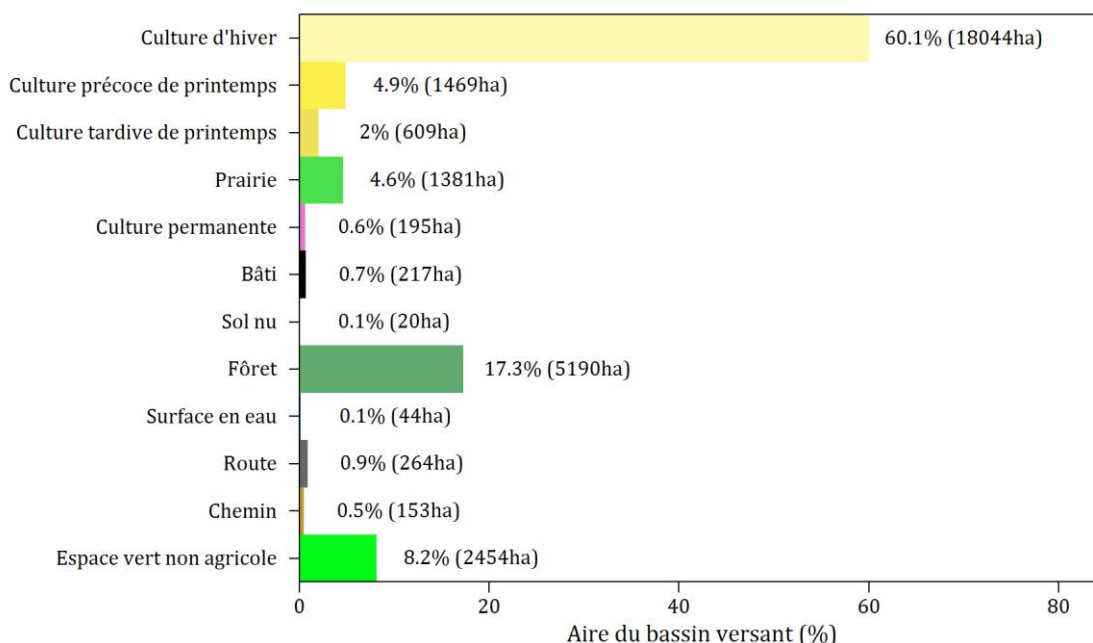


Figure 5 : Répartition de l’occupation des sols sur le périmètre d’étude.

Les évolutions depuis la fin de la seconde guerre mondiale des paysages du plateau de Thelle sont symptomatiques de l’évolution de l’occupation des sols des paysages de plaines agricoles du Nord de la France. L’analyse des Registres Général Agricole de 1970, 1979, 1988, 2000 et 2010 (Figure 6) montre une régression continue des herbages sur cette période au profit des cultures de céréales et d’oléagineux. Sur la période 1970 – 2010, les surfaces toujours en herbe diminuent ainsi de -70% passant de 3 657ha à 1 113ha. La culture du maïs grain et semence est réduite quant à elle de -77% sur cette même période.

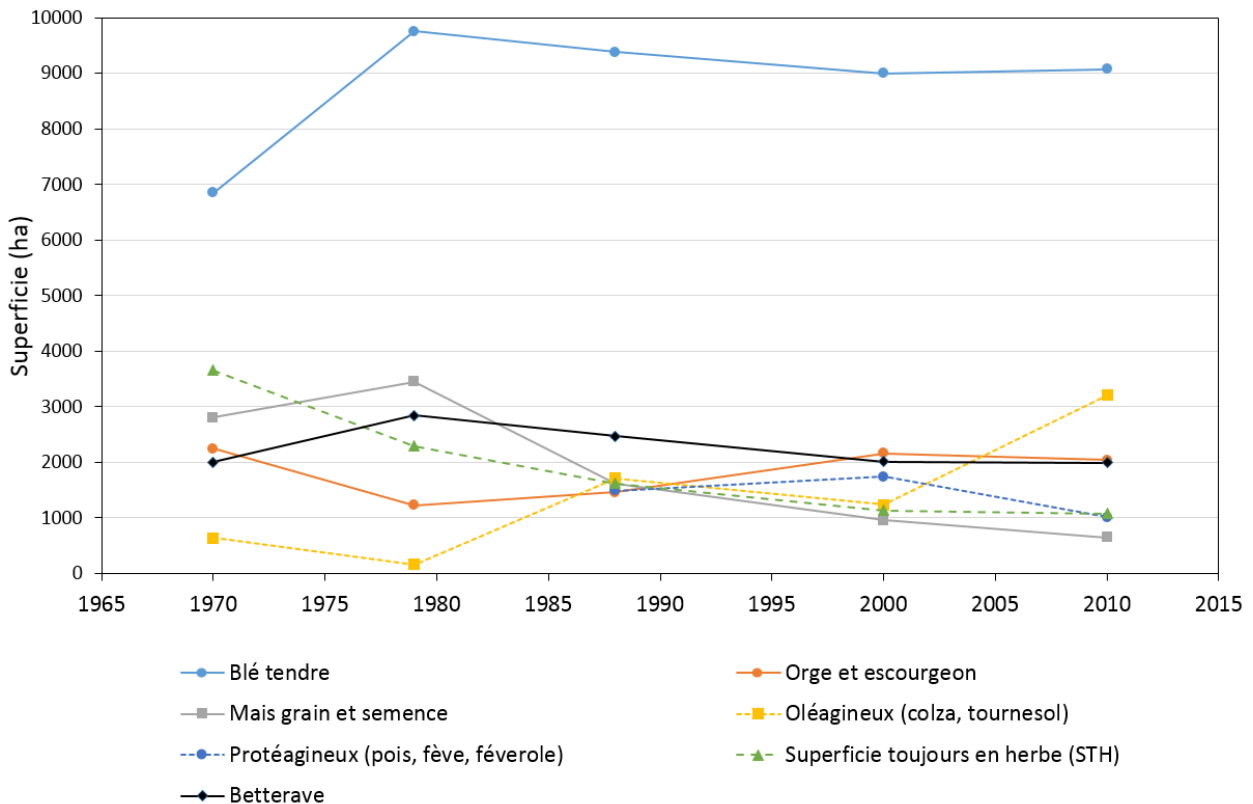


Figure 6 : Evolution des différentes cultures entre 1970 et 2010 (source : Registre Général Agricole).

Sur la même période, la culture de la céréale augmente de 32% et représente en 2010 une forte proportion des cultures (43% de la SAU). La culture d'oléagineux augmente fortement de 402%, passant de 640ha à 3 212ha. Malgré des fluctuations entre 1970 et 2010, la culture de la betterave et d'orge reste constante et représente en 2010, 9.5 et 9.7% de la SAU, respectivement.

2.1.5. Hydrographie

La rivière la Troesne prend sa source à Henonville, au pied des buttes de Rosnes et conflue à Gisors avec l'Epte. Coincée au pied de la cuesta du Vexin, elle s'écoule en pente douce dans une vallée large de Hénonville à Fays-les-Etangs qui se resserre ensuite passé Chaumont-en-Vexin. Cette vallée autrefois marécageuse fut assainie au XVIIIème siècle par un réseau de canaux (dont le canal de Marquemont). Entre Hénonville et l'exutoire du bassin, la longueur de la Troesne est de 10km avec une pente qui varie entre 0 et 5m/km.

La Troesne recueille les eaux de ruissellement du plateau de Thelle, au travers de trois ruisseaux s'écoulant dans des vallées orientées perpendiculairement à la Troesne : l'Aunette à l'ouest, le ru du Mesnil, le ru de Pouilly et le Merderon à l'est (Figure 7). Ces ruisseaux drainent au total 49% de la superficie de la Troesne dont 16% (46.5km²) pour l'Aunette, 13% pour le Ru du Mesnil (39.5 km²), 12% (36,9 km²) pour le Ru de Pouilly et 8% (23.7km²) pour le Merderon. Le linéaire de cours d'eau total sur le bassin est de 131 km, soit une densité de drainage assez faible de 0.44 km/km², caractéristique des paysages sur substrat crayeux.

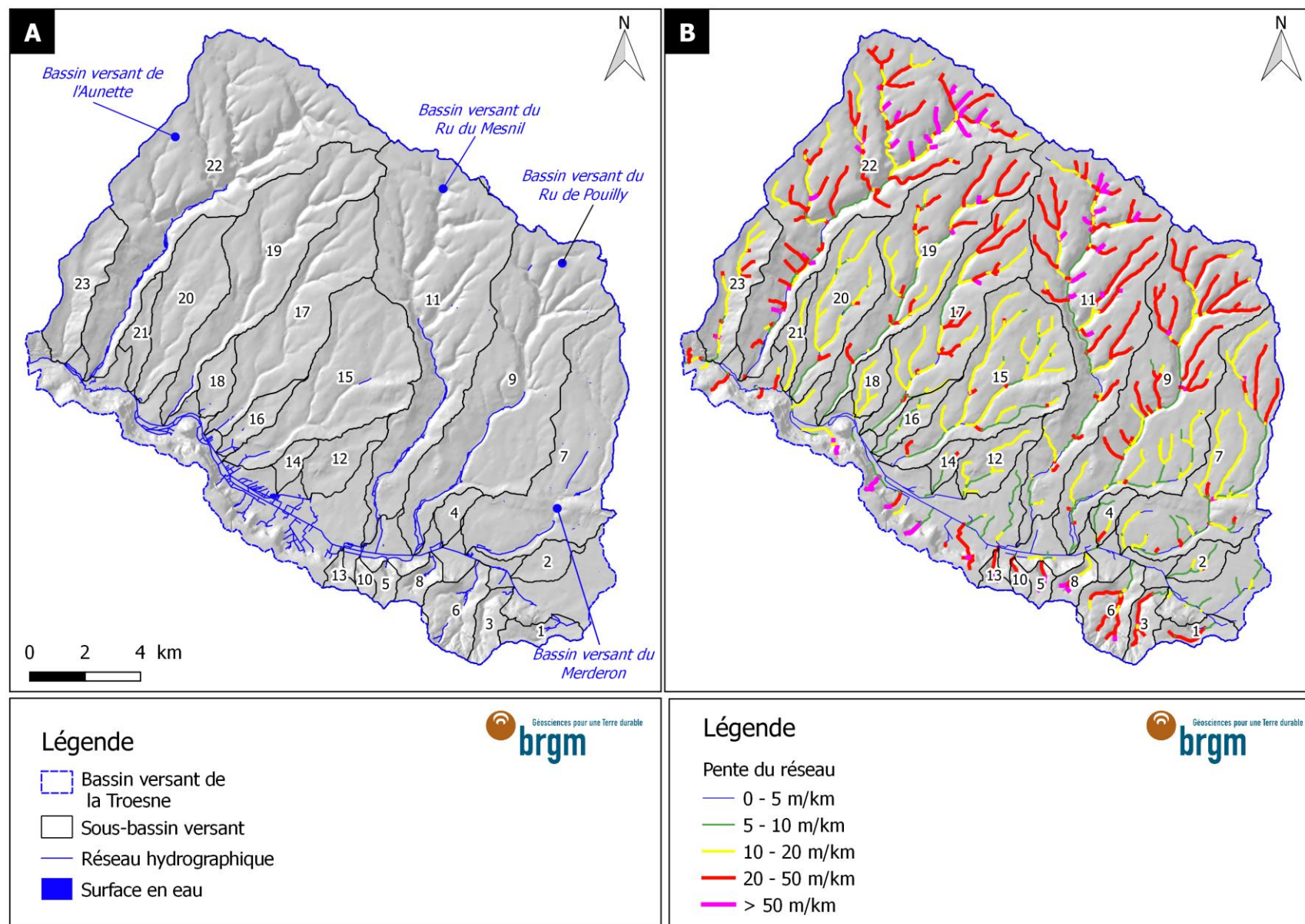


Figure 7 : (A) Principaux sous-bassin de la Troesne et (B) Pente longitudinale des axes de ruissellement drainant une superficie supérieure à 20 ha.

Les 51% restants sont drainées par des vallées sèches, actives lors d'épisodes de remontée de nappe ou de fortes précipitations. Dans les vallées du plateau de Thelle, les pentes sont très importantes sur la partie amont (entre de 20 et 50 m/km) et diminuent progressivement vers l'aval (entre 5 et 10 m/km) (Figure 7), sur une distance allant de 12 à 17 km suivant les bassins (Figure 8). Au sud, sur les versants pentus des Buttes de Rosne, les versants courts aux forts dénivelés induisent également des pentes très fortes, autour de 50 m/km.

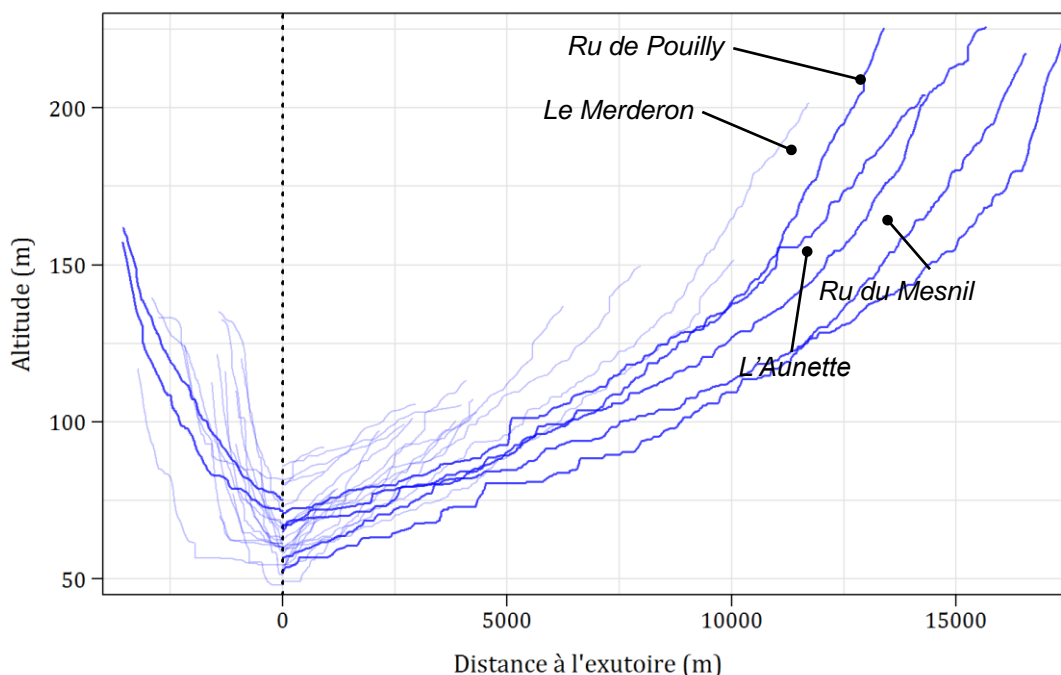


Figure 8 : Profil topographique longitudinal des principaux sous-bassins de la Troesne.

2.1.6. Climat

Le climat de la zone d'étude est de type océanique tempéré à influences continentales. Le rythme des saisons ne présente pas de grands contrastes où l'hiver est une période plus fraîche et l'été trois mois un peu plus ensoleillés. D'après les données de infoclimat.fr sur la période 1981-2010, la température moyenne varie entre 3.9°C en décembre / janvier et 18.5 °C en juillet / août (Figure 9). Les pluies sont abondantes avec en moyenne 15 à 20 jours par mois, globalement bien réparties tout au long de l'année, avec des cumuls mensuels allant en moyenne de 50,3 mm en mars à 72.5 mm en décembre, donnant un cumul moyen annuel de 700,9 mm (Figure 10). Le cumul maximum de précipitation sur une journée est en moyenne de 38.5 mm avec un record 89.8 mm atteint en juillet 1993.

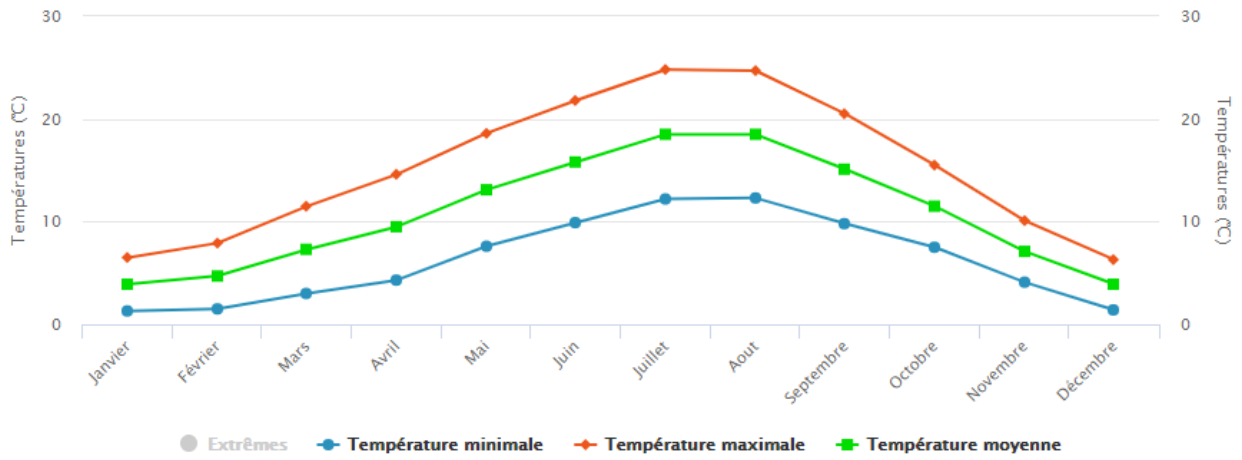


Figure 9 : Statistiques sur les températures mensuelles à Jaméricourt sur la période 1981 -2010 (source : infoclimat.fr)

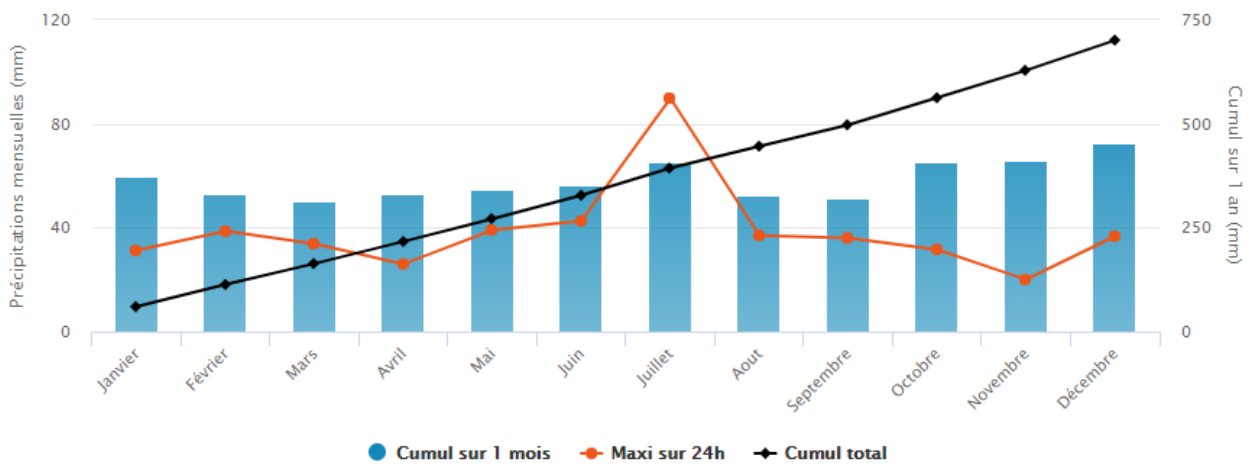


Figure 10 : Statistiques sur les précipitations moyennes mensuelles à Jaméricourt sur la période 1981 - 2010 (source : infoclimat.fr)

2.2. HISTORIQUE DES EVENEMENTS MARQUANTS

L'étude des évènements marquants ayant affectés repose sur l'analyse des arrêtés de catastrophes naturelles recensés dans la Base nationale de Gestion Assistée des Procédures Administratives relatives aux risques (BD GASPAREL).

L'ensemble des arrêtés CatNat relatifs aux risques hydro-gravitaires ont été extraits pour chaque commune du bassin versant de la Troesne. Au final, le nombre total d'arrêtés CatNat sur le bassin et sur la période 1984 – 2016 est de 148 dont :

- (1) 82 pour « inondations et coulées de boues »
- (2) 10 pour « inondations par remontée de nappe » (tous en 2001)
- (3) 54 pour « inondations, coulées de boues et mouvement de terrain »
- (4) 1 pour « Mouvements de terrain »
- (5) 1 pour « Mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols »

Ce premier détail montre ainsi que le premier risque naturel auquel sont confrontées les communes du bassin est le risque inondations et coulées de boues ; (1) et (3). La cartographie de ce risque montre une forte variabilité spatiale du nombre d'arrêtés CatNat, avec au minimum 1 arrêté CatNat (tempête de 1999) jusqu'à 5 arrêtés CatNat pour les communes de Thibivillers et Hénonville (Figure 11).

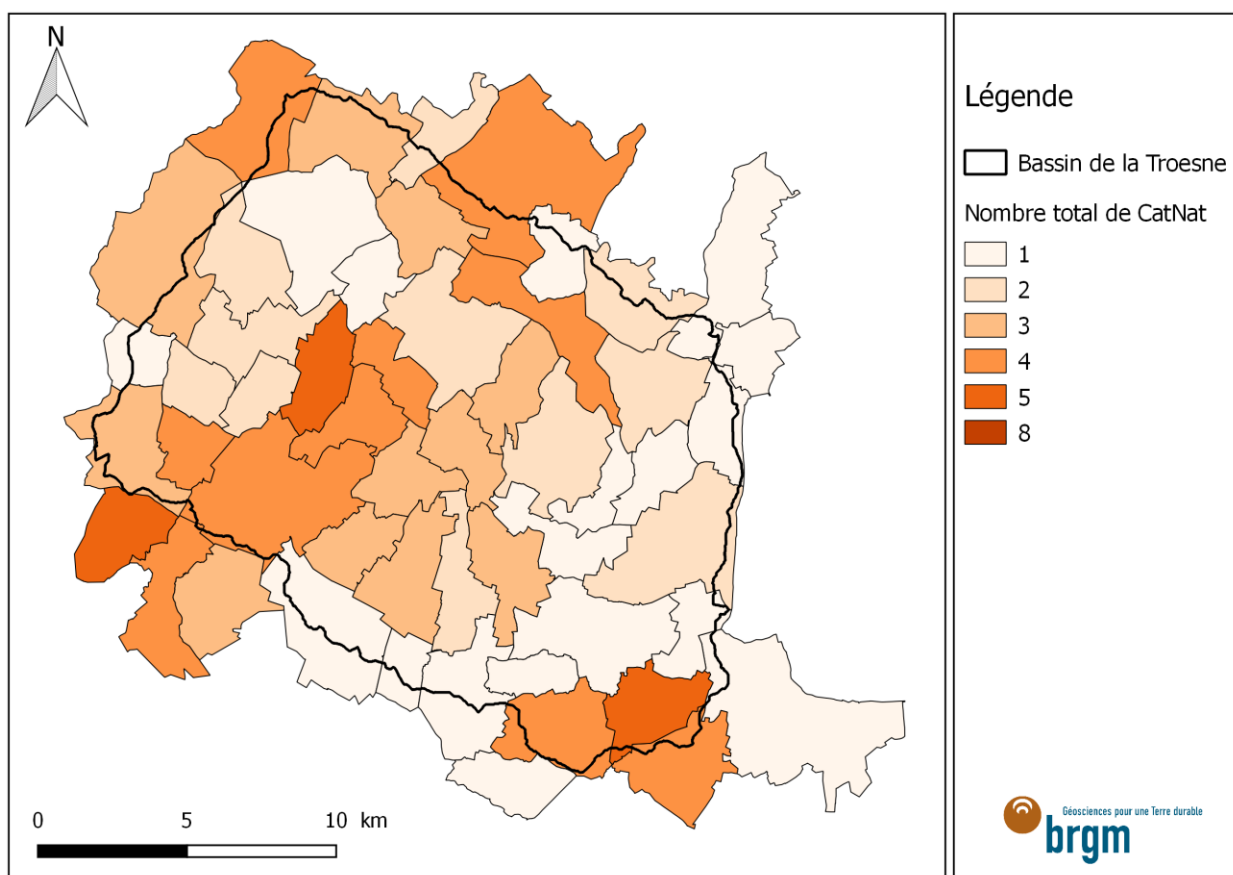


Figure 11 : Nombre total d'arrêtés CatNat « inondations et coulées de boues » par commune sur la période 1984 à 2016.

