
Rapport de stage individuel

5^{ème} année

Déploiement d'outils de modélisation du
ruissellement et de l'érosion des sols à l'échelle
du territoire d'action du Nouvel Espace du Cher
et d'un bassin versant

Nouvel Espace du Cher

39 rue Léon Gambetta, 37150 BLERE



Tuteur entreprise :

Lorraine Poulain-Levieuge

Chargée de mission

Tuteur académique :

Francesca Di Pietro

Pierrick Louet

IMA

2023-2024

REMERCIEMENTS

Dans un premier temps, je tiens à remercier ma tutrice de stage Lorraine Poulain-Levieuge pour ses conseils, sa patience, et ses partages d'expériences.

Puis, je remercie également Natacha Mosnier, directrice du Nouvel Espace du Cher, pour les éléments complémentaires apportés à mon stage, ainsi que Coralie Soleilhac et Virginie Sauter pour leur regard extérieur à mon travail.

Je tiens à remercier Nathan Courjault, en apprentissage au sein du syndicat de rivière Val-de-Vienne et menant des missions similaires aux miennes, pour nos échanges constructifs et ses conseils. Je remercie également Valentin Landemaine, chercheur au BRGM et développeur du modèle Watersed, pour la formation dispensée en début de stage ainsi que pour ses conseils.

Enfin, je tiens à remercier ma tutrice académique Francesca Di Pietro pour son suivi et sa disponibilité tout au long de mon stage.

Sommaire

Introduction	7
1. Contexte de stage	8
1.1. Le Nouvel Espace du Cher	8
1.1.1. Historique et missions	8
1.1.2. Le territoire d'action	8
1.2. Contexte et objectifs de l'étude ruissellement érosion	9
2. Modélisation de l'aléa érosif à macro-échelle	10
2.1. Le modèle MESALES	10
2.2. Matériel et méthode	10
2.2.1. L'occupation du sol	10
2.2.2. La topographie	12
2.2.3. La pédologie	14
2.2.4. Implémentation de l'arbre de décision	14
2.3. Résultats	15
2.4. Discussion	17
3. Watersed	18
3.1. Site d'étude	18
3.2. Matériel	20
3.2.1. Le modèle WaterSed	20
3.2.2. Collecte et source des données	20
3.3. Méthode	21
3.3.1. Mise en forme des données	21
3.3.2. Relevés terrain	23
3.3.3. Expertise	24
3.3.4. Création des données d'entrée au modèle	25
3.3.5. Modélisation diagnostique	27
3.3.6. Modélisation des aménagements	27
3.3.7. Choix des intensités de pluies et des scénarios d'aménagement	28
3.4. Résultats	29
3.4.1. Résultats issus de la modélisation diagnostique	29
3.4.2. Résultats post – aménagement	30
3.5. Discussion	33
Conclusion	35
Bibliographie	36
Annexes	39

Table des figures

Figure 1: territoire d'action du Nouvel Espace du Cher	8
Figure 2: démarche générale du calcul du taux de couverture, d'après Degan et al., (2015) modifié	10
Figure 3: méthode de définition d'un taux de couverture moyen saisonnier pour trois années consécutives à partir du RPG	11
Figure 4: description de l'outil Mosaicking de SAGA-GIS	12
Figure 5: Carte du facteur pente sur le territoire d'action du Nouvel Espace du Cher	13
Figure 6: part de chaque classe d'aléa érosion selon la saison	15
Figure 7: Cultures classifiées en tant qu'aléa érosif fort à très fort pour la saison hiver.....	16
Figure 8: aléa érosif d'après le modèle MESALES sur le territoire d'action du Nouvel Espace du Cher pour la saison hiver et localisation des zones à enjeux	16
Figure 9: Bassin versant du ruisseau de Thoré (37)	18
Figure 10: exemple de coefficients de Montana en fonction de la période de retour de pluie, station de Rennes St-Jaques (35), source : Météo-France.....	21
Figure 11: schématisation de l'application de l'outil Fill Sinks (Wang & Liu, 2006), source : site Watersed	22
Figure 12: concaténation du CODE_LU et du CODE_SOIL, source : site Watersed	25
Figure 13: processus permettant d'intégrer le réseau d'axes de ruissellement déterminé sur le terrain	26
Figure 14: fonctionnement de l'outil Input Generator.....	26
Figure 15: localisation de secteurs à enjeux vis à vis du ruissellement sur une pluie à période de retour 50 ans produite au mois de mai.....	29
Figure 16: impact de la saisonnalité sur le volume de ruissellement et débit de pointe (surface runoff et runoff peak) et sur le transport sédimentaire (sediment yield).....	30
Figure 17: taux d'abattement du volume de ruissellement (surface runoff) et du transport sédimentaire (sediment yield) engendrés par les scénarios d'aménagement pour une pluie d'1 heure survenant au mois de mai	31
Figure 18: taux d'abattement du volume de ruissellement (surface runoff) et du transport sédimentaire (sediment yield) engendrés par les scénarios d'aménagement pour une pluie d'1 heure survenant au mois d'octobre	32

Table des tableaux

Tableau 1: extrait du CTMA 2023-2025	9
Tableau 2: Libellés correspondant au code COUVERT, d'après Degan et al., (2015)	12
Tableau 3: attribution de codes en fonction des pentes et des aires drainées, d'après Degan et al., (2015).....	13
Tableau 4: Q10 ans en fonction de la durée d'évènement pluvieux.....	18
Tableau 5: caractéristiques des axes de ruissellement relevés sur le terrain.....	23
Tableau 6: objectifs et positionnement des aménagements modélisés par Watersed	27
Tableau 7: caractéristiques des aménagements modélisés par Watersed	28
Tableau 8: scénarios d'aménagement sur le bassin versant du ruisseau de Thoré	28

Table des annexes :

Annexe 1: arbre de décision du modèle MESALES, Degan et.al, 2015 (d'après Le Bissonnais et al., 2002b modifié).....	39
Annexe 2: classification du taux de couverture du sol par saison (Degan et al., 2015)	42
Annexe 3: Cartographies des taux de couverture d'après le RPG et Corine Land Cover selon les saisons	43
Annexe 4: code calculatrice raster Qgis pour la classification des pentes	45
Annexe 5: carte des pentes classifiées du territoire d'action du NEC.....	45
Annexe 6: carte des aires drainées classifiées du territoire d'action du NEC	46
Annexe 7: code calculatrice raster Qgis pour la classification des aires drainées	46
Annexe 9: cartographie de la battance sur le territoire d'action du NEC selon les textures pédologiques de la base de données SGDBE.....	47
Annexe 8: cartographie de l'érodibilité sur le territoire d'action du NEC selon les textures pédologiques de la base de données SGDBE.....	47
Annexe 10: cartographies de l'aléa érosif pour les quatre saisons à l'échelle du territoire d'action du NEC selon le modèle MESALES	48
Annexe 11: taux de participation des cultures à un aléa érosif fort à très fort sur le territoire d'action du NEC pour l'été, le printemps et l'automne	50
Annexe 12: aléa érosif d'après le modèle MESALES sur le territoire d'action du Nouvel Espace du Cher pour la saison été et localisation des zones à enjeux	51
Annexe 13: occupation du sol du bassin versant du ruisseau de Thoré (37)	52
Annexe 14: Modèle Numérique de Terrain du bassin versant du ruisseau de Thoré (37).....	52
Annexe 15 : textures de sol dominantes sur le bassin versant du ruisseau de Thoré (37)	52
Annexe 16: carte des pentes du bassin versant du ruisseau de Thoré.....	53
Annexe 17: processus Watersed	54
Annexe 18: classement du type d'occupation du sol pour le modèle Watersed	55
Annexe 19: table des propriétés des cultures du bassin versant du ruisseau de Thoré	55
Annexe 20: taux d'abattement du débit de pointe (runoff peak) engendrés par les scénarios d'aménagement pour une pluie d'1 heure survenant au mois de mai	56
Annexe 21: table des propriétés des types d'occupation du sol n'étant pas qualifiés comme des cultures du bassin versant du ruisseau de Thoré.....	56
Annexe 22: taux d'abattement du débit de pointe (runoff peak) engendrés par les scénarios d'aménagement pour une pluie d'1 heure survenant au mois d'octobre.....	57
Annexe 23: taux d'abatteurs à la fosse maurice pour une pluie d'une heure au mois d'octobre	58

Introduction

La Directive Cadre sur l'Eau (DCE), adoptée en 2000 par le Parlement et le Conseil européen, est l'élément majeur de la réglementation européenne concernant la protection des eaux de surface. Sa transcription en droit français aboutit en 2006 à la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA) dont une des prérogatives est de fixer le bassin versant comme le périmètre de la mise en œuvre de la gestion de l'eau. Ainsi, les Schémas Directeurs d'Aménagement et des Gestion de l'Eau (SDAGE) fixent à partir de 1996 (mise à jour en 2009, 2016 et 2022) les orientations pour chaque bassin à grande échelle pour des cycles de six ans. Sa déclinaison locale s'intitule le Schéma d'Aménagement et des Gestion de l'Eau (SAGE), et permet une approche en adéquation avec les enjeux locaux. Dans cette perspective, les communes et intercommunalités se voient attribuer de nombreuses compétences et responsabilités, dont la compétence GEMAPI (Gestion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations). Cette dernière se voit gérée par des collectivités ou groupements de collectivités.

La LEMA intègre notamment les impacts engendrés par le changement climatique sur la gestion des ressources en eau. Ce dernier, caractérisé par une augmentation des températures de 1,5 °C d'ici 2030 (IPCC, 2023), a de nombreux impacts sur la ressource en eau. L'un d'entre eux se traduit par une occurrence plus élevée d'événements extrêmes, dont les fortes pluies (+1 à 3 jours de fortes précipitations par an, DREAL Centre-Val de Loire, 2019). Ces dernières peuvent conduire à des phénomènes de ruissellement et d'érosion des sols, renforcés par l'aménagement du territoire, comportant de multiples risques : mise en danger des services écosystémiques du sol (stockage de carbone, biodiversité, sécurité alimentaire...), mise en danger des biens et des personnes (inondations par ruissellement, coulées de boues...) (Douvinet et al., 2015; Evrard et al., 2007a), ou encore impact sur la qualité des masses d'eaux en aval de bassins versants (envasement, transfert de contaminants, perturbation de la faune aquatique...) (Kronvang et al., 2003; Steiger et al., 2005).

Le développement d'outils de modélisation numérique relatifs à l'érosion des sols et au ruissellement comporte deux principaux avantages, à savoir l'amélioration des connaissances vis-à-vis du fonctionnement hydraulique et sédimentaire des bassins versants, et une grande flexibilité offerte entre la phase d'étude et la phase travaux (adaptation tout au long de la phase d'étude et test des conséquences de chaque modification). Deux types de modélisation complémentaires peuvent être cités. La première est une modélisation qualitative de l'aléa érosif à large échelle permettant de hiérarchiser les zones à enjeux, à savoir le Modèle d'Evaluation Spatiale de l'ALéa Erosion des Sols (MESALES, INRA-IFEN, 1998). La seconde s'applique sur des secteurs à enjeux ciblés afin de quantifier l'érosion des sols et le ruissellement à l'échelle du bassin versant ; il s'agit du modèle WaterSed (Landemaine, 2016). Ce dernier propose d'établir un état initial, puis de mesurer l'efficacité de l'implantation d'aménagements permettant de réduire les impacts de l'érosion des sols et du ruissellement. Ces outils peuvent donc se révéler très utiles à des fins de gestion de bassins versants et s'intègrent pleinement dans les missions menées par des syndicats de rivières et de bassins tels que le Nouvel Espace du Cher.

Ainsi, ce rapport de stage s'attachera à décrire le déploiement du modèle MESALES sur l'ensemble du territoire du Nouvel Espace du Cher (NEC) et du modèle Watersed sur un secteur à enjeux, à savoir le bassin versant du ruisseau de Thoré sur la commune de Civray-de-Touraine (37).

1.2. Contexte et objectifs de l'étude ruissellement érosion

Les Contrats Territoriaux Milieux Aquatiques (CTMA) sont des programmes d'actions et de financements planifiés sur plusieurs années coordonnés par les collectivités ou groupements de collectivités en charge de la compétence GEMA. Leur objectif principal réside en l'atteinte du bon état écologique et physico-chimique des eaux de surface d'ici 2027. Un premier CTMA a été conduit par le NEC entre 2020 et 2022, et un second initié en 2023 est en cours de réalisation, et arrivera à échéance en 2025.

Un des axes de ce CTMA est la conduite d'études et de travaux à l'échelle des bassins versants. Il prévoit notamment la plantation de haies et de ripisylve (code action BV-02) (tableau 1), l'objectif étant de « limiter les apports d'eau importants et favoriser l'infiltration des eaux ».

Tableau 1: extrait du CTMA 2023-2025

Etudes et travaux de bassins versants		Etudes et travaux de bassins versants
	BV-01	Etude préalable sur 4 affluents : Senelles / Aiguevives / TraineFeuilles / Seigy
	BV-02	Plantations de haies et de ripisylve
Etude bilan		Etude bilan
		Etude bilan

Plusieurs acteurs locaux, notamment à Civray-de-Touraine et Francueil (37), ou encore à Chissay-en-Touraine (41) ont partagé au NEC des retours d'expérience relatifs à l'apparition de ruissellements à l'occasion d'épisodes pluvieux prononcés, notamment ceux survenus à la fin du printemps 2016. Ces ruissellements entraînent plusieurs conséquences : dégradation de biens matériels, creusement de fossés, inondations de voiries, ou encore augmentation du niveau d'eau dans le cours d'eau provoquant des débordements.

Ainsi, l'étude a pour objectif, dans un premier temps, de modéliser les ruissellements et l'érosion associée à l'échelle d'un bassin versant. Dans un second temps, elle prévoit comme outil d'aide à la décision de modéliser l'impact de l'implantation de méthodes d'aménagement « douces » (haies, bandes enherbées...) afin de favoriser une meilleure infiltration de l'eau lors d'épisodes pluvieux remarquables, et ce le plus en amont possible des bassins versants. Ces méthodes d'aménagement peuvent aussi permettre une restauration d'habitats et de corridor écologique (Closet-Kopp *et al.*, 2017 ; Clergeau et Désiré, 1999).

Le modèle WaterSed (Landemaine, 2016) permet 1) de localiser les axes de ruissellement et les parcelles problématiques et 2) d'évaluer l'efficacité des aménagements implantés. En complément, le modèle MESALES a été déployé à l'échelle du territoire du NEC pour mettre en évidence d'éventuels autres secteurs à risque de ruissellement/érosion.

2. Modélisation de l'aléa érosif à macro-échelle

2.1. Le modèle MESALES

Le modèle MESALES (Modèle d'Evaluation Spatiale de l'ALéa Erosion des Sols) (Le Bissonnais et al., 1998) a été développé par l'IFEN et l'INRA (Institut Français de l'ENVironnement & Institut National de la Recherche Agronomique) en réponse à des problématiques de coulées de boues et d'érosion identifiées dans la plupart des régions françaises (Cerdan et al., 2006). Ce modèle a pour vocation de définir de manière qualitative un aléa érosion à large échelle, en témoigne l'application de ce modèle à l'échelle nationale (Le Bissonnais et al., 2002), ou à l'échelle d'un bassin hydrographique tel que le bassin Loire-Bretagne (Degan et al., 2015). Cette étude à l'échelle du bassin Loire-Bretagne propose certaines améliorations du modèle, comme la différenciation des cultures, la prise en compte de la rotation saisonnière des taux de couverture au sol, ou encore la considération de règles de pédotransfert dans le calcul de la battance et de l'érodibilité. Cette méthodologie, nommée MESALES-2014, sera employée pour le calcul de l'aléa érosif à l'échelle du territoire d'action du NEC.

Ainsi, quatre variables sont nécessaires pour le déploiement de cette méthodologie : l'occupation du sol, la topographie, la pédologie, ainsi que les variations climatiques. Ces variables sont traitées afin de les intégrer dans un arbre de décision, qui permet de croiser des paramètres sous forme de combinaison logique pour obtenir une classification. Une de ces variables ne sera pas calculée dans cette étude, il s'agit de la variable relative aux variations climatiques. En effet, ces dernières existent pour un large territoire tel que le bassin Loire-Bretagne, mais peuvent être considérées comme constantes en ce qui concerne le territoire du NEC. Ainsi, le climat sera représenté par la variable Q2 (annexe 1), correspondant au climat d'Indre-et-Loire et du Loir-et-Cher.

2.2. Matériel et méthode

2.2.1. L'occupation du sol

L'occupation du sol constitue la première variable d'entrée de la modélisation MESALES. Elle se compose de deux sources de données, à savoir le RPG (Registre Parcellaire Graphique) sur trois années consécutives et par saison, complété par la base de données Corine Land Cover (inventaire biophysique de l'occupation des sols) (figure 2). Le Recensement Général Agricole (RGA) utilisé dans la démarche MESALES-2014 ne sera pas employé ici. L'objectif final est d'obtenir à l'aide de ces deux bases de données un taux de couverture du sol par saison par pixel.

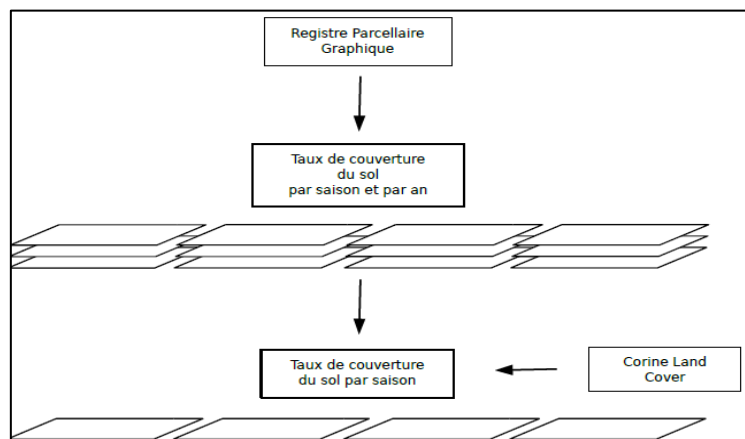


Figure 2: démarche générale du calcul du taux de couverture, d'après Degan et al., (2015) modifié

2.2.1.1. Détermination d'un taux de couverture saisonnier à l'aide du RPG

Le RPG est une base de données géographiques comprenant les contours des parcelles et îlots culturels et leur groupe de cultures majoritaires. Les cultures soumettent le sol à un changement fréquent de couverture, à la fois à l'échelle intra-annuelle et à l'échelle interannuelle. Ainsi, trois années consécutives de RPG ont été utilisées (2020,2021,2022). Pour chaque RPG, un code numérique de 1 à 35 est affecté à chaque code culture en corrélation avec Degan et al. (2015) (annexe 2). Puis, chaque code numérique se voit attribuer un taux de couverture par saison (figure 3), et ce pour les trois RPG. Ces opérations sont effectuées à l'aide du langage de programmation R. Ces données sont exportées sous Qgis, et une jointure attributaire est effectuée en fonction du champ « package » des trois RPG, champ qui attribue un identifiant unique à chaque parcelle. Ainsi, chaque parcelle comporte un taux de couverture par saison, et ce pour trois années consécutives. Ensuite, à nouveau sous R, les taux de couverture saisonniers des trois années sont concaténés. Il en résulte pour chaque saison un code à trois chiffres. Ce code à trois chiffres est ensuite transformé en un code à un chiffre, représentant le taux de couverture moyen saisonnier sur les trois années étudiées (figure 3). Enfin, ce code unique permet la production de quatre raster (un par saison) de résolution 25m.

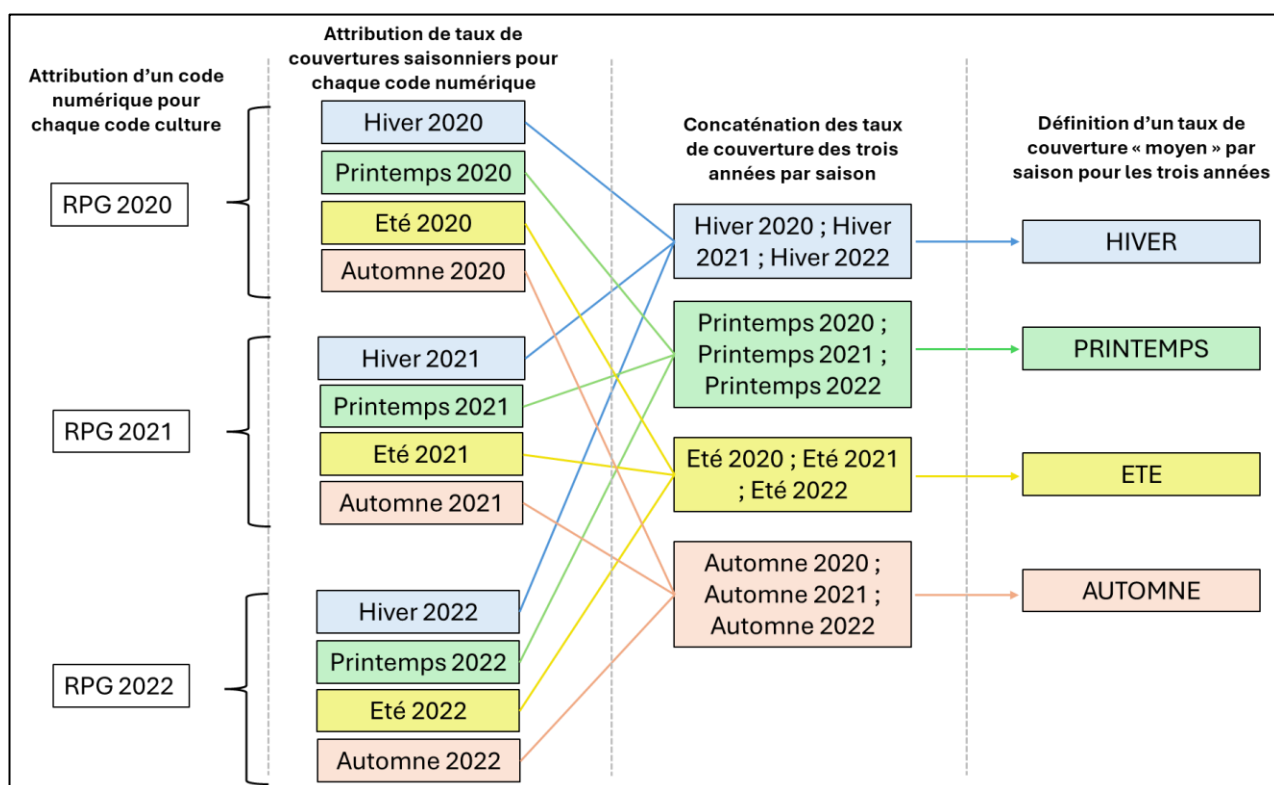


Figure 3: méthode de définition d'un taux de couverture moyen saisonnier pour trois années consécutives à partir du RPG

2.2.1.2. Intégration de Corine Land Cover

La base de données Corine Land Cover de 2018 permet de compléter le RPG en représentant les surfaces non agricoles (forêts, zones urbanisées, surfaces en eau, etc.). Dans un premier temps, chaque code d'occupation du sol de cette base de données a été transformé en taux de couverture comme défini dans Degan et al. (2015), puis la base de données a été rastérisée en fonction du taux de couverture obtenu. Ensuite, ce raster ainsi que les rasters saisonniers obtenus avec les RPG sont importés dans le logiciel SAGA-GIS, et l'outil *Mosaicking* est employé afin de les superposer (figure 4).

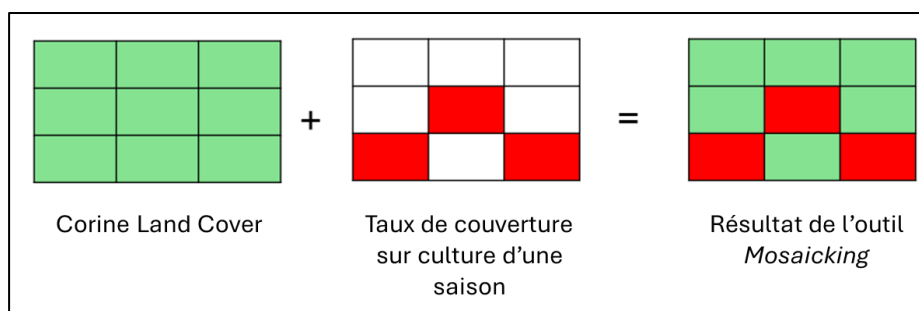


Figure 4: description de l'outil Mosaicking de SAGA-GIS

L'opération décrite par la figure 4 est répétée pour les quatre saisons, résultant quatre cartographies saisonnières du taux de couverture du sol (annexe 3). Les codes résultant de la fusion des trois RPG et de Corine Land Cover permettent de libeller les taux de couverture tel que décrit dans le tableau 2 :

Tableau 2: Libellés correspondant au code COUVERT, d'après Degan et al., (2015)

Code COUVERT	Libellé
1	Sol nu 3/3 ans
2	Sol nu 2/3 ans
3	Sol nu 1/3 ans
5	Sol semi-couvert et couvert 3/3 ans
6	Espace naturel dégradé
7	Prairie et pâturage
8	Forêt
11	Zone urbanisée
55	Étendue d'eau et zone humide

2.2.2. La topographie

La topographie d'un territoire est un des facteurs qui influence le ruissellement, qui lui-même influence l'érosion. Le ruissellement peut être décrit par deux composantes, que sont la quantité de ruissellement, exprimée grâce à l'aire drainée, et sa vitesse, calculée grâce à la pente. Ces deux composantes sont ensuite assemblées afin de donner un facteur de pente.

