



HAL
open science

**Les connectivités hydrologiques en milieu bocager :
étude de l'impact de l'évolution du paysage dans un sous
bassin versant de la Sienne**

Solène Lecrosnier

► **To cite this version:**

Solène Lecrosnier. Les connectivités hydrologiques en milieu bocager : étude de l'impact de l'évolution du paysage dans un sous bassin versant de la Sienne. Géographie. 2021. dumas-03434076

HAL Id: dumas-03434076

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03434076>

Submitted on 18 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les connectivités hydrologiques en milieu bocager : étude de l'impact de l'évolution du paysage dans un sous bassin versant de la Sienne

Sous la direction de Romain Reulier et Daniel Delahaye



2020 – 2021



UNIVERSITÉ
CAEN
NORMANDIE

Remerciements :

Je tiens tout d'abord à remercier les encadrants de ce mémoire, Romain Reulier et Daniel Delahaye, qui ont toujours pris le temps de répondre à mes questions avec beaucoup de bienveillance.

Merci à toutes les personnes qui m'ont accompagnées sur le terrain, sous le soleil ou sous la pluie : Flavie, Estelle, Papa, Anna, Mary, Gwendal et Jean-Eudes.

Merci à ma famille de m'avoir soutenu durant cette année et depuis toujours. Merci tout particulièrement à mes parents, ma sœur Estelle et ma grand-mère Germaine.

Merci à mes copains, qui m'ont soutenu de près ou de loin ou qui m'ont simplement permis de me sentir bien : Flavie, Mary, Anna, Gwendal, Emma, Emma, Lucas, Lorry, Macha, Sophian Anne-Lise, Théo, Charlotte, Lisa et Zélia. Rouffigny c'est très sympa mais, promis, mon prochain site d'étude ce sera les Bahamas.

Merci à Julie, ma camarade de promo sans qui l'année aurait été un peu moins ensoleillée.

Un grand merci à Emma pour les relectures de dernière minute.

Merci à Marie-Paule Bataillé pour l'aide au laboratoire et à Maxime Marie pour les conseils en début d'année.

Merci à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce mémoire dans cette année qui ne fut pas toujours simple.

Résumé :

Ce mémoire a pour but de comprendre l'impact des mutations paysagères sur les connectivités hydrologiques en domaine bocager. Le bassin versant qui sera étudié se situe dans le sud de la Manche, au niveau de la commune de Villedieu-les-Poêles-Rouffigny. Tout comme l'ensemble du département de la Manche, ce bassin versant a connu des mutations paysagères importantes au cours des 60 dernières années, en lien avec le remembrement agricole des années 1970. Les petites prairies ont laissé plus de place aux grandes parcelles cultivées, entraînant un arasement important des haies. Aujourd'hui, ce bassin versant reste bocager mais les changements opérés dans l'organisation du paysage ont profondément bouleversé son fonctionnement hydrologique. Le paysage est support de processus hydrologiques et notamment des écoulements de surface. Dans le but de comprendre le rôle du paysage dans ces différents processus, ce mémoire s'intéressera également aux rôles des rotations culturales sur les connectivités hydrologiques. Le but sera de savoir si celles-ci peuvent entraîner la connexion ou la déconnexion de surfaces au cours d'eau. Des analyses de sédiments seront également réalisées afin de mettre en évidence le rôle des caractéristiques des entités composant le paysage (travail de la parcelle, enherbement et/ou pente des fossés,...) dans les processus hydrologiques et notamment dans les transferts hydro-sédimentaires.

Afin de comprendre l'impact des mutations paysagères sur les connectivités hydrologiques, ce mémoire se basera sur trois années d'étude : 1955, 1992 et 2021. La première étape consistera à présenter l'occupation du sol du bassin versant sur ces trois années par le biais d'un travail de terrain et/ou de photo-interprétation. Le but de l'étape suivante sera de modéliser les connectivités hydrologiques du bassin versant pour les trois années d'étude par le biais du système de modélisation multi-agents LASCAR. Ce modèle nous permettra ainsi de voir l'évolution des surfaces connectées mais également le rôle des différentes entités composant le paysage dans les connectivités hydrologiques. Dans le but de comprendre l'impact des rotations culturales sur les connectivités hydrologiques, les données du Registre Parcellaire Graphique seront utilisées afin d'identifier les rotations culturales du site d'étude sur quatre années consécutives. Ces données seront ensuite remises à l'échelle des parcelles afin de pouvoir modéliser les connectivités hydrologiques du bassin versant en fonction de l'occupation du sol. On pourra ainsi voir si une parcelle se connecte ou se déconnecte du cours d'eau en fonction de la rotation culturale mise en place sur celle-ci. Des prélèvements issus de parcelles connectées au cours d'eau et de fossés seront analysés afin de voir si les connectivités hydrologiques sont toujours synonymes de transferts hydro-sédimentaires. Toutes ces étapes seront ensuite mises en commun dans le but de montrer comment elles peuvent se compléter afin d'offrir une méthode permettant une compréhension globale et durable dans le temps des connectivités hydrologiques d'un bassin versant et des processus qui y sont liés.

Mots clés : mutations paysagères ; connectivités hydrologiques ; modélisations ; LASCAR ; rotations culturales ; transferts hydro-sédimentaires

Sommaire :

Remerciements.....	P1
Résumé.....	P2
Sommaire.....	P3
Introduction générale.....	P4-P6
I. État de l'art.....	P7-P13
II. Le bassin versant de Rouffigny, sous bassin versant de la Sienne : présentation.....	P14-P36
III. L'évolution des connectivités hydrologiques dans un bassin versant bocager au cours de trois années d'étude : méthodologie mise en place.....	P37-P49
IV. Un bassin versant bocager impacté par le remembrement agricole : présentation de l'occupation du sol en 1955, 1992 et 2021.....	P50-P58
V. L'évolution des connectivités hydrologiques dans le bassin versant de Rouffigny : impact de la structure paysagère.....	P59-P76
VI. Mise en place de deux études complémentaires à la modélisation sous LASCAR : étude des rotations culturales et des sédiments transportés sur le bassin versant.....	P77-P88
VII. Mise en évidence de l'impact des évolutions paysagères annuelles sur les connectivités hydrologiques et du rôle des entités du paysage dans les transferts hydro-sédimentaires...	P89-P102
Conclusion générale.....	P103-P104
Bibliographie.....	P105-P107
Table des figures.....	P108-P112
Table des matières.....	P113-P117

Introduction générale:

Contexte de recherche :

Connue pour sa production laitière et ses produits transformés dans le monde entier, la Normandie fait office de référence dans l'élevage laitier. Derrière la Bretagne, qui est aujourd'hui la première région de production laitière en France, la Normandie reste une région agricole importante. Les types d'agriculture pratiqués diffèrent d'un département à un autre et génèrent des paysages variés : des espaces d'open-field dans la plaine de Caen aux territoires de bocage dans la Manche. Le département de la Manche est partagé entre une agriculture d'élevage dans les terres de bocage et une agriculture littorale. Ce bocage est particulièrement présent dans le sud de la Manche où l'élevage laitier domine largement les pratiques agricoles. Selon le dictionnaire Larousse le bocage se définit de la manière suivante : « *Assemblage de parcelles (champs ou prairies), de formes irrégulières et de dimensions inégales, limitées et closes par des haies vives bordant des chemins creux.* » Le bocage évoque souvent une image de paysages verdoyants, sauvages, où la faune et la flore s'épanouissent un peu plus librement que dans d'autres espaces agricoles. La Normandie représente plus que tout autre région ces espaces de bocage : des vaches qui broutent dans une petite prairie verdoyante remplie de pommiers. Une image de carte postale qui ne reflète pas la diversité des paysages agricoles normands et leurs évolutions au cours des années. Le bocage reste en effet une construction humaine qui évolue et mute au grès des évolutions économiques, sociales ou encore technologiques. La mécanisation de l'agriculture au cours des années 60/70 va entraîner de nombreuses modifications dans l'organisation de ces paysages à travers l'agrandissement des parcelles et donc l'abattage de haies, c'est ce que l'on appelle le remembrement agricole.