La chronologie de ces arrêts par commune permet d'identifier les évènements majeurs ayant touchés plusieurs communes à la fois. Pour chaque évènement, des recherches sur le cumul et la durée des précipitations ont été menées. Trois évènements majeurs peuvent être distingués :

- 1 Juillet 1993 : 18 communes sinistrées ; 89.3 mm de pluie sur la journée enregistrée à Jaméricourt (source : infoclimat)
- 4 Aout 1997 : 14 communes sinistrées ; 125 mm de pluie en 1h30 enregistré à Magny-en-Vexin, situé à quelques dizaines de kilomètres du bassin (source : Météo-France)
- 20 Septembre 2014 : 5 communes sinistrées ; entre 50 et 100 mm de pluie en 45 min (source : Mairie de Valdampierre)

Ces recherches historiques montrent que les phénomènes d'inondations et de coulées de boues font suite à des orages violents à fort cumul pluviométrique sur de très courtes durées. Ce constat justifie le fait que l'évaluation de l'aléa ruissellement et érosion réalisée dans la suite de ce rapport considère seulement un aléa pluviométrique estival.

2.3. ETUDES PRECEDENTES

Le BRGM a pris connaissances des différentes études antérieures fournies par la DDT 60 à savoir :

- Etude pour la maitrise des eaux de ruissellement et de l'érosion des sols sur le bassin de la Troesne, HYDRATEC, 1998,
- Aménagement hydraulique de la Troesne, SETAME, 1983,
- Etude de définition d'un plan Pluriannuel de Restauration et d'Entretien des cours d'eau du bassin versant de l'Epte sur le secteur de la Communauté de Communes du Vexin-Thelle, CE3E, 2011.

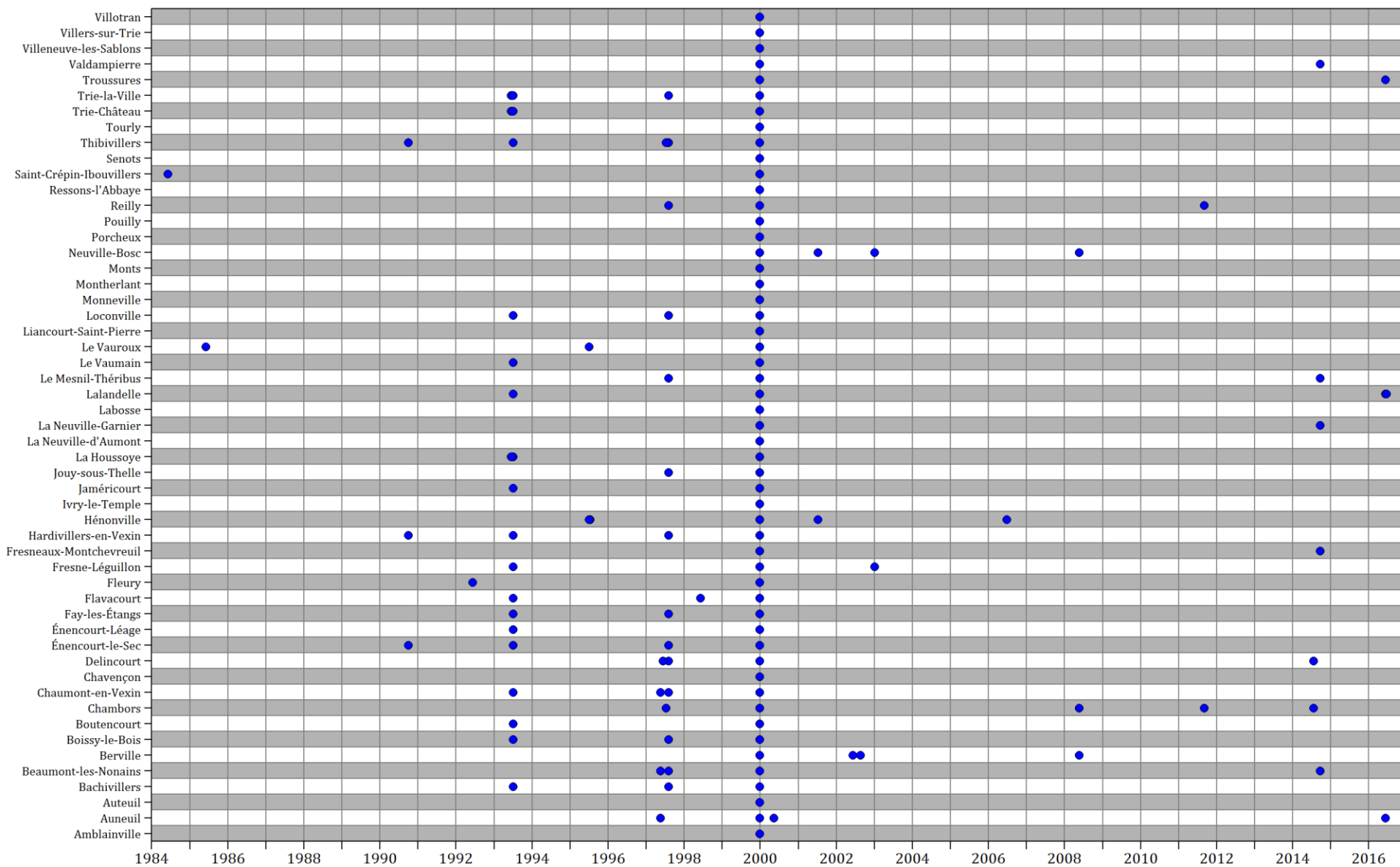


Figure 12 : Chronologie des arrêtés CatNat relatifs aux inondations et coulées de boues par commune sur la période 1984 – 2016.

2.4. EXPERTISE DE TERRAIN

Cette étape consiste à établir un réseau continu d'axes de ruissellement, décrivant le cheminement de l'eau depuis la parcelle agricole jusqu'à l'exutoire du bassin versant. Ce réseau alimente ensuite le modèle d'érosion et de ruissellement. Une pré-cartographie des axes de ruissellement a été réalisée par le BRGM à partir de la BD ALTI 5m et de la BD TOPO (cours d'eau permanent et intermittent). Cette cartographie brute correspond au réseau issu seulement de la topographie et des principaux cours d'eau, sans prise en compte des éléments anthropiques impactant tel que les fossés, les routes, les pistes ou encore les buses.

Sur le terrain, ces axes de ruissellement ont été vérifiés et complétés. L'ensemble de ces axes sont finalement digitalisés dans un SIG, complétés par une photo-interprétation sur les secteurs non-investigués. Le réseau de circulation du ruissellement des trois bassins versants est présenté sur la Figure 13.

Initialement, le linéaire total de réseau hydrographique obtenu à partir de la BD TOPO s'élevait à 131 km. Après ce travail de cartographie, le linéaire total s'élève à 633 km soit un levé de 502 km de réseau. Ces axes de ruissellement sont présentés au 1/10 000^{ème} en Annexe 3.

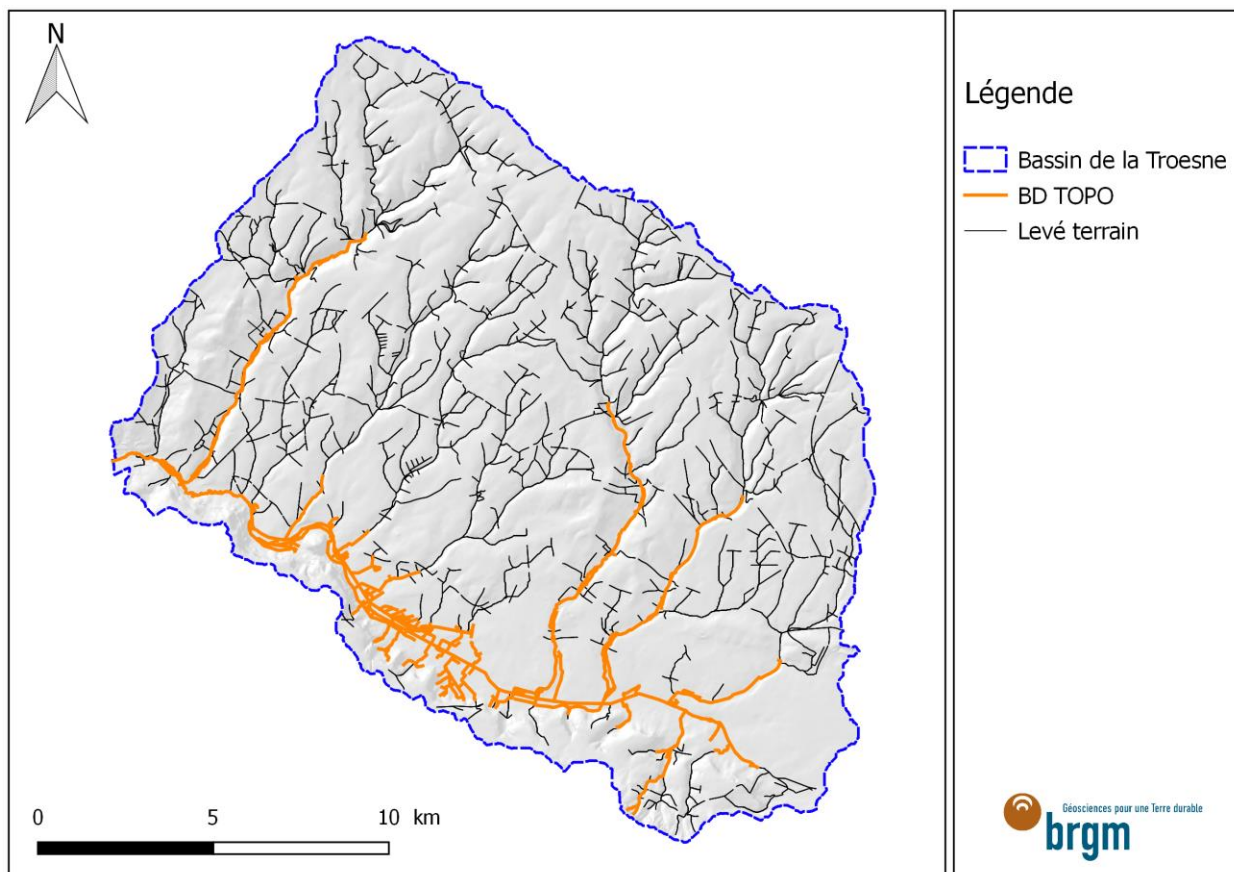


Figure 13 : Axes de ruissellement issues de la BD TOPO complétés par des levés sur le terrain.

En parallèle de ce travail de levé, chaque axe de ruissellement a été classé suivant une typologie en 7 classes :

- Talweg sec agricole
- Ruissellement complexe urbain
- Talweg sec forestier
- Surface en eau
- Route
- Chemin
- Cours d'eau intermittent
- Cours d'eau permanent
- Talweg sec sur prairie

La proportion des différentes classes est présentée sur la Figure 14. Les routes et chemin modifient grandement le parcours des eaux de ruissellement. Au total, ils représentent 41.8% des axes de ruissellement du bassin pour un linéaire de 264 km. Les axes de ruissellement dans les talwegs secs agricoles représentent ensuite 28.6% du linéaire (181 km) suivi des cours d'eau permanent et intermittent avec 19% du linéaire soit 131 km. Par ailleurs, les axes de ruissellement situés sur prairie ne représentent que 3.1% du linéaire (19 km).

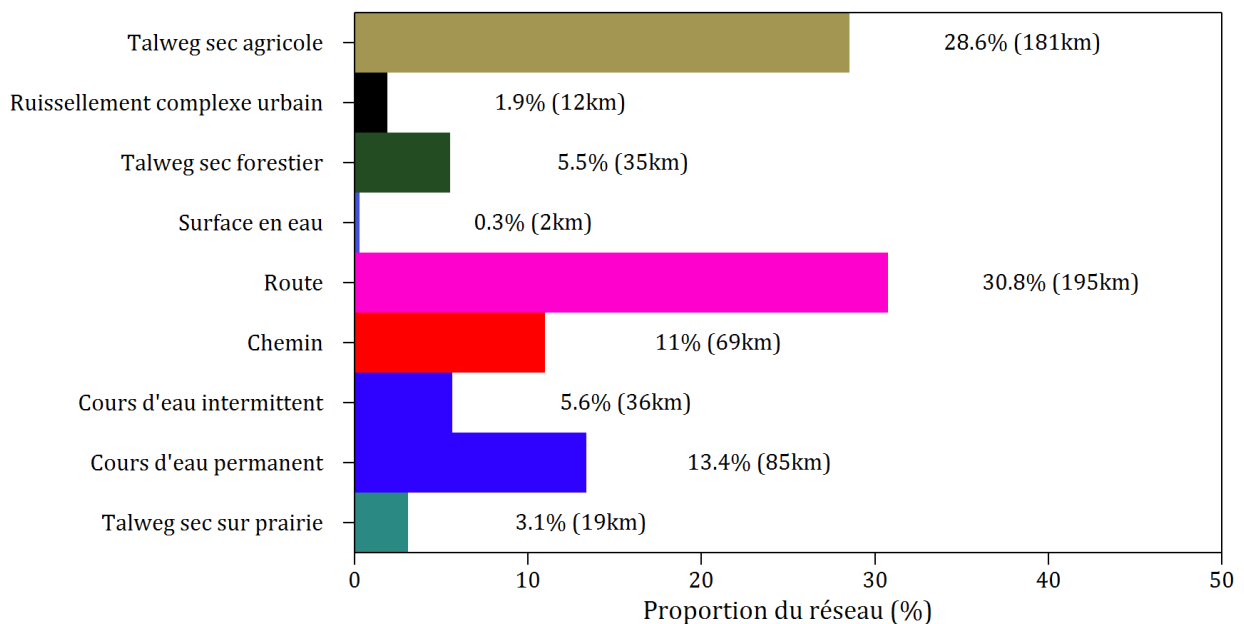


Figure 14 : Proportion des différentes classes d'axes de ruissellement

3. Modélisation du ruissellement et de l'érosion des sols

3.1. METHODOLOGIE GENERALE

Le modèle utilisé pour cette étude est le modèle WaterSed, développé par le BRGM (Cerdan et al., 2001; Landemaine, 2016). Il s'agit d'un modèle non-dynamique distribué simulant le ruissellement et l'érosion des sols depuis l'échelle de la parcelle à celle du bassin versant pour un événement de pluie donné. Calibré et/ou validé dans de nombreux contextes (Haute-Normandie, Mayotte, Champagne, Japon, etc.), cet outil permet d'évaluer l'impact de mesures préventives et curatives (aménagements d'hydraulique douce, mares, etc.) ou encore de prévoir les conséquences de scénarii futurs d'occupation des sols et de changements climatiques.

Ce modèle est la base de l'évaluation de l'aléa ruissellement et coulées de boues. Une modélisation du ruissellement et de l'érosion des sols est réalisée pour un aléa pluviométrique (période de retour 100ans) et une occupation du sol donnée. A partir des cartographies de volume de ruissellement, de masse de terre érodée en sortie de modélisation et d'un système de reclassification expert, l'aléa ruissellement et coulées de boues est finalement déterminé. Les conditions initiales de la modélisation ont été définies avec la DDT :

- Un orage violent d'une durée de 1h, de période de retour 100 ans, intervenant sur sol sec au mois de juillet (mois avec le cumul maximum sur 24h enregistré),
- Des cultures seulement représentées par des cultures d'hiver (blé)

Le choix d'une culture unique sur l'ensemble du bassin permet de s'affranchir de la variabilité temporelle (rotation culturale sur une même parcelle) et spatiale (assolement) des cultures. Sans prise en compte de ces considérations, le risque est d'avoir une cartographie de l'aléa ruissellement et coulées de boues valide seulement pour l'année de la cartographie de l'occupation des sols. Il a donc été décidé avec la DDT de considérer la culture dominante (blé) comme culture unique sur le bassin afin de reproduire le scénario du « pire ».

Des modélisations complémentaires ont également été réalisées, afin de mesurer l'impact d'un programme d'action basé sur des aménagements d'hydraulique douce ou l'amélioration de pratiques culturales pour des orages d'une durée de 1h et de différentes périodes de retour (10ans, 20ans, 50ans, 100ans) :

- Scénario 1 : occupation des sols actuelle (état initial)
- Scénario 2 : occupation des sols actuelle + aménagements d'hydraulique douce
- Scénario 3 : occupation des sols actuelle + amélioration des pratiques culturales

Le programme d'action proposé a été dimensionné à l'échelle du bassin versant, sans concertation avec les acteurs du territoire (agriculteurs, syndicat de bassin, élus, etc.). L'objectif est avant tout de montrer l'intérêt de ces mesures dans la réduction du ruissellement et de l'érosion.

3.2. COLLECTE DES BASES DE DONNEES GEOGRAPHIQUES

L'ensemble des données géographiques nécessaires au travail de modélisation ont pu être récupérées auprès des banques données nationales (Tableau 3). D'autres bases de données ont également été récupérées pour des besoins de PIAO (Photo Interprétation Assistée par Ordinateur) ou cartographiques (Tableau 4).

Tableau 3 : Liste des bases de données nécessaires à la modélisation

Données	Nom	Producteur
Topographie	BD ALTI 5m	IGN
Réseau hydrographique	BD TOPO	IGN
Occupation des sols	Registre Parcellaire Graphique BD TOPO THEAI	ASP IGN CESBIOS
Sol – Formations superficielles	Carte géologique	BRGM
Pluviométrie		Météo France Infoclimat.fr

Tableau 4 : Liste des bases de données annexes

Données	Nom	Producteur
Limites communales et départementales	BD GEOFLA	IGN
Orthophotographies	BD ORTHO	IGN

3.3. PLUIES DE PROJET

Les cumuls pluviométriques associés à différentes périodes de retour pour une durée de 1h ont été obtenus auprès de Météo France à la station de Jaméricourt (Tableau 5). Pour les quatre périodes de retour, l'intensité maximum à 6 min a été défini comme > 40 mm/h afin de compte du caractère orageux de la pluie dans le modèle. Un antécédent pluvieux à 48h de 0 mm a également été retenu pour traduire un sol sec au moment de la modélisation.

Tableau 5 : Cumul pour une pluie de 1h et pour différentes période de retour à la station de Jaméricourt (source : Météo-France)

Durée de retour	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Cumul pluviométrique (mm)	24.6	28.7	34.2	38.6
Intensité maximale à 6 min (mm/h)	>40	>40	>40	>40
Antécédent pluvieux sur 48h (mm)	0	0	0	0

3.4. PRETRAITEMENT DU MNT

La topographie du bassin versant de la Troesne est issu du modèle numérique de terrain (MNT) de l'IGN (BD ALTI 5m). Il s'agit d'une représentation de la topographie de la surface du sol sous forme de maille où pour chaque maille, l'altitude du sol est renseignée en mètre NGF. La résolution des mailles du MNT de l'étude est de 5 m par 5 m. Cette résolution constitue la résolution des sorties de la modélisation.

Ce modèle numérique de terrain présente toutefois des artefacts (cuvettes et pics) susceptibles de bloquer l'écoulement des eaux lors de l'étape de modélisation. Un travail de correction des altitudes est donc réalisé sur ce MNT « brut » afin de garantir un gradient de pente continu depuis l'amont du bassin jusqu'à l'aval et ainsi un écoulement continu du ruissellement.

Toutefois, ce traitement n'est pas suffisant pour reproduire fidèlement l'écoulement des eaux selon les axes de ruissellement cartographiés lors de l'expertise de terrain. Le MNT est donc sur creusé de façon artificielle au droit des axes cartographiés afin de prendre en compte leur impact sur l'écoulement des eaux (route, chemin, etc.).

La comparaison des axes de ruissellement avant et après traitement permet de se rendre compte de l'importance de ce travail pour l'étape de modélisation (Figure 15). Dans l'exemple cité, le travail de correction permet de prendre en compte l'impact d'un chemin sur l'écoulement des eaux.

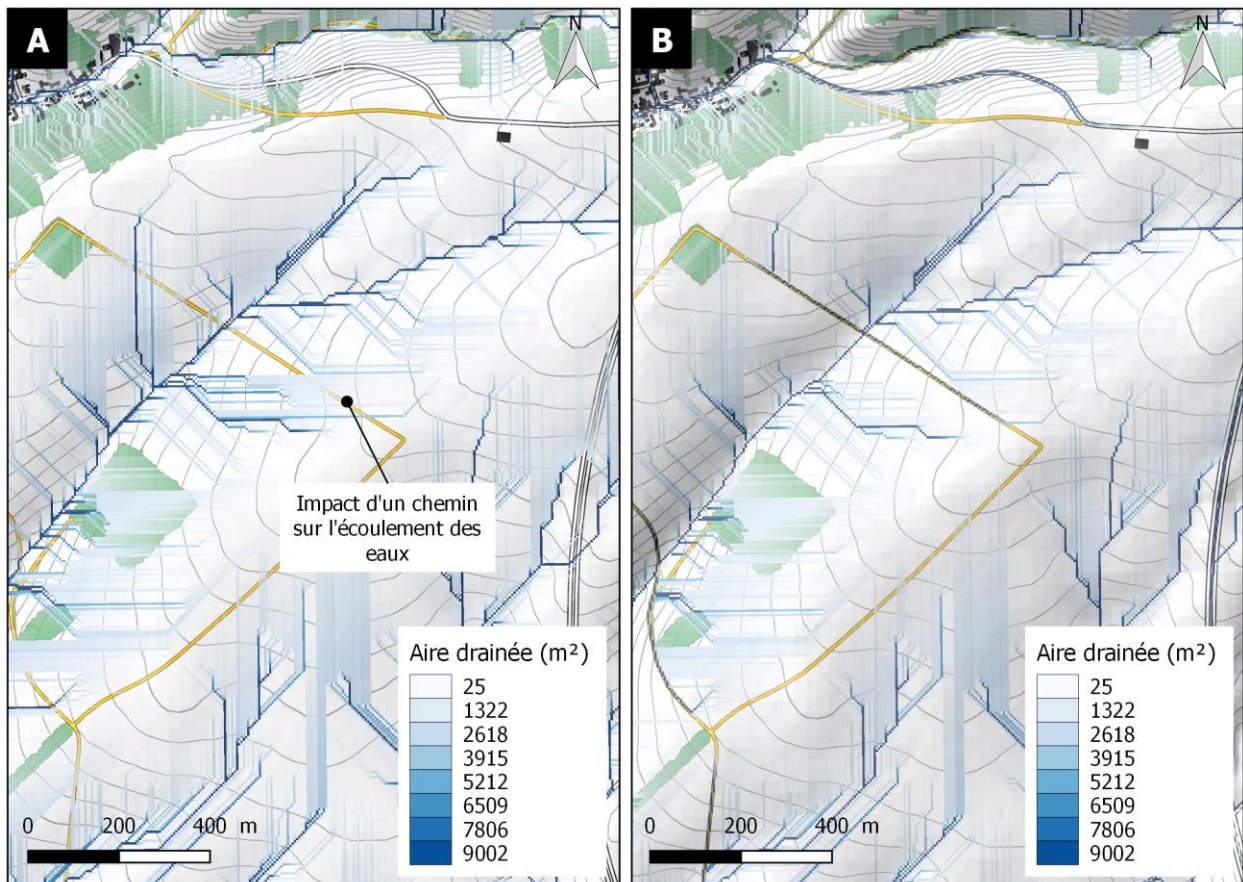


Figure 15 : (A) MNT brut ne tenant pas compte de l'impact d'un chemin sur l'écoulement des eaux et (B) MNT corrigé avec prise en compte du chemin.

3.5. OCCUPATION DES SOLS

Une cartographie de l'occupation des sols 2014 a été construite pour les besoins de l'étude, basée sur plusieurs sources de données : le Registre parcellaire graphique (RPG), la BD TOPO (IGN) et la cartographie de l'occupation des sols OSO 2016. Cette cartographie est adaptée à l'objet d'étude. La procédure de construction de la cartographie des sols est détaillée sur l'Annexe 1. La nomenclature permet de discriminer 12 classes d'occupation des sols présentant un comportement spécifique vis-à-vis des processus de ruissellement et d'érosion. Un extrait de cette cartographie au 1/10 000ème est présenté sur la Figure 16.