2.2.2.1. La pente

La pente est calculée à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) sous Qgis. Sur le territoire du NEC, la pente est comprise entre 0% et 50%. Les zones de forte pente se situent majoritairement au niveau des coteaux du Cher mais aussi des affluents. Un travail de classification des pentes (tableau 3) a été effectué selon le rapport VERSEAU (Degan et al., 2015) afin de permettre le croisement avec les aires drainées. Le code employé dans la calculatrice raster de QGIS est disponible en annexe 4 et la carte finale est disponible en annexe 5.

Tableau 3: attribution de codes en fonction des pentes et des aires drainées, d'après Degan et al., (2015)

Valeur de pente	Classes de pentes	Aire drainée		
		< 1 ha	De 1 à 20 ha	> à 20 ha
0 à 1 %	0	0	1	2
1 à 2 %	1	1	2	5
2 à 5 %	2	2	5	10
5 à 10 %	5	5	10	15
10 à 15 %	10	10	15	30
15 à 30 %	15	15	30	30
30 à 75 %	30	30	30	30
Plus de 75 %	75	75	75	75

2.2.2.2. L'aire drainée

Comme énoncé précédemment, l'aire drainée permet de décrire la quantité de ruissellement. L'outil *Flow accumulation (top-down)* de SAGA GIS est employé pour calculer une aire drainée pour chaque pixel à partir du MNT au pas de 25 m. Une fois la carte des aires drainées obtenue, les pixels sont discrétisés en trois classes (tableau 3) : inférieurs à 1 ha, compris entre 1 et 20 ha, et supérieurs à 20 ha. La carte finale est disponible en annexe 6 et le code employé dans la calculatrice raster de QGIS en annexe 7.

2.2.2.3. Le facteur pente

Le facteur pente est le résultat du croisement entre la vitesse de ruissellement (pente) ainsi que la quantité de ruissellement (aire drainée). Cette dernière est utilisée afin de majorer les classes de pente (Desprats et al., 2006) selon le tableau 3. Afin de procéder à cette majoration, un code R a été développé. Le raster en sortie de ce code donne lieu à une carte représentant le facteur pente (figure 5).

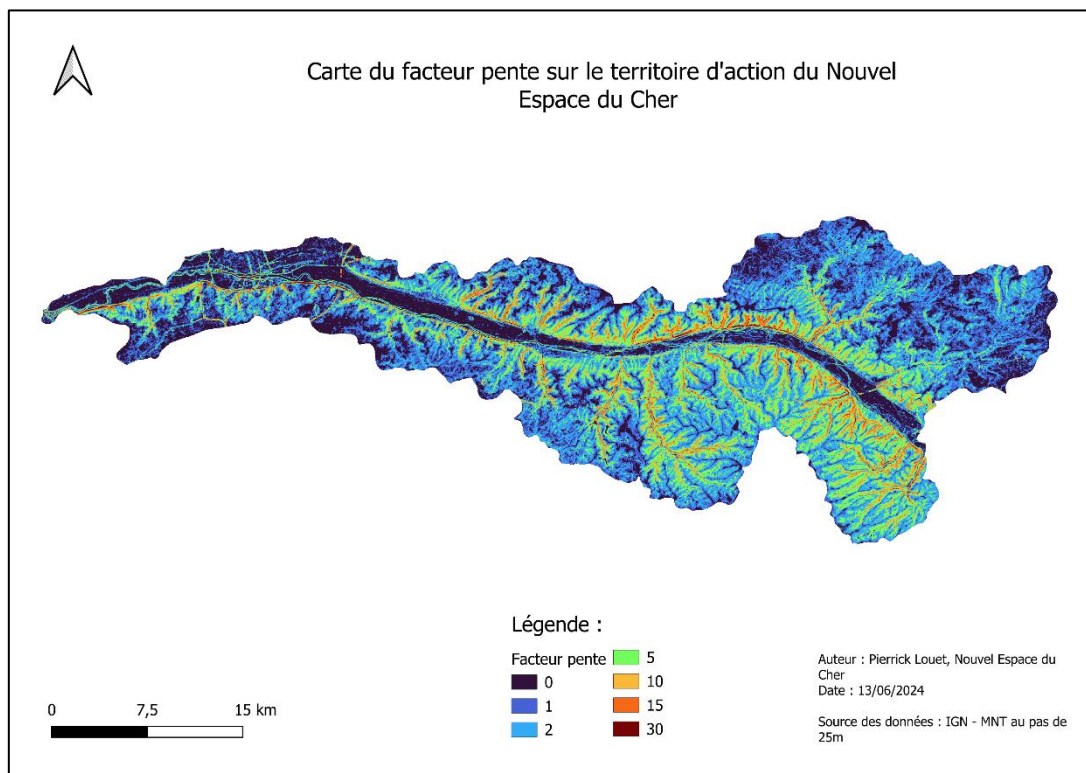


Figure 5: Carte du facteur pente sur le territoire d'action du Nouvel Espace du Cher

2.2.3. La pédologie

Le facteur pédologique est ensuite pris en compte au travers de deux métriques, à savoir la battance et l'érosion. La battance désigne la capacité du sol à former une couche peu perméable en surface, augmentant la probabilité de ruissellement (Augeard, 2006). L'érosion quant à elle indique l'entraînement des particules du sol (El Garouani *et al.*, 2006). La base de données SGDBE (Soil Geographical Database of Eurasia) de 2001 fournit des données de battance et d'érosion à l'échelle de l'Europe selon la texture du sol. Ces données sont ensuite reclassifiées selon le taux de sable et d'éléments grossiers contenus dans chaque polygone, car ces éléments influencent l'érosion et la battance (Bryan, 2000). L'objectif final est d'obtenir deux cartographies de battance et d'érosion à l'échelle du territoire d'action du Nouvel Espace du Cher. Pour obtenir ces cartographies, il faut dans un premier temps découper la couche issue de la base de données SGDBE selon les contours du territoire. L'outil *Couper* de Qgis est employé à cet effet.

2.2.3.1. La battance

La couche shapefile SGDBE découpée à l'échelle du territoire du NEC contient de nombreuses informations, dont une information de texture dominante du sol ainsi qu'un niveau d'aléa à la battance compris entre 1 (aléa très faible) et 5 (aléa fort). Le niveau 0 désigne une zone où l'information relative à la battance n'est pas connue. Cependant, certains sols favorisent l'infiltration et donc une faible battance, notamment les sols sableux (Schueler et Claytor, 2000). Ainsi, les sols comportant un taux de sable supérieur à 65 % (texture dominante égale à 1) sont « déclassés » à un niveau d'aléa battance de 1, et les autres sont laissés tels quels. La cartographie de l'aléa battance est disponible en annexe 9.

2.2.3.2. L'érodibilité

De la même manière que la battance, la base de données SGDBE contient un niveau d'aléa à l'érodibilité compris entre 1 (aléa très faible) et 5 (aléa fort). Le niveau 0 désigne une zone où l'information relative à l'érodibilité n'est pas connue. Poesen *et al.* (1999) ont démontré une corrélation négative entre la présence d'éléments grossiers et la concentration en sédiment dans les flux. Ainsi, plus le sol est constitué d'éléments grossiers en surface, moins le sol est sujet à de l'érosion. De ce fait, si le sol est constitué de plus de 30% d'éléments grossiers, le niveau d'aléa érodibilité est soustrait d'une classe (Degan *et al.*, 2015). Cerdan *et al.* (2010) ont produit une cartographie du taux d'éléments grossiers à l'échelle de l'Europe. En étudiant cette cartographie, il a été constaté que les sols sur le territoire du NEC ont un taux d'éléments grossiers qui n'est pas supérieur à 30%, de ce fait l'aléa érodibilité de la base de données SGDBE n'a pas été modifié. La cartographie de l'aléa érodibilité est disponible en annexe 8.

2.2.4. Implémentation de l'arbre de décision

Les rasters de taux de couverture saisonniers, de pente, de battance et d'érodibilité sont assemblés selon l'arbre de décision décrit dans Degan *et al.*, (2015). Cet arbre, codé sous R, est consultable en annexe 1. Il repose sur le principe de combinaison de données, résultant un aléa érosif « brut ». Cet aléa érosif « brut » est reclassifié afin d'obtenir trois niveaux d'aléa érosif (nul à très faible ; faible à moyen ; fort à très fort) et un niveau « Zones non modélisées », représentant les zones urbanisées notamment. Cet arbre doit être utilisé quatre fois (une utilisation par saison) afin d'aboutir à une modélisation complète.

2.3. Résultats

Le déploiement du modèle à l'échelle du territoire d'action du NEC a donné lieu à quatre cartes décrivant l'aléa érosion en fonction de la saison (annexe 10). D'une manière globale, il peut être remarqué que l'aléa érosion diminue jusqu'à l'été, et augmente au cours de l'automne (figure 6). Ceci est dû au fait que le sol est majoritairement plus couvert en été, réduisant ce risque.

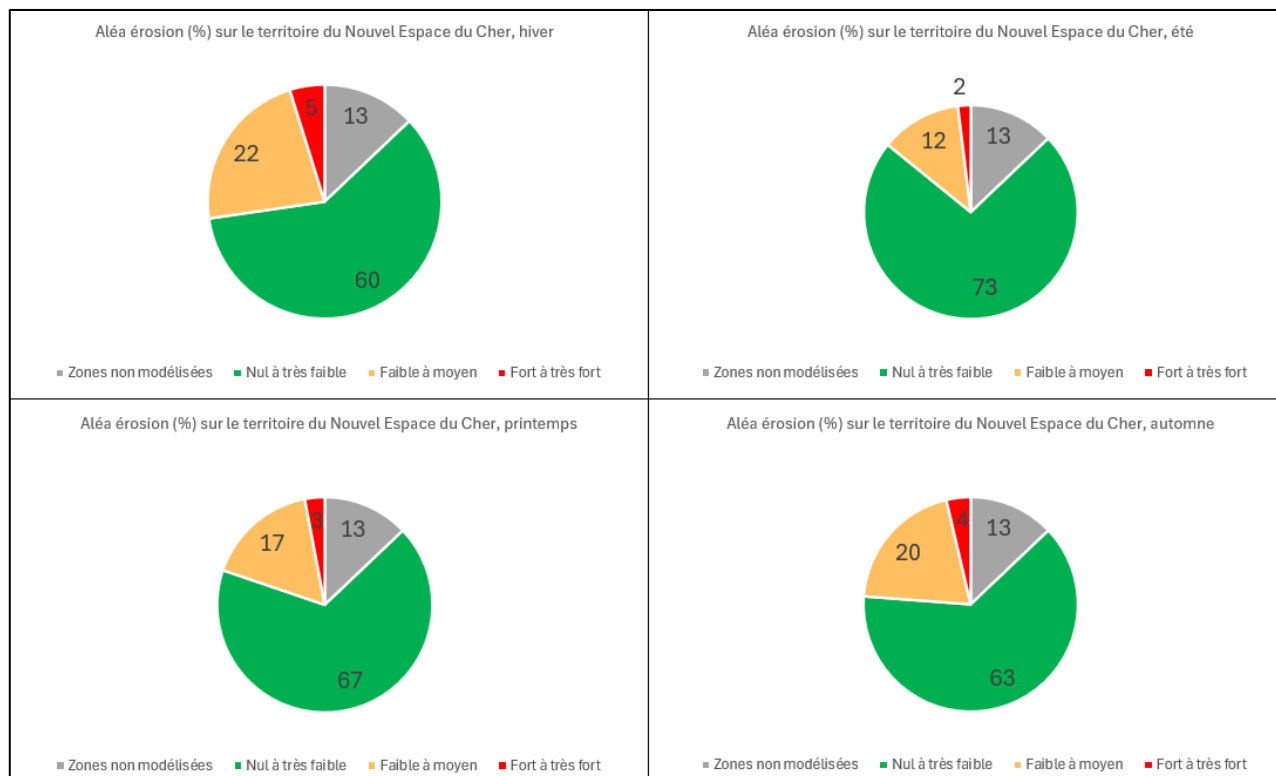


Figure 6: part de chaque classe d'aléa érosion selon la saison

Plus spécifiquement, il a été étudié les cultures classifiées en tant qu'aléa érosif fort à très fort. Les résultats montrent que quatre classes de cultures dominent au sein de cette catégorie d'aléa, à savoir le blé tendre d'hiver (BTH), la vigne (VRC), le colza d'hiver (CZH) et l'orge d'hiver (ORH). L'hiver, l'aléa érosif fort à très fort concerne à hauteur de 24% le blé tendre d'hiver, 17% le colza d'hiver et la vigne, et 10% l'orge d'hiver (figure 7). Au printemps, c'est la vigne qui est la plus représentée avec 32%, 15% concernant le blé tendre d'hiver, 14% pour l'orge d'hiver et 11% concernant le colza d'hiver (annexe 11). Puis, en été, la vigne domine la catégorie aléa fort à très fort à hauteur de 73% (annexe 11). Enfin, en automne, la vigne est toujours la plus représentée au sein de cette catégorie d'aléa avec 25%, suivi du blé tendre d'hiver à hauteur de 23%, et enfin le colza d'hiver avec 15% (annexe 11). Ainsi, mise à part la vigne, les cultures où un aléa fort à très fort est modélisé sont des cultures dites « d'hiver », c'est-à-dire des cultures dont le semi s'effectue en hiver, exposant le sol à l'érosion. Les cultures de vignes sont classées en risque d'aléa fort du fait d'une faible couverture du sol tout au long de l'année.

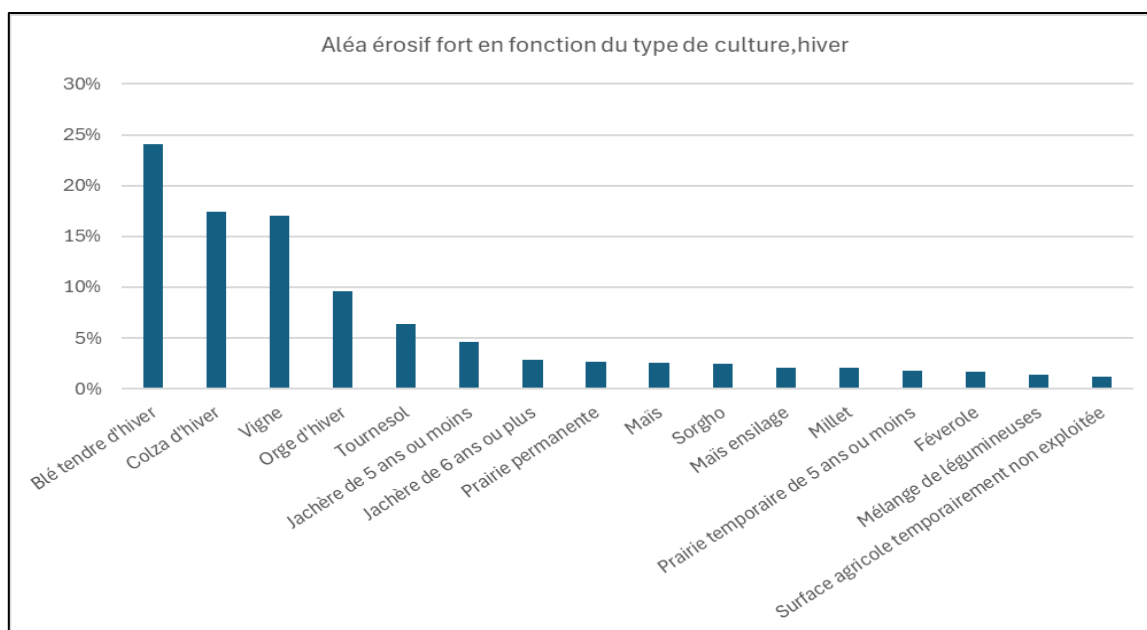


Figure 7: Cultures classifiées en tant qu'aléa érosif fort à très fort pour la saison hiver

D'un point de vue spatial, deux zones exposées au risque d'érosion des sols se distinguent au sein du territoire d'action du Nouvel Espace du Cher. La première se situe rive gauche du cher, et s'étend sur les masses d'eau du Chézelles, du Senelles, de l'Aiguevives et de l'Angé. La seconde se situe rive droite du Cher et se localise sur deux masses d'eau, le Bavet et la Rennes, au nord-est du territoire (figure 8). Le passage de l'hiver à l'été réduit ces zones à enjeux, mais ne les fait pas pour autant varier spatialement (annexe 12).

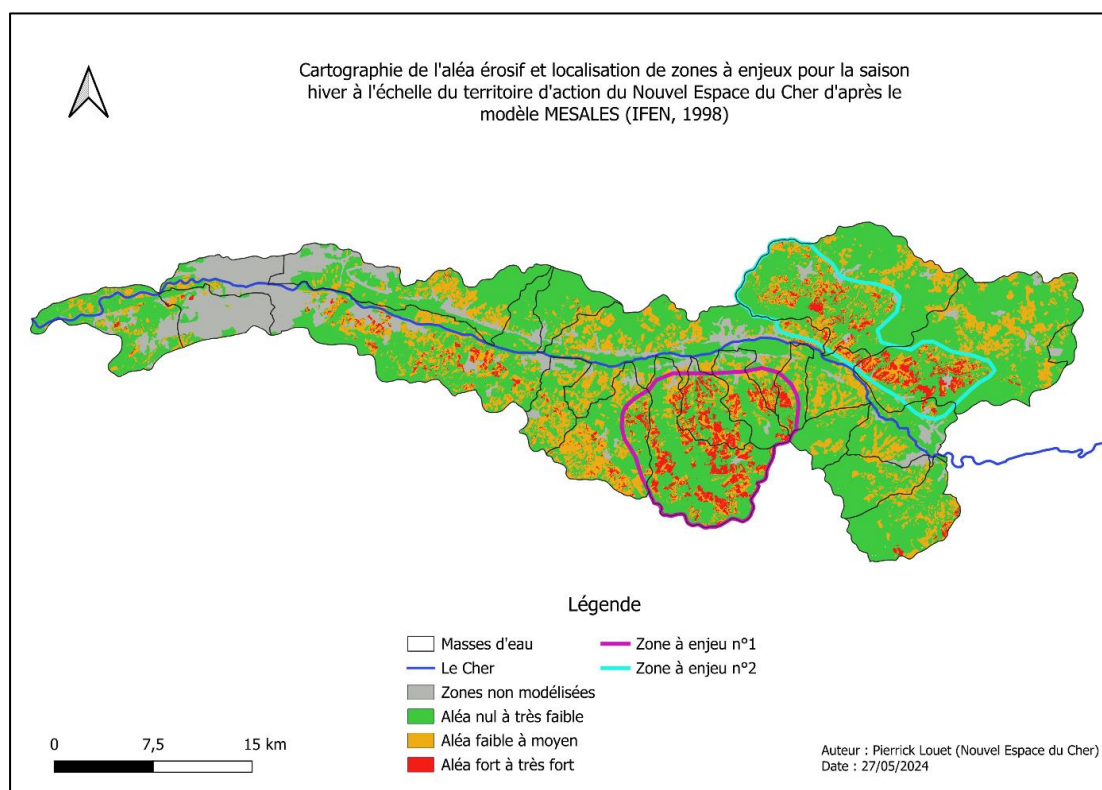


Figure 8: aléa érosif d'après le modèle MESALES sur le territoire d'action du Nouvel Espace du Cher pour la saison hiver et localisation des zones à enjeux

2.4. Discussion

Ainsi, il a pu être observé grâce à cette étude que l'aléa érosif diminuait de l'hiver à l'été, puis augmentait au cours de l'automne, pour finalement être maximal en hiver. Ceci est cohérent avec différentes études (Degan *et al.*, 2015 ; Le Bissonnais *et al.*, 2002). Puis, les types d'occupation du sol contribuant le plus à l'aléa érosif sont les cultures d'hiver et la vigne, fortement présentes sur le territoire d'action du NEC. Une fois de plus, ce résultat concorde avec plusieurs études (Antoni *et al.*, 2006). Deux zones à enjeux ont pu être identifiées, situées dans la partie orientale du territoire d'action du NEC. Ce sont des zones où la vigne est cultivée, résultant un sol peu couvert tout au long de l'année. Les cultures d'hiver, telles que le blé tendre d'hiver, le colza d'hiver ou encore l'orge d'hiver sont aussi très présentes sur ces zones. Ces cultures sont semées en automne et hiver, il en résulte une période où le sol est nu, expliquant l'aléa fort sur ces zones.

Le modèle MESALES, bien que robuste et utilisé dans de nombreuses études, comporte quelques limites. Tout d'abord, il n'y a pas de prise en compte de rotation des cultures sur une même année, pouvant offrir au sol une couverture prolongée, et pouvant diminuer l'érosion. Puis, le taux de couverture pour les vignes est considéré comme nul tout au long de l'année. Or des parcelles de vignes peuvent être pour tout ou partie enherbée. Concernant les zones urbanisées, ces dernières ne sont pas modélisées car elles ne provoquent pas d'érosion. Mais cela ne veut pas dire qu'elles n'ont pas d'impact, car elles peuvent mener à des problématiques similaires à l'érosion, par exemple le transfert de polluants au cours d'eau par lessivage des sols. Enfin, l'arbre de décision, bien que déterminé par des experts, reste une construction subjective et variable selon le groupe d'experts consultés (Cerdan *et al.*, 2006).

Une amélioration dans la présentation des résultats réside dans l'affichage de l'aléa selon les bassins versants de masse d'eau. Cette démarche permettrait l'étude de bassins versants dont le degré d'aléa est fort. Puis, un dialogue avec des experts pourrait permettre de juger la surestimation ou la sous-estimation du degré d'aléa sur certains secteurs, et donc d'ajuster le modèle.

Ainsi, des cartographies d'aléa érosif à l'échelle du Nouvel Espace du Cher ont été obtenues, délimitant des zones où la probabilité d'érosion est élevée. Ce ciblage suggère une étude plus approfondie de ces zones, associé aux retours d'expérience d'acteurs locaux.

3. Watersed

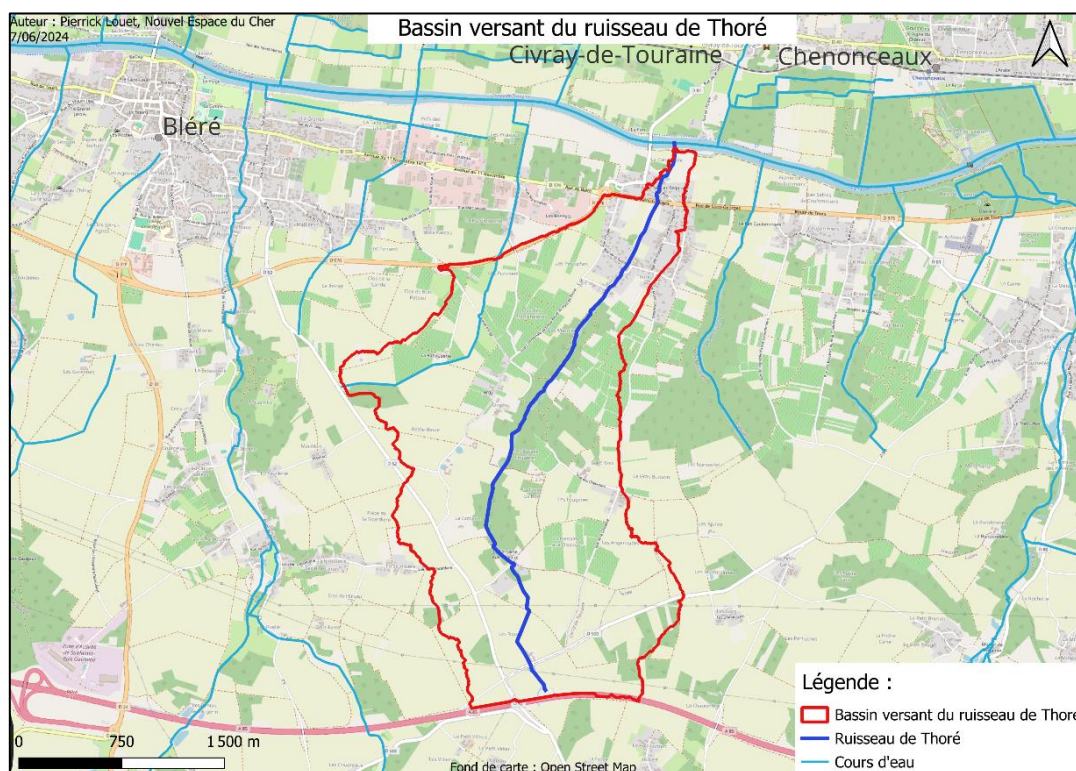
3.1. Site d'étude

Le site sur lequel le modèle Watersed a été déployé est le bassin versant du ruisseau de Thoré, petit affluent rive gauche du Cher. Ce bassin versant s'étend sur 576 hectares et couvre trois communes, à savoir Civray-de-Touraine, Luzillé et Bléré, toutes les trois appartenant au département d'Indre-et-Loire (37). Le cours d'eau principal de ce bassin versant est le ruisseau de Thoré, mesurant 4,7 km de long.