Dans ce type de paysage bocager, tourné vers l'élevage laitier notamment, le paysage évolue également de manière annuelle. Les rotations culturales pratiquées par les agriculteurs changent constamment l'occupation du sol des parcelles. Les entités composant le paysage jouent toutes un rôle dans ces processus de ruissellement et de transferts hydro-sédimentaires. Les parcelles cultivées, les prairies, les fossés, les haies, peuvent jouer différents rôles d'initiation, d'interception ou de concentration du ruissellement en fonction de leurs caractéristiques. Les caractéristiques de chacune de ces entités du paysage ayant un rôle dans les connectivités hydrologiques d'un bassin versant sont également des éléments à prendre en compte dans l'étude du rôle du paysage dans ces processus.

Ce paysage en constante évolution est le support de processus hydrologiques divers comme le ruissellement ou encore les transferts hydro-sédimentaires. Selon le glossaire international d'hydrologie, le ruissellement de surface définit l'écoulement diffus de l'eau sur le sol avant d'atteindre un cours d'eau. Les surfaces connectées au cours d'eau par le biais de ce phénomène de ruissellement sont alors considérées comme hydrologiquement connectées. Ce ruissellement est susceptible de transporter des sédiments, notamment en milieu agricole,

jusqu'aux cours d'eau, on parle alors de transferts hydro-sédimentaires. Les transferts hydro-sédimentaires peuvent avoir de nombreux impacts à la fois sur la biodiversité mais également sur les activités humaines. La ressource en eau peut se retrouver altérée par une présence accrue des matières en suspension chargées en intrants agricoles polluants. Il y a donc les problèmes causés par les sédiments en eux-même (comblement des frayères, envasement ou crue turbide à l'exutoire,...) et les problèmes causés par ce que peuvent potentiellement transporter les eaux et les sédiments à savoir les intrants agricoles (pollution de la ressource en eau, danger pour la biodiversité, augmentation des nitrates...). Au delà de l'influence que ces processus ont sur les cours d'eau, les parcelles sont également impactées car elles peuvent perdre de la terre ou encore des éléments fertilisants. Les versants peuvent être incisés par des ruissellements importants et récurrents. Enfin à l'exutoire des bassins versants, il est possible d'observer des inondations ou encore des phénomènes d'envasement des estuaires. Si ces processus sont plus visibles en domaine d'open-field, ils sont également présents dans les domaines bocagers. L'organisation du paysage complexifie cependant grandement cette étude dans le sens où il est nécessaire de prendre en compte tous les éléments paysagers pouvant avoir un impact sur les transports de sédiments. La présence de haies ou encore de fossés reliés tel un réseau de drainage doit nécessairement être étudiée.

Le bassin versant étudié dans ce travail de recherche se situe en majorité sur la nouvelle commune de Villedieu-les-Poêles-Rouffigny, dans le sud de la Manche. Ce site d'étude fait partie du bassin versant de la Sienne, un cours d'eau qui traverse la Manche et le Calvados et qui se jette dans le havre de Regnéville-sur-Mer. Plusieurs caractéristiques qu'elles soient, hydrologiques, paysagères, géologiques ou encore climatiques rendent ce site sensible aux phénomènes de ruissellement et donc de transferts hydro-sédimentaires. Au-delà de cela, malgré une domination sans appel du paysage bocager, le site a évolué au grès des travaux mis en place par les agriculteurs.

Chaque bassin versant, et notamment les bassins versants bocagers, fonctionne dans un système unique. Au delà de la simple présence de parcelles initiatrices de ruissellement, c'est bien l'organisation des éléments qui constituent le paysage qui va avoir des conséquences sur le système hydrologique global.

Objectifs de recherche :

Le bassin-versant étudié est situé dans une zone qui n'a été que très peu étudiée. Le cours d'eau de la Sienne et son bassin versant n'ont pas fait l'objet d'études approfondies. Le but de ce mémoire sera de comprendre en quoi l'évolution du paysage impacte les connectivités hydrologiques à travers la mise en place d'une modélisation multi-agents sur plusieurs années d'étude. Le paysage bocager a beaucoup évolué aux cours des 80 dernières années, l'intérêt est donc d'évaluer l'impact de ces évolutions sur les surfaces connectées au cours d'eau. Le but de cette étude sera également d'apporter des éléments complémentaires à la modélisation à travers

l'étude de phénomènes à grande échelle pouvant modifier les connectivités hydrologiques du site (caractéristiques des parcelles initiatrices, enherbement et pente des fossés, positionnement des entrées de champ,...). Cette dernière étude sera à la fois une remise en perspective des données obtenues grâce à la modélisation mais également un complément à l'étude réalisée.

En résumé, le travail de recherche présenté, tentera de répondre aux questions suivantes :

⇒ Quelles sont les connectivités hydrologiques actuelles du site d'étude ?

⇒ En quoi les mutations paysagères des ces 70 dernières années ont-elles impacté les connectivités hydrologiques ?

⇒ Les mutations paysagères annuelles à travers les rotations culturales, ont-elles un impact sur les connectivités hydrologiques ?

⇒ Les caractéristiques d'un site à très grande échelle peuvent-elles jouer un rôle dans les processus de transferts hydro-sédimentaires ?

Structuration du travail de recherche :

Sept parties seront présentées dans ce mémoire afin de répondre aux questions préalablement citées. La première partie sera consacrée à l'état de l'art en lien avec les transferts hydro-sédimentaires et les études diachroniques du paysage. Cet état de l'art présentera également les travaux réalisés sur les rotations culturales du sud Manche. Le site d'étude sera présenté dans la deuxième partie. La troisième partie présentera la méthodologie mise en place dans le but d'obtenir les connectivités hydrologiques du site en 2021, 1992 et 1955, en fonction de l'évolution du paysage. La quatrième partie présentera l'évolution de l'occupation du sol sur ces trois années tandis que la cinquième partie présentera le lien entre l'évolution des connectivités hydrologiques et celle du paysage pour les trois années d'étude. La méthodologie mise en place dans le but de montrer l'impact des mutations annuelles du paysage et des entités à grande échelle, à travers l'étude des rotations culturales et des sédiments transportés, sera exposée dans la sixième partie. Enfin, les résultats de l'étude des rotations culturales et des transports de sédiments sur le bassin versant feront office de septième et dernière partie.

I. État de l'art

1.1. Ruissellement, érosion hydrique et transferts hydro-sédimentaires : définitions

Cette première sous-partie a pour but de définir les termes rencontrés au fil des ouvrages étudiés, afin de faire la différence entre ces différents processus.

Il existe deux types de ruissellement: le ruissellement par refus d'infiltration d'un sol non saturé et le refus d'infiltration d'un sol saturé [Cosandey, Robinson, 2012]. Le premier type de ruissellement, également appelé écoulement hortonien, se produit lorsque l'intensité des pluies dépasse la vitesse d'infiltration des sols. Ce type de ruissellement est non seulement dépendant des conditions climatiques mais également géologiques et pédologiques (sous sol imperméable ou non, état de « tassement » du sol,...). Dans le second cas on parle d'aires contributives saturées, en clair l'eau s'infiltré en profondeur et elle gagne en épaisseur au fur et à mesure qu'elle se rapproche de la surface du sol. Dans le cas du ruissellement hortonien, le processus se met en place lorsque le sol refuse d'infiltrer l'eau de pluie. Ce refus peut être expliqué par plusieurs facteurs qu'ils soient climatiques, pédologiques, morphologiques, etc... Quand on parle de ruissellement on parle également de la mise en mouvement de l'eau qui ne s'est pas infiltrée dans le sol [Le Gouée, 2004]. Ce ruissellement peut alors être diffus ou concentré en fonction de la topographie, de l'occupation du sol ou encore du sens du travail du sol. Le ruissellement concentré peut entraîné l'incision des sols sous la forme de rigoles, de ravines et de ravins (le nom varie en fonction de la profondeur de ces incisions). Le ruissellement est indispensable au phénomène d'érosion hydrique mais il n'est pas nécessairement facteur d'érosion, l'énergie cinétique, la vitesse de l'eau et la concentration sont des facteurs déterminants.