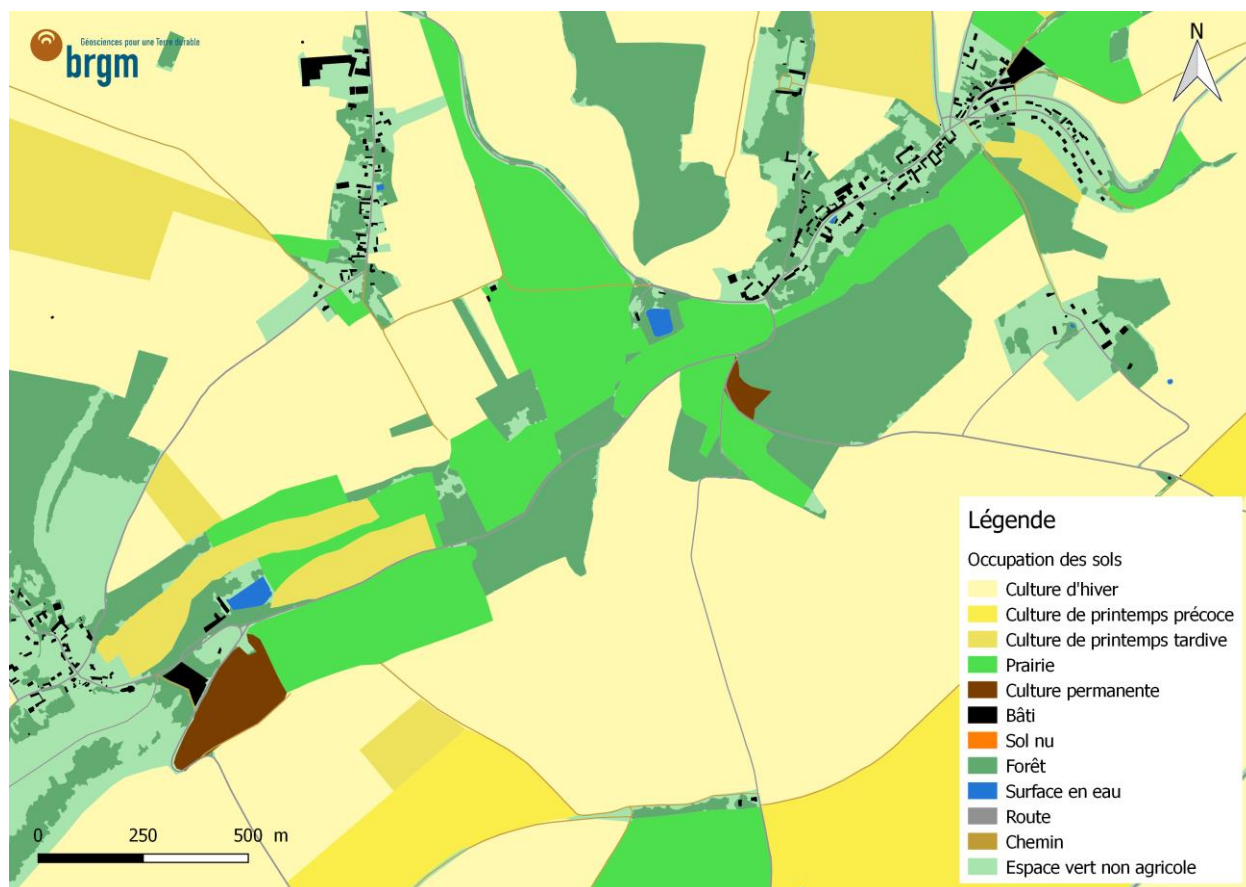


Figure 16 : Extrait de la cartographie de l'occupation des sols de la Troesne au 1/10 000ème.

3.6. FORMATIONS SUPERFICIELLES – SOLS

En l'absence de cartographie numérique des sols sur le bassin versant de la Troesne, la cartographie des formations géologiques au 1/50 000ème produite par le BRGM a été utilisée afin de tenir compte de la variabilité spatiale des propriétés physiques des sols vis-à-vis des processus de ruissellement et d'érosion. Un des paramètres majeurs est la texture du sol. A ce titre, une clef de conversion a été établie à dire d'expert afin d'affecter à chaque formation géologique un pôle de texture de sol (Annexe 2).

Sur l'ensemble du bassin versant de la Troesne, 41 formations géologiques sont recensées. Toutefois, quatre types de formations superficielles couvrent 74.7% du bassin versant (Tableau 6) (Figure 17A).

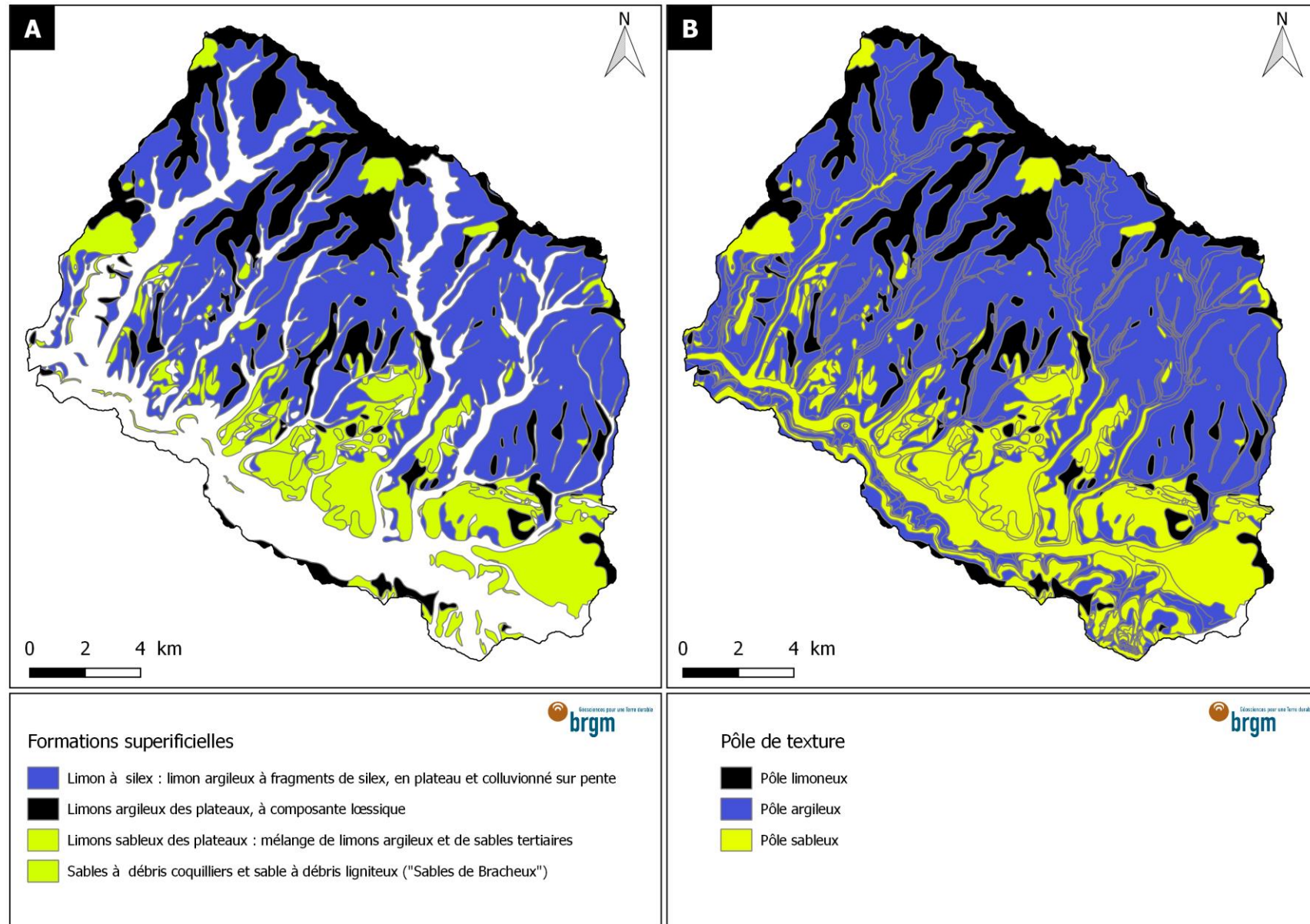


Figure 17 : (A) Principales formations superficielles et (B) Pôle de texture du sol associé.

Tableau 6 : Principales formations superficielles sur le bassin de la Troesne et pôle de texture du sol associé

Formation superficielle	Proportion de couverture du bassin (%)	Pôle de texture
Limons sableux des plateaux : mélange de limons argileux et de sables tertiaires	10.8	Sable
Limons argileux des plateaux, à composante lœssique	17.7	Limon
Limon à silex : limon argileux à fragments de silex, en plateau et colluvionné sur pente	39.9	Argile
Sables à débris coquilliers et sable à débris ligniteux ("Sables de Bracheux") (Thanétien supérieur)	6.3	Sable

Cette distribution montre clairement que les sols sont dominés par une texture limoneuse. Le choix effectué a été de distinguer ces limons en trois pôles (limon, argile et sable) selon la granulométrie accessoire. L'objectif est de prendre en compte les différences de comportement hydrodynamique et érosif entre ces formations. La cartographie de la texture des sols obtenue à partir des formations superficielles et la clef de conversion est présentée sur la Figure 17B.

3.7. PARAMETRISATION DES UNITES SOLS – OCCUPATION DES SOLS

La paramétrisation du modèle WaterSed est l'étape clef qui consiste à affecter à chaque couple sol / occupation des sols des propriétés hydrodynamiques (capacité d'infiltration, réserve utile, etc.) et érosives (érodibilité, etc.) utilisables par le modèle WaterSed (Figure 18).

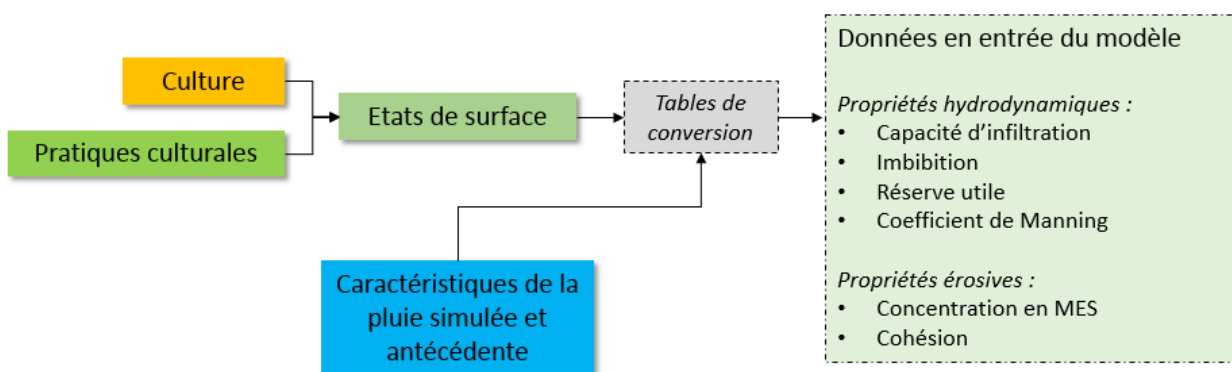


Figure 18 : Principe général de paramétrisation du modèle WaterSed.

3.7.1. Principe

Pour une grande partie des sols cultivés à texture limoneuse, limono-argileuse ou limono-sableuse, l'érosion hydrique des sols résulte du ruissellement lié à la diminution de l'infiltrabilité consécutive à la dégradation structurale superficielle sous l'action de la pluie. Cette dégradation est à l'origine de la formation de croûtes (structurale, sédimentaires) et l'érodibilité est donc directement fonction de la stabilité structurale du sol. Cette stabilité structurale dépend des caractéristiques intrinsèques du sol : texture, teneur en matières organiques, minéralisation des argiles, les cations, les oxydes de Fe et Al, le CaCO₃. Par ailleurs, la rugosité induite par le travail du sol et la croissance des plantes au cours du cycle cultural complexifie encore ces processus de dégradation.

La conséquence est une évolution au cours du cycle cultural, depuis le semi jusqu'à la récolte, des propriétés hydrodynamiques et érosives de chaque type de culture. Devant un tel niveau de complexité, une approche empirique a été menée par l'INRA pour discriminer les facteurs dominants sur l'intensité des processus d'érosion et de ruissellement (Cerdan et al., 2002; Le Bissonnais et al., 2005, 1998).

A partir de très nombreuses observations réalisées sur les sols cultivés du Nord de la France, trois facteurs majeurs furent identifiés : le couvert végétal, le faciès sédimentaire (état de dégradation structural) et la rugosité (travail du sol). Ils caractérisent l'état de surface du sol (Figure 19).

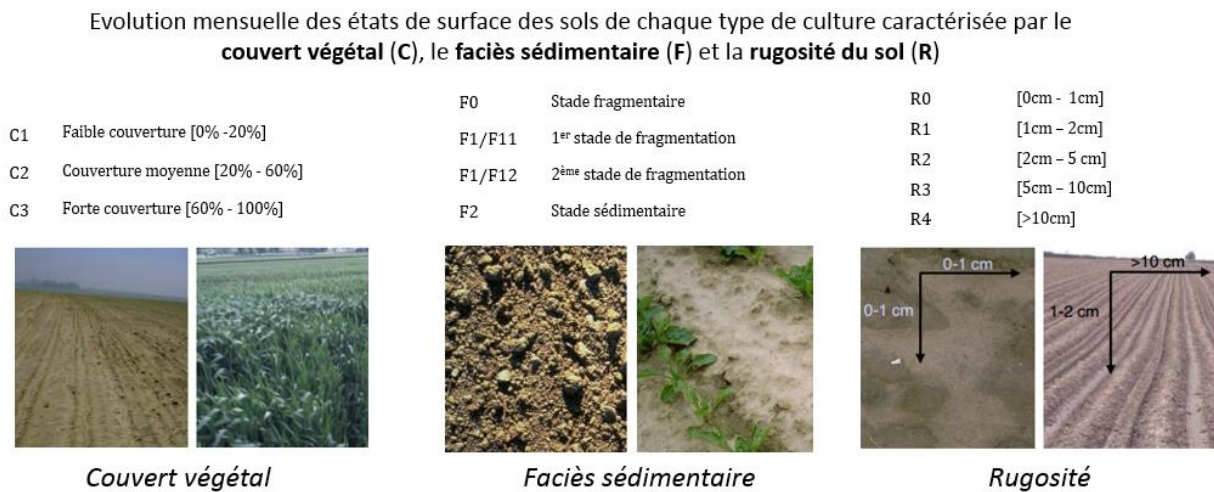


Figure 19 : Méthode d'évaluation de l'état de surface d'une culture selon la couvert végétal, le faciès sédimentaire et la rugosité du sol.

Des règles de décisions furent élaborées pour déduire, à partir des états de surfaces des sols, les propriétés physiques des sols (aptitude au ruissellement, capacité d'infiltration, concentration potentielle en matières en suspension dans les eaux de ruissellement, ou encore érodibilité des sols).

3.7.2. Application au cas d'étude

Ce travail de paramétrisation a été adapté au contexte de l'étude. Un calendrier cultural a été établi pour chaque type de culture et pour chaque type de texture et spécifie l'état de surface du sol à chaque mois de l'année Tableau 7.

Pour les cultures d'hiver, l'évolution des états de surface depuis le semi (en octobre) se caractérise par une croissance végétale jusqu'en juillet / aout, mois de la récolte (passage progressif d'un couvert végétal C1 à C3). Durant cette période de croissance végétale, la dégradation structurale du sol sous l'action de la pluie (F0 vers F2) se traduit par une diminution de la rugosité (R2 vers R0). Le caractère battant (F2) est seulement atteint pour les sols à texture limoneuse tandis que les sols à texture limono-argileuse et limono-sableuse n'atteignent que le stade F12. La stabilité structurale supérieure des sols limono-argileux se traduit par une diminution moindre de la rugosité (rugosité R1 au minimum) contrairement aux sols limoneux et limono-sableux (R0).

Les états de surface des sols pour les différents types de culture ont été extraits pour le mois de juillet, mois au cours duquel sont réalisées les simulations. Les valeurs des paramètres sont déduites à partir de règles de conversion adaptées au contexte de l'étude et sont synthétisées dans le Tableau 9.

Pour les autres classes d'occupation des sols, l'absence de travail du sol induit des propriétés hydrodynamiques et érosives constantes au cours de l'année. Les valeurs des propriétés ont été déterminées à dire d'expert, en se basant sur des travaux réalisés dans des contextes similaires.

L'état hydrique initial du sol est un paramètre important dans le partage ruissellement / infiltration pour une pluie donnée. Dans le modèle, cet état est pris en compte selon l'imbibition, fonction de la capacité d'infiltration et l'antécédent pluvieux à 48h (Tableau 8). Les événements pluviométriques retenus pour les simulations correspondent à des orages estivaux intervenant sur sol sec. L'antécédent pluvieux est donc de 0 mm.

Tableau 7 : Calendrier cultural spécifiant par type de culture et type de sol, l'état de surface du sol. Le mois de juillet correspond au mois où sont effectuées les simulations. Les mois de semi et de récolte sont surlignés par type de culture, en jaune et en vert respectivement.

Culture	Texture	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Hiver	Limoneuse	C1-F0-R2	C1-F1-R1	C1-F12-R0	C1-F2-R0	C1-F2-R0	C2-F2-R0	C3-F2-R0	C3-F2-R0	C3-F2-R0	C3-F2-R0	C2-F2-R0	C2-F2-R0
Précoce de printemps	Limoneuse	C2-F2-R0	C2-F2-R0	C2-F2-R0	C1-F0-R2	C1-F1-R1	C1-F12-R0	C2-F2-R0	C3-F2-R0	C3-F2-R0	C3-F2-R0	C2-F2-R0	C2-F2-R0
Tardive de printemps	Limoneuse	C3-F2-R0	C2-F2-R0	C2-F2-R0	C2-F2-R0	C2-F2-R0	C2-F2-R0	C1-F0-R2	C1-F1-R1	C1-F12-R0	C2-F2-R0	C3-F2-R0	C3-F2-R0
Hiver	Limono-argileuse	C1-F0-R2	C1-F1-R2	C1-F1-R2	C1-F1-R2	C1-F1-R1	C2-F12-R1	C3-F12-R1	C3-F12-R1	C3-F12-R1	C3-F12-R	C2-F12-R1	C2-F12-R1
Précoce de printemps	Limono-argileuse	C2-F12-R1	C2-F12-R1	C2-F12-R1	C1-F0-R2	C1-F1-R2	C1-F1-R2	C2-F1-R2	C3-F1-R1	C3-F12-R1	C3-F12-R	C2-F12-R1	C2-F12-R1
Tardive de printemps	Limono-argileuse	C3-F12-R1	C2-F12-R1	C2-F12-R1	C2-F12-R1	C2-F12-R1	C2-F12-R1	C1-F0-R2	C1-F1-R2	C1-F1-R2	C2-F1-R2	C3-F1-R1	C3-F12-R1
Hiver	Limono-sableuse	C1-F0-R2	C1-F1-R2	C1-F1-R1	C1-F12-R1	C1-F12-R1	C2-F12-R0	C3-F12-R0	C3-F12-R0	C3-F12-R0	C3-F12-R0	C2-F12-R0	C2-F12-R0
Précoce de printemps	Limono-sableuse	C2-F12-R0	C2-F12-R0	C2-F12-R0	C1-F0-R2	C1-F1-R2	C1-F1-R1	C2-F12-R1	C3-F12-R1	C3-F12-R0	C3-F12-R0	C2-F12-R0	C2-F12-R0
Tardive de printemps	Limono-sableuse	C3-F12-R0	C2-F12-R0	C2-F12-R0	C2-F12-R0	C2-F12-R0	C2-F12-R0	C1-F0-R2	C1-F1-R2	C1-F1-R1	C2-F12-R1	C3-F12-R1	C3-F12-R0

Tableau 8 : Table de détermination des pertes initiales (imbibition) au début d'un événement pluvieux par croisement de la capacité d'infiltration mensuelle et de la hauteur de pluie antécédente à 48h

Capacité d'infiltration (mm/h)	Antécédent pluvieux à 48h (mm)			
	0	1-15	16-40	>40
70	22	17	14	10
60	21	16	13	9
50	20	15	12	8
40	19	14	11	7
30	17	13	10	6
20	15	12	8	5
15	14	10	7	4
10	12	8	5	3
5	8	5	3	1
2	5	2	1	0
1	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Tableau 9 : Table de détermination des propriétés hydrodynamiques et érosives de chaque unité sol-occupation des sols.

Texture	Occupation des sols	Etat de surface du sol	Capacité d'infiltration (mm/h)	Concentration potentielle en MES dans les eaux de ruissellement pour une intensité max à 6min > 40 mm/h (g/l)	Erodibilité (-)	Coefficient de Manning (-)
Limoneuse	Culture d'hiver	C3-F2-R0-S1	5	7.5	0.25	0.150
Limoneuse	Culture de printemps précoce	C3-F2-R0-S1	5	7.5	0.25	0.150
Limoneuse	Culture de printemps tardive	C2-F2-R0-S1	2	7.5	0.5	0.090
Limoneuse	Prairie		50	0.1	0	0.300
Limoneuse	Culture permanente		50	0.5	0	0.100
Limoneuse	Bâti		0	0	0	0.020
Limoneuse	Sol nu		1	12.5	1	0.030
Limoneuse	Forêt		60	0.1	0	0.150
Limoneuse	Surface en eau		0	0	0	0.040
Limoneuse	Route		0	0	0	0.030
Limoneuse	Chemin		0	20	0.25	0.020
Limoneuse	Espace vert non agricole		20	0.5	0	0.150
Limoneuse	Axe de ruissellement		0	0	0	0.040
Limono-argileuse	Culture d'hiver	C3-F12-R1-S2	5	3.5	0.1	0.17
Limono-argileuse	Culture de printemps précoce	C3-F12-R1-S2	5	3.5	0.1	0.17
Limono-argileuse	Culture de printemps tardive	C2-F1-R2-S2	10	3.5	0.25	0.11
Limono-argileuse	Prairie		40	0.1	0	0.300
Limono-argileuse	Culture permanente		40	0.5	0	0.100
Limono-argileuse	Bâti		1	0	0	0.020
Limono-argileuse	Sol nu		2	12.5	1	0.030
Limono-argileuse	Forêt		50	0.1	0	0.150
Limono-argileuse	Surface en eau		0	0	0	0.040
Limono-argileuse	Route		0	0	0	0.030
Limono-argileuse	Chemin		0	20	0.25	0.020
Limono-argileuse	Espace vert non agricole		20	0.5	0	0.150
Limono-argileuse	Axe de ruissellement		0	0	0	0.040
Limono-sableuse	Culture d'hiver	C3-F12-R0-S3	15	3.5	0.5	0.15
Limono-sableuse	Culture de printemps précoce	C3-F12-R0-S3	15	3.5	0.5	0.15
Limono-sableuse	Culture de printemps tardive	C2-F12-R1-S3	15	3.5	0.75	0.1
Limono-sableuse	Prairie		60	0.1	0	0.300
Limono-sableuse	Culture permanente		60	0.5	0	0.100
Limono-sableuse	Bâti		1	0	0	0.020
Limono-sableuse	Sol nu		5	12.5	1	0.030
Limono-sableuse	Forêt		70	0.1	0	0.150
Limono-sableuse	Surface en eau		0	0	0	0.040
Limono-sableuse	Route		0	0	0	0.030
Limono-sableuse	Chemin		0	20	0.25	0.020
Limono-sableuse	Espace vert non agricole		20	0.5	0	0.150
Limono-sableuse	Axe de ruissellement		0	0	0	0.040

3.8. DONNEES EN ENTREE DU MODELE

Les trois cartographies sols - occupation des sols (aléa, scénario 1 et 3) sont ensuite transformées en données d'entrée pour le modèle au format raster. Les propriétés hydrodynamiques sont caractérisées suivant 4 couches :

- Imbibition (mm) : perte initiale correspondant à l'humectation du sol et à l'interception de la pluie par la végétation ; dépendant de l'antécédent pluvieux,
- Capacité d'infiltration (mm/h) : perte continue par infiltration de l'eau au sein de la porosité du sol,
- Réserve utile (mm) : hauteur d'eau maximum équivalente à un remplissage total de la porosité du sol,
- Coefficient de Manning : rugosité à la surface du sol conditionnant avec la pente la vitesse de l'eau.

Les propriétés érosives sont caractérisées suivant deux couches raster :

- Concentration potentielle en Matières En Suspension (MES) dans les eaux de ruissellement (g/l) : érosion en nappe provoquée par l'impact des gouttes de pluie à la surface du sol ;
- Erodibilité (-) : coefficient adimensionnel variant entre 0 et 1 et décrivant la sensibilité du sol à l'arrachement en cas de ruissellement concentré

Six cartes de propriétés physiques sont donc produites par scénario. Dans le modèle WaterSed, deux couches sont nécessaires pour caractériser un évènement pluviométrique :

- Hauteur de pluie (mm) : lame d'eau précipitée,
- Durée effective (min) : durée avec une intensité de pluie supérieure à 0 mm/h.