Le bassin versant peut être découpé en trois parties. La partie amont est constituée de vastes parcelles agricoles, pour la plupart des cultures d'hiver ou de printemps. Puis, la partie médiane du bassin versant est composée de vignes, et le cours d'eau évolue dans un environnement forestier. Enfin, c'est dans la partie aval du bassin versant que se trouve la commune de Civray-de-Touraine (lieu-dit de La Canardière et de Thoré), donnant lieu ainsi à un milieu urbanisé (figure 9). Le ruisseau de Thoré est un cours d'eau dont les écoulements se produisent à la faveur d'événements pluvieux et ont un caractère intermittent. Une étude de 2017 a pu estimer le débit décennal en fonction de trois durées de pluies (tableau 4) :

Tableau 4: Q10 ans en fonction de la durée d'évènement pluvieux

Temps de l'évènement pluvieux (min)	Q10ans (m ³ /s)
60	7,7
90	5,7
120	4,6



Les usages du bassin versant sont principalement agricoles (annexe 13), principalement axés sur de la culture d'hiver, de printemps et de la vigne. La partie aval du bassin versant est plus urbaine, avec la commune de Civray-de-Touraine (37). L'altitude du bassin versant varie de 53 m NGF à l'exutoire et 114 m NGF à l'amont (annexe 14). D'un point de vue pédologique, les textures varient de limoneuses à limono-argilo-sableuse (annexe 15). Enfin, les plus fortes pentes du bassin versant sont situées en bordure de cours d'eau (annexe 16).

La commune de Civray-de-Touraine (37) a sollicité le NEC pour des problématiques de ruissellement et d'érosion liées au ruisseau de Thoré. Une retenue sèche a été chiffrée en 2017, mais le projet a été abandonné car trop onéreux. Ainsi, la demande de la commune est d'étudier les flux de ruissellement et d'érosion afin de les contenir le plus en amont possible du bassin versant du ruisseau de Thoré, en vue de proposer des aménagements de type hydraulique douce (haies, bandes enherbées, fascines, etc.), moins coûteux. Ainsi, le deuxième objectif de ce stage est de déployer un outil quantitatif de l'érosion et du ruissellement à l'échelle de ce bassin versant afin de pouvoir apporter des réponses à la commune, à savoir le modèle Watersed.

3.2. Matériel

3.2.1. Le modèle WaterSed

La démarche WaterSed a été initiée dès 2015 (Landemaine, 2016) dans un but d'amélioration du modèle STREAM développé par l'INRAE en 2002 (Cerdan, 2002). L'objectif principal du modèle WaterSed est la modélisation du ruissellement, de l'érosion et des coulées de boues selon un événement pluvieux donné, à l'échelle de la parcelle ou du bassin versant. Une première modélisation « brute » est étudiée afin de proposer des scénarios d'aménagements, qui seront intégrés dans une deuxième modélisation « aménagements ». La comparaison de ces deux modélisations permet *in fine* l'évaluation de l'efficacité de ces aménagements.

Le modèle WaterSed est un modèle distribué, c'est à dire que le site étudié est discrétisé en mailles relativement petites pour être considérées comme homogènes. Ainsi, le ruissellement et l'érosion sont connus pour chaque maille. De plus, l'une des spécificités du modèle est de prendre en compte de manière simultanée le ruissellement dépendant de l'intensité des pluies (ruissellement dit « hortonien ») et le ruissellement issu d'un excès de saturation du sol en eau, qui est quant à lui indépendant de l'intensité des pluies.

Quatre types de données d'entrée sont nécessaires au fonctionnement du modèle. Dans un premier temps, la topographie du site d'étude va permettre l'établissement d'axes de ruissellement théoriques. Puis, l'occupation du sol associée aux caractéristiques pédologiques et pluviométriques vont permettre d'obtenir des états de surface des sols selon une échelle temporelle. L'intégration d'une pluie de projet à ces états de surface des sols permettra de déterminer des propriétés hydrodynamiques et érosives pour chaque type d'occupation du sol. Ces propriétés seront associées à la topographie et constitueront les données d'entrées pour le modèle WaterSed (annexe 17).

3.2.2. Collecte et source des données

3.2.2.1 Topographie

La topographie du territoire est décrite par un Modèle Numérique de Terrain (MNT). L'IGN (Institut Géographique National) propose plusieurs résolutions de MNT, dont l'usage dépend de la disponibilité des données ou encore de l'objectif de l'étude. Dans le cadre du modèle Watersed, la résolution se doit d'être relativement précise (Landemaine, 2016). Ainsi, les dalles MNT de résolution 1m du RGE ALTI (<https://geoservices.ign.fr/rgealti>) du département 37 ont été extraites.

3.2.2.2. Données d'occupation du sol

Décrire l'occupation du sol est une tâche complexe par le nombre et la diversité des usages. Ainsi, plusieurs sources de données ont été combinées dans le but de décrire de manière la plus précise l'occupation du sol, qui est un facteur déterminant pour l'étude du ruissellement et de l'érosion des sols. Dans un premier temps, l'OCS GE (OCcupation du Sol à Grande Echelle) datant de 2021 de l'IGN a été employée afin de distinguer des zones de cultures des zones urbanisées, les surfaces d'eau des forêts, etc... Puis, deux sources d'informations plus précises ont été utilisées, à savoir le RPG 2022 (Registre Parcellaire Graphique) ainsi que la base de données CarHab datant de 2023. Le RPG permet d'identifier les îlots de culture au 1/5000^{ème} suivant une nomenclature de plus de 300 classes de cultures. La base de données CarHab 2023 quant à elle décrit les habitats naturels et semi-naturels de France (forêt de conifère acide humide, végétation herbacée haute...). Ainsi, en combinant ces trois sources de données, une cartographie précise de l'occupation du sol peut être obtenue sur le site d'étude.

3.2.2.3. Données pédologiques

Puis, des données pédologiques doivent être intégrées au modèle. Ces dernières permettent de déduire des propriétés du sol, dont les propriétés de rétention en eau (Hall et Djerbib, 2006 ; Henderson et al., 2005 ; Jensen et al., 2005 ; Nemes et Rawls, 2006 ; Saxton et Rawls, 2006 ; Bruand et al., 2002 ; Al Majou et al., 2007). Ainsi, des cartes de caractéristiques pédologiques au 1:50000 ont été géoréférencées dans le but de relever les textures sur le bassin versant d'étude.

3.2.2.4. Données climatiques

Les données climatiques sont des données pluviométriques de deux types : les cumuls mensuels moyens afin d'établir l'humidité initiale du sol, puis les coefficients de Montana afin de déterminer une hauteur de pluie en fonction de sa durée (Eq.1). Ces coefficients dépendent d'un pas de temps et de la durée de retour de la pluie choisie (figure 10).

$$h(t) = a * t^{(1-b)}$$

Equation 1 : relation liant la hauteur de pluie et sa durée

Avec :

- $h(t)$: hauteur de pluie (mm)
- a et b : coefficient de Montana (figure 10)
- t : temps de pluie (min)

Coefficients de Montana pour des pluies de durée de 6 minutes à 1 heure		
Durée de retour	a	b
5 ans	4.15	0.576
10 ans	4.79	0.569
20 ans	5.377	0.562
30 ans	5.664	0.556
50 ans	6.045	0.55
100 ans	6.48	0.54

Figure 10: exemple de coefficients de Montana en fonction de la période de retour de pluie, station de Rennes St-Jaques (35), source : Météo-France

Depuis le 1^{er} janvier 2024, les données climatiques de base, dont les cumuls mensuels moyens, sont disponibles gratuitement en ligne sur le site de Météo-France. En revanche, ce n'est pas le cas pour les coefficients de Montana, qui restent payants. Ils ont donc été acquis dans le cadre de cette étude. Du fait de sa proximité avec le site d'étude, c'est la station de Sublaines (37) qui a été choisie pour obtenir les cumuls mensuels et les coefficients de Montana.

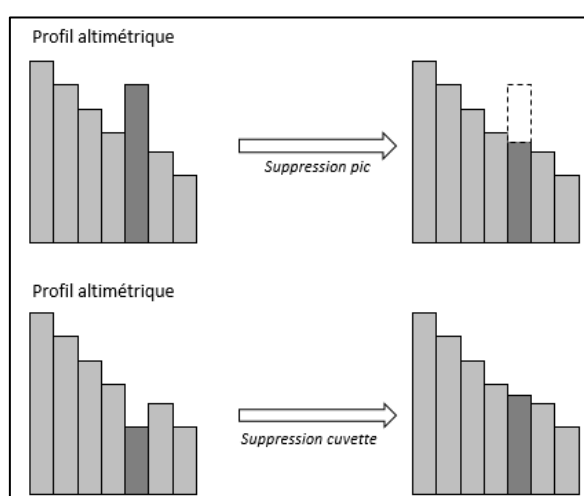
3.3. Méthode

3.3.1. Mise en forme des données

La première étape de la démarche WaterSed est la mise en forme des différentes données d'entrée au modèle.

3.3.1.1. Topographie

La topographie constitue la base du conditionnement des écoulements au sein d'un bassin versant, c'est pourquoi il est impératif qu'elle soit intégrée au modèle. Plusieurs étapes sont nécessaires afin d'obtenir le MNT du site d'étude choisi. Tout d'abord, sous QGIS, les dalles raster doivent être sélectionnées en superposant ces dernières aux dalles vecteurs à l'aide de leurs coordonnées en Lambert 93. L'objectif ici est d'englober le bassin versant d'étude de manière assez large afin d'être sûr de ne pas omettre des parties du site. Puis, ce MNT « global » est importé sous le logiciel SAGA-GIS afin d'y appliquer l'outil *Fill Sinks* (Wan & Liu, 2006), assurant un gradient de pente continu de l'amont vers l'aval du bassin versant d'étude (figure 11). Enfin, toujours sous SAGA GIS, l'utilisation successif de *Flow accumulation (top down)* et de *Upslope area [interactive]* va permettre 1) de calculer la surface drainée par chaque pixel sur le MNT « global » et 2) d'identifier de manière interactive un exutoire rattachant un réseau hydrographique, et donc d'extraire le MNT correspondant au bassin versant d'étude.



Enfin, la dernière étape de mise en forme des données topographiques consiste en l'inventaire des axes de ruissellement bruts. Ces derniers sont déterminés exclusivement avec le MNT en entrée, et ne prennent pas en compte l'occupation du sol. Cet inventaire s'effectue sous SAGA GIS grâce à l'outil *Channel Network and Drainage Basins* avec le MNT du bassin versant étudié en entrée.

Ces axes feront l'objet d'une correction grâce à des investigations de terrain afin de prendre en compte l'occupation du sol et les éléments qui pourraient modifier les écoulements (route, fossé...).

3.3.1.2. Occupation du sol

L'occupation du sol d'un territoire doit être prise en compte pour l'étude de l'érosion du sol et du ruissellement. En effet, l'eau ne va pas ruisseler de la même manière sur une surface forestière que sur une culture de blé, ou encore que sur une surface urbanisée. Comme évoqué précédemment, plusieurs sources de données sont combinées afin de décrire au mieux l'occupation du sol (RPG 2022, OCS GE 2021, CarHab 2023). Cependant un compromis doit être trouvé entre simplification de ces bases de données et précision de la description du territoire étudié.

Ainsi, à partir du RPG 2022, des catégories de cultures ont été créées afin de regrouper les parcelles possédant une sensibilité particulière au ruissellement et à l'érosion, ou par rapport à un critère temporel. Par exemple, l'ensemble des cultures dites « d'hiver » (semis effectués en hiver) ont été regroupées, on y retrouve l'orge d'hiver, le blé dur d'hiver, ou le lupin doux d'hiver. Les cultures de printemps ont été aussi rassemblées, regroupant le sorgho, le sarrasin, l'orge de printemps, ou encore le pois chiche. En revanche, la méthode de semi de la pomme de terre rend cette culture sensible à l'érosion et au ruissellement (Show and Rees, 1994 ; Edwards *et al.*, 2000), c'est pourquoi une catégorie dédiée à cette culture a été créée. La base de données OCS GE de 2021 faisant intervenir des catégories d'occupation du sol assez large, il a été décidé de les laisser telles quelles. Seules les catégories « forêt de feuillus », « forêt de conifères » et « forêt mixte » ont été regroupées sous le nom de « forêt et bois ». Enfin, les habitats contenus dans la base de données CarHab de 2023 ont été classifiés selon trois groupes : « forêt et bois », « Fourré » ainsi que « Couvert végétal ». Chaque catégorie créée se voit attribuer un CODE_LU. Le détail de l'ensemble du classement des cultures est visible en annexe 18.

3.3.1.3. Caractéristiques pédologiques

A la dimension topographique et d'occupation du sol viennent s'ajouter les caractéristiques pédologiques du territoire étudié, plus précisément les textures pédologiques. La connaissance de ces dernières permet de déduire des propriétés du sol, dont les propriétés de rétention en eau (Hall et Djerbib, 2006 ; Henderson *et al.*, 2005 ; Jensen *et al.*, 2005 ; Nemes et Rawls, 2006 ; Saxton et Rawls, 2006 ; Bruand *et al.*, 2002 ; Al Majou *et al.*, 2007). Ainsi, les textures de sol du site d'étude ont pu être extraites avec 1) le géoréférencement de cartes scannées de textures de sol datant de 1987 (INRA, Chambre d'agriculture d'Indre et Loire) et 2) délimitation de polygones correspondant aux limites de textures. Un CODE_SOIL de 1 est attribué pour les textures limoneuses, et un CODE_SOIL de 2 est attribué aux textures limono-argilo-sableuses.

3.3.2. Relevés terrain

Cette étape permet de corriger les axes de ruissellement bruts afin de prendre en compte les éléments d'occupation du sol pouvant influencer ces derniers, comme des routes, des chemins ou des fossés. Une prospection terrain est nécessaire afin de relever ces éléments sur l'ensemble du bassin versant d'étude. Cette prospection a été établie avec une tablette terrain qui a permis la création des axes suivants (tableau 5) :

Tableau 5: caractéristiques des axes de ruissellement relevés sur le terrain

Type d'axe	CODE_LU	Largeur (m)
Fossé	7	2
Thalweg	24	2
Cours d'eau	6	2
Route	2	5
Buse	25	1

3.3.3. Expertise

L'étape suivante consiste à croiser les données pédologique, d'occupation du sol et de pluviométrie afin d'obtenir des états de surface de sol en fonction d'une pluie de projet. Cela peut s'effectuer grâce à un algorithme en ligne *PREMACHE*, et se déroule en plusieurs étapes.

3.3.3.1. Initialisation

Cette étape permet de définir un certain nombre de propriétés pour chaque type d'occupation du sol. Les cultures sont distinguées des non-cultures. Pour les cultures, huit paramètres sont définis :

- Opération : type de travail du sol
- Mois : mois de l'opération
- Couvert : classe de couvert végétal lors du semi
- Encroustement : état d'encroûtement de la surface du sol
- Rugosité : rugosité de la surface du sol
- Mois C2 : nombre de mois nécessaires à la culture pour atteindre un couvert végétal moyen
- Mois C3 : nombre de mois nécessaires à la culture pour atteindre un couvert végétal fort

Une table est ainsi créée avec l'ensemble des types de cultures et les paramètres correspondant, et est injectée dans l'application en ligne *PREMACHE*. Cette table est visible annexe 19.

Pour les types d'occupation du sol qualifiés de « non-culture », six paramètres sont utilisés :

- INILT : capacité d'infiltration (mm/h)
- MES_INT010 : concentration en MES pour une intensité de pluie max entre 0 et 10 mm/h
- MES_INT1040 : concentration en MES pour une intensité de pluie max entre 10 et 40 mm/h
- MES_INT40 : concentration en MES pour une intensité de pluie max supérieure à 40 mm/h
- MAN : coefficient de Manning
- ERO : érodibilité

De la même manière que pour les cultures, une table est créée contenant les types d'occupation du sol qualifiés de « non-culture » et est importée dans l'application en ligne *PREMACHE*. Cette table est visible en annexe 21.

Enfin, les catégories de CODE_SOIL présentes sur le territoire d'étude doivent être renseignées, à savoir soit CODE_SOIL = 1 (textures limoneuses) et/ou CODE_SOIL = 2 (textures limono-argilo-limoneuses). Au sein du bassin-versant étudié, ces deux catégories de textures sont présentes, ainsi les deux sont sélectionnées.

3.3.3.2. Etats de surface des sols

Cette étape permet de lier les deux tables « cultures » et « non-cultures » obtenues précédemment aux cumuls mensuels de précipitations (mm). Ces cumuls mensuels ont été mesurés à la station de Sublaines (37) entre 1992 et 2020, et permettent de définir un état de surface de sol selon le mois de l'année. L'évolution de l'état de surface du sol au cours de l'année selon le type d'occupation du sol (CODE_LU) associé aux textures de sol (CODE_SOIL) est ensuite calculée à l'aide de l'algorithme *PREMACHE*.

3.3.3.3. Pluie de projet

La troisième étape du processus consiste à appliquer une pluie de projet aux états de surface mensuels calculés précédemment. Trois paramètres principaux définissent une pluie de projet :

le mois de l'évènement, les coefficients a et b de Montana, et enfin la durée totale de l'évènement. Les coefficients a et b de Montana sont choisis en fonction de la période de retour de pluie souhaitée (entre 5 et 50 ans, figure 10), et couplés à la durée totale de pluie exprimée en minutes (Eq.1), une hauteur de pluie en millimètres peut être déterminée. Cette valeur de hauteur de pluie doit être conservée, car elle devra être saisie lors de la modélisation Watersed. La pluie de projet est alors appliquée à l'ensemble des états de surface calculés précédemment, donnant lieu à des tables Watersed.

3.3.3.4. Tables Watersed

Les tables Watersed, issues du croisement entre la pluie de projet et les états de surface, prennent deux formes : « Properties Table » et « Initial soil moisture table ». La première présente quatre propriétés hydro-sédimentaires en fonction de la concaténation du CODE_LU et du CODE_SOIL, résultant en un CODE (figure 12). Les quatre propriétés hydro-sédimentaires sont la capacité d'infiltration (mm/h), la concentration en MES dans les eaux de ruissellement (g/l), le coefficient de Manning, et enfin l'érodibilité du sol. Les trois propriétés relatives à la table « Initial soil moisture table » correspondent aux caractéristiques des pluies et l'humidité initiale du sol, à savoir : la capacité d'infiltration (mm/h), la durée effective de l'évènement de pluie pour une capacité d'infiltration donnée (min), et enfin l'imbibition ou perte initiale avant ruissellement (mm).

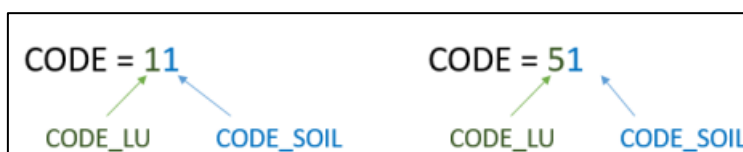


Figure 12: concaténation du CODE_LU et du CODE_SOIL, source : site Watersed

3.3.4. Création des données d'entrée au modèle

Puis, l'étape suivante consiste à spatialiser les propriétés hydrodynamiques et érosives, et de les coupler aux données topographiques, à savoir le MNT ainsi que les axes de ruissellement.

Les axes de ruissellement bruts ne sont issus que d'un calcul topographique, et ne reflètent pas l'impact sur les écoulements des infrastructures telles que les routes, chemins, ou encore les fossés. C'est pourquoi des campagnes terrain ont été effectuées afin de pouvoir relever ces infrastructures pouvant impacter les écoulements au sein du bassin versant d'étude. L'objectif ici est d'intégrer les axes de ruissellement relevés sur le terrain aux axes de ruissellement bruts, donnant lieu à un réseau qui sera nommé *runoff network* (figure 13). Pour obtenir ce réseau, l'outil *Fill DEM* sous SAGA GIS sera utilisé. Cet outil prend en entrée le MNT puis les axes de ruissellement relevés sur le terrain, et va « surcreuser » le MNT à l'endroit où les axes ont été relevés sur le terrain afin de forcer les écoulements. Ce MNT « surcreusé » est ensuite utilisé comme entrée pour l'outil *Channel Network and Drainage Basins*, résultant un réseau d'axes de ruissellement prenant en compte à la fois la topographie et les infrastructures influençant la direction des écoulements.

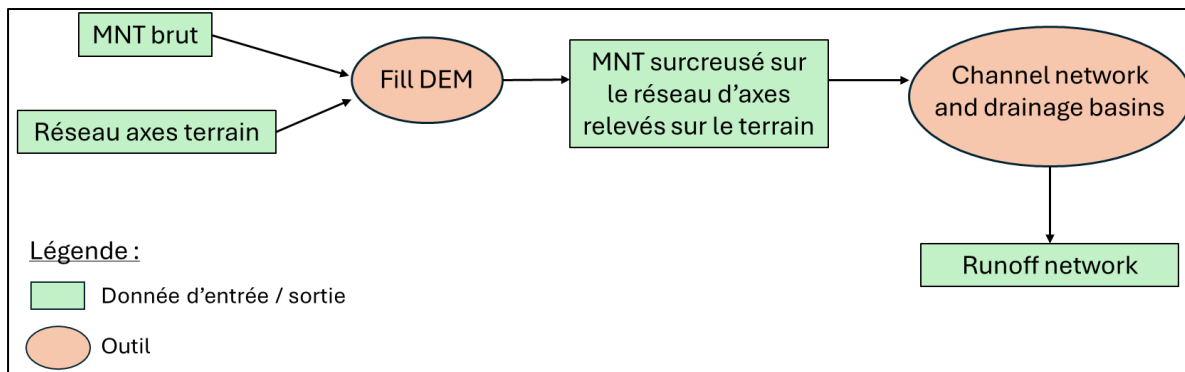


Figure 13: processus permettant d'intégrer le réseau d'axes de ruissellement déterminé sur le terrain

Ensuite, l'outil *Input Generator* (figure 14) de SAGA GIS est utilisé afin de spatialiser les propriétés hydrodynamiques et érosives obtenues avec l'algorithme *PREMACHE*. L'outil fonctionne de la manière suivante : la cartographie de l'occupation des sols est fusionnée à la cartographie des axes de ruissellement relevés sur le terrain, afin que les CODE_LU des types d'occupation du sol soient remplacés par les CODE_LU des axes de ruissellement relevés sur le terrain au droit de ces derniers. Puis, la cartographie des caractéristiques pédologiques est fusionnée à la cartographie de l'occupation du sol / des axes de ruissellements relevés sur le terrain, et pour chaque pixel le CODE_LU est concaténé au CODE_SOIL. Les tables de propriétés hydrodynamiques et érosives obtenues sous *PREMACHE* sont ensuite intégrées au raster comportant le CODE_LU et le CODE_SOIL concaténé, et ainsi les 4 propriétés peuvent être spatialisées ainsi que le raster portant l'information CODE. L'outil permet également de générer les 4 autres rasters permettant de définir les caractéristiques des pluies et l'humidité initiale du sol.