On sait aujourd'hui que l'état de la réserve en eau dans l'ex Basse-Normandie s'est dégradé notamment à cause de l'élévation de la pression agricole depuis une quarantaine d'années [Le Gouée, 2004]. En 1991, par le biais de la Directive Nitrates, le tiers du département de la Manche était recensé comme zone vulnérable concernant la pollution de ses ressources en eau par des polluants d'origine agricole. On sait que l'augmentation des parcelles cultivées augmente les processus de ruissellement et d'érosion des sols [Le Gouée, 2004 ; Mérot, et al, 1999]. L'érosion hydrique dépend de facteurs naturels mais également anthropiques, à savoir : les précipitations, le relief, le sol et l'utilisation agricole du sol [Le Gouée, 2004]. Elle se définit par trois étapes successives : mobilisation, transfert et dépôt [Reulier, 2015]. Les pluies sont à l'origine de l'érosivité pluviale, c'est à dire la capacité des précipitations à fragiliser le sol. Le relief va lui définir la capacité érosive d'un ruissellement et l'orientation de ce ruissellement. Les sols sont plus ou moins sensibles à l'érosion hydrique, on parle alors d'érodibilité des sols. Suivant l'occupation du sol, les parcelles sont plus ou moins susceptibles d'être soumises à ces processus d'érosion hydrique, une parcelle destinée à la culture du maïs, à nu, est en effet beaucoup plus propice à ce genre de phénomène qu'une prairie enherbée. Selon la synthèse sur l'état des sols de France du GISOL de 2011, l'érosion des sols, issue de l'érosion hydrique, représente une inquiétude majeure quant à la

perte en sol qui peut se révéler irréversible, les pertes en sol sont majoritairement supérieures aux volumes de sol formés par l'altération naturelle des roches [GISOL, 2011]. Toujours selon ce rapport, l'érosion des sols affecterait principalement les sols agricoles limoneux des grands Bassins parisiens et aquitains, ainsi que certaines situations de piémont et certains secteurs méditerranéens. L'inquiétude autour de ces questions d'érosion hydrique est également exacerbée par les potentielles conséquences du réchauffement climatique sur les précipitations qui se feraient plus rares mais plus intenses.

Les transferts hydro-sédimentaires définissent eux les transferts de sédiments issus de parcelles agricoles jusqu'aux cours d'eau. L'érosion hydrique est donc indispensable à la mise en place de ces transferts, celle-ci peut en effet seulement déplacer les particules, en fonction des obstacles au ruissellement de surface présents sur le site. Lorsque les particules arrachées aux parcelles agricoles arrivent jusqu'aux cours d'eau, on parle de matières en suspension (MES) dans le cours d'eau. Les nitrates permettent de facilement quantifier la pollution des eaux, cela est plus compliqué pour les MES car il n'est pas toujours simple de savoir si ces MES sont issues de l'érosion des parcelles ou des berges [Le Gouée, 2004]. Pour le savoir, il faut suivre les épisodes de ruissellement afin de pouvoir quantifier la quantité de sédiments apportée par chacun des affluents et par chacune des parcelles qui y sont connectées [Reulier, 2015 ; Reulier et al, 2015].

1.2. Les processus de ruissellement, d'érosion hydrique et de transferts hydro-sédimentaires en domaine d'openfield

Les processus d'érosion hydrique ont été particulièrement étudiés en domaine d'openfield puisqu'ils sont plus visibles, c'est en effet ce processus qui est le plus néfaste et le plus important sur les terres cultivées de par l'importance des potentielles pertes en terre et par la formation de rigoles ou de ravines. Les processus d'érosion hydrique en milieu agricole présentent une grande diversité sur le territoire national mais également à une plus grande échelle, qu'elle soit régionale ou départementale. Ces processus sont en général assez simples à observer puisque les eaux de ruissellement dépendent de la topographie et de l'occupation du sol [Viel et al, 2014]. Par exemple dans l'ex région du Nord-Pas-de-Calais, ces processus de ruissellement et d'érosion des sols sont extrêmement importants du fait de l'accroissement des cultures industrielles (betteraves, céréales, légumineuses,...) [Auzet, 1987]. Dans le Pays de Caux, où on observe de nombreux processus de ruissellement concentrés, les risques d'érosion hydrique dépendent de façon très étroite de la formation des croûtes de battance et en second lieu du compactage superficiel. Les rigoles apparaissent alors selon deux critères : les caractéristiques des pluies et l'état du sol [Boiffin et al, 1988]. Cette région reste donc sensible aux processus de ruissellement et d'érosion hydrique.

Il serait cependant réducteur de généraliser ces processus à la simple occupation du sol. De nombreux autres paramètres doivent être pris en compte et doivent être présents pour observer ce type de processus. Certaines zones présentent en effet toutes les caractéristiques nécessaires à des processus de ruissellement et d'érosion hydrique, pourtant sur le terrain, rien de tout cela

n'est observable. C'est par exemple le cas de la plaine de Caen qui présente des parcelles en moyenne supérieure à 50ha destinées aux cultures industrielles [Delahaye, 1996]. L'occupation du sol semble donc sensible à la mise en place de ces processus. Cependant plusieurs paramètres entrent en jeu pour limiter voir stopper le ruissellement : l'absence de l'enchaînement de deux cultures de printemps, des paramètres physiques comme des horizons ayant une bonne stabilité structurale et un régime pluviométrique faible. Les grandes parcelles cultivées ne sont donc pas nécessairement synonymes de ruissellement, d'érosion hydrique et de transferts hydro-sédimentaires.

1.3. Les processus de ruissellement, d'érosion hydrique et de transferts hydro-sédimentaires en milieu bocager

En domaine bocager, on aurait tendance à penser que les processus de transferts hydro-sédimentaires sont bien moins présents, voir inexistant. On sait aujourd'hui que le bocage limite les processus de ruissellement. En effet si on compare deux bassins versants similaires et comparables, le coefficient de ruissellement apparaît 1,5 à 2 fois plus forts sur le bassin non bocager [Mérot et al, 2005]. En domaine bocager on observe en effet beaucoup plus de processus d'interception du fait de la présence d'entités paysagères ou de types de couverts capables d'intercepter le ruissellement. Il existe plusieurs types de couverts qui ont des valeurs d'interception différentes : la végétation forestière, les pelouses et les landes, les plantes cultivées, les zones urbanisées et la neige [Cosandey, Robinson, 2012]. Cependant dans l'article de Reulier et al de 2017, il est clairement expliqué que ces processus sont présents et peuvent même être importants. Au même titre que dans les domaines d'openfield, plusieurs paramètres doivent être pris en compte. Le bocage se compose d'éléments qui peuvent en effet restreindre voir stopper les phénomènes de ruissellement, c'est par exemple le cas des haies et des prairies enherbées, nombreuses dans le bocage. L'érosion hydrique et les transferts hydro-sédimentaires entraînés par le ruissellement peuvent mettre en mouvement un grand nombre de sédiments le long des versants jusqu'aux cours d'eau. Par exemple le bassin versant de Lingèvres dans le Calvados, a été étudié et on note qu'avec 47 mm de pluie, 170 tonnes de sédiments ont été exportés sur un bassin de 15 km² [Reulier et al, 2017]. La présence de ces processus en milieu bocager peut également se voir visuellement, dans le sud Manche, dans le bassin versant du Moulin du Pontorsier, on observe la présence de ravines issues de l'érosion hydrique [Le Gouée, 2004].

De part la présence d'un réseau linéaire dense, en domaine bocager certaines parcelles pourtant assez éloignées des cours d'eau peuvent se retrouver connectées et donc transporter des sédiments jusqu'à ces cours d'eau [Viel et al, 2014]. Le linéaire comprend à la fois les surfaces imperméables tel que les routes ou les chemins (qui deviennent imperméables par un effet de tassement du sol), les fossés enherbés ou non, les haies et les talus. Les éléments ponctuels tels que les trouées dans les talus et les entrées de champ sont également à prendre en compte. Les routes et les chemins constituent des voies de concentration du ruissellement issues des parcelles jusqu'au cours d'eau. Les trouées de talus et les sorties de champ, en fonction de leurs positions,