Enfin, le modèle WaterSed propage le ruissellement à la surface du sol selon les lignes de plus grandes pentes et selon les axes de ruissellement cartographiés lors de l'expertise terrain. Deux couches supplémentaires sont ainsi renseignées dans le modèle :

- Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) : altimétrie discrétisé en maille de 5 m et corrigée hydrologiquement (« brulage » du MNT à partir du réseau de circulation du ruissellement décrit sur le terrain),
- La largeur des axes de ruissellement.

Au final, 9 cartes sont nécessaires pour effectuer une simulation : 2 pour décrire la topographie, 5 pour caractériser les propriétés de l'occupation du sol et des pratiques culturales et 2 pour caractériser l'évènement de pluie considéré.

L'ensemble des modélisations sont réalisés sous WaterSed v2.910 sous l'environnement SAGA GIS et les sorties de modélisation ont été traitées sous le logiciel R. Le modèle et les deux logiciels sont en open-access et en open-source.

3.9. CALIBRATION DU MODELE WATERSED

La calibration du modèle WaterSed est une étape clef qui consiste à affecter des valeurs aux différents paramètres du modèle (Tableau 10). En l'absence de station hydrométrique sur le bassin, il n'est pas possible de caler le modèle à partir d'évènement pluie-débit observé. Les valeurs attribuées se sont donc basées sur les modélisations réalisées en Haute-Normandie (Landemaine, 2016) et dans la Somme (Ludwig and Landemaine, 2017).

Tableau 10 : Valeurs des différents paramètres renseignées dans le modèle WaterSed pour l'ensemble des simulations

Paramètre	Description	Valeur
Module « Hydrologie »		
Effet d'échelle (-)	Facteur variant entre 0 et 1 en fonction de la résolution de la modélisation	0.2
Réserve utile maximale (mm)	Valeur maximum de la réserve utile sur le bassin versant	200
Récession (-)	Facteur de forme contrôlant la récession de l'hydrogramme de crue	1.5
Module « Erosion »		
Débit critique (m ³ /s)	Valeur seuil enclenchant de l'érosion concentrée	0.01
Coefficient de dépôt sédimentaire (-)	Valeur contrôlant l'intensité des processus de dépôt le long des chemins d'écoulement des eaux	0.001

4. Aléa ruissellement et coulée de boues

4.1. EVALUATION L'ALEA COULEE DE BOUES

4.1.1. Méthode

L'aléa coulée de boue est évalué à partir de deux sorties de modélisation WaterSed pour une pluie de période de retour 100 ans et pour une occupation des sols où les cultures sont seulement représentées par des cultures d'hiver. Les deux sorties en question sont les suivantes :

- La masse de terre transférée (t) : masse totale de terre transférée par le ruissellement provenant d'un bassin versant amont. Elle somme l'érosion diffuse et l'érosion concentrée.
- L'érosion concentrée (t) : masse de terre érodée localement par arrachement, sous l'action de l'écoulement des eaux de ruissellement

L'intérêt de ces sorties est de disposer, sur chacune des mailles de 5m*5m, d'un bilan à l'échelle de l'évènement de pluie des masses de terre transférées ou de l'érosion concentrée (Figure 20).

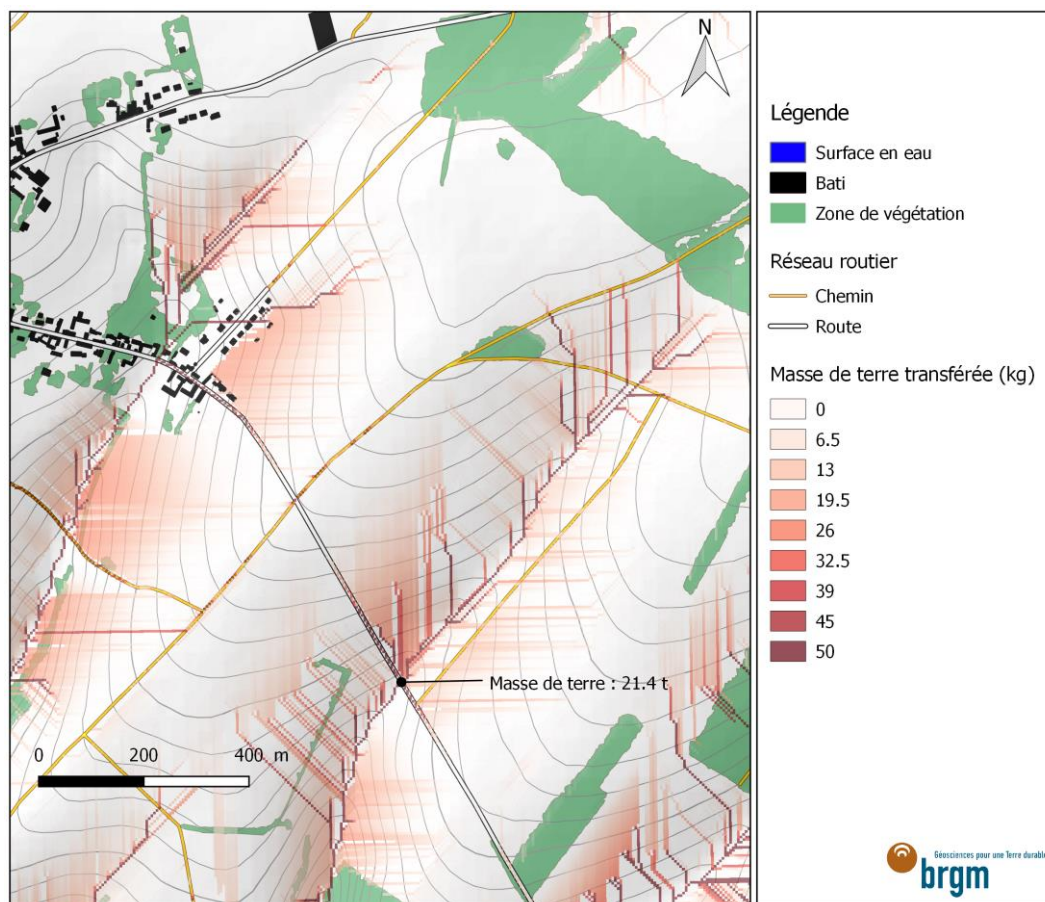


Figure 20 : Extrait de la cartographie des masses de terre transférées simulées par le modèle WaterSed pour une pluie de 1h de période de retour 100 ans et pour une occupation des sols avec des cultures seulement représentées par des cultures d'hiver.

L'emprise géographique de l'évaluation de l'aléa coulée de boue se focalise le long des voies de transfert du ruissellement et de l'érosion (routes, talwegs secs, etc.). Un seuil d'aire drainée a été recherché, afin de démarrer l'évaluation dès les premiers rameaux du réseau de ruissellement, présentant des formes d'érosion concentrée (ravine, rigole).

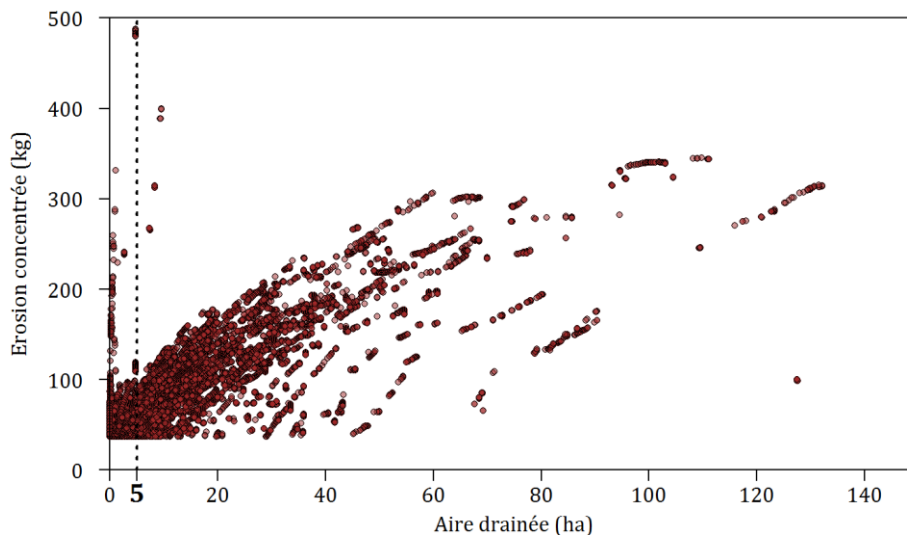


Figure 21 : Erosion concentrée locale calculée à partir du modèle Watersed et représentée en fonction l'aire drainée.

Pour se faire, seules les mailles présentant de l'érosion concentrée ont été sélectionnées. La masse de terre associée à cette érosion est ensuite mise en relation avec l'aire drainée par la maille. La Figure 21 montre que l'érosion concentrée démarre franchement à partir de 5 ha, avec une érosion concentrée pouvant atteindre 100 kg par maille. L'évaluation de l'aléa coulée de boue se focalise donc sur les axes de ruissellement drainant une superficie minimum de 5ha.

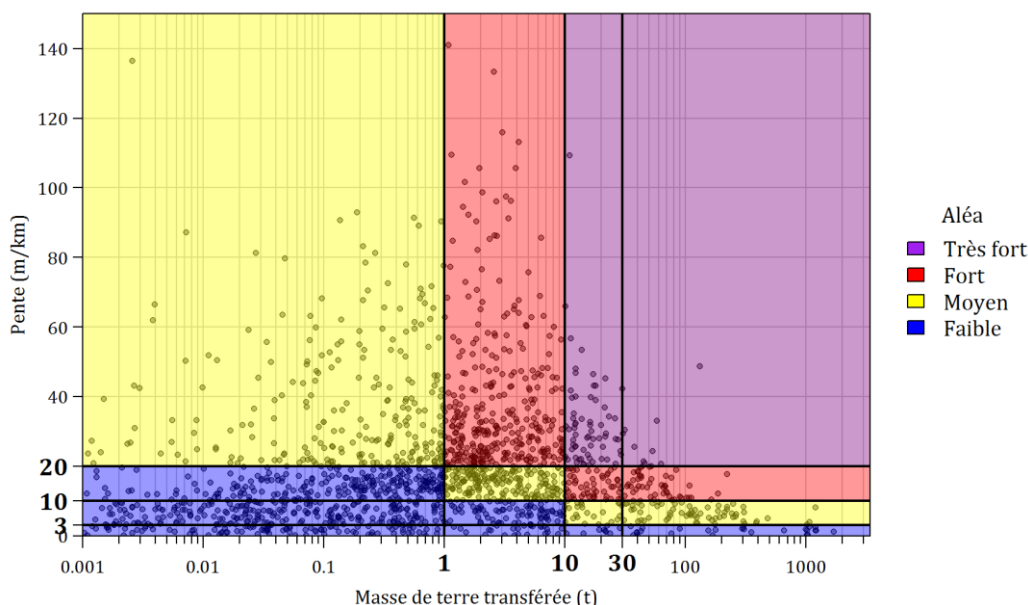


Figure 22 : Masse de terre transférée et pente de chacun des 3 991 axes de ruissellement identifiés. A partir de classes de masse de terre transférée et de pente (valeurs limites en gras), l'aléa coulée de boue est déterminé selon 4 classes.

A partir de ce seuil de 5 ha, des tronçons homogènes d'aire drainée ont été extraits (10 ha, 20 ha, 30 ha, etc.). Au total, 3 991 tronçons ont été identifiés pour un linéaire total de 768 km. Sur chacun des tronçons, la masse de terre érodée et l'érosion concentrée sont extrait tous les 5 m (résolution de la modélisation). Une masse de terre érodée médiane et la somme de l'érosion concentrée sont calculés par axe. La pente moyenne de chaque tronçon est évaluée par régression linéaire, sur les vertex de la polygone de l'axe de ruissellement, entre l'altitude et la distance depuis l'extrémité de l'axe. L'évaluation de l'aléa coulée de boue repose sur un système de classes de masses de terre transférée et de classes de pentes. Connaissant les deux variables sur chaque tronçon, l'aléa est ainsi déduit (Figure 22).

Ces classes ont été adaptées spécifiquement au contexte de l'étude, de manière à éviter une surreprésentation d'une classe d'aléa et surtout discriminer les talwegs les plus sensibles au phénomène de coulée de boue, dans une optique de mise en place d'actions prioritaires. L'aléa se décline en quatre classes : faible, moyen, fort et très fort. Les phénomènes d'érosion concentrée le long des axes de ruissellement (rigole, ravine) et notamment au sein des talwegs secs agricoles représentent un sur-aléa, dans la mesure où de grandes quantités de matériaux pédologiques peuvent être arrachés. Pour cette raison, l'aléa est augmenté d'une classe dans le cas où la somme de l'érosion concentrée sur l'axe est supérieure à 5 t.

4.1.2. Application

La cartographie de l'aléa coulée de boue pour chacun des 3 991 tronçons est présentée sur la Figure 23. Cette cartographie est détaillée au 1/10 000^{ème} en Annexe 4.

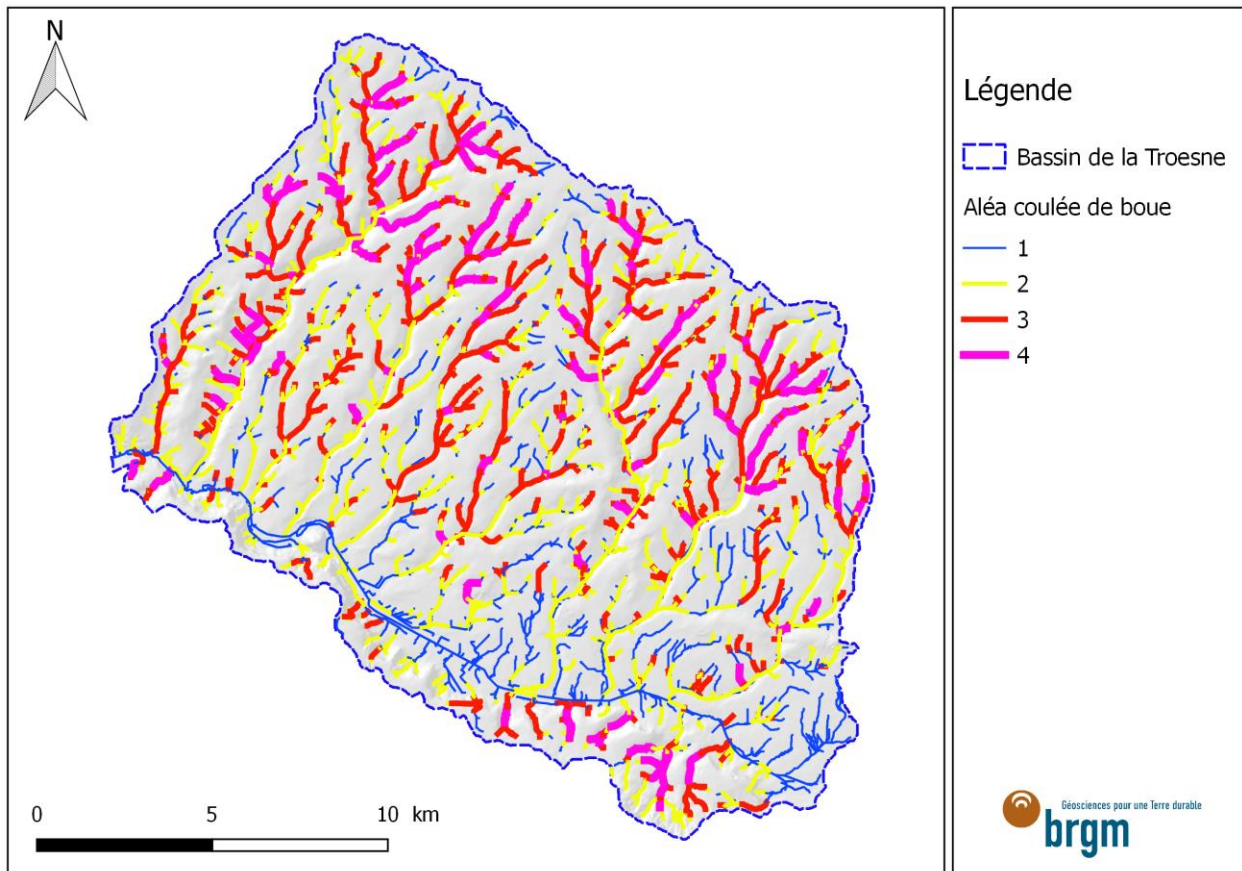


Figure 23 : Cartographie de l'aléa coulée de boue sur le bassin de la Troesne.

Les axes de ruissellement avec un aléa « très fort » sont principalement observés vers le nord du Plateau de Thelle. Ils sont localisés dans des talwegs secs drainant les plateaux agricoles. Entre les plateaux et les talwegs, l'aléa est graduel, en relation avec l'augmentation progressive de la masse de terre transférée (en relation avec l'aire drainée) et avec l'augmentation des pentes (Figure 24).

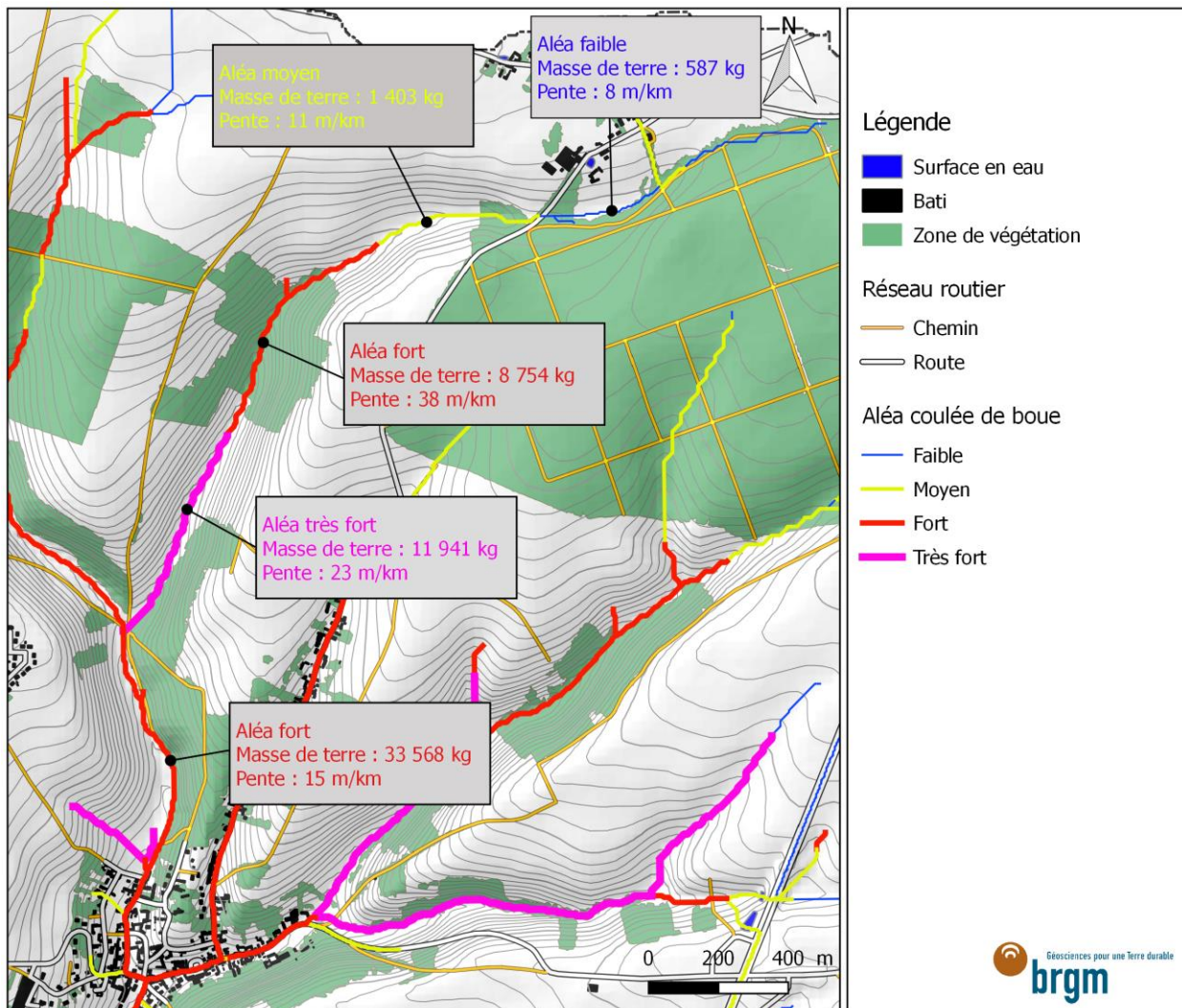


Figure 24 : Evolution de l'aléa coulée de boue depuis les plateaux agricoles jusque dans les talwegs secs.

Vers l'aval, les vallées s'élargissent, la pente longitudinale s'adoucit, offrant les possibilités aux sédiments de se déposer. L'aléa coulée de boue est en conséquence plus faible. C'est le cas sur les principaux cours d'eau de la Troesne (l'Aunette, le Ru du Mesnil, ou encore le Ru de Pouilly), où l'aléa est « moyen ». Vers le sud, sur les versants, les pentes sont également plus faibles qu'à l'amont du Plateau de Thelle, donnant globalement un aléa « moyen » à « fort » mais pouvant être localement « très fort ».

Dans la vallée de la Troesne, en dépit de masses de terre transférées importantes par le cours d'eau, les faibles pentes dans les vallées entraîne un aléa « faible » à « moyen ». Au sud, sur les Buttes de Rosnes, l'aléa est « fort » à « très fort » en raison de versants courts à fortes pentes.

Ce schéma de répartition amont-aval de l'aléa est parfaitement visible en sommant le linéaire d'axe de ruissellement par classe d'aléa et par classe d'aire drainée (Figure 25). La proportion d'axes avec un aléa « faible » et « moyen » est de 58% de 27%, respectivement, pour des aires drainées inférieures à 20 ha. Ces proportions diminuent progressivement avec l'augmentation de l'aire drainée des bassins versants, jusqu'à environ 100 – 150 ha. Le corollaire est une augmentation de la proportion des axes à aléa « très fort », passant de 0.3% à 23% pour une aire drainée de 150 ha. Au-delà de ce seuil, l'aléa sur les axes de ruissellement tend à être « moyen » puis « faible » en raison de la diminution des pentes.

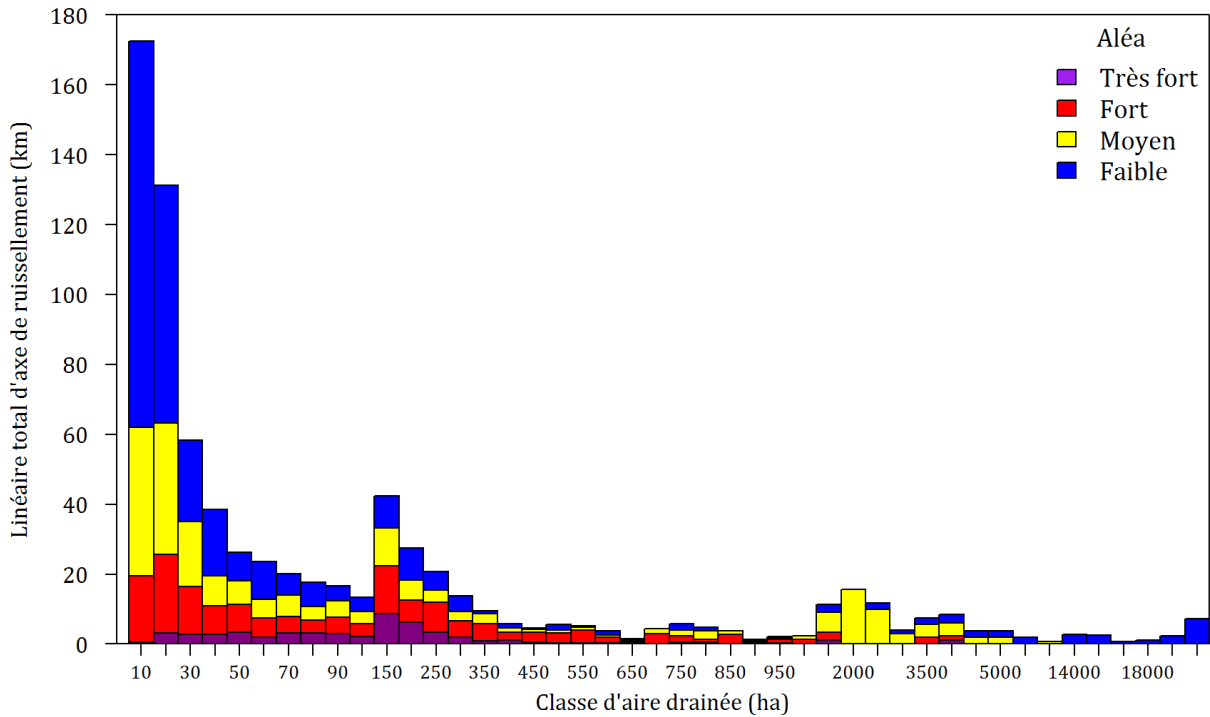


Figure 25 : Distribution du linéaire total d'axe de ruissellement par classe d'aire drainée avec une distinction de l'aléa coulée de boue sur le linéaire de chaque classe d'aire drainée.