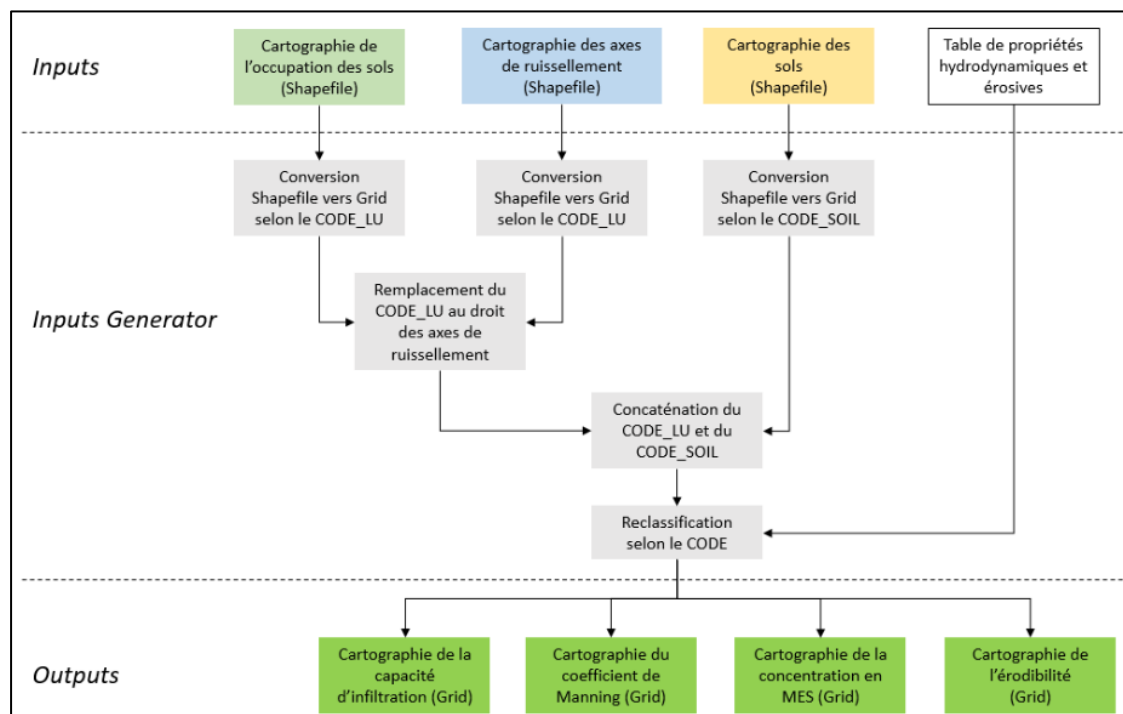


Figure 14: fonctionnement de l'outil *Input Generator*

3.3.5. Modélisation diagnostique

Une modélisation dite « diagnostique » est une modélisation dressant l'état initial d'un système. Dans le cadre de cette étude, c'est une modélisation des flux d'érosion et de ruissellement non-contenus par des aménagements. Cet état initial permet d'identifier des secteurs problématiques dans l'objectif d'implanter des aménagements, et de mesurer l'efficacité de ces derniers.

L'outil *WaterSed Model* de SAGA GIS permet la modélisation des flux de ruissellements et d'érosion grâce aux rasters issus de l'utilisation de l'outil *Input Generator*, au MNT ainsi qu'à la largeur des axes de ruissellement. Cet outil permet aussi d'intégrer des aménagements, néanmoins cette option n'est pas utilisée à ce stade car il s'agit d'une modélisation diagnostique.

Une vingtaine de paramètres sont issus de l'utilisation de cet outil, parmi lesquels on peut retrouver le volume de ruissellement (*surface runoff*, m³), le débit de pointe (*runoff peak*, m³/s), le transport sédimentaire (*sediment yield*, kg) ou encore l'érosion diffuse (*interill erosion*, kg).

3.3.6. Modélisation des aménagements

3.3.6.1. Les aménagements

Sur la base de la modélisation diagnostique, un ou plusieurs scénarios d'aménagement peuvent être imaginés. Le modèle Watersed permet d'intégrer quatre types d'aménagement à la modélisation, à savoir des haies, des fascines, des bandes enherbées et des bassins de rétention. Ces types d'aménagements répondent à des problématiques différentes, mais sont aussi complémentaires (tableau 6).

Tableau 6: objectifs et positionnement des aménagements modélisés par Watersed

	Objectif	Positionnement
Haie	- Freine le ruissellement - Infiltration du ruissellement diffus	- Limite de parcelle - Perpendiculaire à la pente
Fascine	- Freine le ruissellement - Freine l'érosion concentrée	- Dans les thalwegs - Perpendiculaire à la pente
Bande enherbée	- Freine le ruissellement - Infiltration du ruissellement - Freine l'érosion concentrée	- En bordure de cours d'eau, fossés, parcelles
Bassin	- Ecrêter le pic de crue - Infiltration des eaux - Tamponner les volumes de ruissellement	- Thalwegs larges et peu pentus

3.3.6.2. Création des aménagements

Les quatre types d'aménagements se matérialisent selon trois catégories. Les haies et fascines sont des entités linéaires, les bandes enherbées des polygones, et enfin les bassins sont des entités ponctuelles. Ainsi, la première étape consiste à créer ces entités selon le scénario d'aménagement défini. Les couches lignes et/ou polygones et/ou points sont créées sous Qgis à l'aide de l'outil *Créer une couche*. Puis, pour chaque entité créée, les attributs suivants doivent être renseignés (tableau 7) :

- ID : Type d'aménagement
- WIDTH : Largeur de l'aménagement (m)

- INFILTRATION : Capacité d'infiltration (mm/h)
- MANNING : coefficient de Manning ($s.m^{-1/3}$)
- VOLUME : volume de stockage, uniquement pour les bassins (m^3).

Tableau 7: caractéristiques des aménagements modélisés par Watersed

	ID	WIDTH	INFILTRATION	MANNING	VOLUME
Fascine	1	0,5	200	1	0
Haie	2	1	400	0,6	0
Bande enherbée	3	1	50	0,15	0
Bassin	4	0,5	0	0,04	2000

3.3.6.3. Construction des raster propriétés

Puis, l'ensemble de ces propriétés doivent être transformées en raster afin d'être intégrées dans le modèle. Cette opération s'effectue sous SAGA GIS à l'aide de l'outil *Measures Generator*. Ainsi, 4 rasters (5 dans le cas d'une implantation de bassin) sont créés et directement utilisables pour la modélisation.

3.3.6.4. Modélisation prenant en compte les aménagements

De la même manière que lors de la modélisation diagnostique, l'outil *WaterSed Model* est réemployé avec les mêmes entrées. Les rasters correspondants aux aménagements créés sont insérés dans la partie *CONTROL MEASURES* de l'outil *WaterSed Model*. L'exécution du modèle donne en sortie les mêmes paramètres que la modélisation diagnostique avec l'impact des aménagements implantés pris en compte.

3.3.7. Choix des intensités de pluies et des scénarios d'aménagement

Pour cette étude, il a été choisi de modéliser un état diagnostique sous trois intensités de pluies d'1 heure, à savoir sous une période de retour de 5 ans, 10 ans et 50 ans ayant lieu au mois de mai et au mois d'octobre, donnant lieu à six modélisations post-aménagements. Puis, trois scénarios d'aménagement ont été envisagés (tableau 8) :

Tableau 8: scénarios d'aménagement sur le bassin versant du ruisseau de Thoré

	Aménagement	Linéaire / capacité
Scanario 1	Haies	1600 m
	Fascines	20 m
Scanario 2	Haies	6300 m
	Fascines	20 m
Scanario 3	Haies	6300 m
	Fascines	20 m
	Bassins	8000 m^3

Ces scénarios d'aménagement tiennent compte des résultats de la modélisation diagnostique, mais aussi de la volonté d'implanter des aménagements d'hydraulique douce le plus en amont possible du bassin-versant.

3.4. Résultats

3.4.1. Résultats issus de la modélisation diagnostique

La modélisation diagnostique permet de déterminer l'état actuel des flux d'érosion et de ruissellement. Elle permet de cibler des zones en vue d'y implanter des aménagements contenant les phénomènes de ruissellement et d'érosion.

Six modélisations diagnostiques ont été déployées sur le bassin versant d'étude, à savoir trois au mois de mai avec des événements pluvieux de période de retour 5, 10 et 50 ans, et trois au mois d'octobre avec les mêmes périodes de retour d'événements pluvieux. Ce choix permet d'observer les phénomènes pour différentes intensités d'événements et pour différentes conditions culturales. Trois indicateurs ont été étudiés, à savoir le volume de ruissellement (*surface runoff*, m^3), le débit de pointe (*runoff peak*, m^3/s), et le transport sédimentaire (*sediment yield*, kg).

Ces modélisations diagnostique permettent de mettre en lumière deux types de ruissellement. Le premier est un phénomène de ruissellement « concentré », caractérisé par un flux principal. On trouve ce type de ruissellement principalement dans les thalwegs, observable en figure 15 a) et b). Le deuxième type de ruissellement pouvant être observé est qualifié de diffus, assimilable à des flux parallèles de faibles intensités. De tels flux sont observables en c) et en d) (figure 15).

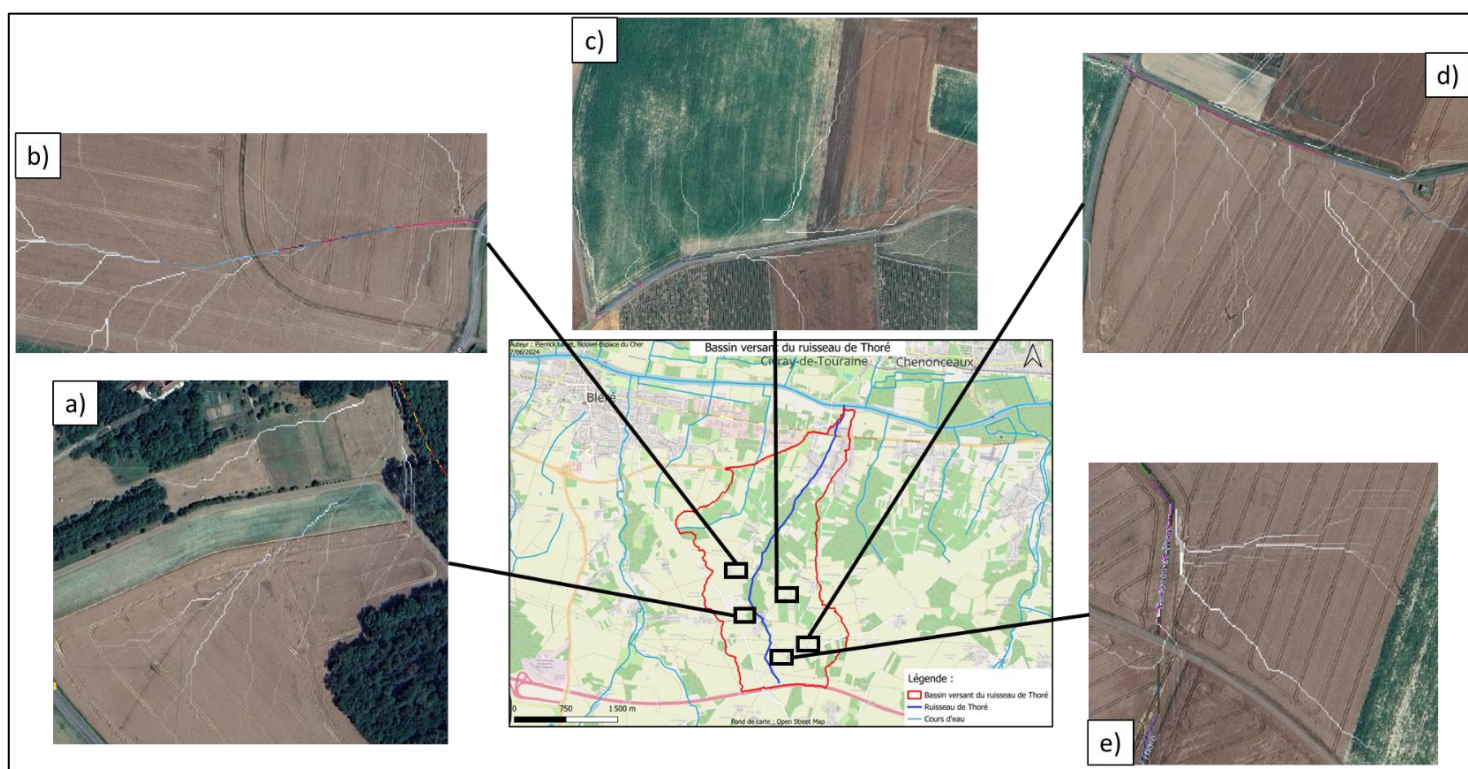


Figure 15: localisation de secteurs à enjeux vis à vis du ruissellement sur une pluie à période de retour 50 ans produite au mois de mai

Puis, le secteur urbanisé à l'aval du bassin versant a été étudié afin de connaître l'influence de la saisonnalité sur le ruissellement et le transport sédimentaire au sein du bassin versant (figure 16). Le point où les résultats ont été relevés correspond à une zone à enjeu inondation – débordement dans le lieu-dit de Thoré appartenant à la commune de Civray-de-Touraine (37).

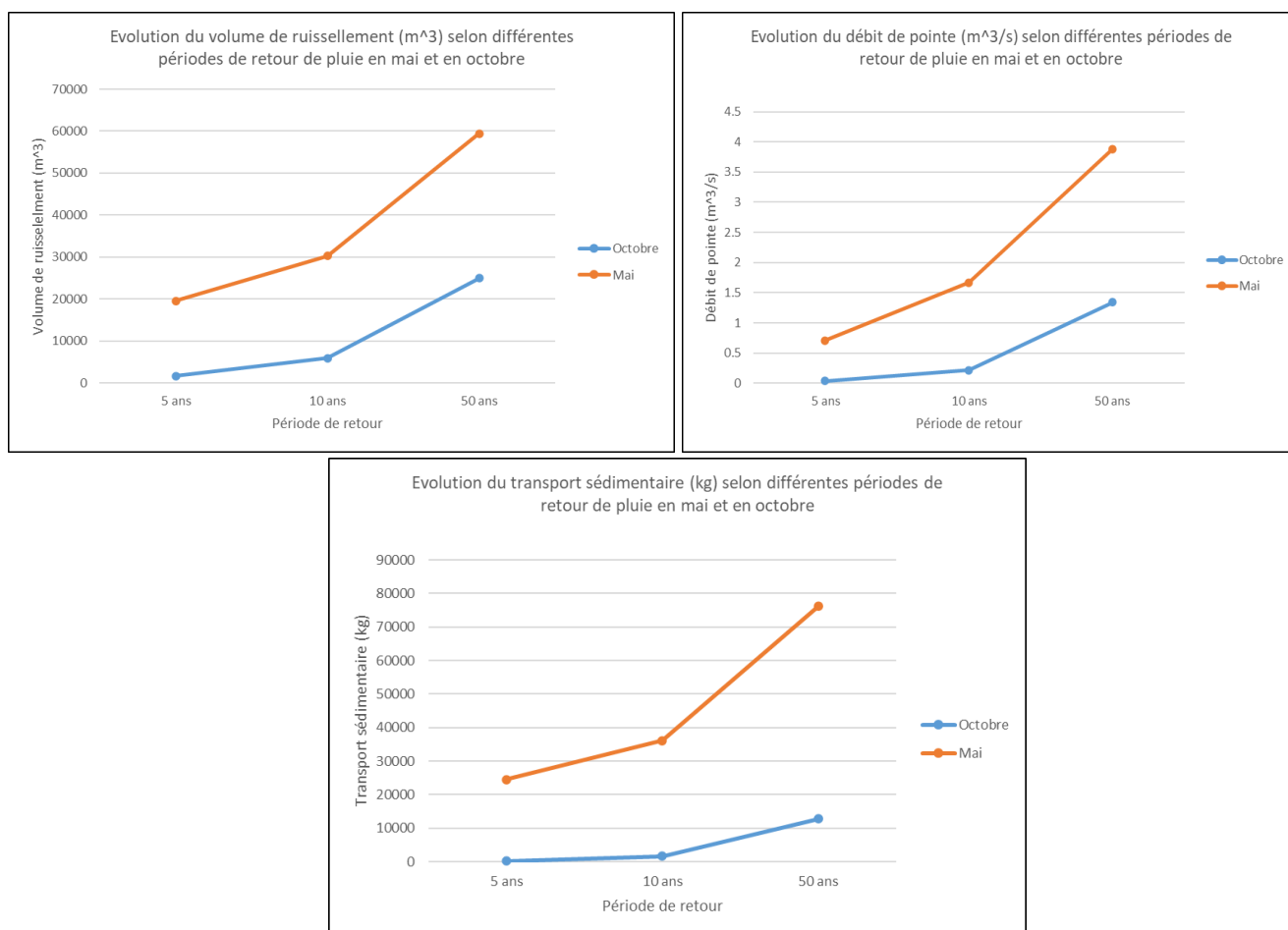


Figure 16: impact de la saisonnalité sur le volume de ruissellement et débit de pointe (*surface runoff* et *runoff peak*) et sur le transport sédimentaire (*sediment yield*)

Dans un premier temps, il peut être remarqué que le ruissellement (*surface runoff* et *runoff peak*) est plus important en mai qu'en octobre. A titre d'exemple, il est observé une différence de 20000 m^3 entre octobre et mai pour une pluie à période de retour 5 ans. De même pour le débit de pointe, avec 1 m^3/s de différence entre les deux mois pour une pluie de retour 5 ans.

3.4.2. Résultats post – aménagement

Les trois scénarios d'aménagement (tableau 8) ont été intégré au modèle et trois pluies de projet d'1 heure ont été appliqué, à savoir une pluie à période de retour 5 ans, 10 ans et 50 ans. Dans un premier temps, la modélisation a été déployée sur le mois de mai, et sur le mois d'octobre dans un second temps. Dans les deux cas, l'évolution de trois paramètres a été étudiée : le volume de ruissellement (*surface runoff*, m^3), le débit de pointe (*runoff peak*, m^3/s), et le transport sédimentaire (*sediment yield*, kg). L'observation des résultats se fait toujours au même point pour une comparaison avant/après aménagement.

3.4.2.1. Pluie d'1 heure au mois de mai pour trois périodes de retour

Tout d'abord, il est observé une décroissance de l'efficacité des aménagements avec l'augmentation des intensités de pluie (figure 17). Puis, une hiérarchie entre les scénarios semble s'établir : plus le linéaire et volume d'aménagement est important, plus le scénario est efficace.

Les scénarios 1 et 2 mobilisent des haies et des fascines. Bien qu'avec une augmentation du linéaire de haie dans le scénario 2 (+ 4700 m), les résultats montrent un taux d'abattement du volume de ruissellement et du débit de pointe assez faible (-0,6% dans le cas du scénario 1 et -2% dans le cas du scénario 2). Cependant, on trouve un taux d'abattement allant jusqu'à -19% pour le transport sédimentaire dans le cadre du scénario 2.

Le scénario 3, qui n'est autre que le scénario 2 auquel on ajoute 8000 m³ de bassin, montre des taux d'abattement bien supérieurs aux deux autres scénarios pour l'ensemble des métriques étudiées. Par exemple, on passe d'une réduction du débit de pointe de -2% à -18% pour une pluie à période de retour 5 ans (annexe 20).

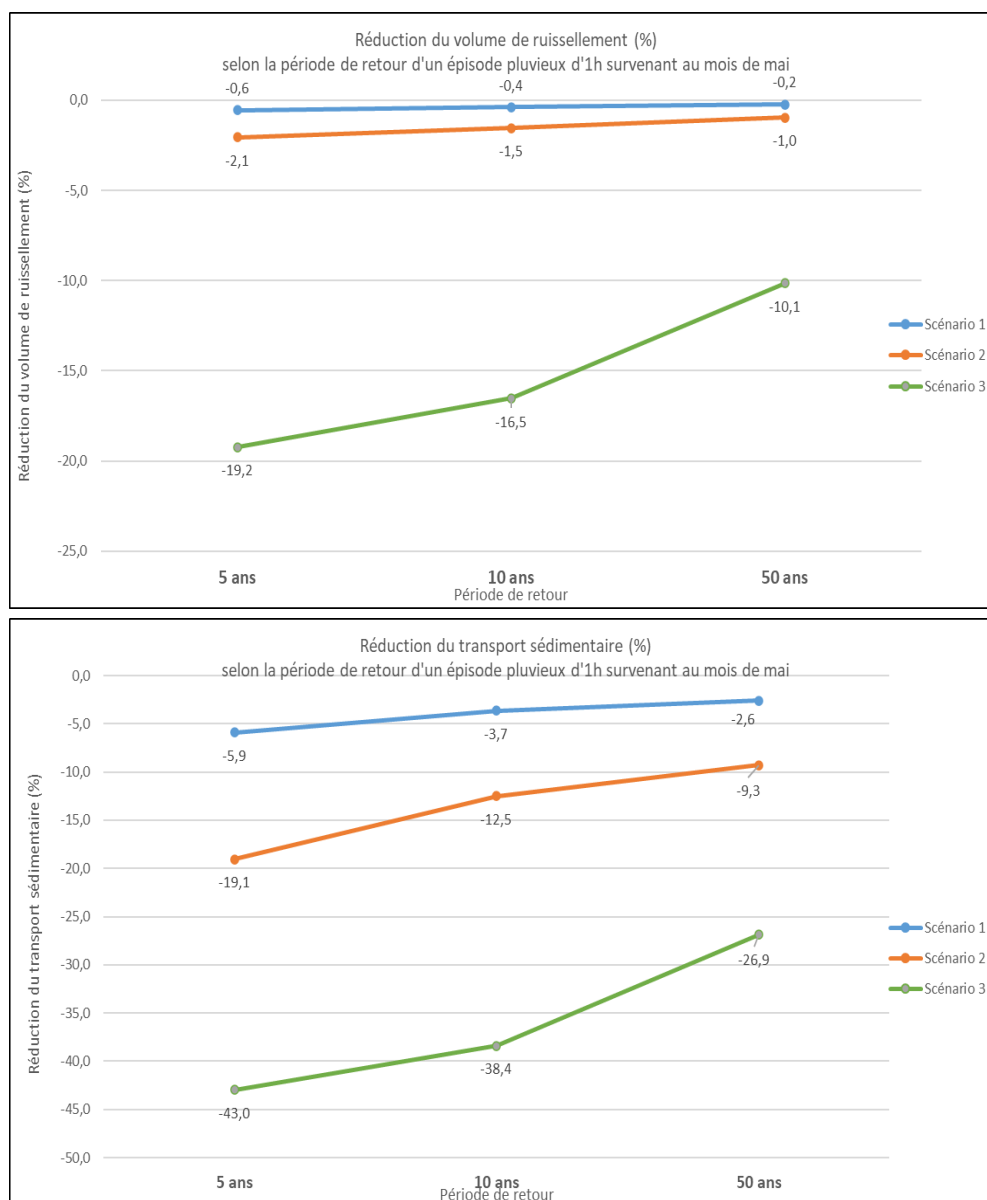


Figure 17: taux d'abattement du volume de ruissellement (surface runoff) et du transport sédimentaire (sediment yield) engendrés par les scénarios d'aménagement pour une pluie d'1 heure survenant au mois de mai

3.4.2.2. Pluie d'1 heure au mois d'octobre

Le même travail a été effectué pour le mois d'octobre (figure 18). La diminution de l'efficacité des aménagements avec l'augmentation des intensités de pluies est plus difficilement observable que pour le mois de mai, avec notamment une augmentation de l'efficacité entre une pluie à

période de retour 5 et 10 ans, puis une diminution de l'efficacité entre une pluie à période de retour 10 ans et 50 ans. Cependant, les trois scénarios conservent une même hiérarchie

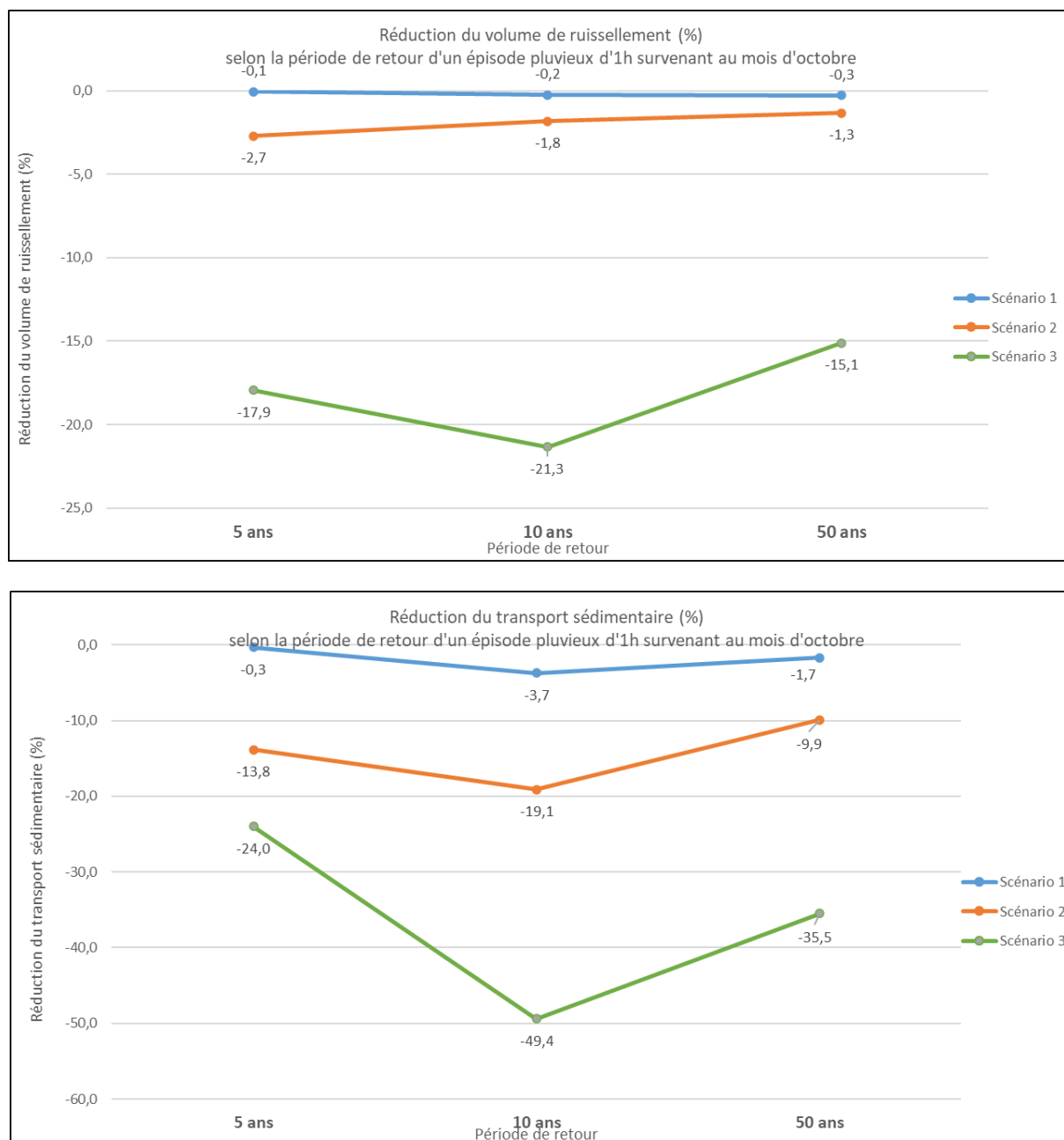


Figure 18: taux d'abattement du volume de ruissellement (surface runoff) et du transport sédimentaire (sediment yield) engendrés par les scénarios d'aménagement pour une pluie d'1 heure survenant au mois d'octobre

d'efficacité, à savoir que le scénario le plus efficace dans la réduction des volumes de ruissellement et du transport sédimentaire est celui comportant des bassins (scénario 3). Le graphique relatif aux taux d'abattements du débit de pointe est consultable en annexe 23.