permettent de faire circuler les écoulements dans le bassin versant. Les fossés ont également un impact dans ces transferts dans le sens où ils concentrent également les écoulements. Les talus permettent aux sédiments riches en matière organique d'être piégés en amont, tandis qu'en aval on observe des phénomènes de départ de matériaux érodés [Mérot et al, 2005]. Le talus peut cependant rester un élément perméable de part le racinaire qui y est présent ou encore à cause des lessivages récurrents [Mérot et al, 2005]. En étant perpendiculaires à la pente, les haies peuvent diminuer ou stopper les phénomènes de ruissellement. Les haies ont également un impact sur la longueur du ruissellement. A contrario, une haie parallèle à la pente ne jouera aucun rôle d'interception des écoulements. Il n'existe d'ailleurs pas de lien entre la densité du réseau de haies et les surfaces connectées aux cours d'eau [Mérot et al, 2005 ; Viel et al, 2014]. Cela montre bien qu'au-delà du nombre de haies présentes sur un bassin versant, c'est leur organisation qui va déterminer leur rôle dans l'interception. Si l'on veut lutter contre les processus de ruissellement, ce n'est donc pas sur le nombre de haies que l'on veut implanter qu'il faut réfléchir mais bien sur leur localisation et leur orientation. Il est en effet possible d'étudier le rôle hydrologique des haies en fonction de leurs caractéristiques. Les haies continues et perpendiculaires à la pente présentent un rôle hydrologique fort, les haies discontinues et perpendiculaires à la pente ainsi que celles continues et en position obliques, possèdent un rôle hydrologique moyen. Enfin, les reliques de haies ou les haies parallèles à la pente ont un rôle hydrologique faible ou nul [Le Gouée, 2004]. L'occupation des sols et les rotations culturales jouent également un rôle majeur dans ces processus dans le sens où le sol peut se retrouver à nu pendant une période plus ou moins longue et plus ou moins pluvieuse. Une culture de maïs qui se succède à une autre laisse le sol à nu pendant au moins 6 mois [Delahaye, 1996]. Il faut également noter la modification des systèmes culturaux en domaine bocager qui « *est la principale cause de ce déséquilibre avec notamment la croissance des surfaces en maïs fourrager* » [Delahaye, 1996]. Le remembrement a également participé à ces modifications. Déjà en 1987, Véronique Auzet notait un agrandissement des parcelles ainsi qu'une augmentation des superficies consacrées aux cultures avec 79 % du terroir en 1947 contre 98 % en 1983, sur l'ensemble du territoire national.

Les impacts du paysage bocager sur les processus hydrologiques dans un bassin versant peuvent donc être résumés en deux idées principales selon Mérot et al : « *d'une part accroître l'hétérogénéité de l'organisation et de l'état interne du bassin et d'autre part de modifier les chemins de l'eau pour les eaux de surfaces* ». Ce sont ces deux éléments qui rendent particulièrement compliquée l'étude des processus de ruissellement et de transferts hydro-sédimentaires en milieu bocager.

En résumé, on sait que les processus de ruissellement en domaine d'openfield se mettent en place à partir d'un excès hydrique, tout comme dans le domaine bocager. La différence majeure se trouve dans la composition du bocage et dans la présence de nombreuses entités interceptrices de ce ruissellement. La différence est aussi induite par l'occupation du sol. Les sols sont en général plus sensibles en domaine d'openfield à la mise en place de ces processus de ruissellement de part une plus grande présence de parcelles dédiées aux cultures. Suivant l'occupation du sol, les

processus de ruissellement peuvent donc se mettre en place plus ou moins rapidement. Le ruissellement dépend donc de paramètres à la fois naturels (précipitations, topographie, structure du sol,...) et anthropiques (occupation du sol, types de cultures et de rotations culturales, positionnement des haies, des entrées de champs,...). Ce sont ces facteurs anthropiques qui font varier l'importance du ruissellement et des processus que celui-ci entraîne.

1.4. La modélisation multi-agents comme outil de présentation des connectivités hydrologiques

Afin de comprendre le rôle des entités paysagères, des techniques de modélisation multi-agents ont été mises en place [Reulier et al, 2016 ; Reulier et al, 2017]. Ces sont ces techniques qui permettent d'étudier les connectivités hydrologiques. Un bassin versant désigne un espace drainé par ses cours d'eau et ses affluents. L'eau de pluie suit donc un trajet de ruissellement induit par la pente avant de rejoindre le cours d'eau. Cependant, la pente n'est pas le seul élément qui doit être pris en compte pour analyser ces dynamiques. D'autres facteurs entrent en compte : l'occupation du sol, les réseaux de fossés, de routes, de haies mais également la présence d'entités ponctuelles comme les entrées de champ ou les mares. Tous ces éléments jouent un rôle différent dans les dynamiques de ruissellement, ils peuvent intercepter les écoulements, les concentrer ou encore en être les initiateurs. Au-delà de la simple compréhension du système hydrologique global du bassin versant, la modélisation est un réel outil d'aide à la gestion et à la protection de ces espaces et de ces écosystèmes. En effectuant ce travail de modélisation on repère quelles entités du bassin versant jouent un rôle dans les dynamiques d'écoulement et de ruissellement, à la suite de cela on peut plus facilement mettre en place différentes méthodes permettant de mieux contrôler ces phénomènes. Le modèle présenté dans l'article de Reulier et al de 2017 est le modèle Landscape Structure And Runoff (LASCAR). Le but est de comprendre le phénomène de ruissellement et sa circulation jusqu'aux cours d'eau dans un bassin-versant. La méthode est la suivante : un agentgoutte se déplace selon la pente renseignée par un modèle numérique de terrain, au long de son déplacement, l'agent va rencontrer et interagir avec les éléments du paysage, représentés par des patches, venant « *contraindre la dynamique topographique du déplacement des agents* » [Reulier et al, 2017]. Cette simulation permet de visualiser quelles entités paysagères jouent un rôle dans la circulation de l'eau sur le bassin versant. L'article explique également qu'il est possible de réaliser plusieurs modélisations en y intégrant ou non divers paramètres : les entités linéaires à savoir les routes, les haies et les fossés, peuvent être intégrés dans une deuxième simulation. Il est également possible de ne faire ruisseler que les prairies cultivées et les routes, enfin on peut établir un seuil d'infiltration pour les prairies et les surfaces boisées. Ces modélisations permettent d'aboutir à une carte des connectivités hydrologiques, en démontrant le rôle des différentes entités paysagères dans la circulation de l'eau.

Après modélisation il est possible de vérifier les résultats obtenus sur le terrain. Dans l'article Viel et al de 2014, une méthodologie a été présentée afin d'aboutir à une cartographie présentant les connectivités potentielles dans un bassin versant bocager du Calvados. Dans cet

article, quatre types de surfaces jouant un rôle dans les transports hydro-sédimentaires ont été recensées : « *les surfaces, qui jouent un rôle de production ou d'infiltration du ruissellement ; les haies qui modifient ou limitent l'écoulement des eaux sur les versants [...] ; les entrées de champ, qui assurent la connexion entre les parcelles agricoles et les réseaux ; les linéaires, qui favorisent le transfert du ruissellement depuis les parcelles agricoles vers les cours d'eau : les réseaux de fossés et le réseau routier* ». De cette étude il ressort trois types de connexion possible : les parcelles directement connectées au cours d'eau, les parcelles indirectement connectées (c'est-à-dire connectées par le réseau linéaire) et les parcelles déconnectées. La première étape de cette démarche consiste à définir les parcelles potentiellement connectées du fait de la topographie et « *des différents réseaux qui composent la structure paysagère* » [Viel et al, 2014]. Il est ensuite possible de vérifier la présence de ces écoulements et chemins d'eau sur le terrain afin d'avoir une carte des connectivités fonctionnelles. Certaines parcelles en herbe connectées ont en effet moins de chance de réellement produire du ruissellement sur le terrain. Chaque bassin versant, et notamment en domaine bocager, présente une organisation du paysage singulière. Cependant, cette méthodologie peut être appliquée à différents sites d'étude afin de mettre en lumière les connectivités potentielles avant d'étudier les connectivités fonctionnelles.

1.5. Les études diachroniques dans le cadre de l'évolution des connectivités hydrologiques

Au-delà de simplement étudier l'impact du paysage, faire rentrer les évolutions diachroniques du paysage dans l'étude des connectivités hydrologiques permet de comprendre un peu plus le rôle de chacune des entités dans ce phénomène et dans les processus qui y sont liés. À ce jour aucune étude semblable n'a été réalisée sur le bassin versant de la Sienne. D'autres bassins versants ont cependant fait l'objet de ce type de recherches. Dans « Trajectoire d'un hydrosystème : le Guer amont sous bassin du Léguer », M. Guillemois présente l'évolution du paysage dans un bassin versant agricole breton ayant subi les effets du remembrement au fil des années. Ces évolutions du paysage sont également mises en relation avec les évolutions des connectivités hydrologiques du site, par le biais d'une modélisation multi-agents sous LASCAR (voir 1.4). Cette étude se base sur différents travaux de digitalisation sur plusieurs années d'étude afin de visualiser les évolutions du paysage breton. Ces différents travaux de digitalisation ont été réalisés à partir de plans cadastraux et de photos aériennes. L'étude des connectivités débute à partir de 1830 où l'on observe 86 % de parcelles déconnectées contre 14 % connectées. En 1952, le pourcentage de parcelles connectées monte à 22 %, il descend à 19 % en 1978 et atteint 33 % en 2020. Cette étude montre bien le lien entre évolution du paysage et évolution des connectivités. Cette évolution n'est cependant pas linéaire comme on peut le voir avec les résultats obtenus en 1978 qui sont inférieurs à ceux de 1952. Ce mémoire présente le rôle des entités composant le paysages dans l'évolution des connectivités hydrologiques et notamment des haies qui ont été graduellement abattues au fil des années. Pour l'année 2020, c'est-à-dire l'année en cours lors de ce mémoire, il est possible de vérifier les résultats de la modélisation sur le terrain et d'expliquer

pourquoi le modèle a pu éventuellement offrir des résultats qui ne sont pas en accords avec ce qui se passe sur le terrain.