Les communes où l'aléa coulée de boue est le plus élevé sont celles situées majoritairement au nord du Plateau de Thelle. Les communes de Labosse, Valdampierre, Jouy-sous-Thelle ou encore Beaumont-les Nonains présentent un aléa « fort » ou « très fort » pour plus de 50% des axes de ruissellement.

Toutefois, il ne s'agit pas forcément des communes les plus à risques. La confrontation avec les zones exposées dans le point suivant permet de répondre à cette question et de prioriser les espaces à aménager pour réduire l'aléa coulée de boue.

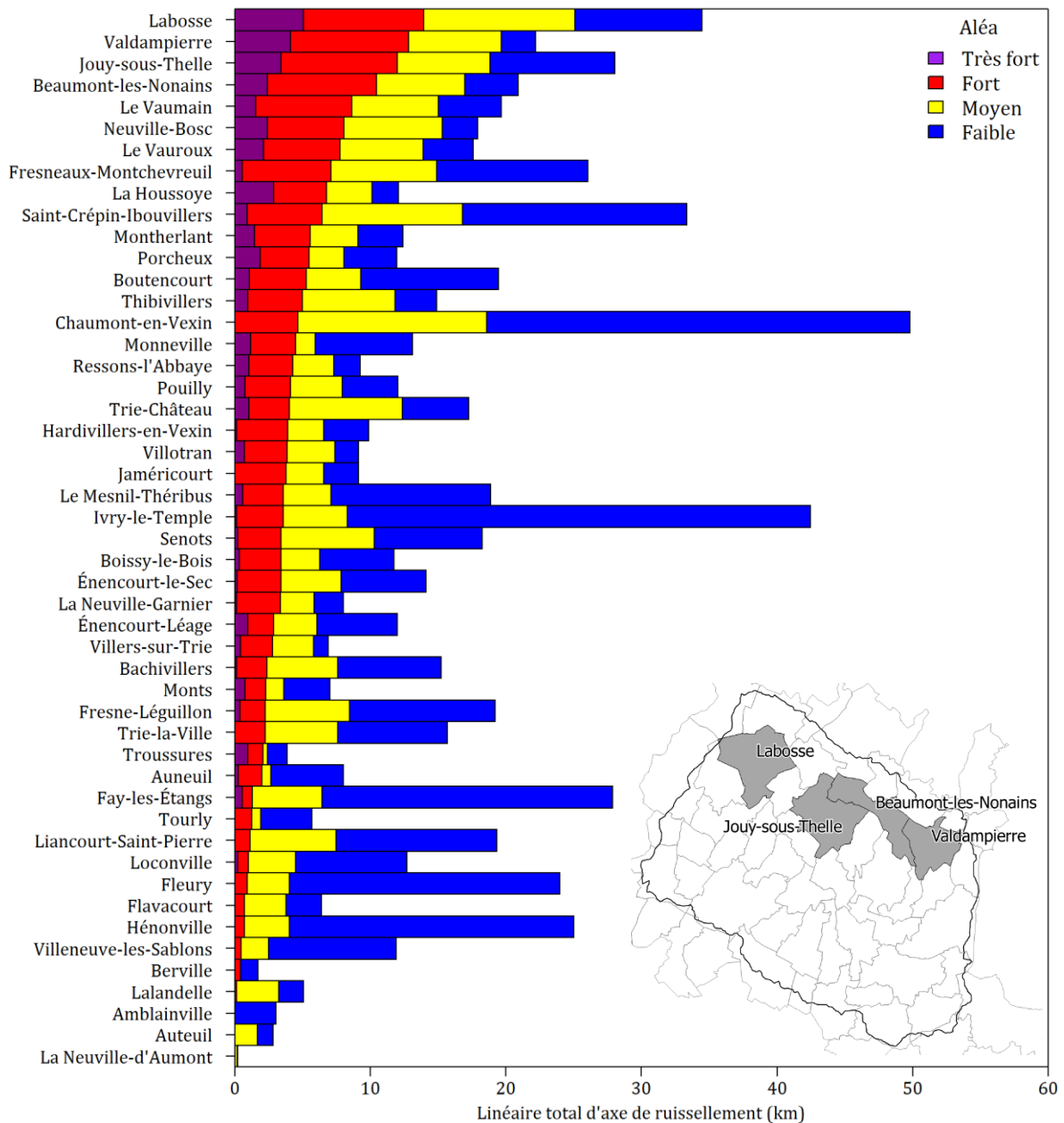


Figure 26 : Distribution du linéaire total d'axe de ruissellement par commune avec une distinction de l'aléa coulée de boue sur le linéaire de chaque commune.

4.2. DEFINITION DE L'ENVELOPPE D'INONDATION PAR RUISSELLEMENT

4.2.1. Méthode

Les deux sorties de modélisation utilisées pour l'évaluation des inondations par ruissellement sont les suivantes :

- Le débit de pointe (m^3/s) : débit de pointe de l'hydrogramme de crue. Dans le modèle, l'hydrogramme est approximée sous forme triangulaire,
- La vitesse (m/s) : vitesse de l'écoulement des eaux de ruissellement au droit de la maille.

La cartographie du débit de pointe en sortie du modèle Watersed est connue en toute maille de $5m*5m$ du bassin de la Troesne (Figure 27).

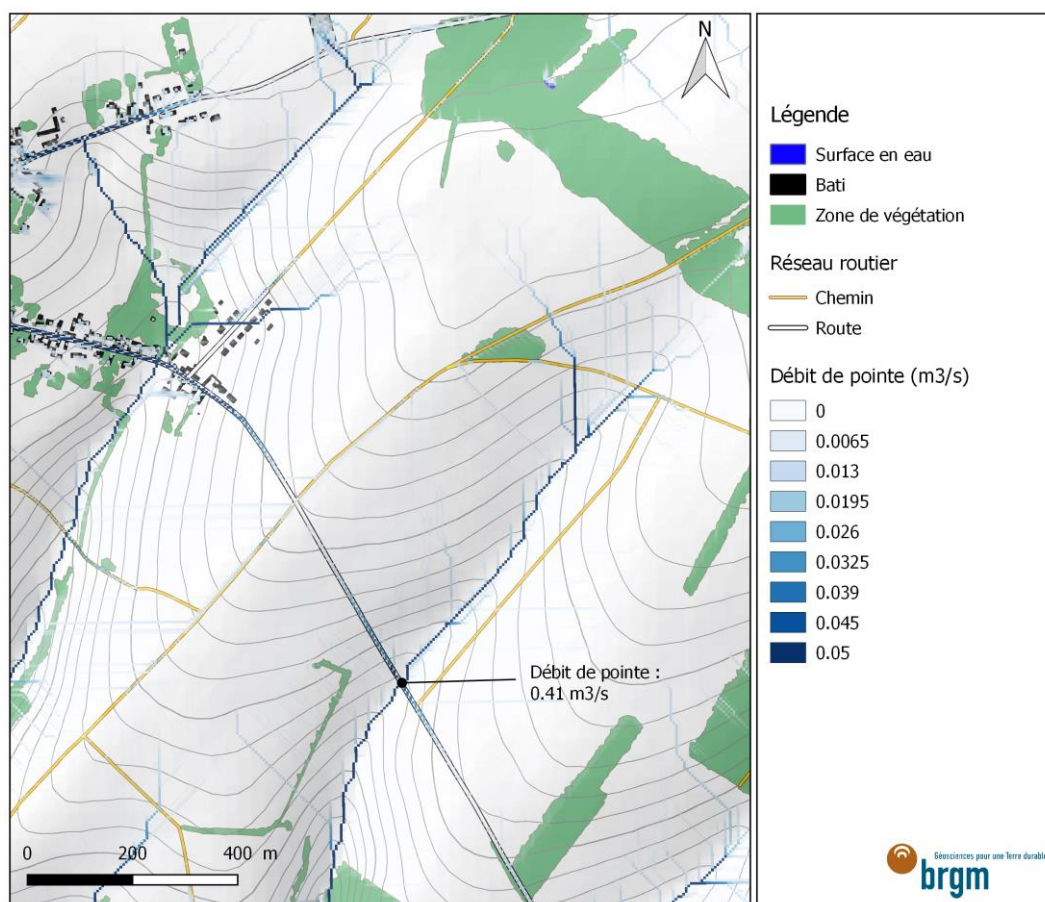


Figure 27 : Extrait de la cartographie des débits de pointe simulés par le modèle WaterSed pour une pluie de 1h de période de retour 100 ans et pour une occupation des sols avec des cultures seulement représentées par des cultures d'hiver.

Tout comme l'aléa coulée de boue, l'extension géographique de l'évaluation de l'inondation par ruissellement se focalise le long des voies de transfert (talwegs, routes, etc.), jusqu'au fond de vallée de l'ensemble des affluents de la Troesne. Dans les vallées avec un cours d'eau à écoulement permanent, il est alors question d'inondation par débordement de cours d'eau. La vallée de la Troesne est exclue, en raison de largeurs importantes et de faibles pentes, nécessitant l'emploi d'un modèle hydraulique.

L'approche proposée est d'estimer une largeur d'écoulement connaissant le profil en travers de la vallée, le débit et la vitesse. Un seuil de débit de pointe de 50 l/s a été défini afin d'avoir des débits suffisants pour pouvoir estimer l'emprise de l'inondation au regard de la qualité de la donnée topographique utilisée, à savoir la BD ALTI 5m.

En effet, cette base de données ne permet pas d'avoir la géométrie précise des principaux affluents de la Troesne, puisque ces cours d'eau ne font que quelques mètres de largeur. L'estimation de l'emprise de l'inondation ne tient donc pas compte de la section des cours d'eau. Il n'est donc pas pertinent de fournir une cartographie des vitesses et hauteurs d'eau sur les zones inondées. En conséquence, il n'est pas possible de définir une cartographie de l'aléa inondation par ruissellement ou par débordement au sens PPRI. De plus, l'ensemble des bassins tampons et ouvrages de régulation des débits ne sont pas pris en compte. L'objectif est avant tout d'avoir une connaissance de la localisation des phénomènes d'inondations.

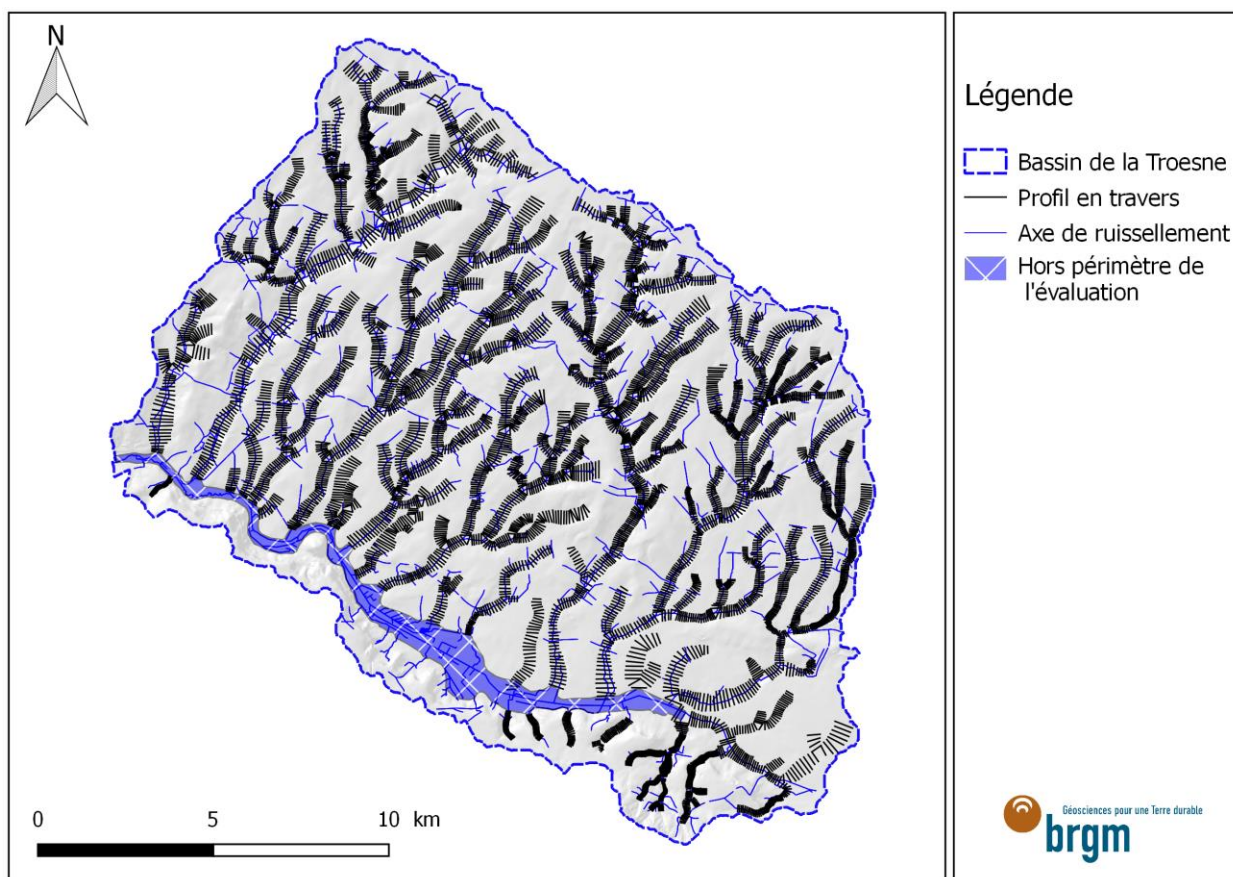


Figure 28 Cartographie des 4 907 profils en travers répartis sur les principaux axes de ruissellement du bassin de la Troesne.

4.2.2. Application

Sur l'ensemble du bassin, 4 907 profils en travers ont été tracés (Figure 28), avec une distance d'environ 60 m entre les profils, adaptée suivant la variabilité des pentes longitudinales. Sur chacun de ces profils, le débit maximum et la vitesse associée ont été extraits. La section de l'écoulement est calculée en divisant le débit par la vitesse. Ensuite, il s'agit de déterminer la largeur d'écoulement associée à cette section. Pour ce faire, une procédure itérative a été mise en place pour déterminer la largeur d'écoulement associée à la section.

Cette largeur d'écoulement est ensuite interpolée entre les profils et la largeur extraite tous les 1 m le long le réseau d'axe de ruissellement naturel et le réseau d'axe de ruissellement corrigé à partir de l'expertise terrain. Une distance tampon pour la largeur d'écoulement extraite est réalisé tous les 1m et pour les deux réseaux.

En cas d'inondation majeure, il y a un risque que le ruissellement déborde des axes de ruissellement anthropique (biefs perchés, fossés, etc.) et que les eaux rejoignent le fond de vallée naturel. Pour cette raison, les deux types de réseau sont considérés (Figure 29). Enfin, l'ensemble des zones situées entre les deux réseaux sont intégrées à l'emprise de l'inondation.

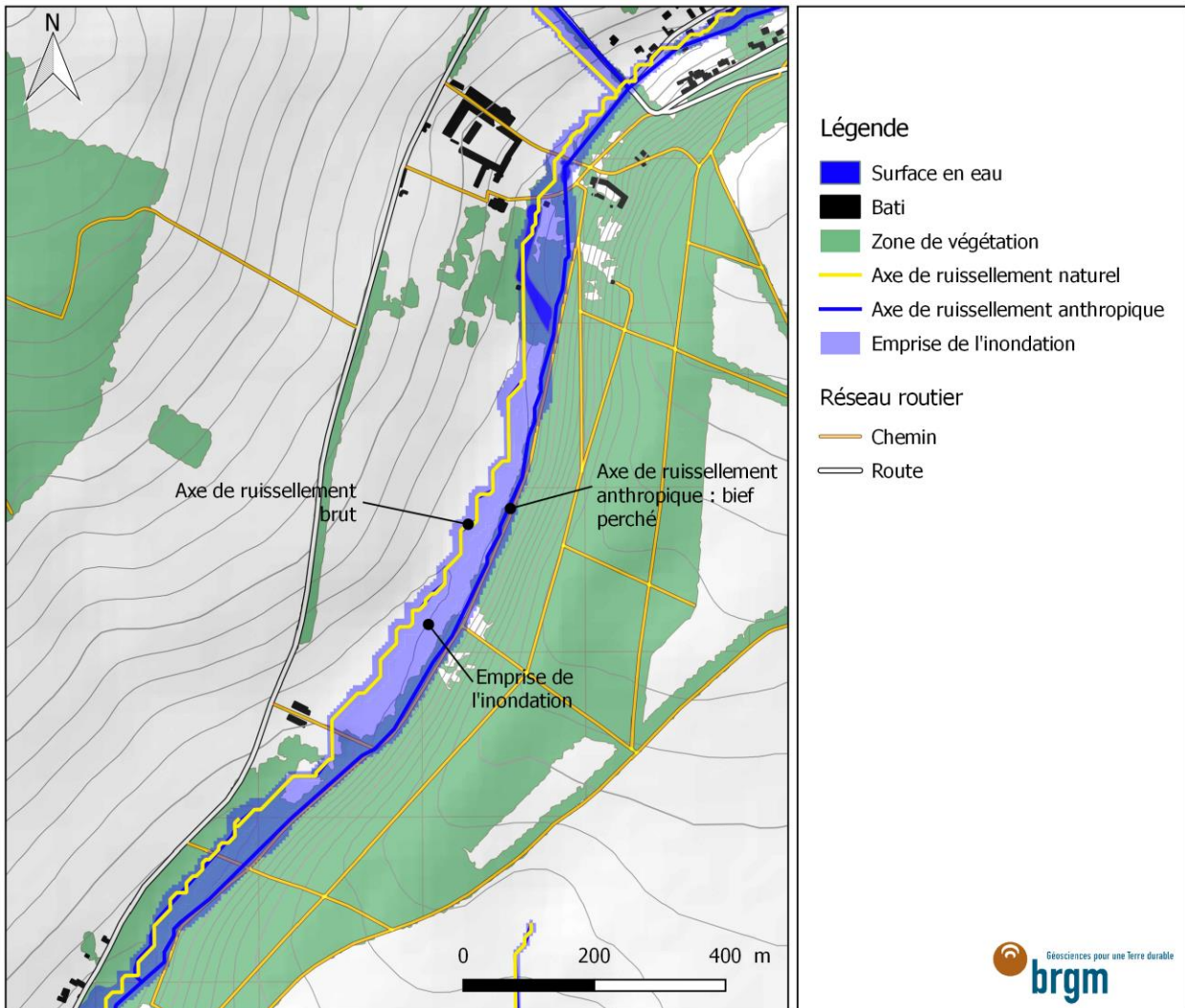


Figure 29 : Evaluation de l'emprise de l'inondation par considération des axes de ruissellement naturels et anthropiques.

Cette dissociation des réseaux est particulièrement visible dans les fonds de vallée des affluents de la Troesne. Vers l'amont, les axes de ruissellement anthropiques et naturels se confondent le plus souvent. La cartographie de l'enveloppe d'inondation par ruissellement est présentée sur la Figure 30. Cette cartographie est détaillée au 1/10 000^{ème} en Annexe 5.

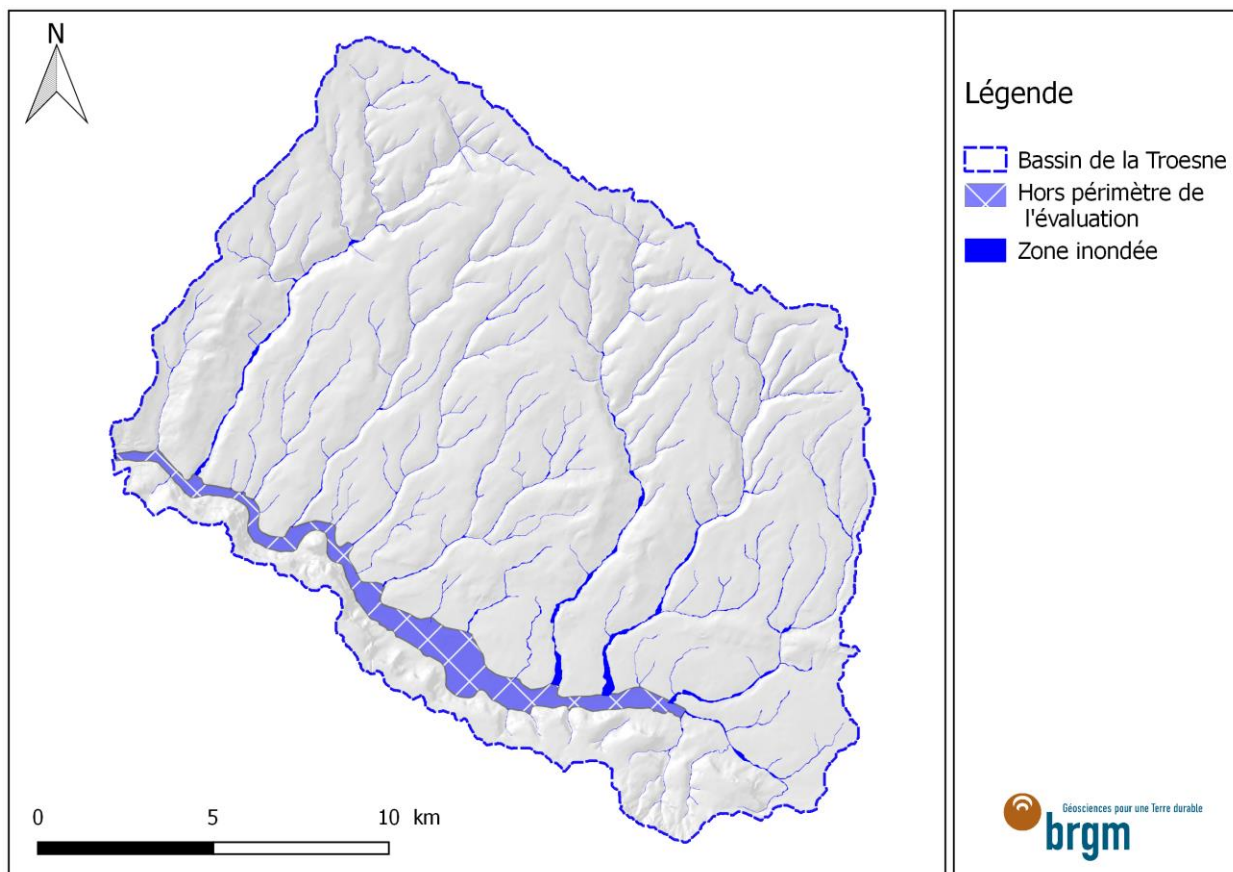


Figure 30 : Cartographie des zones inondées sur le bassin de la Troesne pour une pluie de 1h de période de retour 100 ans.

Durant la phase de réflexion avec la DDT sur la méthodologie de zonage de l'inondation par ruissellement, il avait été évoqué l'idée d'une relation entre l'aire drainée et la largeur d'écoulement. Cette piste a donc été investiguée. Une tendance positive est logiquement observée entre l'aire drainée et la largeur d'écoulement mais la dispersion est très importante, empêchant le déploiement d'une telle méthode pour le contexte de l'étude (Figure 31). Ce résultat renforce l'importance d'estimer la largeur des écoulements à l'aide de la topographie locale.

Contrairement à l'aléa coulée de boue, ce sont les communes situées vers l'exutoire des affluents de la Troesne, au sud du plateau de Thelle, qui sont les plus impactées par les inondations par ruissellement et par débordement : Ivry-le-Temple, Fresne-Léguillon, Saint-Crepin-Ibouvillers, Fleury ou encore Chaumont-en-Vexin. Sur ces communes, la surface totale inondée dépasse les 30 ha (Figure 32).