3.5. Discussion

Le modèle Watersed a été déployé sur le bassin versant du ruisseau de Thoré, s'étendant sur les communes de Luzillé, Bléré et Civray-de-Touraine. Les six configurations dans lesquelles le modèle a été exploité ont permis d'apprécier l'impact des variations d'intensité de pluies et des saisons, et ainsi de proposer trois scénarios d'aménagement dans l'objectif d'atténuer les effets du ruissellement et de l'érosion des sols au niveau de la commune de Civray-de-Touraine.

Les résultats diagnostics ont montré que le ruissellement et l'érosion étaient plus importants pour des pluies survenant en mai qu'en octobre. Ce résultat peut paraître surprenant à première vue sachant que les sols sont globalement plus couverts au printemps qu'en automne.

Puis, trois scénarios d'aménagement ont été appliqués aux six modélisations, avec comme point de référence le ruisseau de Thoré dans la zone à enjeux de Civray-de-Touraine. Les résultats ont montré sur le mois de mai une diminution de l'efficacité des aménagements avec l'augmentation de l'intensité de l'évènement pluvieux simulé, conformément à plusieurs études (Landemaine et al, 2020 ; Landemaine, 2016). Pour un évènement pluvieux ayant lieu au mois d'octobre, cette corrélation négative entre l'intensité de la pluie et l'efficacité des aménagements est plus difficilement observable (figure 18).

En prenant un point de référence plus en amont (fosse maurice), toujours dans le ruisseau de Thoré, les évolutions d'efficacité semblent plus cohérentes (annexe 23). Le point où initialement les mesures étaient prises fait apparaître des apports d'eau autres que ceux provenant du ruisseau de Thoré (ruissellements provenant de la route notamment), ainsi l'incohérence observée semble venir du point de mesure.

Les ordres de grandeur d'efficacité des aménagements sont aussi en accord avec la littérature (Landemaine, 2020). L'efficacité des fascines et des haies est assez limitée concernant la réduction du ruissellement, avec des taux d'abattement fluctuants entre 0 et -3 % (figures 17 et 18). En revanche ces aménagements se révèlent assez performants vis-à-vis de la réduction du transport sédimentaire, avec des taux d'abattements variant entre -10 et -20%.

Une comparaison entre les taux d'abattement de mai et d'octobre permet de montrer que les aménagements sont globalement plus efficaces pour une pluie au mois d'octobre. Ceci est lié au fait que le ruissellement et l'érosion sont plus importants au mois de mai, rendant les aménagements moins efficaces.

Une des perspectives à ce travail serait d'intégrer les zones humides potentielles du site d'étude. En effet, le Nouvel Espace du Cher a lancé à l'échelle de son territoire d'action un inventaire de zones humides réalisé par la SEPANT (Société d'Etudes, de Protection et d'Aménagement de la Nature en Touraine) dans le département 37 et la CDPNE (Comité Départemental de la Protection de la Nature et de l'Environnement) dans le département 41. Ces zones humides peuvent stocker des volumes d'eau et ainsi écrêter les pics de crues. Plusieurs zones humides à probabilité de présence forte ont été recensées sur le bassin versant du ruisseau de Thoré. N'étant pas prise en compte dans le modèle, il serait pertinent 1) d'estimer leur volume de stockage, 2) de les assimiler à des bassins afin d'étudier leur impact sur le ruissellement et l'érosion du bassin versant et 3) de proposer des consignes de gestion ou de restauration.

Cependant, il convient de garder à l'esprit qu'un modèle ne représente pas par définition la réalité. Puis, les nombreuses données d'entrée et étapes peuvent être sources d'accumulation d'incertitudes et d'erreurs. Ensuite, cette étude est la première menée sur le territoire d'action du

NEC, ainsi certains paramètres doivent être ajustés et adapté au territoire. Puis, certaines imprécisions ressortent, notamment vis-à-vis des vignes, où le potentiel érosif et de ruissellement est sous-évalué par le modèle. L'ensemble de ces éléments suggèrent à la prudence vis-à-vis des résultats.

Conclusion

Une démarche d'étude et de réduction du ruissellement et de l'érosion des sols a été initiée à l'échelle du territoire d'action du Nouvel Espace du Cher. De nombreuses communes se trouvent en aval de bassins versants d'affluents du Cher et se retrouvent donc exposées à ces risques, qui sont voués à devenir de plus en plus récurrents sous l'action du changement climatique. Ainsi, l'objectif de l'étude a été de proposer des solutions pour limiter le ruissellement et l'érosion le plus en amont possible du bassin versant du site d'étude à l'aide de méthodes d'aménagement d'hydraulique douce. Pour cela, le modèle Watersed a été déployé sur le bassin versant du ruisseau de Thoré, et a permis 1) de localiser et de quantifier les principaux flux de ruissellement et d'érosion, 2) modéliser les impacts des aménagements implantés et 3) comparer l'efficacité de ces aménagements. Les résultats ont montré des taux d'abattelements plutôt faibles pour des scénarios d'aménagement mettant en jeu des fascines et des haies, et des taux d'abattement nettement plus importants à l'occasion de la modélisation de bassins. La suite du travail concernant le bassin versant du ruisseau de Thoré sera de fédérer et créer une dynamique entre les acteurs agricoles et institutionnels afin de déterminer le scénario d'aménagement le plus adapté aux enjeux sociaux, environnementaux et économiques, sur la base de cette présente étude. Ce travail a déjà été initié grâce à plusieurs échanges et réunions avec la commune de Civray-de-Touraine au cours de ce stage. Les zones humides, dont l'inventaire est actuellement mené par le NEC et la SEPANT, pourront être intégrées dans le modèle du fait de leur capacité de stockage. Puis, l'objectif à terme sera d'appliquer le modèle Watersed sur d'autres bassins versants du territoire d'action du NEC, en s'appuyant sur la cartographie d'aléa érosion MESALES réalisée au cours de cette étude, et/ou du retour d'acteurs agricoles, élus, ou résident(e)s. D'une manière globale, le NEC poursuivra le travail relatif à la plantation de haies dans le cadre du CTMA 2023-2025.

Bibliographie

Al Majou, H., Bruand, A., Duval, O., & Cousin, I. (2007). Comparaison de fonctions de pédotransfert nationales et européennes pour prédire les propriétés de rétention en eau des sols. *Etude et Gestion des Sols*, 14(2), 103-116.

Antoni, V., Le Bissonnais, Y., Thorette, J., Zaidi, N., Laroche, B., Barthès, S., ... & Arrouays, D. (2006). Modélisation de l'aléa érosif des sols en contexte méditerranéen à l'aide d'un Référentiel Régional Pédologique au 1/250 000 et confrontation aux enjeux locaux. *Etude et gestion des sols*, 13(3), 201-222.

Augeard, B. (2006). *Mécanismes de genèse du ruissellement sur sol agricole drainé sensible à la battance. Etudes expérimentales et modélisation* (Doctoral dissertation, ENGREF (AgroParisTech)).

Bruand, A., Fernandez, P. P., Duval, O., Quétin, P., Nicoullaud, B., Gaillard, H., ... & Prud'Homme, L. (2002). Estimation des propriétés de rétention en eau des sols: Utilisation de classes de pédotransfert après stratifications texturale et texturo-structurale. *Etude et gestion des sols*, 9, 2-105.

Bryan, R. B. (2000). Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology*, 32(3-4), 385-415.

Cerdan, O., King, C., Surdyk, N., Dubus, I., & Desprats, J. F. (2006). Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols. Rapport n 3: Synthèse et recommandations générales.

Cerdan, O., Govers, G., Le Bissonnais, Y., Van Oost, K., Poesen, J., Saby, N., ... & Dostal, T. (2010). Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data. *Geomorphology*, 122(1-2), 167-177.

Chow, T. L., & Rees, H. W. (1994). Effects of potato hilling on water runoff and soil erosion under simulated rainfall. *Canadian Journal of Soil Science*, 74(4), 453-460.

Clergeau, P., & Désiré, G. (1999). Biodiversité, paysage et aménagement: du corridor à la zone de connexion biologique. *Mappemonde*, 55(3), 19-23.

Closset-Kopp, D., Gallet-Moron, É., Buridant, J., Lenoir, J. R. M. H., & Decocq, G. (2017). Un cas de forêt linéaire ancienne dans les paysages ruraux: de la difficile reconnaissance des haies anciennes à l'étude de leur diversité végétale. *Revue forestière française*, 69(4), 441-454.

Degan, F., Salvador-Blane, S., & Cerdan, O. (2015). Cartographie de l'aléa érosif sur le bassin Loire-Bretagne. *Agence de l'Eau Loire-Bretagne, laboratoire Géo-Hydrosystèmes continentaux de l'Université François Rabelais de Tours, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Projet VERSEAU*. 102p.

Desprats, J. F., Bourguignon, A., Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., and Colmar, A. (2006). Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols. Rapport numéro1 : Etude de sensibilité sur le département de l'Hérault. RP-55049-FR. Technical report, BRGM, Orléans.

Douvinet, J., Van De Wiel, M. J., Delahaye, D., & Cossart, E. (2015). A flash flood hazard assessment in dry valleys (northern France) by cellular automata modelling. *Natural Hazards*, 75, 2905-2929.

Edwards, L. M., Volk, A., & Burney, J. R. (2000). Mulching potatoes: Aspects of mulch management systems and soil erosion. *American Journal of potato research*, 77, 225-232.

El Garouani, A., Chen, H., Lewis, L., Tribak, A., & Abharour, M. (2008). Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du sig idrisi au nord-est du Maroc. *Télédétection*, 8(3), 193-201.

Evrard, O., Biielders, C. L., Vandaele, K., & van Wesemael, B. (2007). Spatial and temporal variation of muddy floods in central Belgium, off-site impacts and potential control measures. *Catena*, 70(3), 443-454.

Hall, M., & Djerbib, Y. (2006). Moisture ingress in rammed earth: Part 2–The effect of soil particle-size distribution on the absorption of static pressure-driven water. *Construction and Building Materials*, 20(6), 374-383.

Henderson, J. J., Crum, J. R., Wolff, T. F., & Rogers III, J. N. (2005). Effects of particle size distribution and water content at compaction on saturated hydraulic conductivity and strength of high sand content root zone materials. *Soil science*, 170(5), 315-324.

Jensen, N. H., Balstrøm, T., & Breuning-Madsen, H. (2005). The relations between soil water retention characteristics, particle size distributions, bulk densities and calcium carbonate contents for Danish soils. *Hydrology Research*, 36(3), 235-244.

Kronvang, B., Laubel, A., Larsen, S. E., & Friberg, N. (2003). Pesticides and heavy metals in Danish streambed sediment. *Hydrobiologia*, 494, 93-101.

Le Bissonnais, Y., Thorette, J., Bardet, C., & Daroussin, J. (2002). L'érosion hydrique des sols en France. *Rapport INRA, IFEN*, 106.

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. *University of Rouen*.

Landemaine, V., Soullignac, A., & Cerdan, O. (2020). *Analyse coût bénéfice des actions de lutte contre le ruissellement et l'érosion des sols sur le bassin de la Lézarde, Rapport final BRGM* (p. 142). RP-69650-FR.

Nemes, A., & Rawls, W. J. (2006). Evaluation of different representations of the particle-size distribution to predict soil water retention. *Geoderma*, 132(1-2), 47-58.

Poesen, J., De Luna, E., Franca, A., Nachtergaele, J., & Govers, G. (1999). Concentrated flow erosion rates as affected by rock fragment cover and initial soil moisture content. *catena*, 36(4), 315-329.

Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil science society of America Journal*, 70(5), 1569-1578.

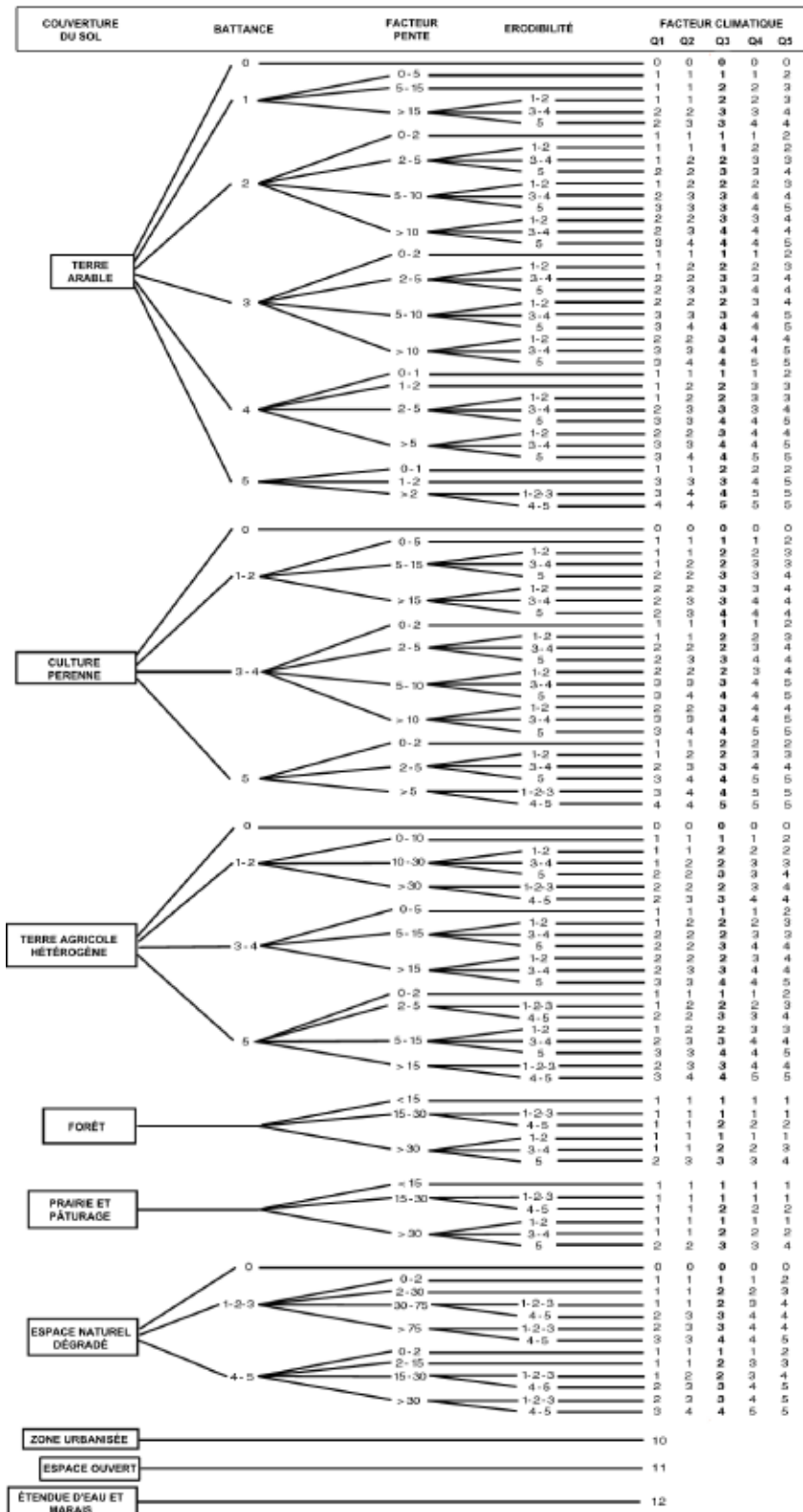
Schueler, T. R., & Claytor, R. A. (2000). Maryland stormwater design manual. *Maryland Department of the Environment*. Baltimore, MD.

Steiger, J., Tabacchi, E., Dufour, S., Corenblit, D., & Peiry, J. L. (2005). Hydrogeomorphic processes affecting riparian habitat within alluvial channel–floodplain river systems: a review for the temperate zone. *River Research and Applications*, 21(7), 719-737.

Wang, L., & Liu, H. (2006). An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(2), 193-213.

Annexes

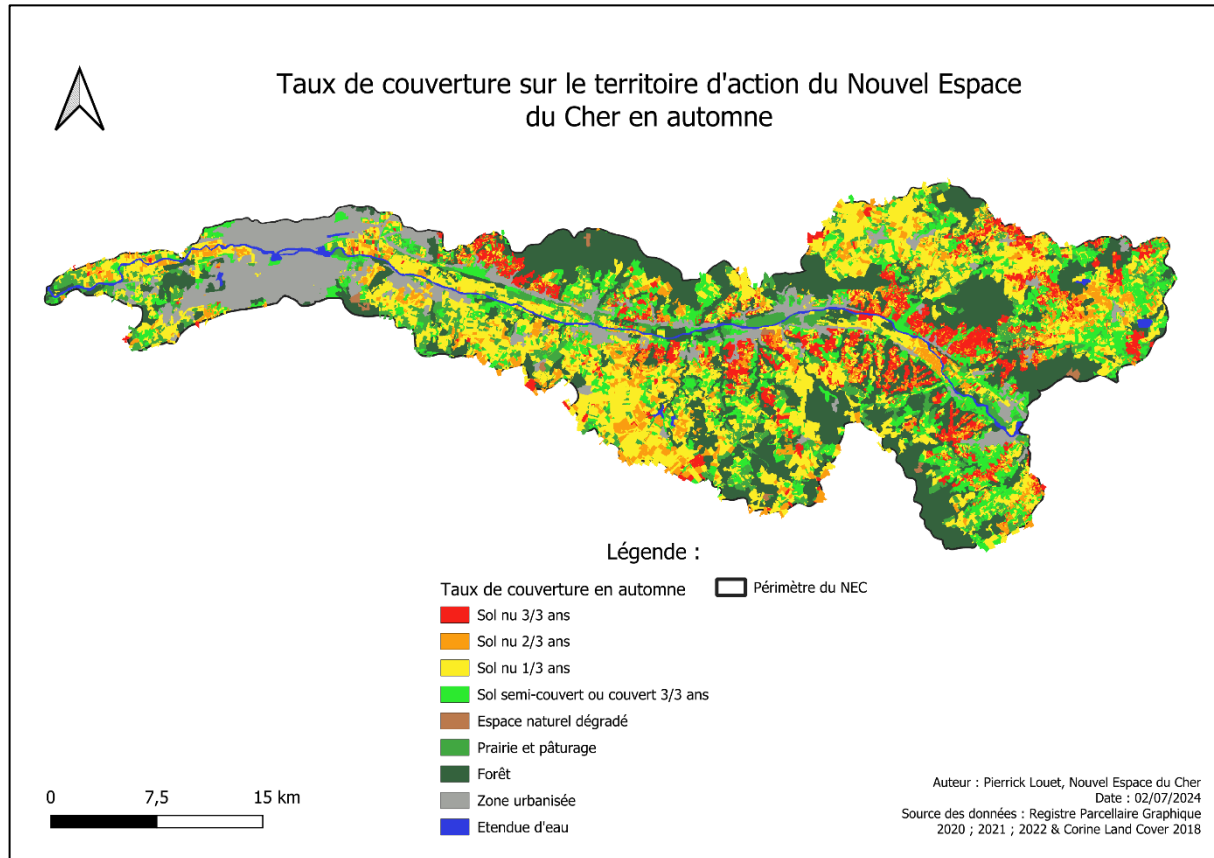
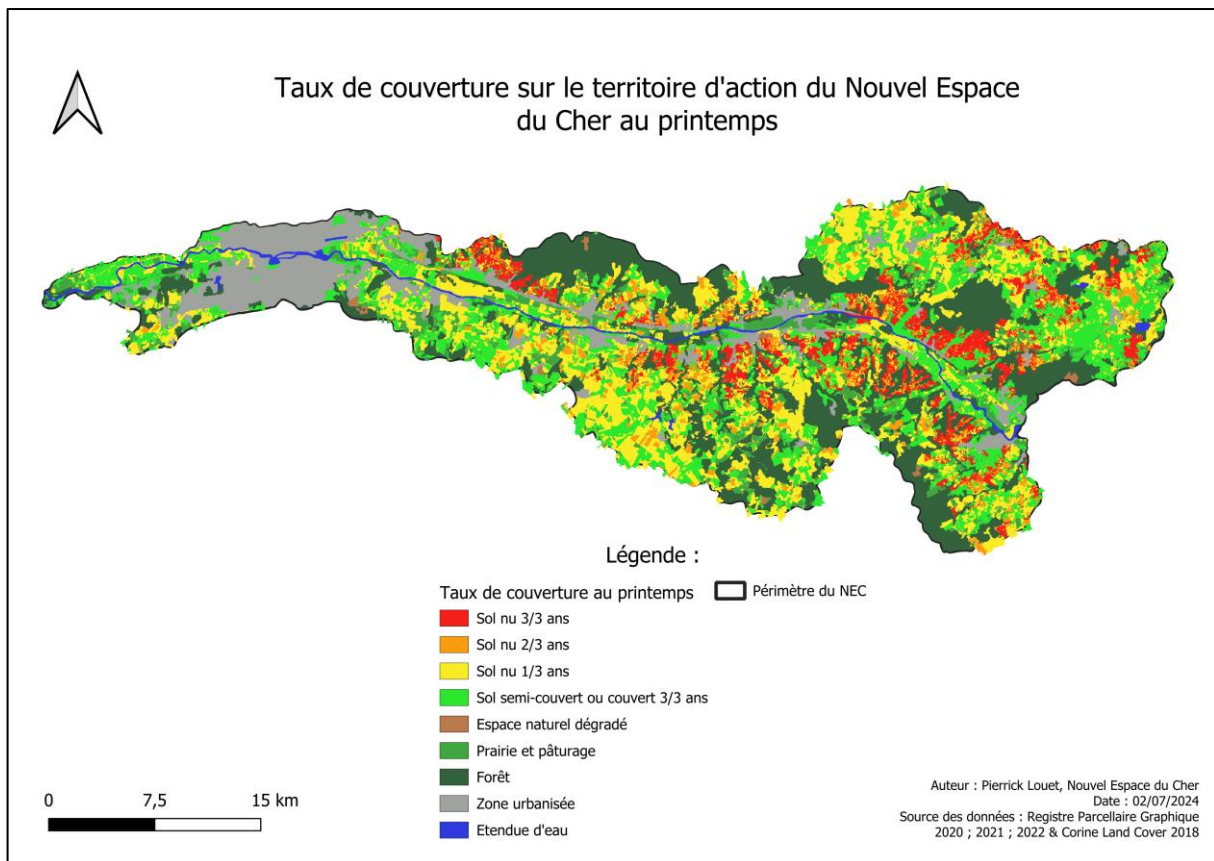
Annexe 1: arbre de décision du modèle MESALES, Degan et.al, 2015 (d'après Le Bissonnais et al., 2002b modifié)