1.6. Les rotations culturales dans le sud de la Manche

À ce jour, aucune étude n'a montré le rôle des rotations culturales sur la baisse ou la hausse des surfaces connectées. Cette partie a donc pour but de définir ce processus de rotation et de voir les travaux qui ont été réalisés pour identifier les rotations culturales dans le sud de la Manche. Les rotations culturales désignent l'alternance d'une suite de cultures au fil des années sur une même parcelle. On parle alors bien de rotation puisqu'il y a une suite logique dans l'organisation de celle-ci. Les rotations culturales peuvent être biennales, triennales ou encore quadriennales. Lorsque les cultures se succèdent et s'alternent sans suite logique, on parle simplement de succession culturale [Wikipédia, 2020]. Ces rotations permettent la fertilisation des sols et minimisent le développement des bioagresseurs, c'est-à-dire tous les organismes vivants en capacité de détruire les cultures. Les rotations culturales ont déjà fait l'objet d'études dans le sud Manche. Dans sa thèse de 2015, M. Marie présente les rotations suivantes comme étant les plus présentes dans la zone du site d'étude identifiée ici par le terme « bocage virois » :

- Mais – Mais – Mais – Prairie temporaire (3ans)
- Mais – Mais – Céréales
- Mais – Céréales
- Mais – Céréales – Colza

Le rôle des prairies temporaires ou artificielles varient d'une exploitation à une autre. Certaines d'entre elles sont des cultures qui sont destinées à être ensilées notamment lorsqu'elles présentent une alternance avec du maïs. Dans ce cas ces prairies ne sont pas enherbées mais sont recouvertes de ray-grass ou de trèfle afin d'être récoltées. Certaines de ces prairies sont simplement présentes en tant qu'interculture sans rôle défini, tandis que d'autres servent de prairies de pâture entre deux récoltes [Marie, 2015]. Cette étude nous montre la prédominance du maïs à fourrage ou à ensilage dans cette région. La culture de maïs est évidemment à prendre en lien avec la prédominance de l'élevage comme type d'agriculture, le maïs servant en effet d'alimentation pour le bétail. M. Marie rappelle également que les rotations culturales sont intimement liées à l'exploitation en elle-même. Elles peuvent donc être très variées d'une exploitation à une autre, même dans un territoire ayant des caractéristiques communes, du fait de plusieurs éléments comme la modernisation de l'exploitation agricole ou le type de bétail élevé. En effet, on nourrit différemment des animaux destinés à la production de viande et des vaches laitières, cette différence entraîne nécessairement des variations dans les pratiques agricoles et donc dans les rotations culturales.

II. Le bassin versant de Rouffigny, sous-bassin versant de la Sienna : présentation

2.1. La Sienna et son bassin versant

2.1.1. La Sienna

La Sienna est un fleuve côtier d'environ 80km localisé dans le département de la Manche. La source de la Sienna se trouve dans la commune de Saint-Sever-Calvados à une altitude de 319m et son exutoire se trouve au niveau du havre de Régneville-sur-Mer. La Sienna se jette donc dans la mer de la Manche. La largeur moyenne de la Sienna est d'environ 10m mais son exutoire atteint une largeur d'environ 20m. Le fleuve traverse des paysages bocagers, à la fois composés de prairies et de cultures. Selon le Syndicat Intercommunal d'Aménagement et d'Entretien de la Sienna (SIAES), on dénombre environ 360km de cours d'eau à l'intérieur du bassin versant auquel il faut ajouter environ 200km de ruisseaux en tête de bassin versant. Les principaux affluents en rive droite sont : La Sénène (12km de longueur), la Gièze (12km de longueur) et la Vanne (20km de longueur). En rive gauche on trouve la Bérence , la Chaussée et l'Airou (30,5km de longueur). Au niveau de la source à Saint-Sever-Calvados on note la présence d'une réserve d'eau naturelle appelé le Gast. L'Airou est le seul affluent de la Sienna qui n'est pas contrôlé par cette réserve. C'est une rivière qui peut connaître de fortes crues de part l'imperméabilité des sols et le climat pluvieux de la région.

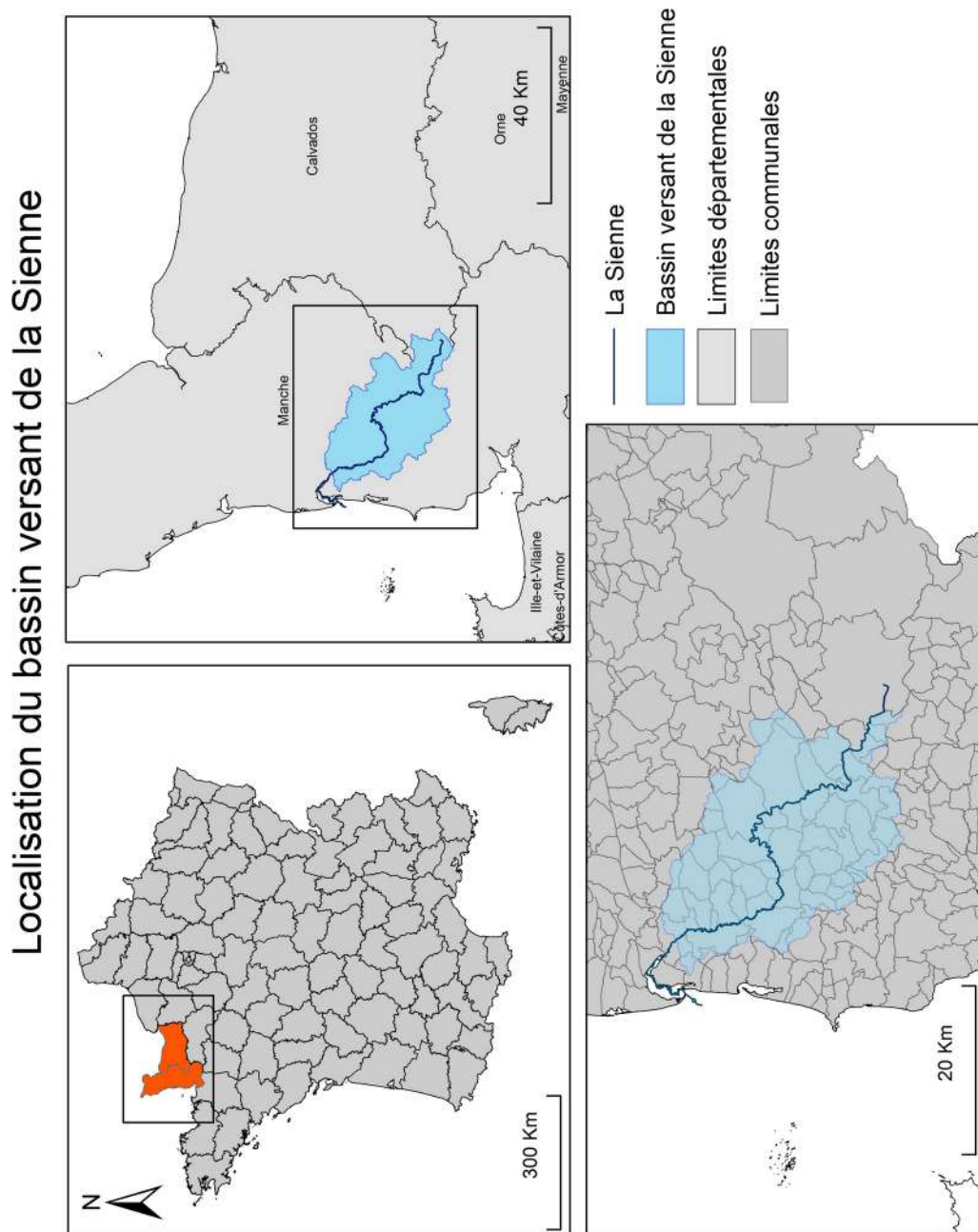


Figure 1 : Photographie de la Sienna à Gavray-sur-Sienna. Source : S.Lecrosnier (12/04/21).