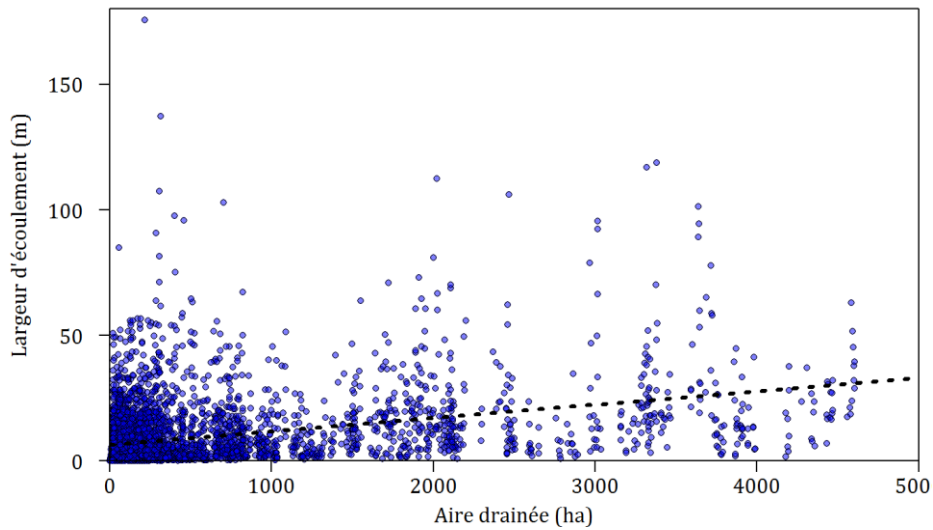


Figure 31 : Largeur d'écoulement des eaux de ruissellement calculée au niveau des 4 907 profils en travers et classée en fonction de l'aire drainée.

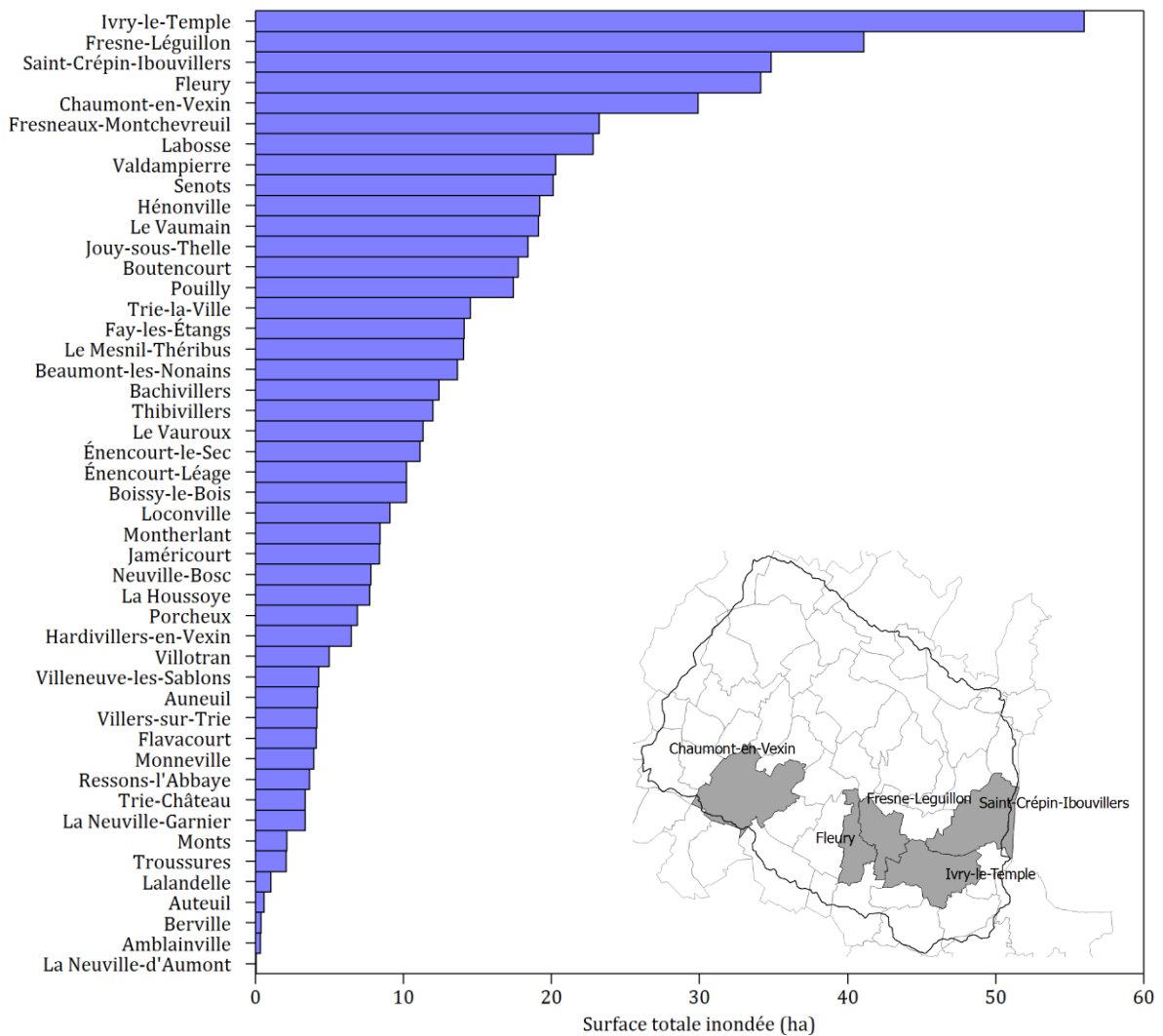


Figure 32 : Surface totale inondée par commune pour une pluie de 1h de période de retour 100 ans.

5. Risque ruissellement et coulée de boue

5.1. INVENTAIRE DES ENJEUX

L'inventaire des enjeux consiste à recenser l'ensemble des éléments pouvant être impactés par les coulées de boue et les inondations. Ces enjeux sont diverses, tant l'emprise de l'homme et de ses activités sur son environnement est importante : habitations privées, routes, bâtiments publics, commerciaux, industriels, cultures, captages, réseaux d'eau, réseau électriques, etc., et dans le cas le plus dramatique, les vies humaines. La cartographie des enjeux est issue de la BD TOPO de l'IGN.

Sur le bassin de la Troesne, 20 554 bâtiments sont dénombrés et représentent 0.7% de l'occupation des sols du bassin de la Troesne (Figure 4B). Concernant les routes, 1 212 km de linéaire est totalisé. Une ligne de chemin de fer est également présente au sud du territoire d'étude, assise sur les Buttes de Rosnes, sur une longueur de 20 km

5.2. HIERARCHISATION DES ENJEUX

Une hiérarchisation des enjeux est proposée, en fonction de leur importance dans la gestion d'une crise suite à des inondations et des coulées de boues. Après lecture des enjeux surfaciques et linéaires de la BD TOPO, une hiérarchisation est proposée :

Tableau 11 : Hiérarchisation des enjeux face selon leur importance face à une crise provoquée par du ruissellement et des coulées de boues.

Niveau d'importance	Description
1	<ul style="list-style-type: none">Chemins agricoles, pistes, sentiers
2	<ul style="list-style-type: none">Routes et voies ferrées
3	<ul style="list-style-type: none">Habitations privéesBâtiments industriels, commerciaux et agricolesBâtiments administratifs : palais de justice, bureau de poste, etc.Bâtiments ou site lié à la culture, aux loisirs, au sport et à l'enseignement : camping, musée, terrain de sport, écoles, etc.Monuments historiques : église, château, cimetière, etc.Infrastructures de réseau d'eau et d'électricité : station de pompage, usine de traitement des eaux, poste de transformation, etc.
4	<ul style="list-style-type: none">Bâtiments publics, administratifs et de santé indispensables à la gestion de la crise : mairie, caserne de pompier, gendarmerie, préfecture, sous-préfecture, hôtel de police, hôpital

Dans ce travail, la vulnérabilité des enjeux, c'est-à-dire le niveau d'endommagement prévu sur les enjeux face aux aléas étudiés, n'est pas abordé. La hiérarchisation des enjeux est présentée dans l'Atlas cartographie des enjeux.

5.3. EVALUATION DU RISQUE

La cartographie du risque coulée de boues et inondation repose sur un croisement entre la cartographie de l'aléa coulée de boue, la cartographie des inondations et la cartographie des enjeux. L'approche est différente pour les enjeux surfaciques (bâti) et les enjeux linéaires (routes, chemins, etc.)

Pour les enjeux surfaciques de type « bâti », l'enveloppe de l'inondation est croisée avec le bâti. Cette étape de croisement est importante car elle permet de discriminer les bâtiments avec et sans aléa. Une intersection simple n'est pas satisfaisante car elle englobe les bâtiments situés juste à la limite de l'emprise de l'inondation. Le risque est alors de surestimer le nombre de bâtiments à risque, au détriment de ceux qui sont en partie ou en totalité dans l'emprise de l'inondation. Le choix a donc été fait d'affecter un aléa seulement pour les bâtiments dont 30% de la surface se situe dans l'emprise de l'inondation. Ainsi, sur les 20 652 bâtiments situés sur le bassin de la Troesne, 492 bâtiments ont 30% de leur surface dans l'emprise de l'inondation. Pour chacun de ces bâtiments, l'aléa ruissellement et coulée de boue de l'axe de ruissellement le plus proche est attribué.

Pour les enjeux linéaires, l'enveloppe de l'inondation est croisée avec le linéaire de route, chemins et voies ferrées. Ce linéaire est tronçonné tous les 5m de façon à extraire seulement les tronçons affectés situés dans l'enveloppe d'inondation. Sur les 1212 km de routes et chemins, et les 11.6 km de voies ferrées, 47 km sont situés dans l'emprise de l'inondation. Comme pour les enjeux surfaciques, l'aléa ruissellement et coulée de boue de l'axe de ruissellement le plus proche de chaque tronçon est attribué.

Connaissant l'aléa et le niveau d'importance pour chaque enjeu, le risque ruissellement et coulée de boue est déterminé suivant la clef présentée dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Méthode d'évaluation du risque de ruissellement et de coulée de boue à partir du niveau d'importance des enjeux et de l'aléa.

Aléa	Enjeu			
	1	2	3	4
1	Faible	Faible	Faible	Moyen
2	Faible	Faible	Moyen	Fort
3	Faible	Moyen	Fort	Très fort
4	Moyen	Fort	Très fort	Très fort

La cartographie du risque issue de ce croisement est présentée au 1/10 000^{ème} en Annexe 5. Le risque individuel de chaque enjeu surfacique et linéaire est sommé par commune dans l'optique d'identifier les communes les plus sensibles (Figure 33 et Figure 34).

Parmi l'ensemble des communes du bassin, la commune de Valdampierre arrive largement en tête avec 68 bâtiments présentant un risque fort à très fort de ruissellement et de coulée de boue. Cette commune est suivie par Boissy-le-Bois (16 bâtiments), Labosse (13 bâtiments), Fresneaux-Montchevreuil (12 bâtiments) ou encore Montherlant (11 bâtiments).

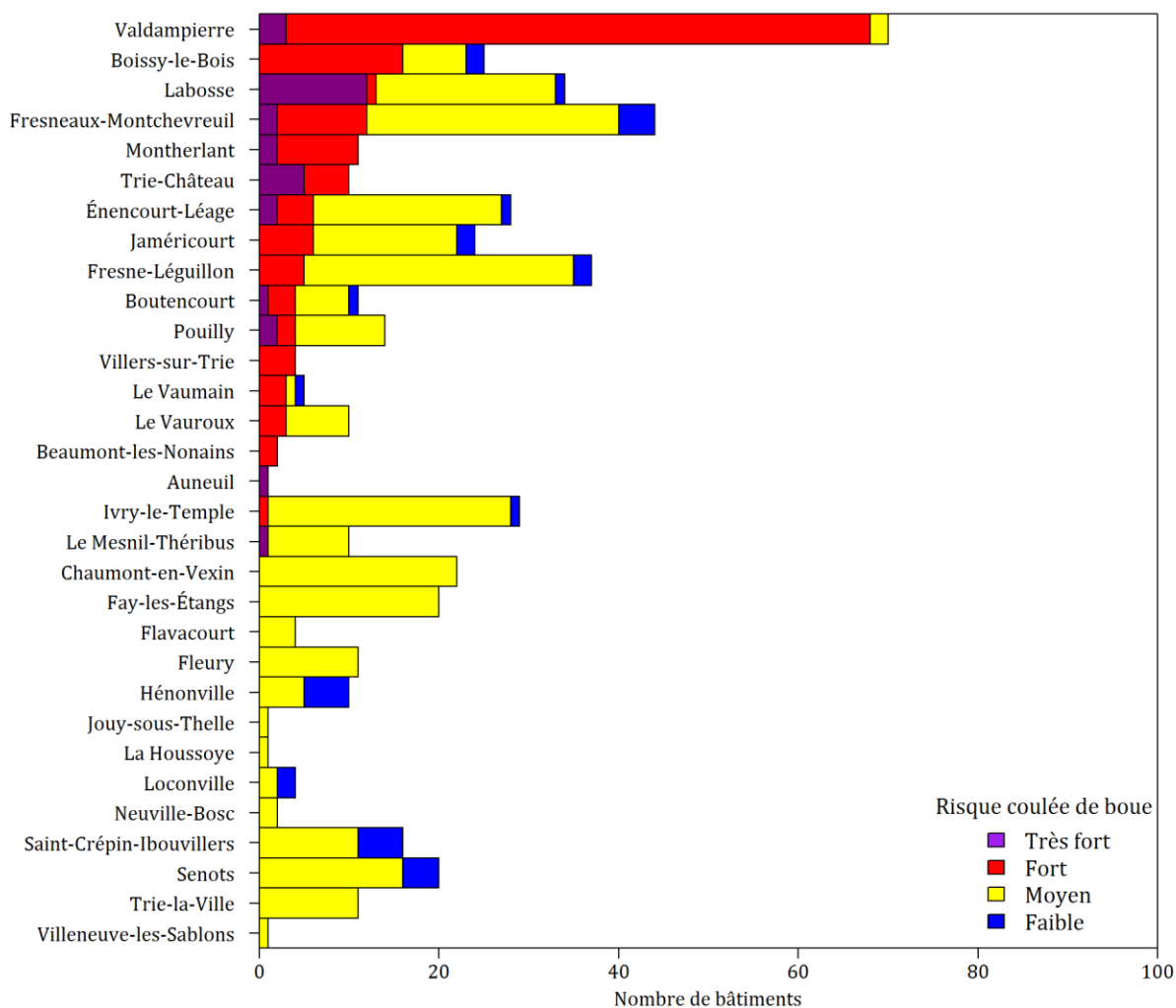


Figure 33 : Nombre total de bâtiments par commune classé suivant le risque de ruissellement et de coulée de boue.

L'organisation du territoire est globalement identique à chaque fois : un centre-bourg située à l'exutoire d'un talweg sec et drainant un ou plusieurs bassins versants agricoles d'une superficie de l'ordre de la centaine d'hectares. Le temps de réponse très court de ces bassins versants est aggravé par les réseaux de routes et chemins installés dans les talwegs et sur les versants pentus. La commune de Valdampierre est l'exemple type : environ 3 km de linéaire de route présente un risque de ruissellement et coulée de boue moyen à fort. La cartographie du risque sur le bourg permet de se rendre compte de l'ampleur du problème : trois rues orientées vers le centre bourg drainent des bassins versants de 473 ha, 80 ha, 174 ha et 156 ha.

Les communes de Labosse, Boissy-le-Bois, Jaméricourt, du Vauroux, ou encore du Mesnil-Théribus sont exactement dans la même configuration, dans des proportions cependant moindre en terme d'enjeux exposés.

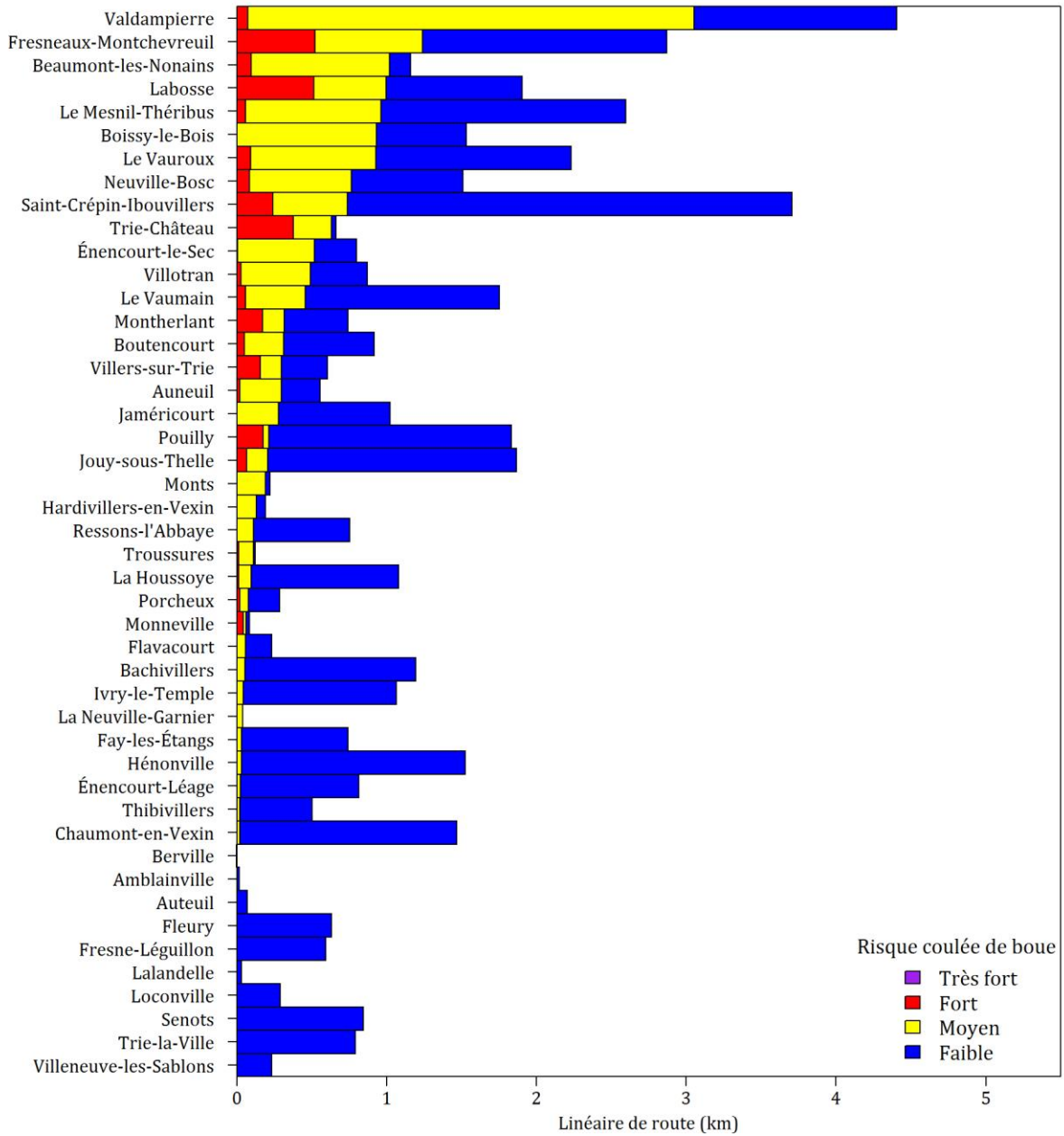


Figure 34 : Linéaire total de réseau routier et ferré par commune classé suivant le risque de ruissellement et de coulée de boue.

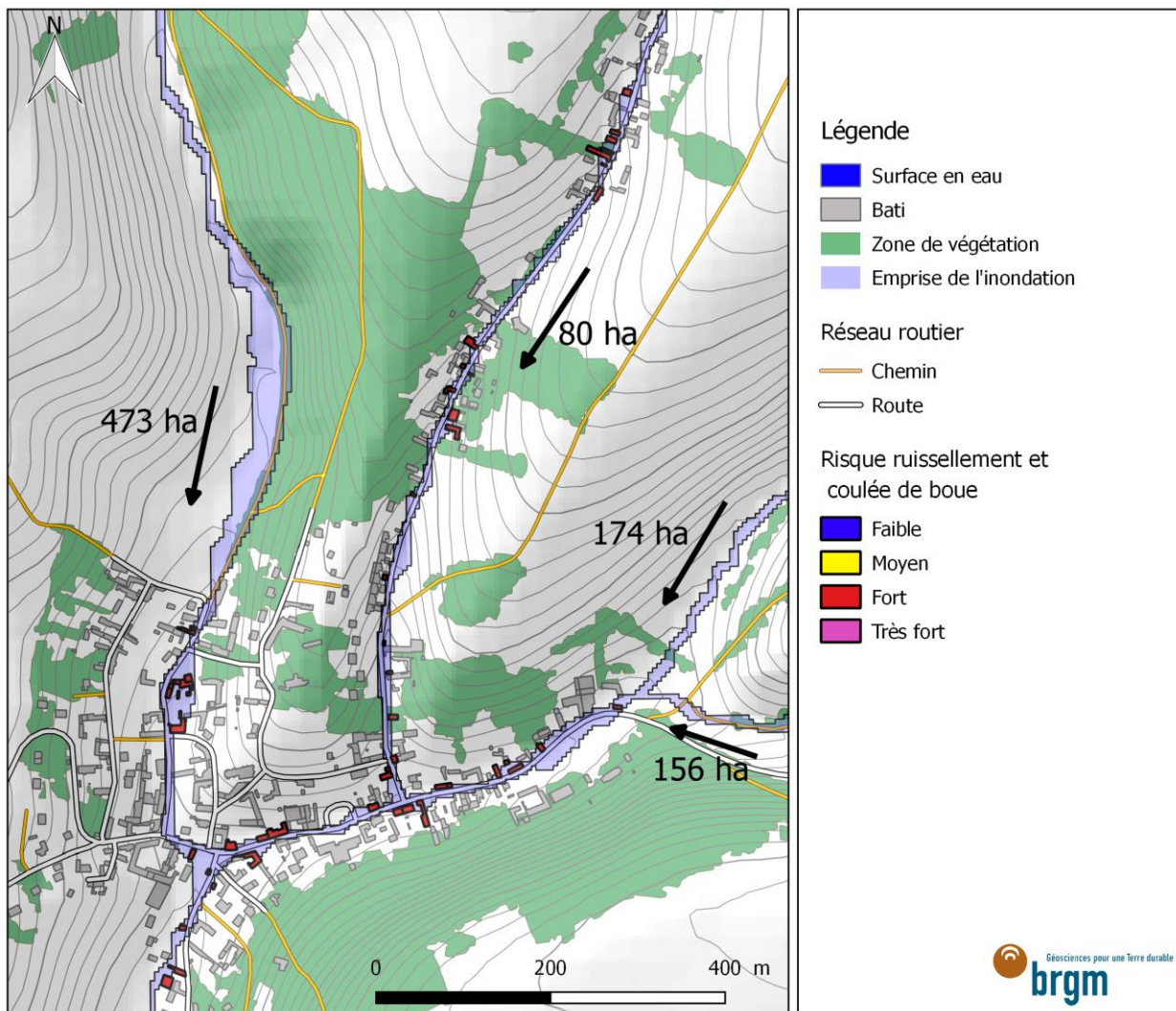


Figure 35 : Emprise de l'inondation suite à une pluie de 1h (période de retour 100 ans) et risque ruissellement et coulée de boue sur les enjeux bâti au niveau du bourg de Valdampierre.

La cartographie du risque ruissellement et coulée de boue sur le bassin versant de la Troesne constitue ainsi un document de référence pour identifier les enjeux où le risque est élevé et pour déployer une stratégie d'action sur le bassin versant. Cette cartographie constitue également un document support pour l'établissement ou la révision des documents d'urbanisme. Le bon sens serait d'interdire les nouvelles constructions dans l'emprise de l'inondation définie, ou le cas échéant, d'imposer des conditions garantissant la protection des biens et des personnes face aux inondations (placer la construction sur la partie la moins exposée du terrain, surélever les planchers habitables, placer certaines pièces telles que les chambres aux étages, etc.).