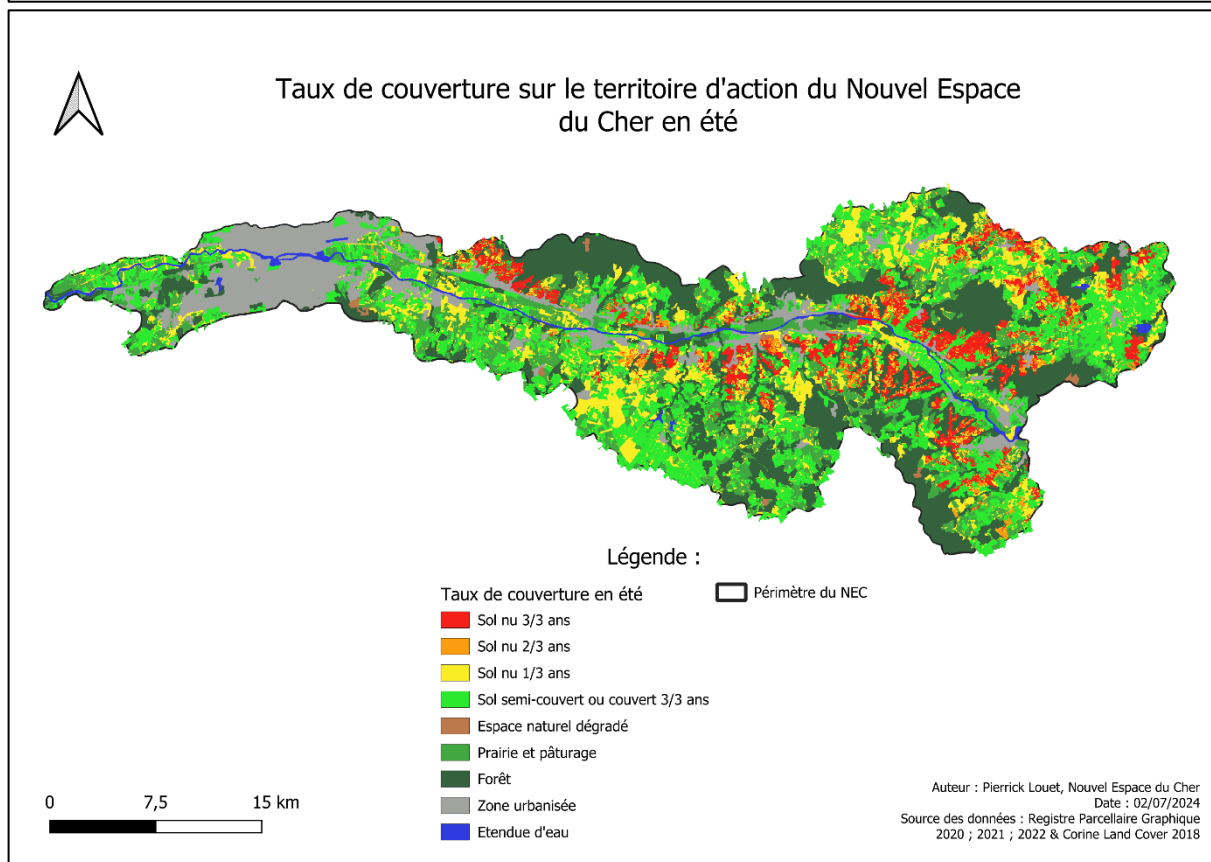
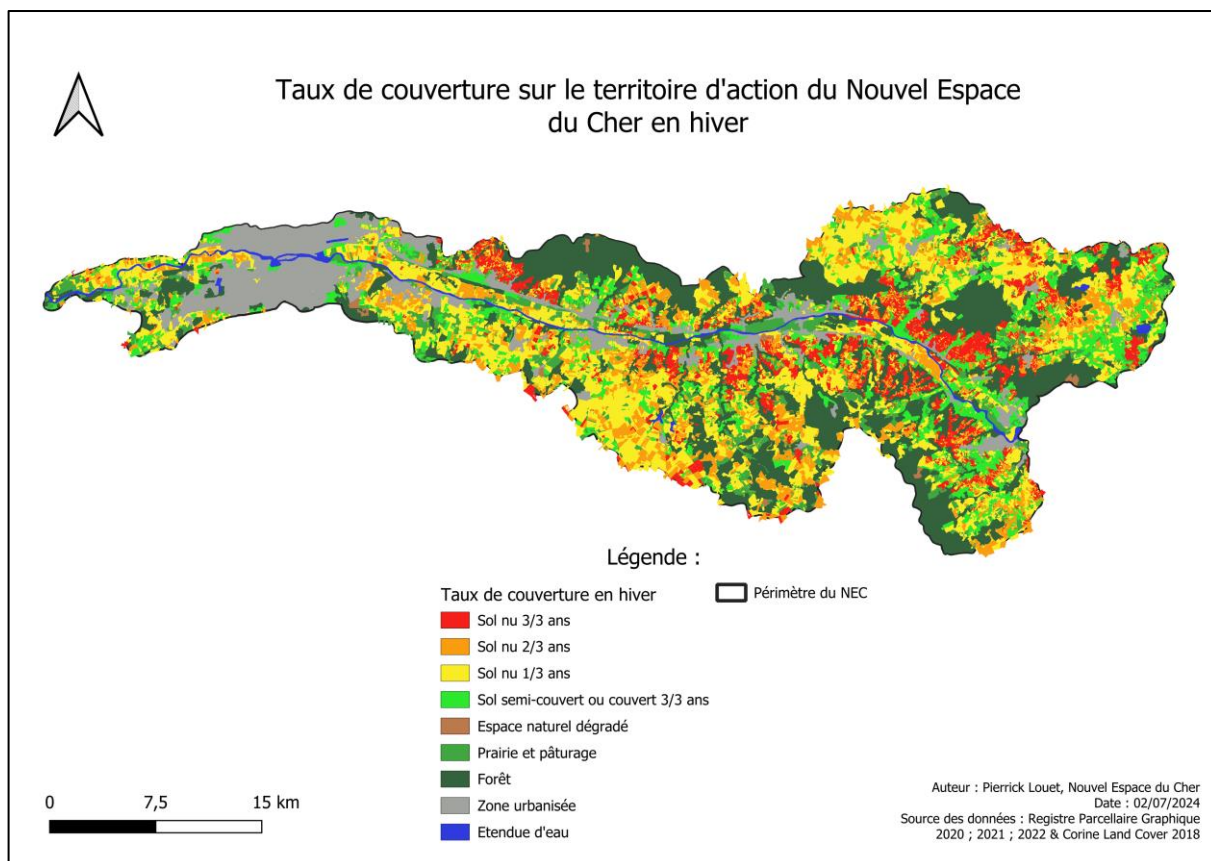


	TAUX DE COUVERTURE DU SOL	BATTANCE ET RUISSELLEMENT	FACTEUR PENTE	ERODIBILITÉ	FACTEUR CLIMATIQUE				
					Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
SOL SEMI-COUVERT ET COUVERT TROIS ANS SUR TROIS <i>classe 5</i>	0	1-2	0-10	1-2	0	0	0	0	0
			10-30	3-4	1	1	1	1	2
			>30	5	1	2	2	3	3
	3-4	5-15	0-5	1-2-3	2	2	3	3	4
			5-15	4-5	2	2	2	3	4
			>15	1-2	2	3	3	4	4
	5	5-15	0-2	3-4	1	1	1	1	2
			2-5	5	1	2	2	2	3
			>15	1-2-3	2	2	2	3	3
ESPACE NATUREL DÉGRADÉ <i>classe 6</i>	0	1-2-3	0-2	4-5	2	2	3	3	4
			2-30	1-2	1	2	2	3	3
			30-75	3-4	2	3	3	4	4
	4-5	15-30	>75	1-2-3	2	3	3	4	4
			0-2	4-5	3	3	4	4	5
			2-15	1-2-3	1	1	1	1	2
PRAIRIE ET PÂTURAGE <i>classe 7</i>	<15	15-30	15-30	4-5	1	1	1	1	1
			>30	1-2-3	1	1	1	1	1
			>30	4-5	1	1	2	2	2
FORÊT <i>classe 8</i>	<15	15-30	>30	1-2	1	1	1	1	1
			>30	3-4	1	1	2	2	3
			>30	5	2	3	3	3	4
ZONE URBANISÉE	11	44	55						
ESPACE OUVERT	44	55							
ÉTENDUE D'EAU ET MARAIS	55								

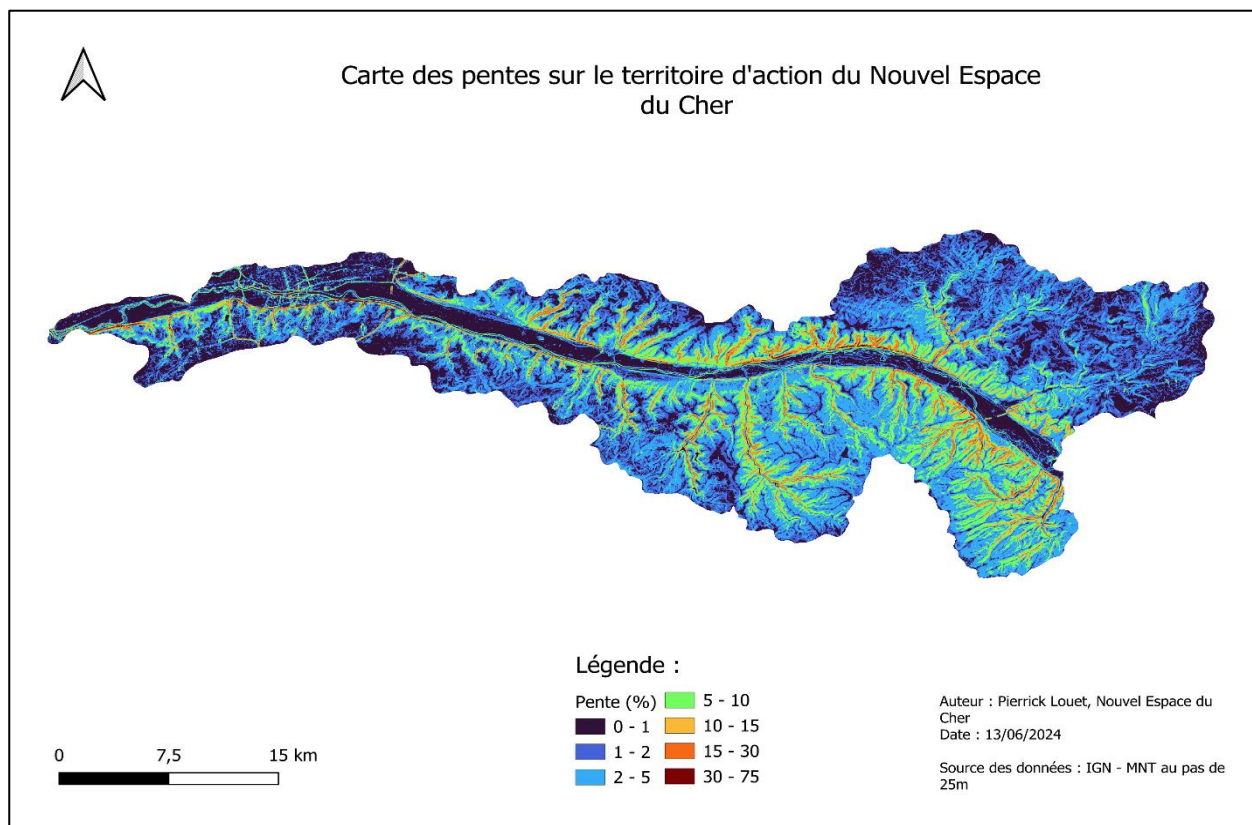
Annexe 2: classification du taux de couverture du sol par saison (Degan et al., 2015)

Cl.	Libellé	hiver	print.	été	aut.
1	Blé tendre : hiver	1	2	3	1
2	Blé tendre : printemps	2	1	3	2
3	Mais grain et ensilage	2	1	3	3
4	Orge : hiver	1	2	3	1
5	Orge : printemps	2	1	3	2
6	Autres Céréales : hiver	2	2	3	1
7	Autres Céréales : printemps	1	1	3	2
8	Colza	1	2	3	1
9	Tournesol	2	1	3	3
10	Soja	2	1	3	3
11	Lin oléagineux	2	2	3	1
12	Pois protéagineux	1	2	2	1
13	Fève, féverole	1	2	3	1
14	Lupin doux	1	2	2	1
15	Plantes à fibres (chanvre)	1	2	3	1
16	Semences				
17	Gel	3	3	3	3
18	Gel industriel	3	3	3	3
19	Autres gels				
21	Légumes secs (haricot)	1	1	2	2
22	Fourrage	7	7	7	7
23	Estives landes	7	7	7	7
24	Prairies permanentes	7	7	7	7
25	Prairies temporaires	7	7	7	7
26	Vergers	1	1	1	1
28	Vignes	1	1	1	1
30	Fruits à coque	1	1	1	1
32	Betterave industrielle	2	1	3	2
33	Tabac	1	2	3	2
34	Légumes-fleurs	3	3	3	3
35	Arboriculture	1	1	1	1





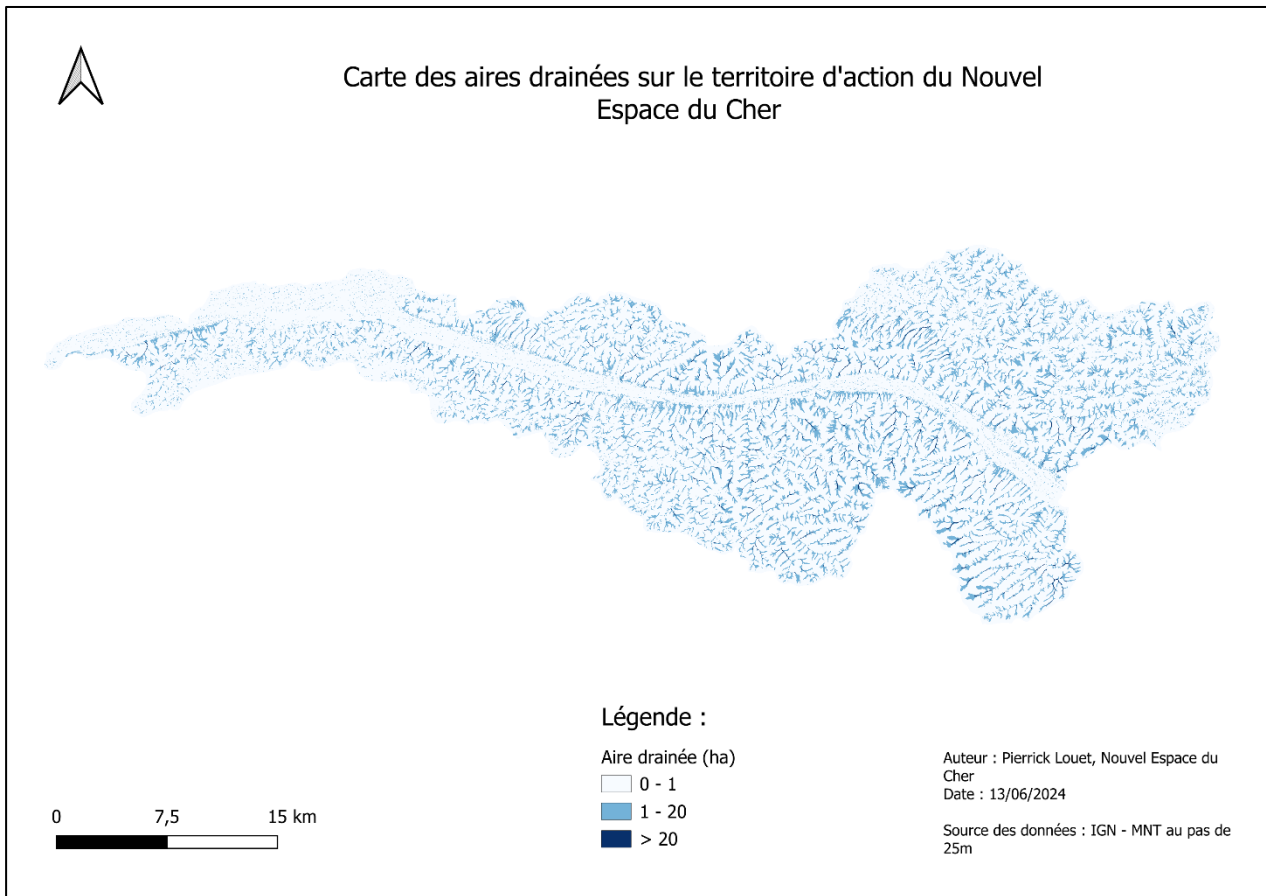
Annexe 5: carte des pentes classifiées du territoire d'action du NEC



Annexe 4: code calculatrice raster Qgis pour la classification des pentes

```
("Pente_périmètre_NEC@1" >= 0 AND "Pente_périmètre_NEC@1" < 1)*0 +
("Pente_périmètre_NEC@1" >= 1 AND "Pente_périmètre_NEC@1" < 2)*1
+("Pente_périmètre_NEC@1" >= 2 AND "Pente_périmètre_NEC@1" < 5)*2 +
("Pente_périmètre_NEC@1" >= 5 AND "Pente_périmètre_NEC@1" < 10)*5 +
("Pente_périmètre_NEC@1" >= 10 AND "Pente_périmètre_NEC@1" < 15)*10 +
("Pente_périmètre_NEC@1" >= 15 AND "Pente_périmètre_NEC@1" <
30)*15+("Pente_périmètre_NEC@1" >= 30 AND "Pente_périmètre_NEC@1" < 75)*30
```

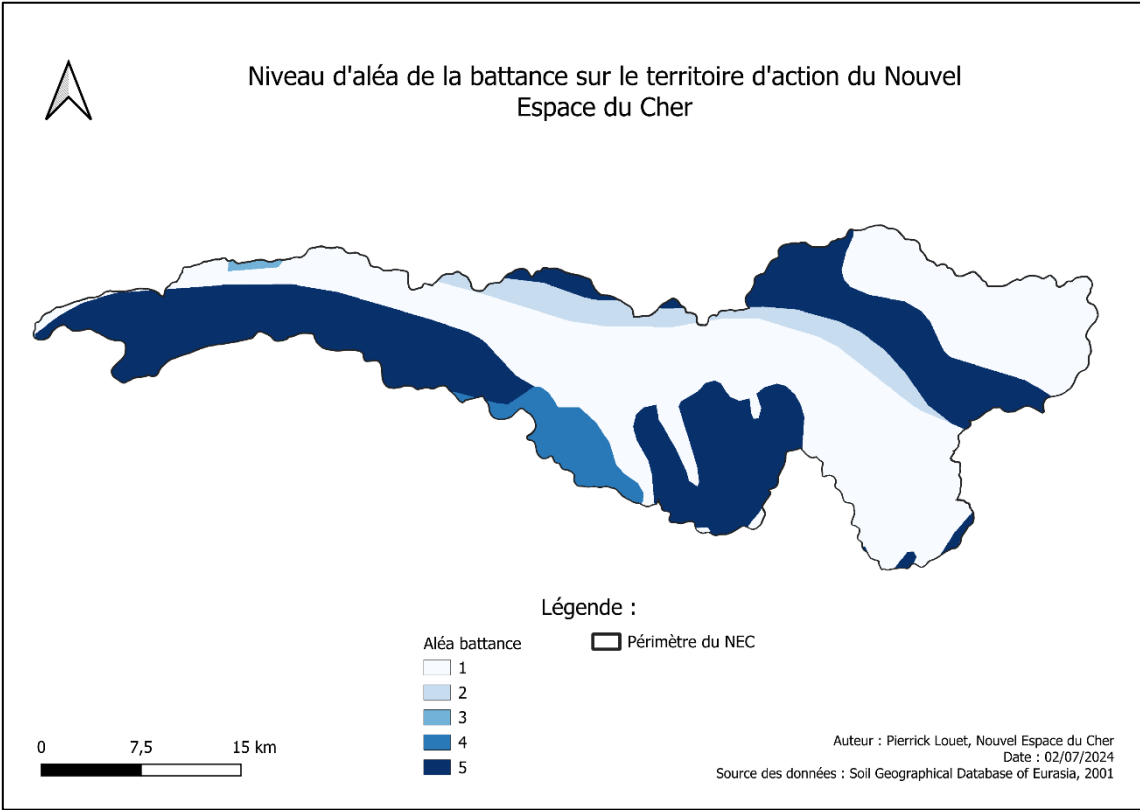
Annexe 6: carte des aires drainées classifiées du territoire d'action du NEC



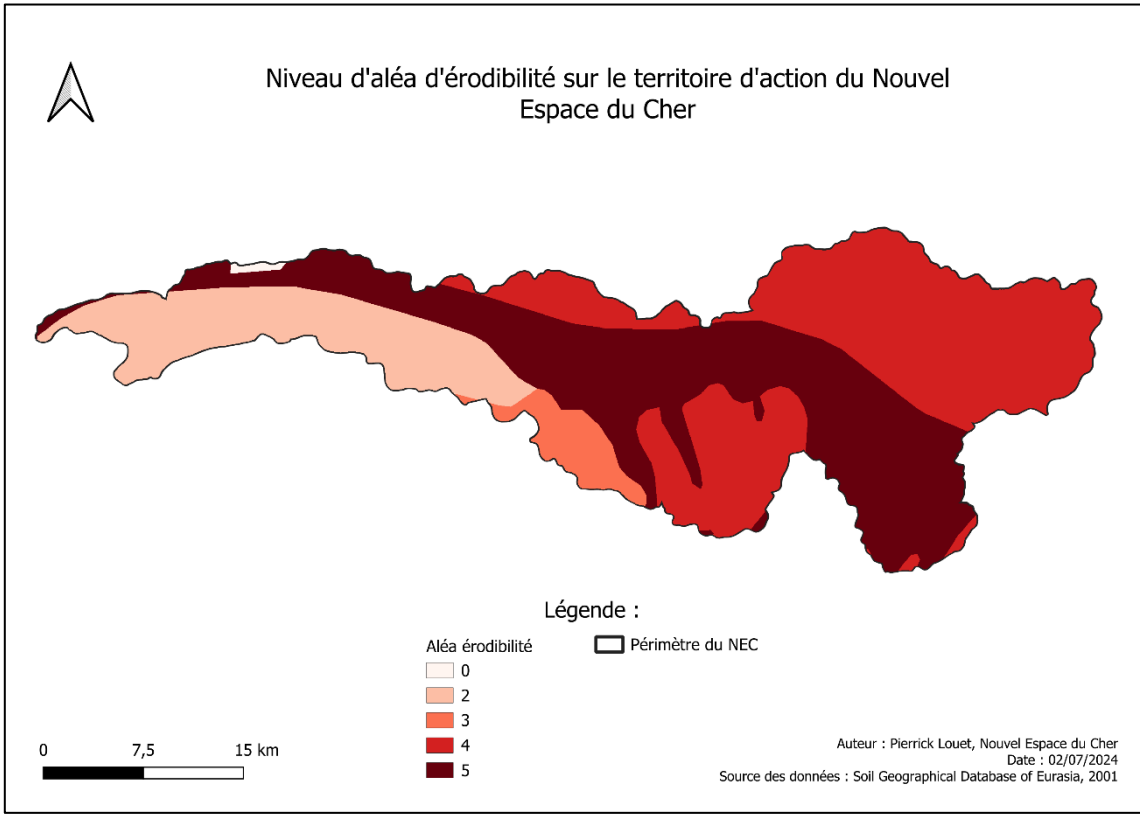
Annexe 7: code calculatrice raster Qgis pour la classification des aires drainées

```
("aire drainee ha@1" <= 1)*1 + ("aire drainee ha@1" > 1 AND "aire drainee ha@1" <= 20)*2 + ("aire drainee ha@1" > 20)*3
```