2.1.2. Le bassin versant de la Sienna : un hydrosystème en milieu bocager

2.1.2.1. Localisation et gestion

D'une surface d'environ 580km², le bassin-versant de la Sienna est géré par 5 communautés de communes à savoir Coutances Mer et Bocage, Granville Terre et Mer, Villedieu Intercom, Mont-Saint-Michel Normandie et De la Vire au Noireau. Il traverse au total 66 communes majoritairement réparties sur le département de la Manche.



Sources : IGN : BD_TOPO (50; 14; France)
Réalisation : Solène Lecrosnier

Figure 2 : Carte de localisation du bassin versant de la Sienna.

2.1.2.2. Climat et précipitations

Le bassin versant de la Seine se trouve majoritairement dans le département de la Manche qui est très influencé par l'effet temporisateur de la mer. Le département est en grande partie ceinturé par la mer, on trouve donc un climat océanique où les hivers sont doux, les étés tempérés et les précipitations relativement abondantes. Le bassin versant s'étend plus précisément du centre de la côte ouest au sud est de la Manche, le sud du bassin versant est donc moins influencé par l'effet temporisateur de la mer qu'au niveau de l'exutoire. Il y a plus d'écart de température entre les saisons mais également entre le jour et la nuit. Les précipitations sont également plus abondantes au sud du bassin versant. La carte suivante, issue du profil environnemental 2015 de Basse-Normandie réalisé par la DREAL Normandie, présente les aires climatiques qui composent le territoire bas normand.

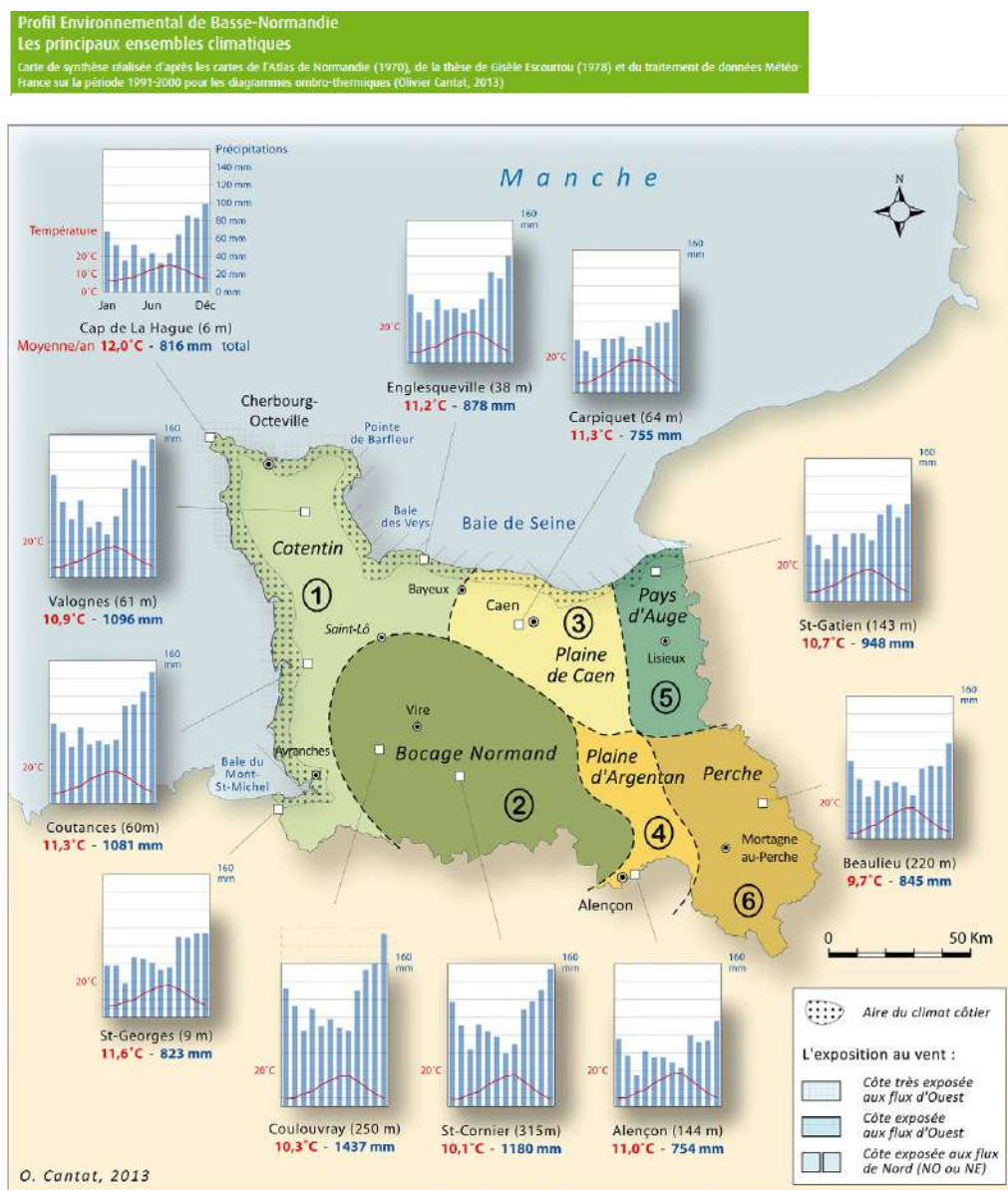


Figure 3 : Carte de présentation des principaux ensembles climatiques de Basse-Normandie. Source : DREAL Normandie (2013).

Le bassin versant de la Sienne se trouve donc sur deux aires climatiques : le Bocage Normand en majorité et le Cotentin au niveau de l'exutoire. On remarque des variations notamment aux niveau des précipitations qui sont bien plus importantes dans l'aire climatique nommée « Bocage Normand », représentée par la station de Coulouvray qui se trouve au niveau de la source du bassin versant de la Sienne. Cette station recense un cumul pluviométrique de 1 437mm, cette station recense d'ailleurs le cumul pluviométrique le plus important de toutes les stations présentées sur cette carte. Au niveau de l'exutoire, sur cette carte, on trouve la station de Coutances qui recense un cumul de pluie de 1 081mm. Il y a un degré de différence pour la température moyenne entre ces deux stations, les températures sont en effet plus influencées par l'effet temporisateur de la mer au niveau de l'exutoire du bassin versant.

2.1.2.3. Géologie

Le bassin versant se trouve sur des sols imperméables et majoritairement sur des schistes ou des grès. Le schiste ne désigne pas une roche à proprement parlé, mais une texture de roche qui se caractérise par une construction en feuillets. Il existe donc plusieurs types de schistes. Comme les schistes, il existe plusieurs types de grès. Le grès est une roche sédimentaire détritique, c'est à dire qu'elle est composée d'au moins 50 % de débris. Ces débris sont majoritairement sableux et s'agglomèrent lors de processus de diagenèse. Le bassin versant repose également sur du granite mais dans une moindre mesure, il est en effet traversé par une des deux bandes synclinales de granite de 10 km de large qui traverse la Manche d'ouest en est. La bande synclinale traversant le bassin versant s'étend des falaises de Champeaux à Pont-Farcy et Vire. Sur la carte suivante présentant la géologie de la Basse-Normandie, on peut voir cette bande synclinale au sud de la Manche. L'ensemble du bassin versant repose sur des roches similaires issues du Briovérien et du Paléozoïque. Selon l'Association Patrimoine Géologique de Normandie, l'ouest de la Normandie est composée : « *de terrains sédimentaires, magmatiques et métamorphiques, très épais, déposés entre le Précambrien et le Paléozoïque ; ces séries ont été déformées et plissées par deux orogènes structurant le Massif armoricain.* » On voit en effet une différence nette entre la géologie de l'ouest de la Basse-Normandie et celle à l'est, composée de terrains sédimentaires.