6. Propositions de mesures

Cette phase a pour objectif de proposer des solutions d'aménagements permettant de diminuer le risque ruissellement et coulée de boue au droit des enjeux. La lutte contre ces phénomènes suppose une réflexion globale, à l'échelle du bassin versant, en considérant les facteurs responsables des phénomènes de coulées de boues et les solutions acceptables par les parties prenantes de la problématique (agriculteurs, communes, associations, services de l'Etat, etc.).

Ces solutions sont diverses et se résument en trois catégories, en fonction de leur positionnement aux différentes échelles du bassin versant : les mesures agronomiques, les ouvrages d'hydraulique douce et les ouvrages structurants.

Sur les parcelles agricoles, les agriculteurs sont encouragés à adopter des pratiques culturales limitant le départ de terres et favorisant l'infiltration. De nombreux travaux démontrent ainsi l'efficacité des cultures intermédiaires, du non-déchaumage des résidus de cultures, d'un travail du sol superficiel ou encore d'une gestion raisonnée des assolements et des rotations dans la réduction du ruissellement et de l'érosion (Martin et al., 2014; Ouvry et al., 2012a; Souchère et al., 2005). Cependant, la mise en place de ces bonnes pratiques dépend de la volonté des agriculteurs. En Europe, ce genre de pratiques reste limité (Holland, 2004) et prendra certainement plusieurs années voire des dizaines d'années à être généralisé (Evrard et al., 2008). En attendant, en bas des parcelles agricoles et le long des chemins d'écoulement des eaux, des aménagements d'hydraulique douce (fascines, haies, bandes et chenaux enherbés) peuvent être installés (Evrard et al., 2008, 2007; Ouvry et al., 2012b). A l'exutoire des vallons secs, des ouvrages structurants (barrages en terre, bassins tampons) sont conseillés lorsqu'il s'agit de protéger les villages situés en fond de vallée, des coulées boueuses et des inondations (Boardman and Vandaele, 2015; Fiener and Auerwald, 2000; Verstraeten and Poesen, 1999).

Le positionnement de chaque mesure doit être réfléchi dans le cadre d'un schéma d'aménagement à l'échelle du bassin versant (Gumiere et al., 2011). L'idée est de cibler les zones de production de l'érosion et les voies de transfert, puis de dimensionner en conséquence les mesures appropriées qui garantissent un impact significatif aux différentes échelles du bassin versant. En effet, cette efficacité entre les échelles spatiales n'est pas systématique et les performances observées à l'échelle locale (au droit des aménagements) ne peuvent pas être simplement extrapolées à l'échelle globale (exutoire du bassin versant) (Van Oost et al., 2002; Verstraeten et al., 2006). La mesure de cette efficacité nécessite alors l'emploi d'outil de modélisation tel que le modèle WaterSed, où le ruissellement et l'érosion sont simulés en tout point de l'espace.

Partant de ces principes et ces constats, le schéma d'aménagement proposé pour le bassin de la Troesne se décompose en deux scénarios (court et long terme), qui sont comparés à un scénario de référence :

- Scénario 1 : Occupation des sols actuelle (2014)
- Scénario 2 : Occupation des sols actuelle (2014) + Aménagements d'hydraulique douce (court terme)
- Scénario 3 : Occupation des sols actuelle (2014) + Aménagements d'hydraulique douce + Amélioration des pratiques culturales (long terme)

Ces scénarios sont testés pour des pluies d'une durée de 1h et pour des périodes de retour de 10 ans, 20 ans, 50 ans et 100 ans.

6.1. POSITIONNEMENT ET PARAMETRISATION DES MESURES

6.1.1. Les ouvrages d'hydraulique douce

La localisation des aménagements d'hydraulique douce est présentée au 1/10 000^{ème} en Annexe 6. Elle est réalisée de manière automatique selon les règles suivantes :

- Un positionnement aux limites des parcelles agricoles afin d'éviter de gêner le travail de l'agriculteur,
- Un bassin versant agricole amont compris entre 2ha et 50ha. Au-delà de ce seuil déjà élevé, le risque est une destruction de l'ouvrage en raison de débits trop importants en cas d'évènements pluviométrique majeur,
- Une pente locale supérieure à 2%

A l'issue de cette étape, 241 emplacements ont été identifiés. Sur ces emplacements, le choix du type d'aménagement d'hydraulique douce s'est porté exclusivement sur des fascines. Il s'agit en effet d'un scénario fictif. D'autres aménagements sont possibles (haies de ligneux, haies de miscanthus, bandes enherbées, taillis, etc.) mais le choix final nécessite d'être concerté et accepté par les agriculteurs, afin de garantir la pérennité de l'ouvrage. Rapporté à la superficie du bassin de la Troesne (300 km²), la densité d'aménagement est de 0.80 pour un linéaire total de fascine de 13 170 m soit un coût total de 658 500 € H.T. (coût moyen de 50€ H.T. du mètre linéaire) ou 31.5 € H.T. par hectare (rapporté à la SAU de 20 960 ha en 2010).

L'impact de chaque fascine sur le ruissellement et l'érosion est quantifié à l'aide du modèle WaterSed. Le module aménagement nécessite différentes couches en entrée, caractérisant les propriétés des aménagements. Les propriétés des fascines sont tirées des essais expérimentaux menés par l'AREAS. L'abattement sur la charge sédimentaire est calculé selon une relation empirique également tirée de ces travaux, où l'abattement diminue avec l'augmentation du débit spécifique en entrée de la fascine.

Tableau 13 : Propriétés des fascines renseignées dans le modèle WaterSed

Propriété	Valeur
Largeur (m)	0.5
Capacité d'infiltration (mm/h)	200
Coefficient de Manning	0.3

6.1.2. Les pratiques culturales

Les pratiques culturales ont une très grande influence sur l'intensité du ruissellement et de l'érosion des sols. La limitation de ces phénomènes passe par deux leviers fondamentaux : protéger le sol de l'impact des gouttes de pluie et infiltrer les eaux de pluies.

De très nombreuses solutions existent pour atteindre cet objectif, avec des déclinaisons suivant le type de culture, le type de sol et le régime pluviométrique ([CA Hauts-de France, 2018](#); [Dautrebande et al., 2006](#); [Ouvry et al., 2012a](#)). Libre à chaque agriculteur de se renseigner auprès de sa Chambre d'Agriculture pour mettre en place les solutions les plus adaptées à son activité.

Le scénario 3 considère un cas fictif où l'amélioration des pratiques culturales entraîne une augmentation de la capacité d'infiltration du sol. Toutefois, il est raisonnable de penser que cette augmentation décroît avec la capacité d'infiltration initiale. L'augmentation est de 100% pour les faibles valeurs (2 mm/h, 5 mm/h) et de 50% à 25% pour les fortes valeurs (10 mm/h, 15 mm/h).

Tableau 14 : Capacité d'infiltration des différents types de cultures et pour différentes texture de sol sans et avec une amélioration des pratiques culturales.

Texture	Culture	Etat de surface du sol	Sans amélioration	Avec amélioration	Différence (%)
			Capacité d'infiltration (mm/h)	Capacité d'infiltration (mm/h)	
Limoneuse	Hiver	C3-F2-R0-S1	5	10	+100%
Limoneuse	Printemps précoce	C3-F2-R0-S1	5	10	+100%
Limoneuse	Printemps tardive	C2-F2-R0-S1	2	5	+150%
Limono-argileuse	Hiver	C3-F12-R1-S2	5	10	+100%
Limono-argileuse	Printemps précoce	C3-F12-R1-S2	5	10	+100%
Limono-argileuse	Printemps tardive	C2-F1-R2-S2	10	15	+50%
Limono-sableuse	Hiver	C3-F12-R0-S3	15	20	+25%
Limono-sableuse	Printemps précoce	C3-F12-R0-S3	15	20	+25%
Limono-sableuse	Printemps tardive	C2-F12-R1-S3	15	20	+25%

6.2. IMPACT DES SCENARIOS SUR LA PARCELLE AGRICOLE

Au total, 12 simulations sont réalisées : 4 évènements de pluie de différentes périodes de retour et 3 scénarios (référence, aménagements d'hydraulique douce, aménagements d'hydraulique douce + pratiques culturales). La mesure de l'impact des scénarios 2 et 3 par rapport au scénario 1 (scénario de référence) est réalisée dans un premier temps à l'échelle de la parcelle agricole.

Deux sorties du modèle sont analysées pour quantifier l'impact des scénarios sur la production du ruissellement et de l'érosion :

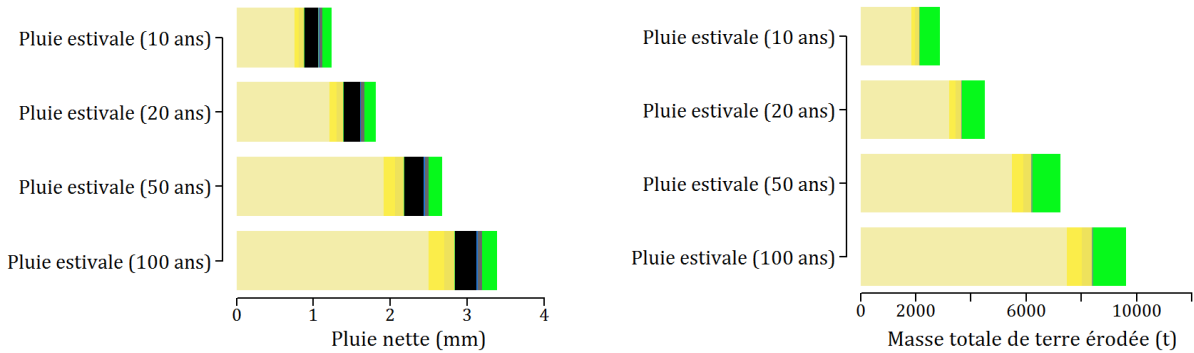
- Pluie nette (mm) : hauteur de pluie disponible pour le ruissellement après avoir retiré les pertes initiales (imbibition) et continues (capacité d'infiltration),
- Masse de terre érodée (t) : produit du volume de pluie nette et de la concentration en MES potentielle dans les eaux de ruissellement.

La pluie nette et la masse de terre érodée sont agrégées pour chaque type d'occupation des sols, pour chaque évènement et chaque scénario. Les résultats sont présentés sur la Figure 36.

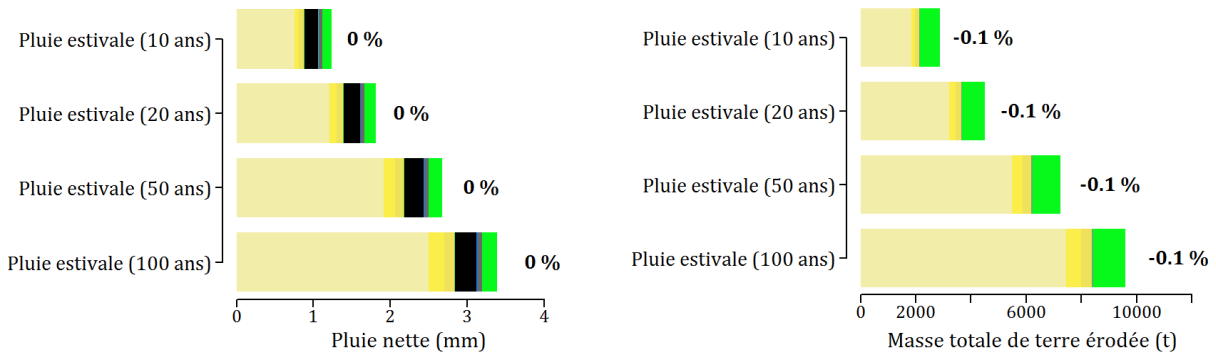
Pour le scénario 1 (référence), les cultures d'hiver sont la principale source de ruissellement et de sédiment. Elles génèrent en moyenne 68% de la pluie nette et 72% de la masse totale de terre érodée. Cette contribution monte à 77 % et 82%, respectivement, en considérant les autres types de culture. Les espaces imperméabilisés (routes, bâti) sont la seconde de ruissellement, avec une contribution moyenne de 11%. Globalement, la contribution des différentes classes d'occupation des sols reste constante entre les différents évènements.

La pluie nette et la masse totale de terre érodée augmente logiquement avec l'augmentation du cumul pluviométrique : de 1.25 mm à 3.45 mm entre une pluie de période de retour 10 ans et 100 ans.

Scénario 1 : Situation actuelle



Scénario 2 : Hydraulique douce



Scénario 3 : Hydraulique douce + Pratique culturale

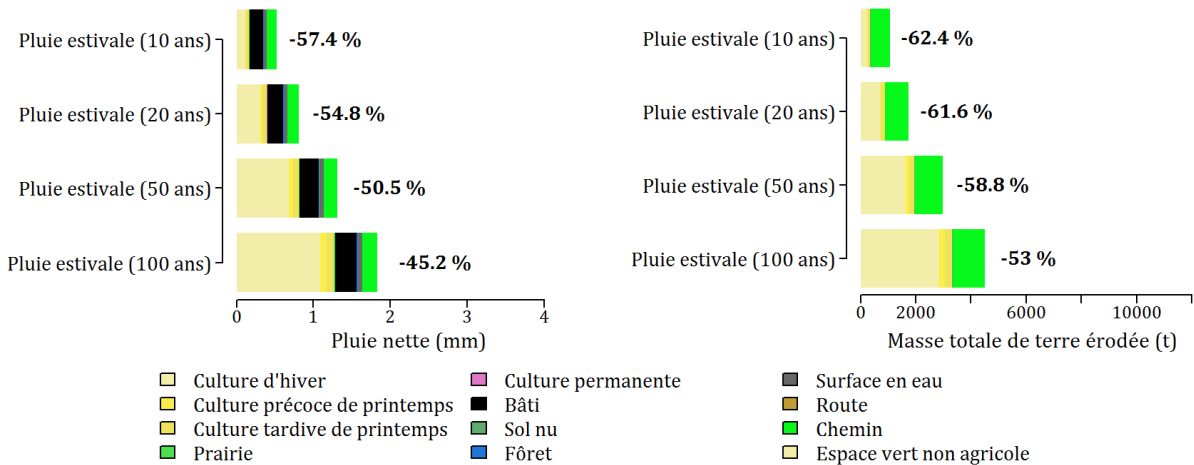


Figure 36 : Pluie nette et masse totale de terre érodée avec un détail sur la contribution de chaque classe d'occupation des sols.

La mise en place de fascines (Scénario 2) n'a aucune influence sur la production de ruissellement et d'érosion à l'échelle de la parcelle agricole. Ces ouvrages interviennent seulement le long des chemins d'écoulement des eaux, une fois le ruissellement généré.

Contrairement au scénario 2, le scénario 3 (amélioration des pratiques culturales) a un effet extrêmement positif pour limiter le ruissellement et de l'érosion à la source. La réduction sur la pluie nette est en moyenne de 52% sur les 4 événements et en moyenne de 59% sur la masse

totale de terre érodée. Cet abattement sur l'érosion est décroissant avec l'augmentation du cumul pluviométrique : environ 62% pour une pluie de période de retour 10 ans à environ 53% pour une pluie de période de retour 100 ans. Les conséquences positives de ce piégeage de l'eau et des sédiments à la source sont étudiées à l'échelle du bassin versant dans le point suivant.

6.3. IMPACT DES SCENARIOS DANS LE TALWEG

La mesure de l'impact des scénarios 2 et 3 le long des axes de ruissellement est effectuée en positionnant des points de de contrôle sur ces axes, à l'amont des enjeux exposés au risque de ruissellement et coulée de boue. Au total, 35 points de contrôle sont répartis sur les communes les plus exposées au risque. La localisation de chaque point de contrôle est consultable dans l'Atlas des propositions de mesures.

Comme dans le point précédent, deux sorties du modèle sont analysées pour quantifier l'impact des scénarios sur le transfert du ruissellement et de l'érosion :

- Débit de pointe (m³/s) : débit maximum de l'onde de crue au droit du point de contrôle,
- Masse de terre transférée (t) : masse de terre totale transportée par le ruissellement au droit du point de contrôle.

Le débit de pointe et la masse de terre transférée au droit de chaque point de contrôle pour les trois scénarios et quatre évènements de pluie sont présentés sur la Figure 38 et la Figure 39, respectivement.

La mise en place de fascine (Scénario 2) n'a pas d'effet sur les débits de pointe pour l'ensemble des points de contrôle (Figure 38). L'objectif de ces ouvrages est de réduire localement la vitesse de l'eau et de favoriser ainsi les processus de sédimentation comme il est démontré sur la Figure 39. Les abattements sur la charge sédimentaire varient de -87% à 0% avec une médiane de -24% (Figure 37).

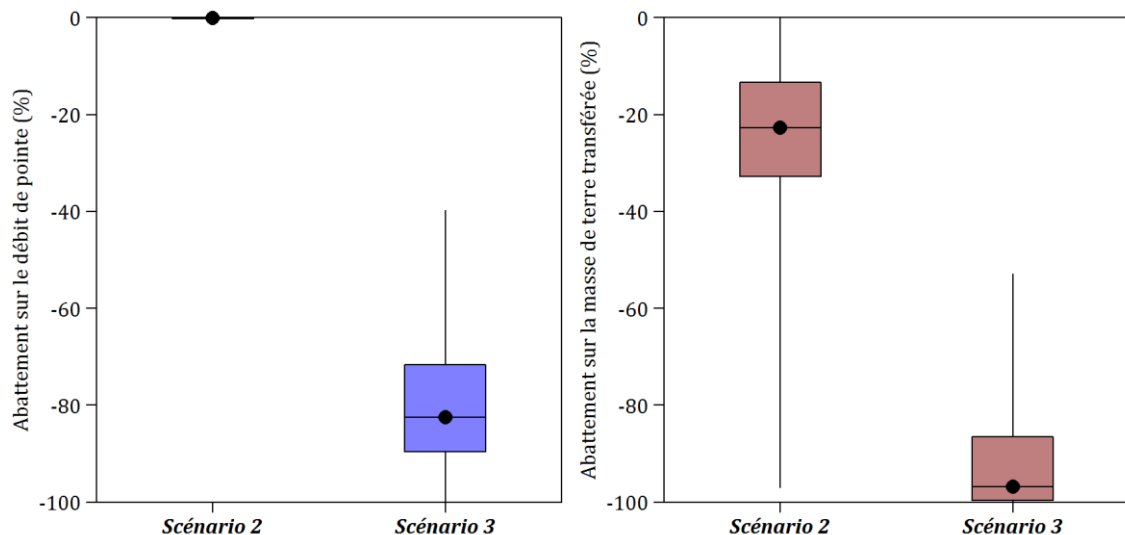


Figure 37 : Distribution des abatements sur le débit de pointe et la masse de terre transférée pour les 4 évènements de pluie, pour le scénario 2 et le scénario 3, par rapport au scénario 1 (référence).

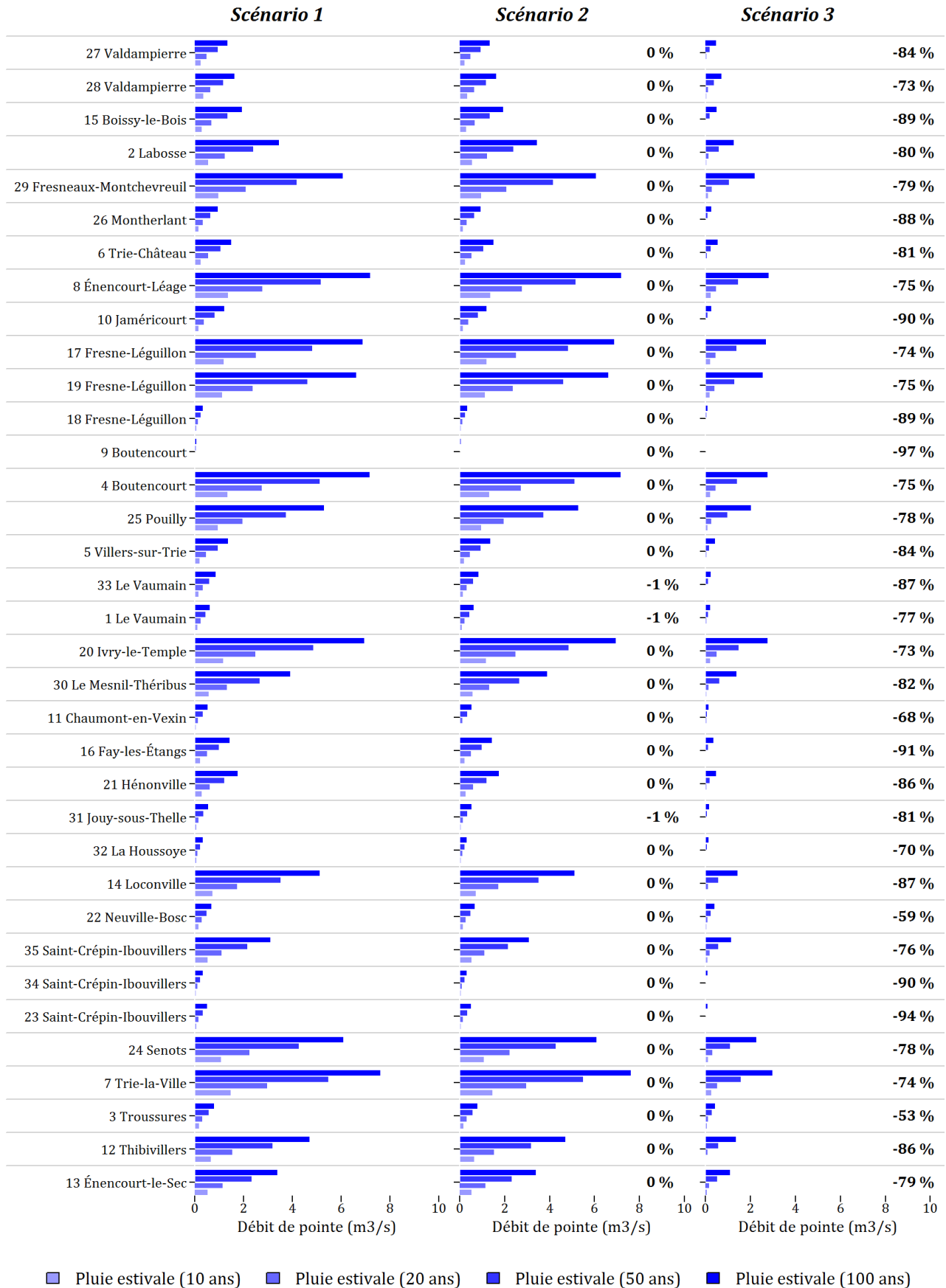


Figure 38 : Débits de pointe au droit de 35 points de contrôle pour 4 événements de pluie de temps de retour 10ans, 20ans, 50 ans et 100ans..