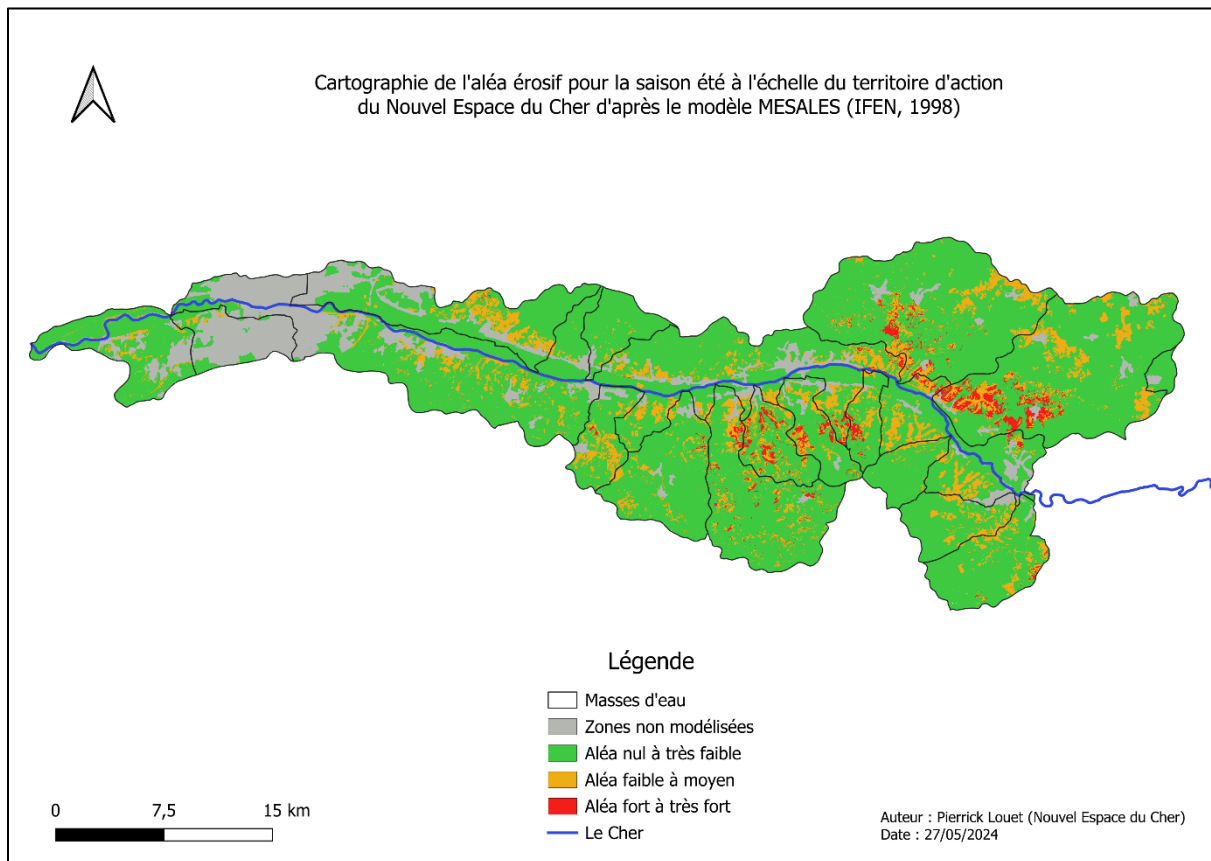
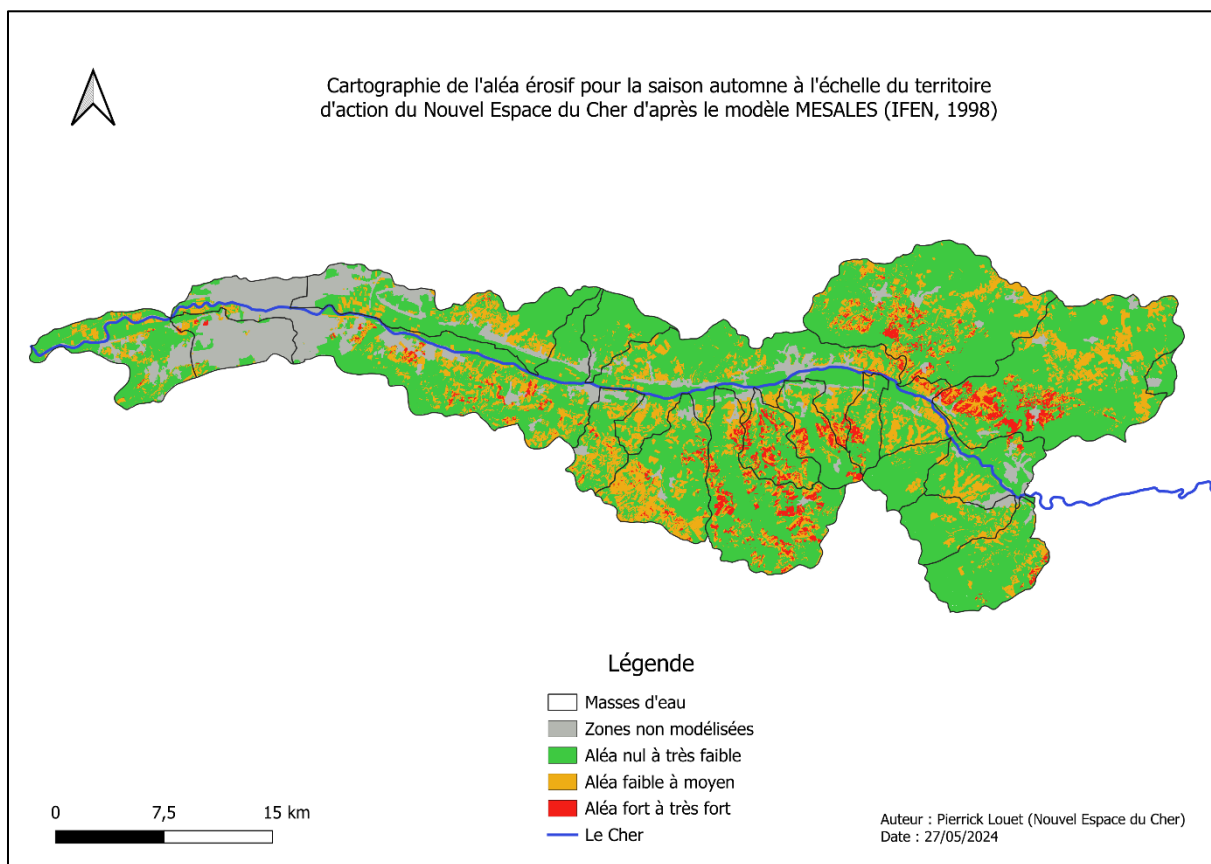
Annexe 9: cartographie de la battance sur le territoire d'action du NEC selon les textures pédologiques de la base de données SGDBE

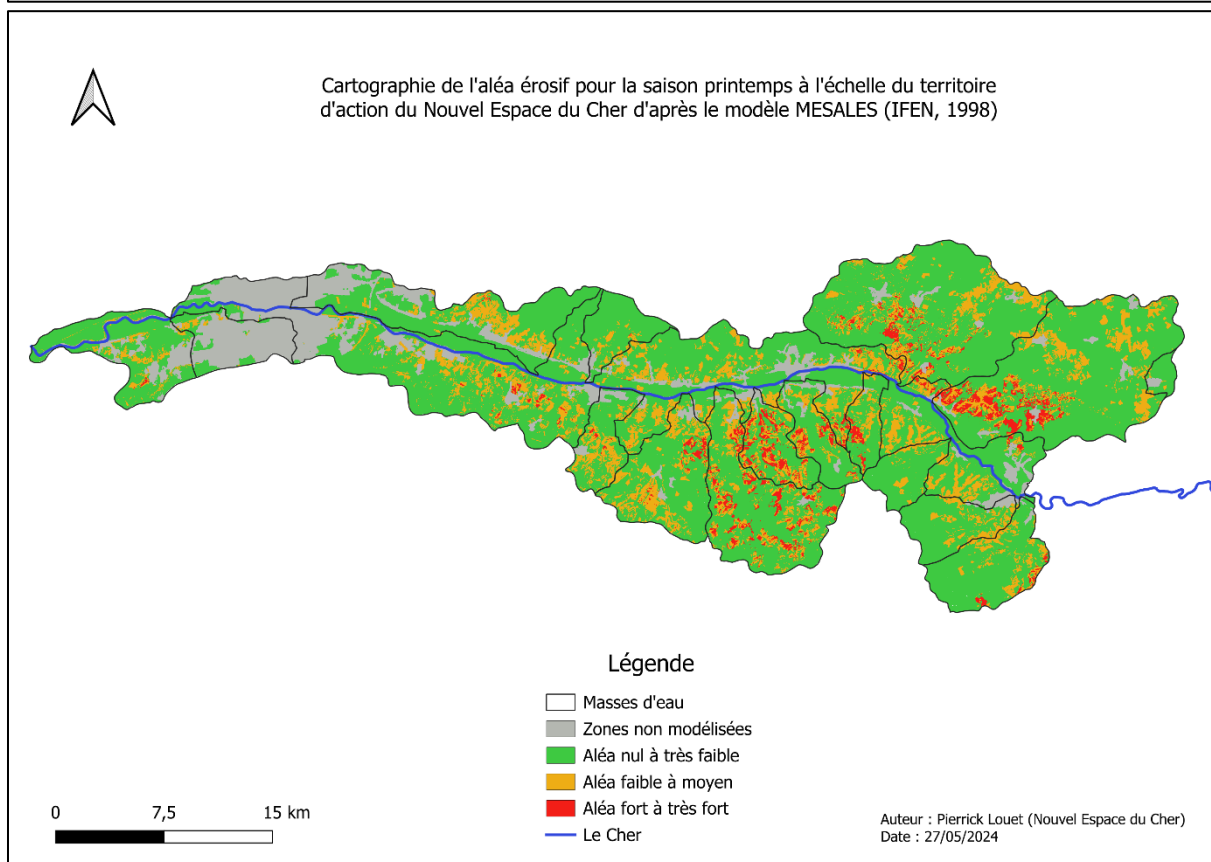
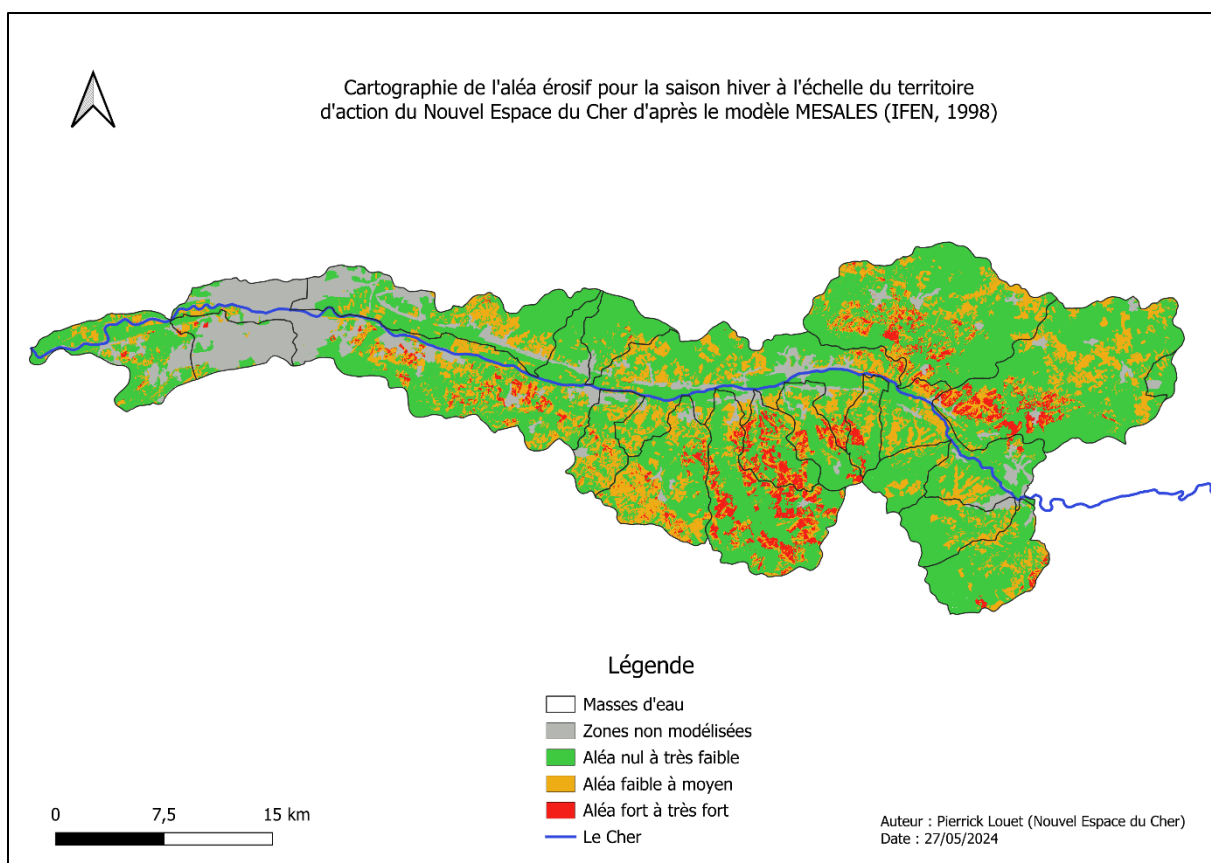


Annexe 8: cartographie de l'érodibilité sur le territoire d'action du NEC selon les textures pédologiques de la base de données SGDBE

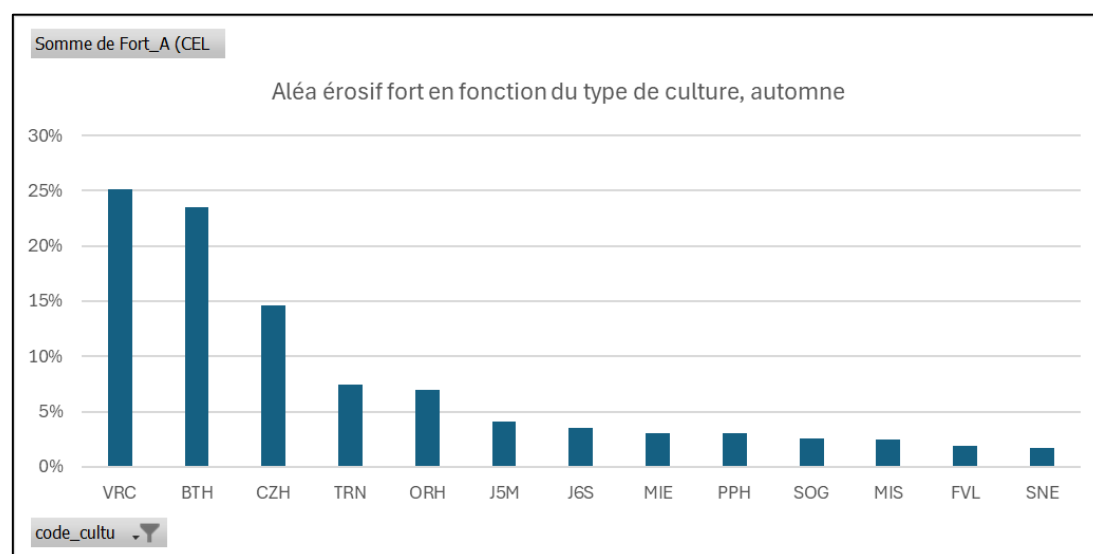
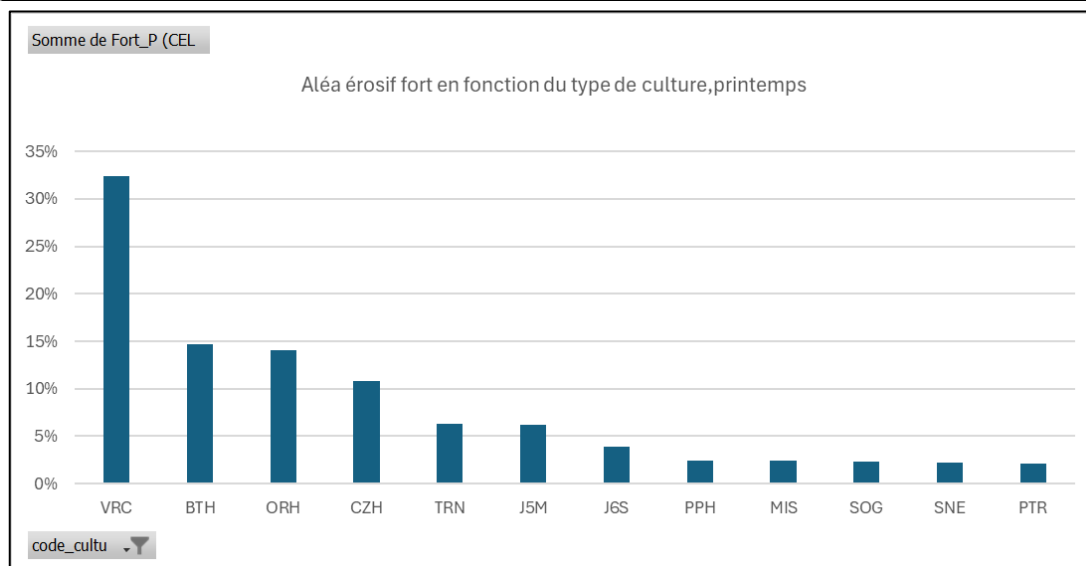
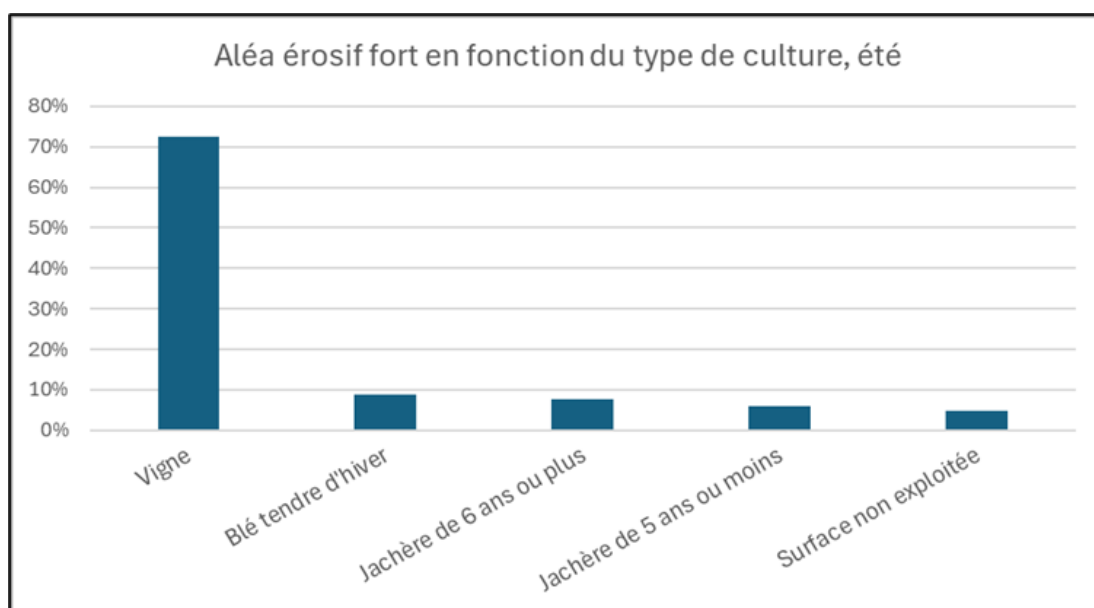


Annexe 10: cartographies de l'aléa érosif pour les quatre saisons à l'échelle du territoire d'action du NEC selon le modèle MESALES

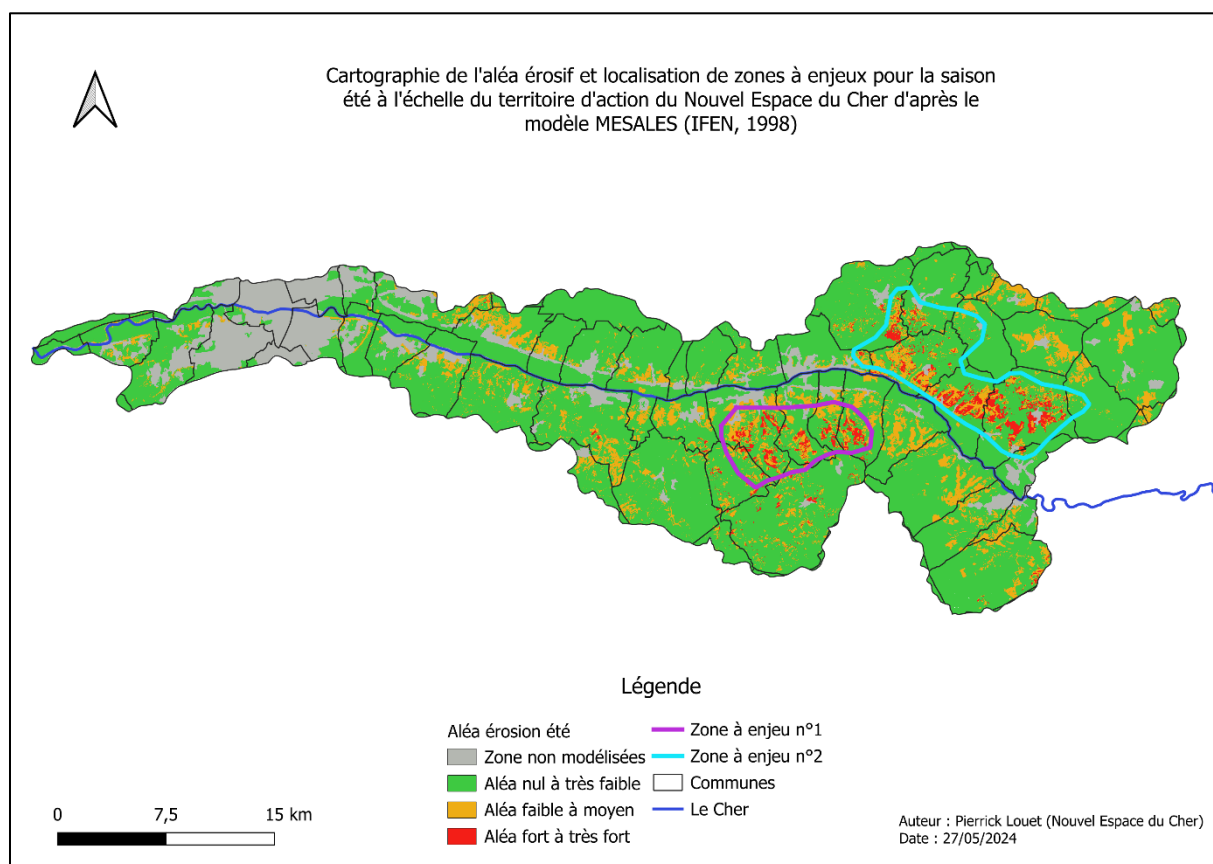




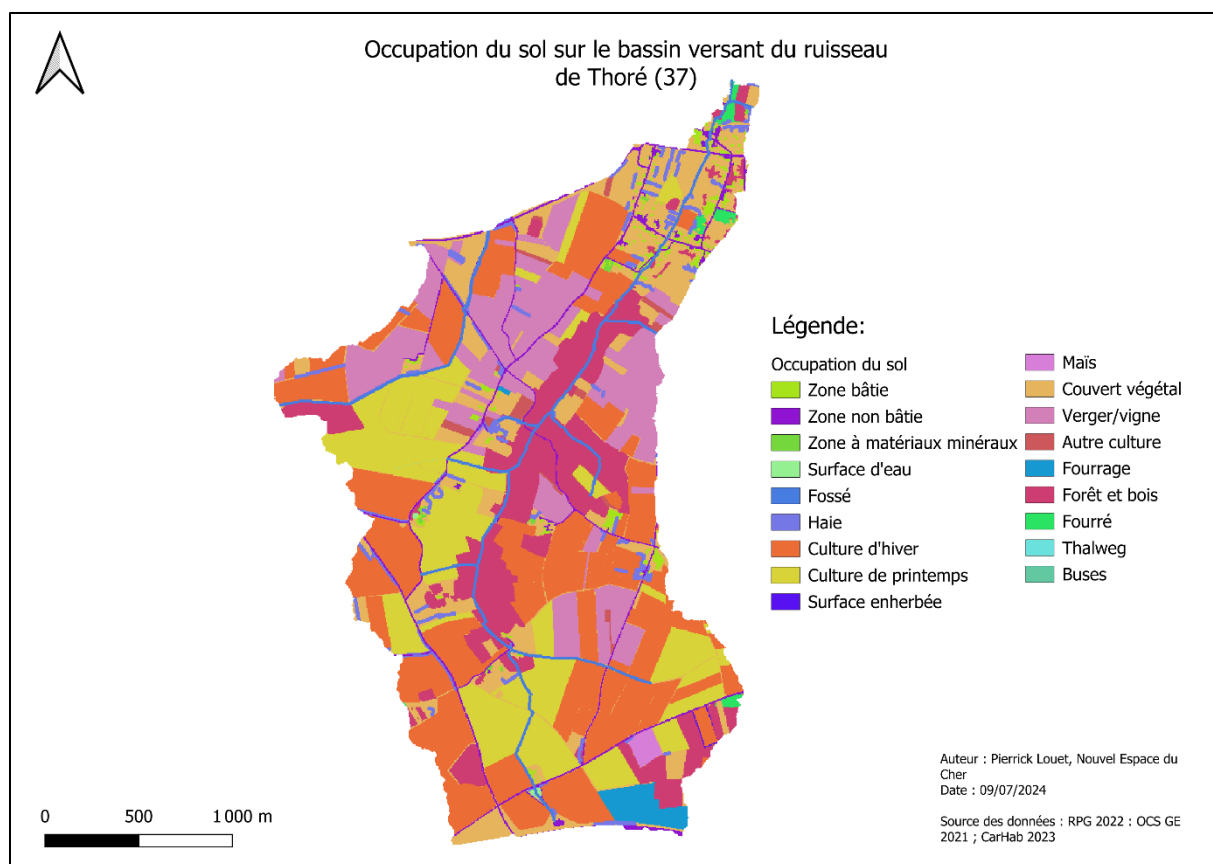
Annexe 11: taux de participation des cultures à un aléa érosif fort à très fort sur le territoire d'action du NEC pour l'été, le printemps et l'automne