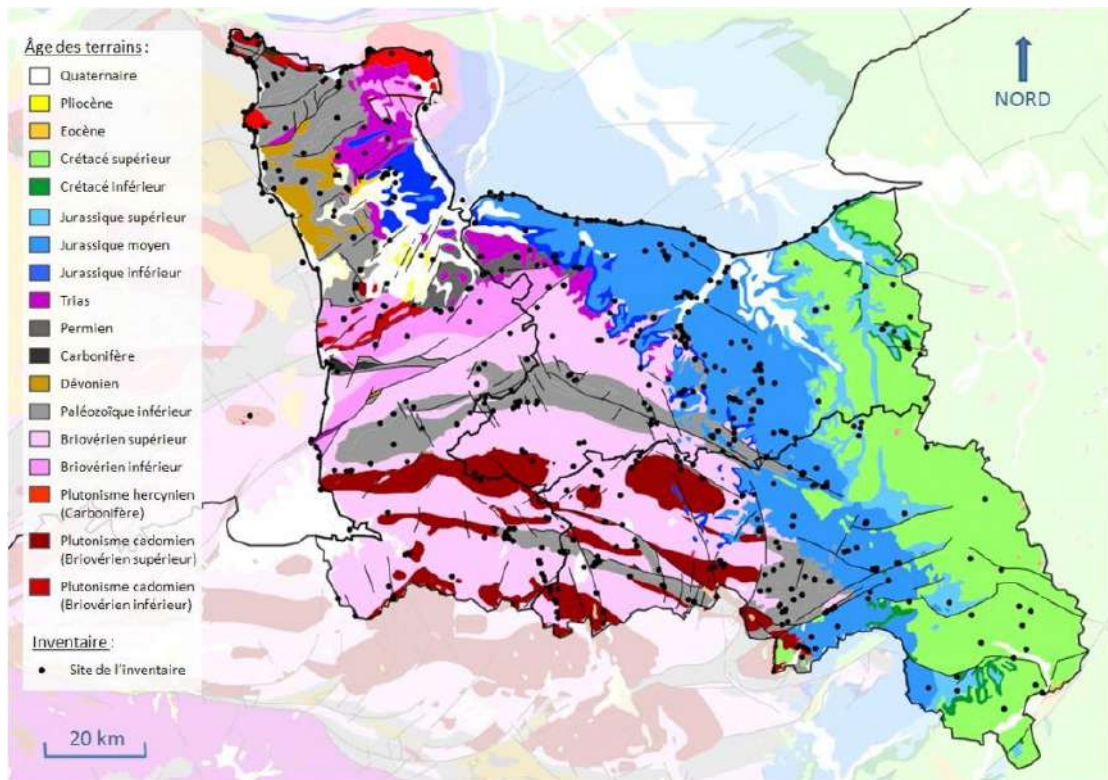


Figure 4 : Carte des sites de l'inventaire du patrimoine géologique de Basse-Normandie. Source : APGN.

2.1.2.4. Activités

Le bassin-versant de la Sienne présente une densité de population faible, environ 65hab/km². La nouvelle commune de Villedieu-les-Poêles-Rouffigny est la commune la plus importante en terme de population dans le bassin-versant. L'agriculture est l'activité économique dominante, elle occupe environ 75 % du territoire du bassin versant. On y trouve principalement de l'élevage laitier bovin, de la culture de céréales (maïs à ensilage et blé) et de la production de viande. On peut noter la présence de quelques industries et de quatre stations de pompage.

2.2. Pourquoi travailler sur la Sienne et son bassin versant ?

Selon le Syndicat Intercommunal d'Aménagement et d'Entretien de la Sienne la qualité de l'eau de la Sienne est primordiale pour quatre raisons. Tout d'abord quatre stations de pompage sont présentes le long du cours d'eau, il est donc logique que la qualité de l'eau doit être la plus irréprochable que possible afin d'assurer la distribution d'une eau potable saine. Deuxièmement, la Sienne débouche dans un havre et peut donc amener avec elle divers polluants risquant d'altérer la qualité des eaux littorales pour la conchyliculture mais également pour la baignade. Des processus d'envasement de ce havre sont également possibles. Le territoire est sensible aux inondations du fait des précipitations abondantes et de l'imperméabilité des sols, connaître le fonctionnement de la Sienne permet de prévenir au mieux ces événements et d'éviter les risques.

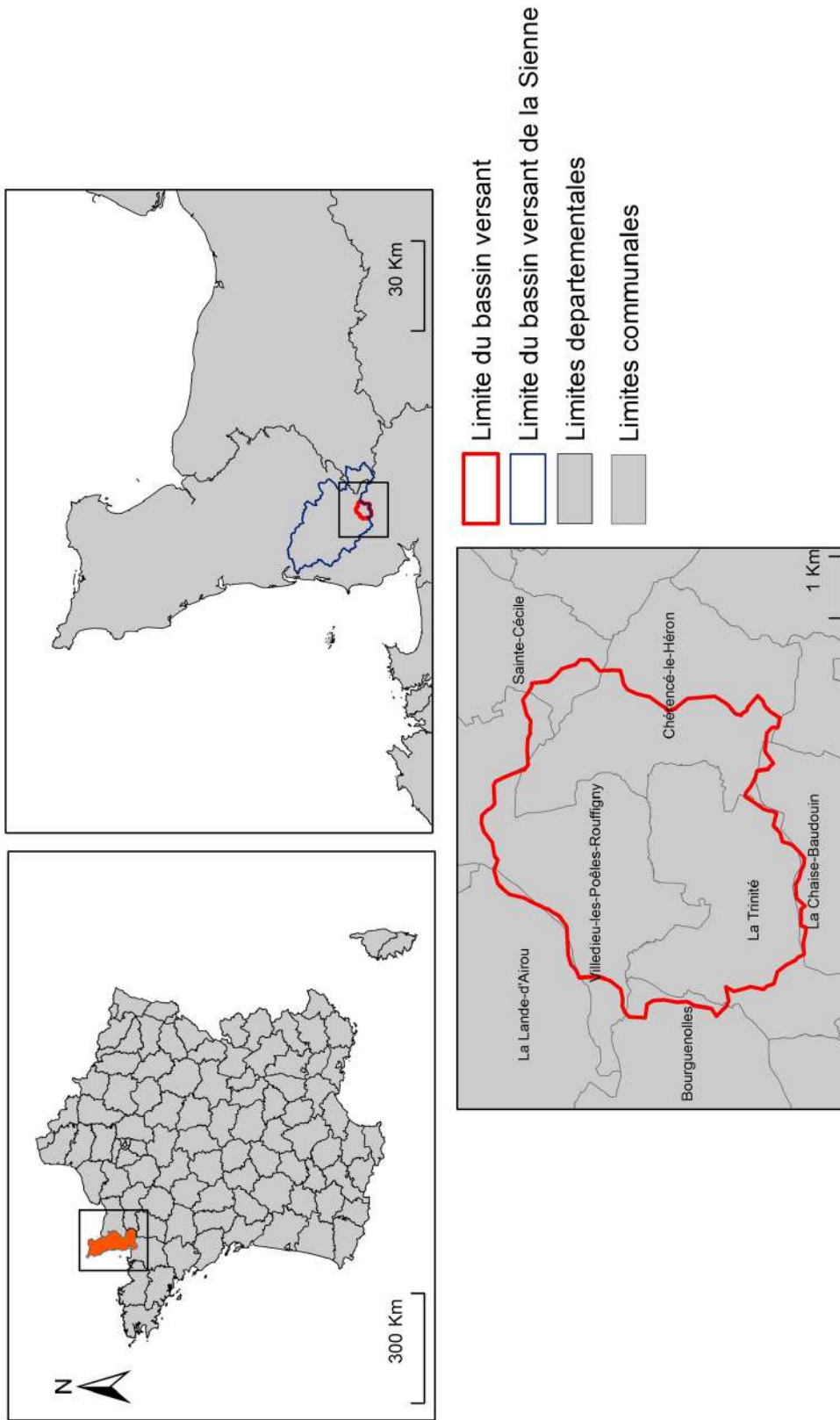
La Sienne est un espace de préservation et de protection de nombreuses espèces aquatiques, en effet le bassin versant de l'Airou a été classé zone Natura 2000 car celui-ci abrite des espèces aquatiques protégées : le saumon atlantique, la lamproie marine, la moule perlière et la cordulie a corps fin. Des travaux ont été mis en place par le SIAES afin de lutter contre les phénomènes de ruissellement et d'érosion à travers l'implantation de haies sur talus et de déplacement des entrées de champs. Cela montre bien que le ruissellement est présent sur ce bassin versant et que les enjeux sont importants notamment pour la qualité des terres agricoles. En plus de ces enjeux directement liés aux transferts hydro-sédimentaires, le bassin versant de la Sienne est un bassin versant agricole qui a évolué au fil des années. Le paysage s'est modifié entraînant de nouvelles organisations permettant l'évolution des connectivités hydrologiques. Ce site permet donc de travailler sur ces évolutions paysagères tout en sachant que ce travail est pertinent puisque le bassin versant est sensible aux phénomènes de ruissellement.