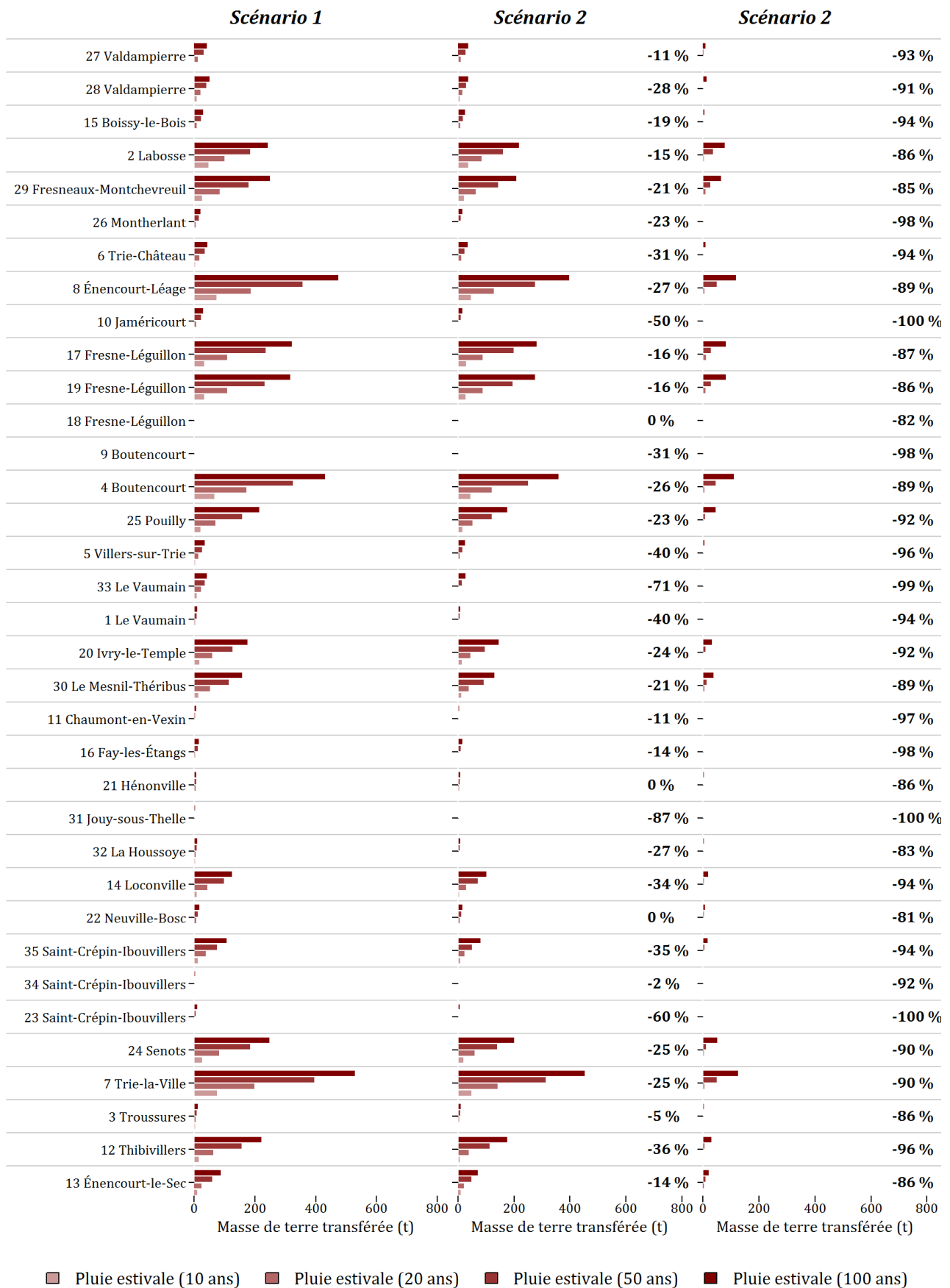


Figure 39 : Masse de terre transférée au droit de 35 points de contrôle pour 4 événements de pluie de temps de retour 10ans, 20ans, 50 ans et 100ans.

Par ailleurs, l'abattement sur la charge solide diminue avec l'augmentation du cumul pluviométrique : la médiane calculée sur l'ensemble des points de contrôle diminue de -26% pour une pluie de période de retour 10 ans à -18% pour une pluie de période de retour 100 ans (Figure 40). L'abattement médian de 24% peut paraître faible par rapport aux abattements de l'ordre de 80-90% annoncés au droit des fascines (Ouvry et al., 2012b). Ce résultat peut s'expliquer par une densité de fascines relativement faible de 0.80 fascine / km². De meilleures performances peuvent être espérées en densifiant les fascines le long des chemins d'écoulement des eaux. Toutefois, l'amélioration des pratiques culturales (scénario 3) est un levier beaucoup plus fort pour réduire le ruissellement et l'érosion des sols.

La réduction à la source de la genèse du ruissellement et de l'érosion démontrée au point 6.2 a des conséquences positives le long des chemins d'écoulement des eaux. Sur l'ensemble des points de contrôle, la réduction sur le débit de pointe varie entre -97% et -53% (Figure 38) avec une médiane de -80% (Figure 37). Pour les masses de terre transférée, la réduction est encore plus forte avec une médiane de -92% (Figure 37). Comme pour les fascines, l'abattement diminue avec l'augmentation du cumul pluviométrique (Figure 40). Il reste cependant élevé : entre -90% et -65% sur les débits de pointe entre un évènement de période de retour 10ans et 100 ans ; entre -100% et -79% sur les masses de terre transférées pour les mêmes évènements.

Les résultats issus de cette étude ne peuvent qu'encourager les agriculteurs à améliorer leurs pratiques culturales tant les effets sont bénéfiques, aux différentes échelles du bassin versant, dans la réduction du risque ruissellement et coulée de boue.

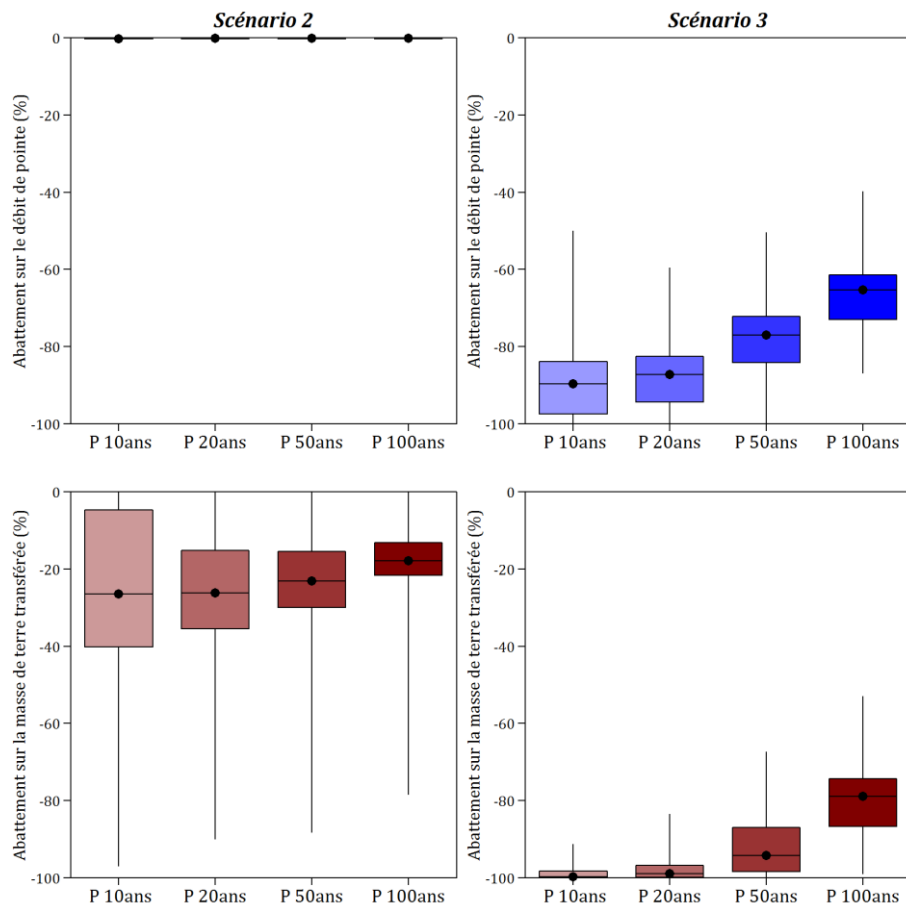


Figure 40 : Distribution des abattements sur le débit de pointe et la masse de terre transférée par évènements de pluie et pour le scénario 2 et le scénario 3, par rapport au scénario 1 (référence).

7. Conclusion

L'objectif de cette étude était d'établir une cartographie du risque ruissellement et coulée de boue en vue d'identifier les zones exposées et de proposer des aménagements permettant d'amoinrir le risque.

La première phase de travail a consisté à récolter l'ensemble des données géographiques des banques donnes nationales (IGN, BRGM, Météo France, etc.) afin de décrire numériquement les paysages du bassin de la Troesne du point de vue de la topographie, de l'occupation des sols, de la géologie, de l'hydrographie et du climat. Cette collecte a été complétée par une expertise de terrain où 502 km de réseau ont été cartographiés et caractérisés, dans l'optique de reproduire fidèlement l'écoulement des eaux de ruissellement depuis la parcelle agricole à celle du bassin versant. Cette première phase a également été l'occasion de recenser les phénomènes marquants de coulées de boues. Ils apparaissent principalement lors d'orages d'été en juillet-aout ou en septembre, après les déchaumages post-moisson.

L'ensemble des données récoltées ont définies le cadre de l'évaluation de l'aléa ruissellement et coulée de boue, dans la seconde phase de ce travail. L'évènement de référence retenu correspond ainsi à pluie d'une durée d'une heure et d'une période de retour 100 ans. Le ruissellement et l'érosion générée pour cet évènement ont été simulés à l'aide d'un outil de modélisation (WaterSed). Les sorties de modélisation ont permis de déduire (1) l'aléa coulée de boue sur l'ensemble des axes de ruissellement et (2) l'emprise des inondations associés. Fort de cette évaluation spatialisée, les communes et les secteurs où l'aléa est le plus élevé ont pu être identifiés. Par ailleurs, la cartographie produite pourra aiguiller les élus dans l'élaboration ou la révision des documents d'urbanisme.

Dans la troisième phase, le travail s'est focalisé sur les enjeux actuels du bassin et leur hiérarchisation en fonction de leur importance dans la gestion d'une crise provoqué par des phénomènes de ruissellement et de coulées de boues. Le croisement de l'aléa avec les enjeux a permis d'aboutir à la cartographie du risque ruissellement et coulée de boue, sur les bâtiments et sur les réseaux routiers et ferroviaires.

Les communes les plus exposées répondent le plus souvent au schéma suivant : un centre-bourg située à l'exutoire d'un talweg sec et drainant un ou plusieurs bassins versants agricoles d'une superficie de l'ordre de la centaine d'hectares. Le temps de réponse très court de ces bassins versants est aggravé par les réseaux de routes et chemins encaissés dans les talwegs et sur les versants pentus.

Partant de l'identification des zones à risque, deux scénarios de mesures sont proposés dans une quatrième phase, avec un scénario d'aménagements d'hydraulique douce et un scénario cumulant aménagements d'hydraulique douce et amélioration des pratiques culturales. L'impact de ces deux scénarios est quantifié par modélisation pour des évènements de pluie de période de retour 10 ans, 20 ans, 50 ans et 100 ans.

Les enseignements tirés de la modélisation montrent que la mise en place de fascines à une densité de 0.8 fascine / km² permet de réduire, au droit des enjeux, l'érosion de 24% en moyenne. Cependant, l'amélioration des pratiques culturales est un levier beaucoup plus fort dans la réduction du ruissellement et de l'érosion des sols, avec des abattements de 80% sur le ruissellement et de 92% sur les transferts de sédiments (notamment sous forme de coulées de boue). L'accompagnement des agriculteurs dans cette direction est vraisemblablement la clef pour une gestion durable du risque ruissellement et coulée de boue sur le bassin de la Troesne.

8. Bibliographie

- Boardman, J., Vandaele, K., 2015. Effect of the spatial organization of land use on muddy flooding from cultivated catchments and recommendations for the adoption of control measures. *Earth Surf. Process. Landforms* 343, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/esp.3793>
- CA Hauts-de France, 2018. Guide de l'érosion - Lutter contre l'érosion.
- Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Souchère, V., Martin, P., Lecomte, V., 2002. Sediment concentration in interrill flow: Interactions between soil surface conditions, vegetation and rainfall. *Earth Surf. Process. Landforms* 27, 193–205. <https://doi.org/10.1002/esp.314>
- Cerdan, O., Souchère, V., Lecomte, V., Couturier, A., Le Bissonnais, Y., 2001. Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model: Sealing and transfer by runoff and erosion related to agricultural management. *Catena* 46, 189–205. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00166-7](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00166-7)
- Dautrebande, S., Cordonnier, H., Thirion, M., Bielders, C., 2006. Lutter contre l'érosion des terres. Les livrets l'agriculture n°12, Ministère la Région wallone, Dir. générale l'Agriculture 38.
- Evrard, O., Persoons, E., Vandaele, K., van Wesemael, B., 2007. Effectiveness of erosion mitigation measures to prevent muddy floods: A case study in the Belgian loam belt. *Agric. Ecosyst. Environ.* 118, 149–158. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.02.019>
- Evrard, O., Vandaele, K., van Wesemael, B., Bielders, C.L., 2008. A grassed waterway and earthen dams to control muddy floods from a cultivated catchment of the Belgian loess belt. *Geomorphology* 100, 419–428. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.01.010>
- Fiener, P., Auerswald, K., 2000. Effectiveness of grassed waterways in reducing runoff and sediment delivery from agricultural watersheds. *J. Environ. Qual.* 32, 927–936. <https://doi.org/10.2134/jeq2003.9270>
- Gumiere, S.J., Le Bissonnais, Y., Raclot, D., Cheviron, B., 2011. Vegetated filter effects on sedimentological connectivity of agricultural catchments in erosion modelling: a review. *Earth Surf. Process. Landforms* 36, 3–19. <https://doi.org/10.1002/esp.2042>
- Holland, J.M., 2004. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: Reviewing the evidence. *Agric. Ecosyst. Environ.* 103, 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.12.018>
- Landemaine, V., 2016. Érosion des sols et transferts sédimentaires sur les bassins versants de l'Ouest du Bassin de Paris : analyse, quantification et modélisation à l'échelle pluriannuelle. Thèse de doctorat. Université de Rouen-Normandie.
- Le Bissonnais, Y., Benkhadra, H., Chaplot, V., Fox, D., King, D., Daroussin, J., 1998. Crusting, runoff and sheet erosion on silty loamy soils at various scales and upscaling from m² to small catchments. *Soil Tillage Res.* 46, 69–80. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(97\)00079-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(97)00079-2)
- Le Bissonnais, Y., Cerdan, O., Lecomte, V., Benkhadra, H., Souchère, V., Martin, P., 2005. Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. *Catena* 62, 111–124. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.05.001>

- Ludwig, B., Landemaine, V., 2017. Etude hydraulique - Bassins versants de Doullens.
- Martin, P., Ronfort, C., Laroutis, D., Souchère, V., Sebillotte, C., 2014. Cost of best management practices to combat agricultural runoff and comparison with the local populations' willingness to pay: Case of the Austreberthe watershed (Normandy, France). *Land use policy* 38, 454–466. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.12.014>
- Ouvry, J.F., Coufourier, N., Richet, J.B., Lhérieau, M., Pivain, Y., Martin, P., Lecomte, V., Barrier, C., Witkowski, D., Saint-Omer, L., Corruble, C., Luce, M., 2012a. Maîtrise du ruissellement et de l'érosion des sols en Haute-Normandie. Expérimentations sur les pratiques culturales 2001-2010. Synthèse des résultats de ruissellement et d'érosion. Groupe Maîtrise du ruissellement par les pratiques culturales.
- Ouvry, J.F., Richet, J.B., Bricard, O., Lhérieau, M., Bouzid, M., Saunier, M., 2012b. Fascines et haies pour réduire les effets du ruissellement érosif - Caractérisation de l'efficacité et conditions d'utilisation.
- Souchère, V., Cerdan, O., Dubreuil, N., Le Bissonnais, Y., King, C., 2005. Modelling the impact of agri-environmental scenarios on runoff in a cultivated catchment (Normandy, France). *Catena* 61, 229–240. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.03.010>
- Van Oost, K., Van Rompaey, A., Poesen, J., Govers, G., Verstraeten, G., 2002. Evaluating an integrated approach to catchment management to reduce soil loss and sediment pollution through modelling. *Soil Use Manag.* 18, 386–394. <https://doi.org/10.1079/SUM2002150>
- Verstraeten, G., Poesen, J., 1999. The nature of small-scale flooding, muddy floods and retention pond sedimentation in central Belgium. *Geomorphology* 29, 275–292. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00020-3)
- Verstraeten, G., Poesen, J., Gillijns, K., Govers, G., 2006. The use of riparian vegetated filter strips to reduce river sediment loads: An overestimated control measure? *Hydrol. Process.* 20, 4259–4267. <https://doi.org/10.1002/hyp.6155>

Annexe 1

Cartographie de l'occupation des sols

La procédure de construction de la cartographie de l'occupation des sols est détaillée sur la Figure 41.

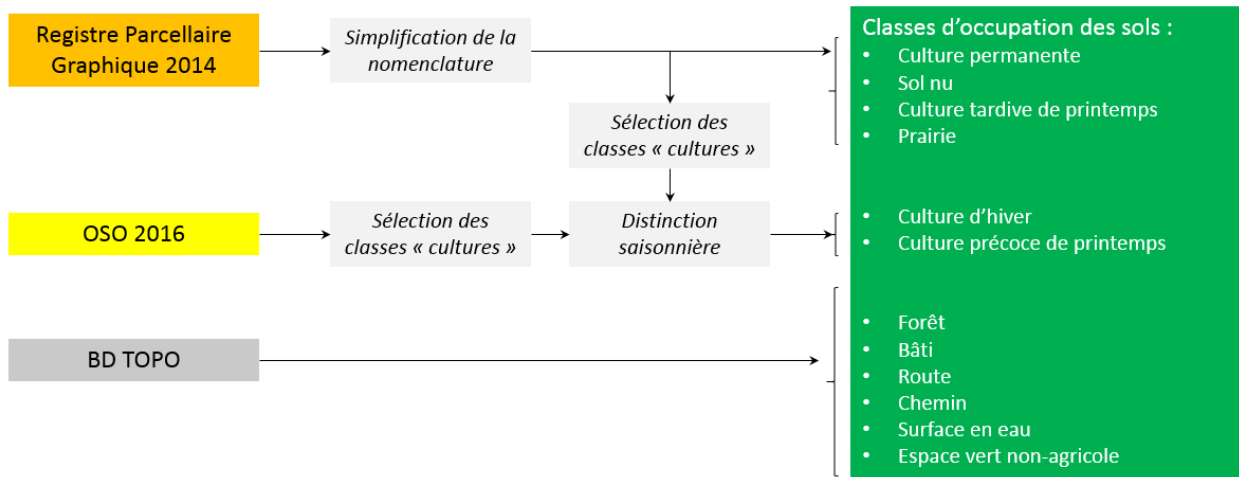


Figure 41 : Procédure de construction de la cartographie de l'occupation des sols.

Le Registre Parcellaire Graphique (RPG) est une base de données géographiques détaillant à une échelle 1/5000ème l'emprise des îlots de culture ainsi que le type de culture majoritaire pratiquée suivant une nomenclature en 28 classes. Toutefois, aucune distinction n'est faite sur la date de semis des cultures pratiquées. Par exemple, un blé tendre correspond à une classe 1 mais il est impossible de savoir s'il s'agit d'un blé tendre d'hiver ou d'un blé tendre de printemps. Cette information est déterminante car la sensibilité au ruissellement et à l'érosion des sols est différente suivant la date de semis.

Pour cette raison, les classes de culture du RPG pouvant être semées en hiver ou au printemps (blé tendre, orge, colza, etc.) ont été croisées aux classes « culture » de la cartographie de l'Occupation des Sols Opérationnelles (OSO) produite par le laboratoire CESBIO (Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère) dans le but d'établir cette distinction saisonnière. Cette dernière présente les caractéristiques suivantes : une nomenclature de 17 classes, une résolution spatiale de 10 à 20 mètres et une fréquence de mise à jour annuelle.

Les données d'entrée utilisées sont multiples : des séries d'images optiques multi-temporelles à haute résolution (Sentinelle 2), ou encore des données auxiliaires de référence (Corine Land Cover, Registre Parcellaire Graphique, BD TOPO) pour l'étalonnage des méthodes (méthodes supervisées) et pour la validation des produits. Les méthodes utilisées impliquent des erreurs et un niveau de confiance est indiqué pour chaque objet géographique en sortie.

La résolution spatiale des images satellites utilisées pour produire OSO 2016 (10 à 20 m) n'est suffisante pour détecter certains objets géographiques, ayant un rôle majeur sur les processus de ruissellement et d'érosion. Il s'agit ainsi du bâti, des surfaces en eau, des routes et des chemins. A cette fin, la BD TOPO de l'IGN est la dernière base de données à être utilisée. Il s'agit d'une description vectorielle des éléments du territoire et de ses infrastructures, de précision métrique. Au final, une cartographie de l'occupation des sols en 12 classes et à une précision cadastrale aura été établie pour le secteur d'étude.

Annexe 2

Clef de conversion formation superficielle – texture de sol

Description de la formation géologique	Texture
Remblais	3
Alluvions récentes : argiles et limons, parfois tourbeux	3
Alluvions récentes associées à des tourbes	3
Alluvions anciennes d'âge indéterminé : galets, sables	3
Colluvions de dépressions, limons de fond de vallée sèche et de piedmont	2
Colluvions alimentées essentiellement par les Cailloutis de Gisors	2
Colluvions alimentées essentiellement par des éléments résiduels du Rupélien ("Stampien") et du Bartonien : meulières, grès, parfois galets	2
Limon brun de pente colluvionné	2
Colluvions polygéniques de versants : limons, silex, fragments de craie et de calcaire, sables, argiles, etc	2
Limon de pente à silex colluvionné	2
Eboulis, glissements en masse de terrains tertiaires	3
Epandage de glacis des Cailloutis de Gisors : galets et cailloutis de silex, de meulière et de grès (Quaternaire ancien)	3
Limons argileux des plateaux, à composante loessique	1
Limons sableux des plateaux : mélange de limons argileux et de sables tertiaires	3
Limon à silex : limon argileux à fragments de silex, en plateau et colluvionné sur pente	2
Formation résiduelle issue des alluvions anciennes : galets fluviatiles et fragments de silex et de meulière	3
Formation résiduelle issue des Cailloutis de Gisors	3
Formation résiduelle composée de fragments et de blocs de meulière ("Stampien" silicifié) dans une matrice sableuse	3
Formation résiduelle issue des galets du sommet du Thanétien : galets de silex arrondis dans une matrice sableuse, localement mêlée à la Formation de Gisors	3
Formation résiduelle issue des galets de la base du Thanétien : galets de silex arrondis ou émoussés, silex verdis non usés.	3
Formation résiduelle à silex (issus de la craie crétacée et du Thanétien) dans une matrice argileuse ou argilo-sableuse ; souvent solifluée sur les pentes	2
Sables de Fontainebleau (Rupélien -"Stampien"- supérieur, partie moyenne)	3
Marnes à huîtres, Argiles à corbules (Rupélien -"Stampien"- inférieur)	2
Argile verte de Romainville, Caillasses d'Orgemont, Calcaire de Sannois (faciès "Sannoisien") (Rupélien -"Stampien"- inférieur)	2
Marnes supragypseuses : marnes blanchâtres, verdâtres et grises ("Marnes bleues d'Argenteuil, Marnes blanches de Pantin") (faciès "Ludien" supérieur) (Priabonien)	2
Falun du Vouast, Marnes et calcaires lacustres, Marnes à Pholadomya ludensis, gypse, marnes et calcaires (faciès "Ludien" inférieur et moyen) (Priabonien)	2
Sables et grès de Marines, Sables de Cresnes, Sables de Monceau (faciès "Marinésien" supérieur) (Bartonien supérieur)	3
Sable quartzeux verdâtre d'Ezanville, Calcaire de Ducy, Horizon de Mortefontaine et Calcaire et Marnes de Saint-Ouen (faciès "Marinésien" inférieur et moyen) (Bartonien supérieur)	3
Série supérieure sableuse du faciès "Auversien" (Bartonien inférieur)	3
Calcaire à milioles, Calcaire à cérithes, Marnes et Caillasses (Lutétien supérieur)	2
Calcaire et sable calcaire à mollusques et foraminifères benthiques : milioles, alvéolines et orbitolites ("Calcaire grossier") (Lutétien moyen)	3
Calcaires et sables glauconieux ("Glauconie grossière"), Calcaire à Nummulites laevigatus ("Pierre à Liards") (Lutétien inférieur)	3
Argile de Laon, Sables de Cuise s.l. (faciès "Cuisien" indifférencié) (Yprésien supérieur)	2
Marno-calcaires, argiles à lignite et argiles et sables coquilliers (faciès "Sparnacien" indifférencié) (Yprésien inférieur)	2
Conglomérat à galets de silex arrondis ("avellanaires") du sommet des Sables de Bracheux (Thanétien supérieur)	3
Sables à débris coquilliers et sables à débris ligniteux ("Sables de Bracheux") (Thanétien supérieur)	3
Calcaire bioclastique à lithoclastes de craie ("Calcaire et conglomérat de Jaméricourt") (faciès "Montien")(Sélandien)	2
Craie blanche à silex à bélemnites (Campanien)	2
Craie blanche à silex à Micraster coranguinum (Santonien)	2
Craie blanche à silex à Micraster decipiens (Coniacien)	2
Craie marneuse grise ou blanchâtre (Turonien indifférencié)	2

1 : texture à dominante limoneuse ; 2 : texture à dominante argileuse ; 3 : texture à dominante sableuse

Annexe 3

Atlas des axes de ruissellement

Annexe 4

Atlas de l'aléa ruissellement et coulée de boue

Annexe 5

Atlas du risque de ruissellement et coulée de boue

Annexe 6

Atlas des propositions d'actions



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Hauts de France

Arteparc, Bât. A, 2 Rue des Peupliers,
BP104096

59814 – Lesquin Cedex – France

Tél. : 03 20 19 15 40