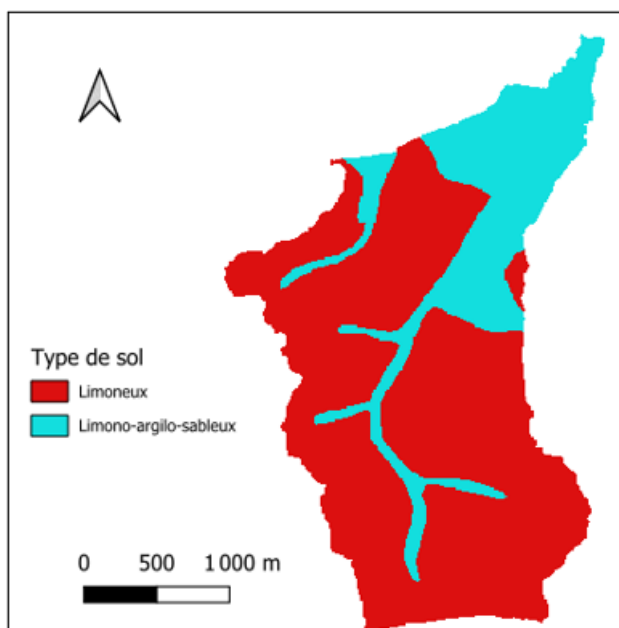
Annexe 12: aléa érosif d'après le modèle MESALES sur le territoire d'action du Nouvel Espace du Cher pour la saison été et localisation des zones à enjeux



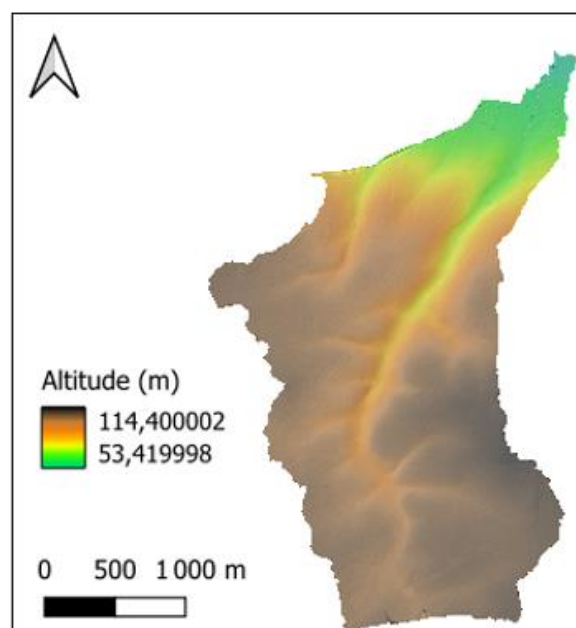
Annexe 13: occupation du sol du bassin versant du ruisseau de Thoré (37)



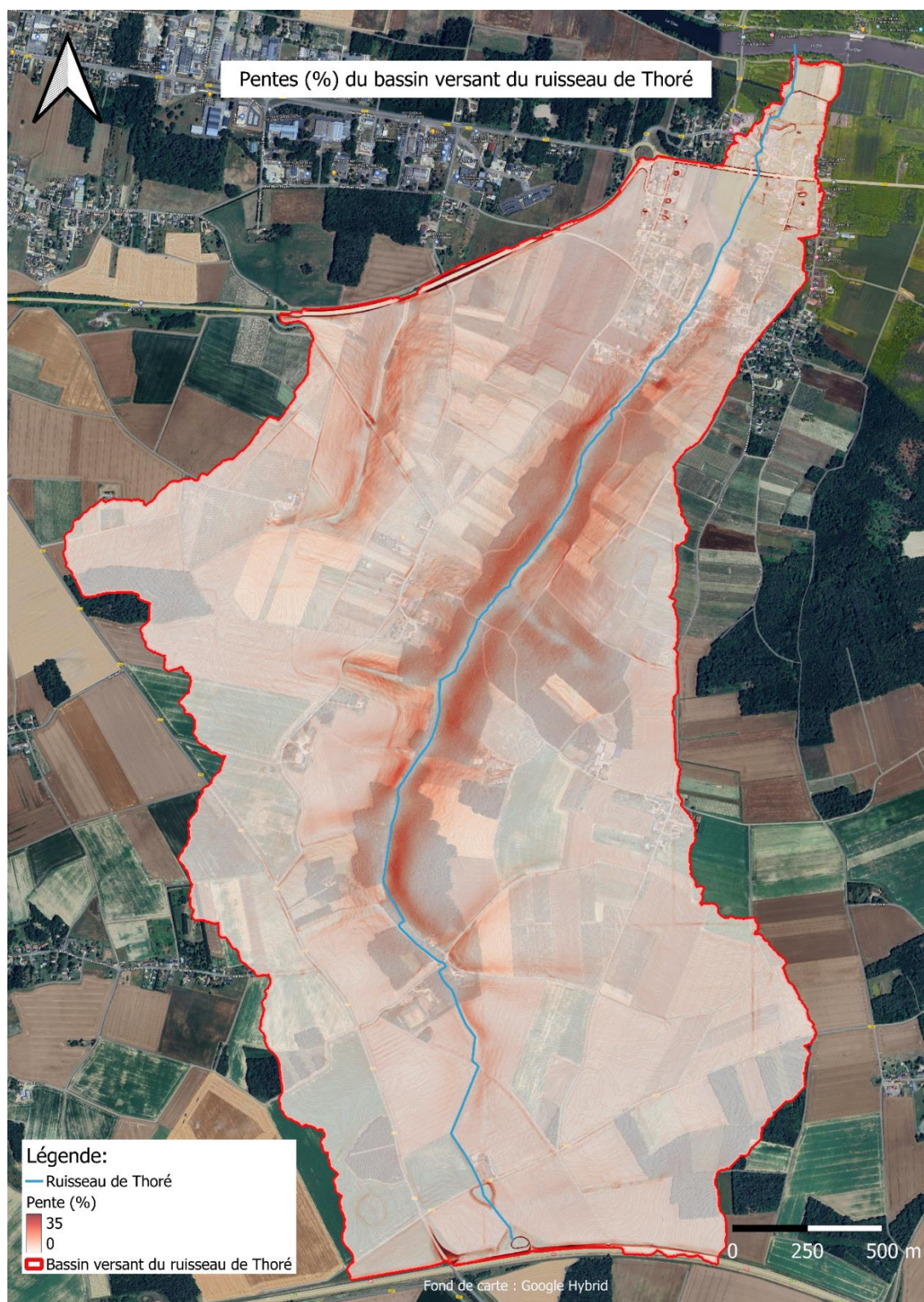
Annexe 15 : textures de sol dominantes sur le bassin versant du ruisseau de Thoré (37)



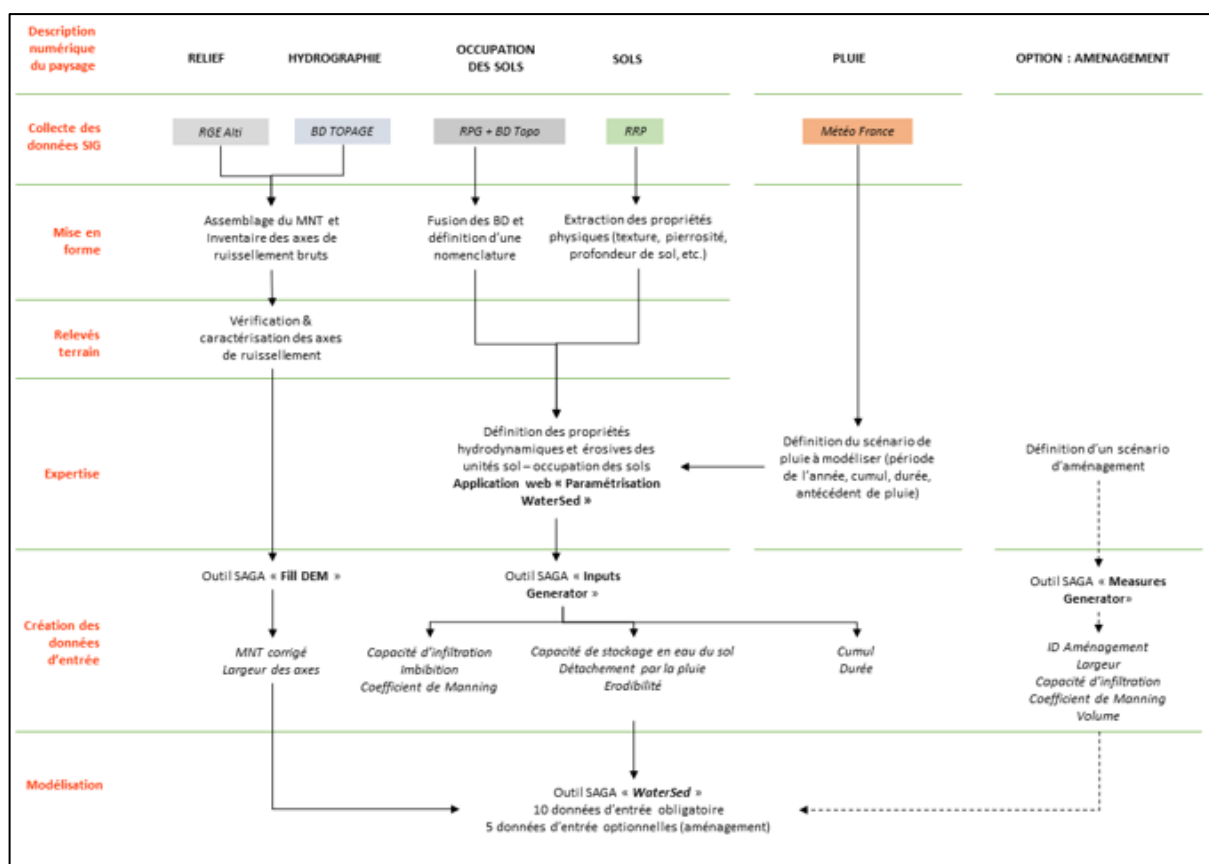
Annexe 14: Modèle Numérique de Terrain du bassin versant du ruisseau de Thoré (37)



Annexe 16: carte des pentes du bassin versant du ruisseau de Thoré



Annexe 17: processus Watersed



Annexe 18: classement du type d'occupation du sol pour le modèle Watersed

DESC_LU	CODE_LU
Zone bâtie	1
Zone non bâtie	2
Zone à matériaux minéraux	3
Zone à autres matériaux composites	4
Sol nu	5
Surface d'eau	6
Fossé	7
Haie	8
Culture hiver	9
Culture printemps	10
Surface enherbée	11
Mais	12
Pomme de terre	13
Betterave	14
Culture de légumes de plein champ	15
Couvert végétal	16
Maraichage	17
Verger / Vigne	18
Autre culture	19
Culture sous serre	20
Fourrage	21
Forêt et bois	22
Fourré	23

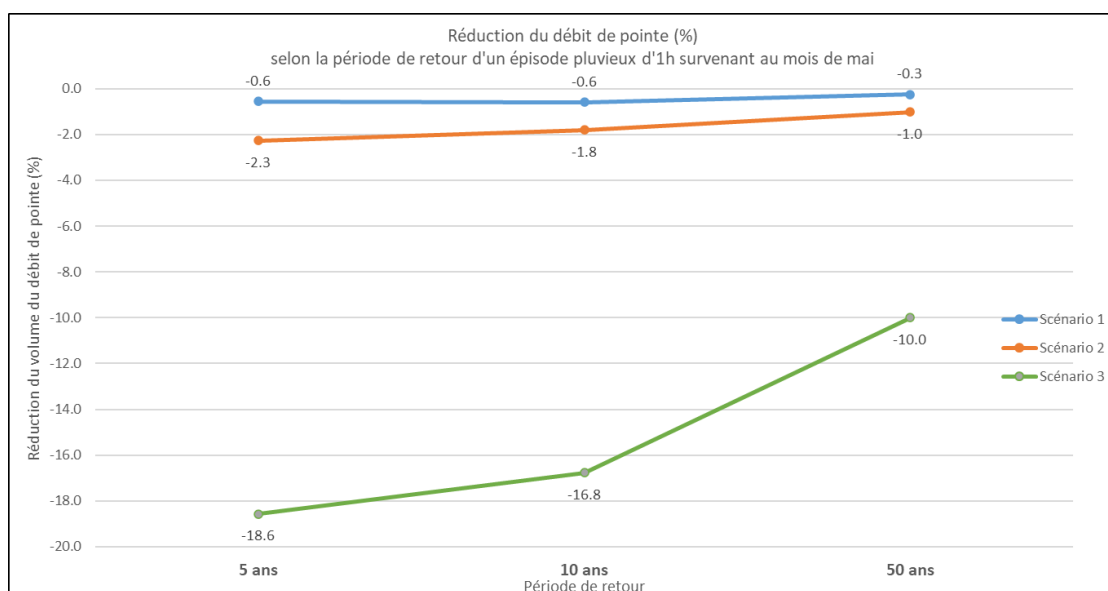
Annexe 19: table des propriétés des cultures du bassin versant du ruisseau de Thoré

CODE_LU	DESC_LU	OPERATION	MOIS	COUVERT	ENCROUT	RUGOSITE_R	RUGOSITE_E	MOIS_C2	MOIS_C3
9	Culture hiver	Semi	Octobre	C1	F0	R2	R2	5	8
9	Culture hiver	Dechaumage + CIPAN	Aout	C1	F0	R3	R3	2	3
10	Culture printemps	Labour	Novembre	C1	F0	R4	R4		
10	Culture printemps	Semi	Mars	C1	F0	R2	R2	2	3
12	Mais	Labour	Novembre	C1	F0	R4	R4		
12	Mais	Semi	Avril	C1	F0	R2	R2	3	4
13	Pomme de terre	Labour	Novembre	C1	F0	R4	R4		
13	Pomme de terre	Semi	Avril	C1	F0	R0	R4	2	3
14	Betterave	Labour	Novembre	C1	F0	R4	R4		
14	Betterave	Semi	Mars	C1	F0	R1	R1	3	4
15	Culture de legumes de plein champ	Labour	Novembre	C1	F0	R4	R4		
15	Culture de legumes de plein champ	Semi	Mai	C1	F0	R1	R1	3	4
16	Couvert vegetal	Semi	Aout	C1	F0	R3	R3	2	3
17	Maraichage	Labour	Novembre	C1	F0	R4	R4		
17	Maraichage	Semi	Fevrier	C1	F0	R1	R1	3	4
21	Fourrage	Semi	Octobre	C1	F0	R2	R2	5	8
21	Fourrage	Dechaumage + CIPAN	Aout	C1	F0	R3	R3	2	3

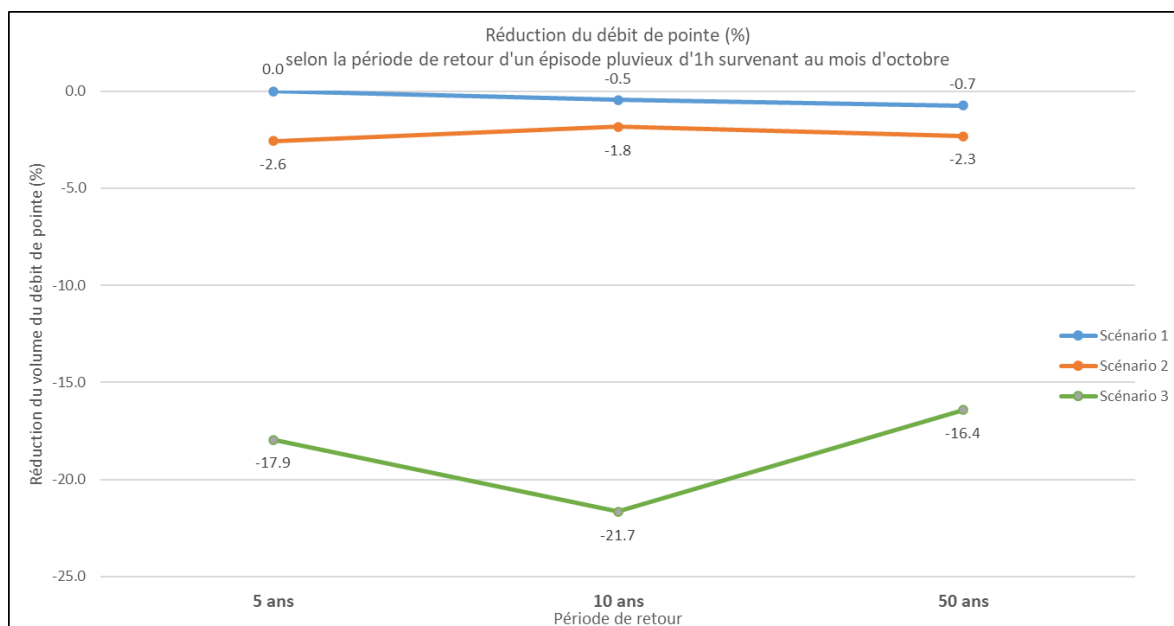
Annexe 21: table des propriétés des types d'occupation du sol n'étant pas qualifiés comme des cultures du bassin versant du ruisseau de Thoré

CODE_LU	DESC_LU	INFILT	MES_INT010	MES_INT1040	MES_INT40	MAN	ERO
1	Zone batie		2 0.05	0.05	0.05	0.02	0
2	Zone non batie		5 0.05	0.1	0.2	0.02	0
3	Zone a materiaux mineraux		10 0.05	0.1	0.15	0.05	0
6	Surface d eau		0 0.05	0.05	0.05	0.04	0
7	Fosse		20 0.05	0.05	0.05	0.08	0
8	Haie		50 0.1	0.2	0.3	0.15	0
11	Surface enherbee		50 0.1	0.2	0.3	0.15	0
18	Verger / Vigne		30 0.2	0.6	1.5	0.1	0.5
19	Autre culture		15 0.5	1.5	3.5	0.08	0.5
20	Culture sous serre		3 0.05	0.05	0.05	0.04	0
22	Foret et bois		60 0.1	0.2	0.3	0.15	0
23	Fourre		60 0.1	0.2	0.3	0.15	0
24	Thalweg		20 0.05	0.05	0.05	0.08	0.5
25	Buse		0 0.05	0.05	0.05	0.03	0

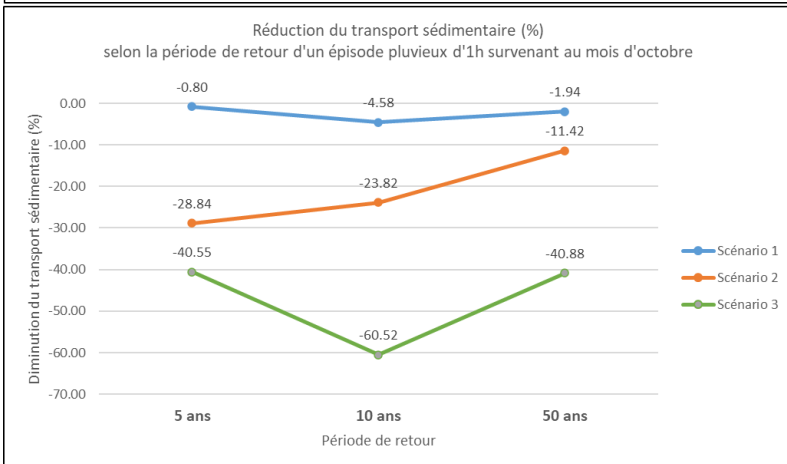
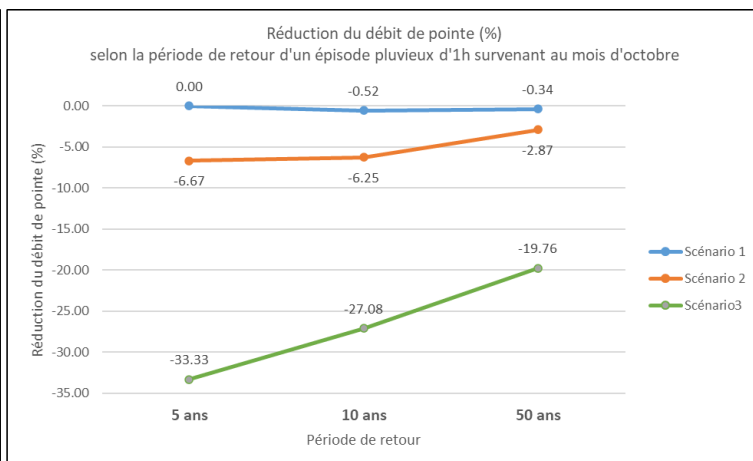
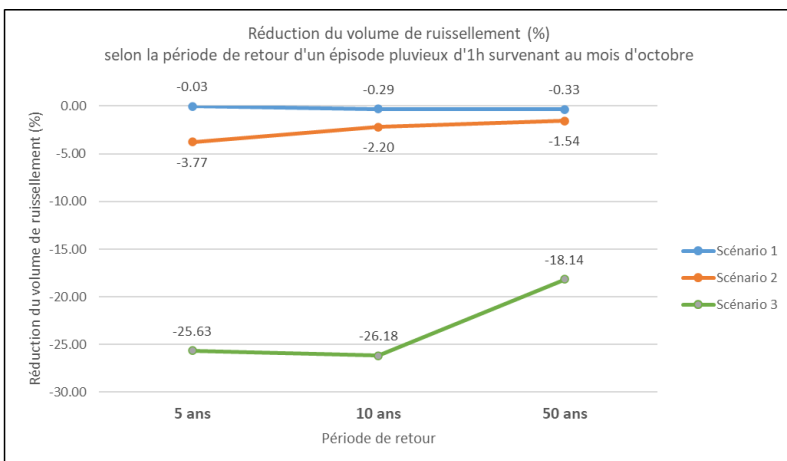
Annexe 20: taux d'abattement du débit de pointe (runoff peak) engendrés par les scénarios d'aménagement pour une pluie d'1 heure survenant au mois de mai



Annexe 22: taux d'abattement du débit de pointe (runoff peak) engendrés par les scénarios d'aménagement pour une pluie d'1 heure survenant au mois d'octobre



Annexe 23: taux d'abattelements à la fosse maurice pour une pluie d'une heure au mois d'octobre





POLYTECH[®]
TOURS

35 ALLÉE FERDINAND DE LESSEPS
37200 TOURS

Pierrick Louet

2023-2024

Déploiement d'outils de modélisation du ruissellement et de l'érosion des sols à l'échelle du territoire d'action du Nouvel Espace du Cher et d'un bassin versant

Résumé :

Les communes situées en aval de bassin versant font de plus en plus face à des crues importantes lors d'épisodes pluvieux intenses, comme peut en témoigner ceux survenus au printemps et à l'été 2016. Ces épisodes intenses sont voués à se multiplier et à s'intensifier sous l'effet du changement climatique, amenant les syndicats de rivières à s'emparer de ces problématiques. L'implantation d'aménagements à l'échelle du bassin versant tel que des haies peut permettre de réduire les volumes de ruissellement et d'érosion des sols et peut s'avérer être une solution moins onéreuse que l'implantation de bassin de rétention d'eau proche des communes à enjeu. Ainsi, ce stage s'est attaché à 1) décrire l'aléa érosif sur l'ensemble du territoire d'action du Nouvel Espace du Cher à l'aide du modèle MESALES et d'extraire des bassins versants à enjeux, 2) de localiser et de quantifier les flux de ruissellement sur un bassin versant à l'aide du modèle Watersed dans le but d'implanter des aménagements le plus en amont possible du bassin versant d'étude, et 3) d'étudier l'impact de ces aménagements.

Mots Clés : modélisation ; érosion ; ruissellement ; aménagements d'hydraulique douce ; cultures ; crues ; occupation du sol ; topographie ; pédologie ; pluviométrie

Nouvel Espace du Cher
39 rue Léon Gambetta, 37150 BLERE



Tuteur entreprise :

Lorraine Poulain-Levieuge

Tuteur académique :

Francesca Di Pietro