2.3. Le bassin versant de Rouffigny : présentation

2.3.1. Localisation

Le bassin versant qui sera étudié dans ce travail de recherche se situe dans le sud de la Manche et s'étend majoritairement sur les trois communes suivantes : Villedieu-les-Poêles-Rouffigny, Chérencé-le-Héron et La Trinité. Quatre autres communes se trouvent en limite de ce bassin versant : La Chaise-Baudouin au sud, Bourguenolles à l'ouest, La Lande d'Airou au nord ouest et Sainte-Cécile au nord-est. Il se situe à environ 30km à l'ouest de Vire et à 20km au nord est d'Avranches. Ce sous bassin versant est d'une superficie d'environ 21km².

Localisation du site d'étude



Sources : IGN : BD_TOPO (50; 14; France)
 Réalisation : Solène Lecrosnier

Figure 5 : Carte de localisation du bassin versant de Rouffigny.

2.3.2. Caractéristiques du bassin versant

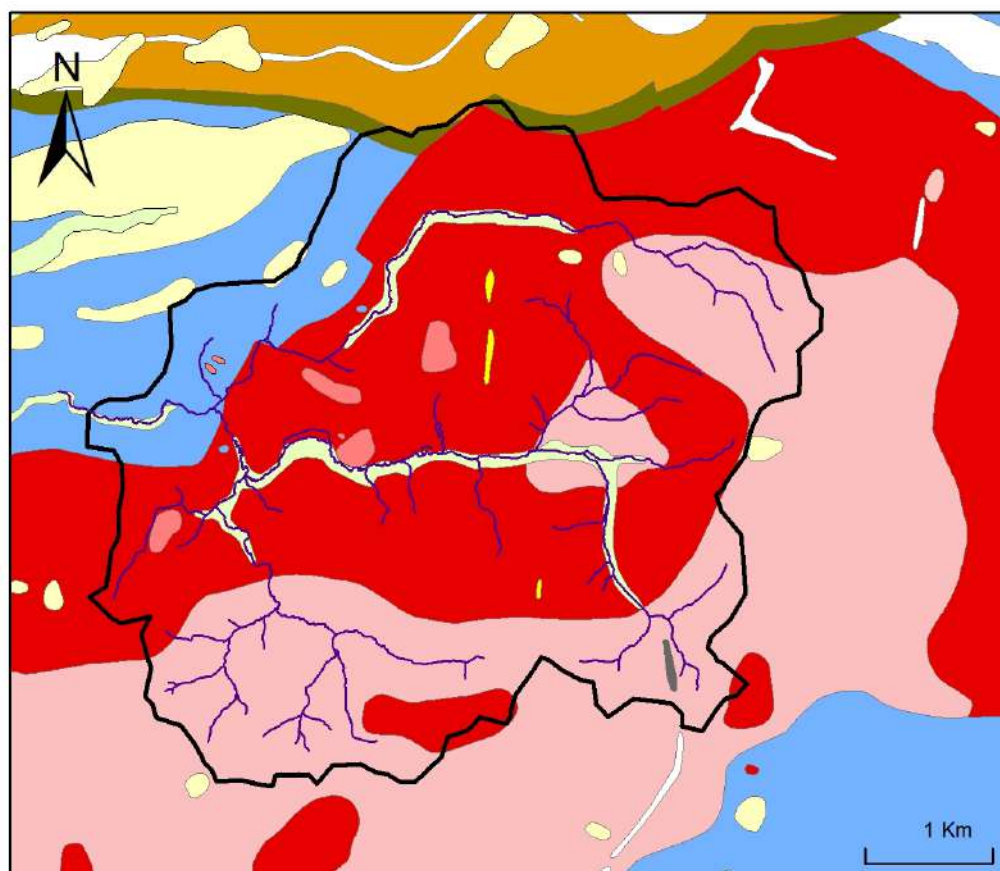
2.3.2.1. Un substrat géologique imperméable

Le bassin versant étudié repose sur des granites issus de la bande synclinale granitique qui traverse la Manche d'ouest en est, des falaises de Champeaux à la ville de Vire. Sur la carte géologique ci-dessus on distingue trois types principaux de substrat rocheux.

Ce sont majoritairement les granodiorites à biotite et cordiérite qui dominent le site d'étude. La roche granodiorite est une roche magmatique, plutonique, proche du granite. On peut ensuite voir la présence d'une enclave à l'est du bassin versant constituée d'altérites des granodiorites à biotite et cordiérites. On retrouve également ce type de roche au sud du bassin versant, là où circule le cours d'eau de l'Airou. Ce substrat correspond à des granodiorites arénisés. En géologie, l'arène désigne le sable grossier issu de l'arénisation des roches magmatiques ou métamorphiques riches en quartz. Dans les climats tempérés comme les nôtres les granodiorites peuvent subir des transformations par l'infiltration d'eau jusqu'à la roche saine, ces phénomènes se produisent donc dans le sous-sol. Le résultat est la transformation de la roche en un sable grossier dont les particules ne sont en général pas érodées du fait de la proximité avec la source de constitution. Au nord ouest du bassin versant on trouve des siltites et grès briovériens indifférenciés, comédifiés. La siltite est une roche sédimentaire.

D'autres substrats sont présents sur le site d'étude mais de manière plus ponctuelle. Quatre petits pointements de leucogranites d'âge cadomien sont recensés sur le site d'étude. Les leucogranites sont des roches granitiques mais où la proportion de minéraux « foncés » est moindre. On retrouve le plus souvent ces roches sous forme de petits massifs, comme c'est le cas sur le bassin-versant, car ils sont issus de remontées de magma à basse température. Le long des cours d'eau, notamment celui de l'Airou au centre du bassin versant, de la Nouette au sud est et sur une partie de la Marchandière au nord, on trouve des alluvions récentes. Au nord du bassin versant on retrouve quelques points de loess non carbonatés ou décalcifiés. Trois petits filons de quartz sont également présents, deux au nord et un au sud, liés à la présence d'une fracture subméridienne. Au nord, en limite du bassin versant, on trouve des conglomérats et grès pourprés ainsi qu'une série des Grès de la Bloutière. Un filon doléritique est présent au sud, au niveau du cours d'eau de la Nouette.

Carte géologique du site d'étude



Légende

- Granodiorites cadomiennes à biotite et cordiérite
- Leucogranites
- Altérites des granodiorites cadomiennes à biotite et cordiérite
- Siltites et grès briovériens indifférenciés, comédifiés
- Loess non carbonatés ou décalcifiés
- Alluvions récentes
- Filons de quartz
- Série des Grès de la Bloutière
- Filons doléritiques
- Conglomérats et grès pourprés
- Cours d'eau
- Limite du bassin versant

Sources : BRGM : GEO050K_HARM_050

Réalisation : Solène Lecrosnier

Figure 6 : Carte géologique du bassin versant de Rouffigny.

2.3.2.2. Des sols agricoles sensibles au ruissellement

Le sous bassin versant est majoritairement recouvert de brunisols ou sols bruns. Ce sont des sols que l'on rencontre fréquemment dans les zones tempérées. Ces sols sont excellents pour l'agriculture de part leur profondeur et leur retenue d'eau. Les brunisols sont également d'excellents sols forestiers sur le plan chimique, sur le plan physique leurs qualités dépendront de quatre éléments à savoir la profondeur prospectable, l'importance de la réserve en eau et la profondeur hydrique et enfin la position topographique et l'exposition. Selon le Référentiel Régional Pédologique du département de la Manche réalisé en 2016, les brunisols présents sur ce site sont présentés comme des « *sols bruns acides de position et de pentes hétérogènes reposant sur le granite du Précambrien de l'Avranchin oriental, de la Manche centrale, de la Hague bocagère et du bas Val de Saire.* » Les brunisols sont des sols non calcaires. Ils sont issus de l'altération in situ du matériau parental pouvant être de nature très diverse.

Plusieurs « enclaves » pédologiques sont visibles sur ce site d'étude :

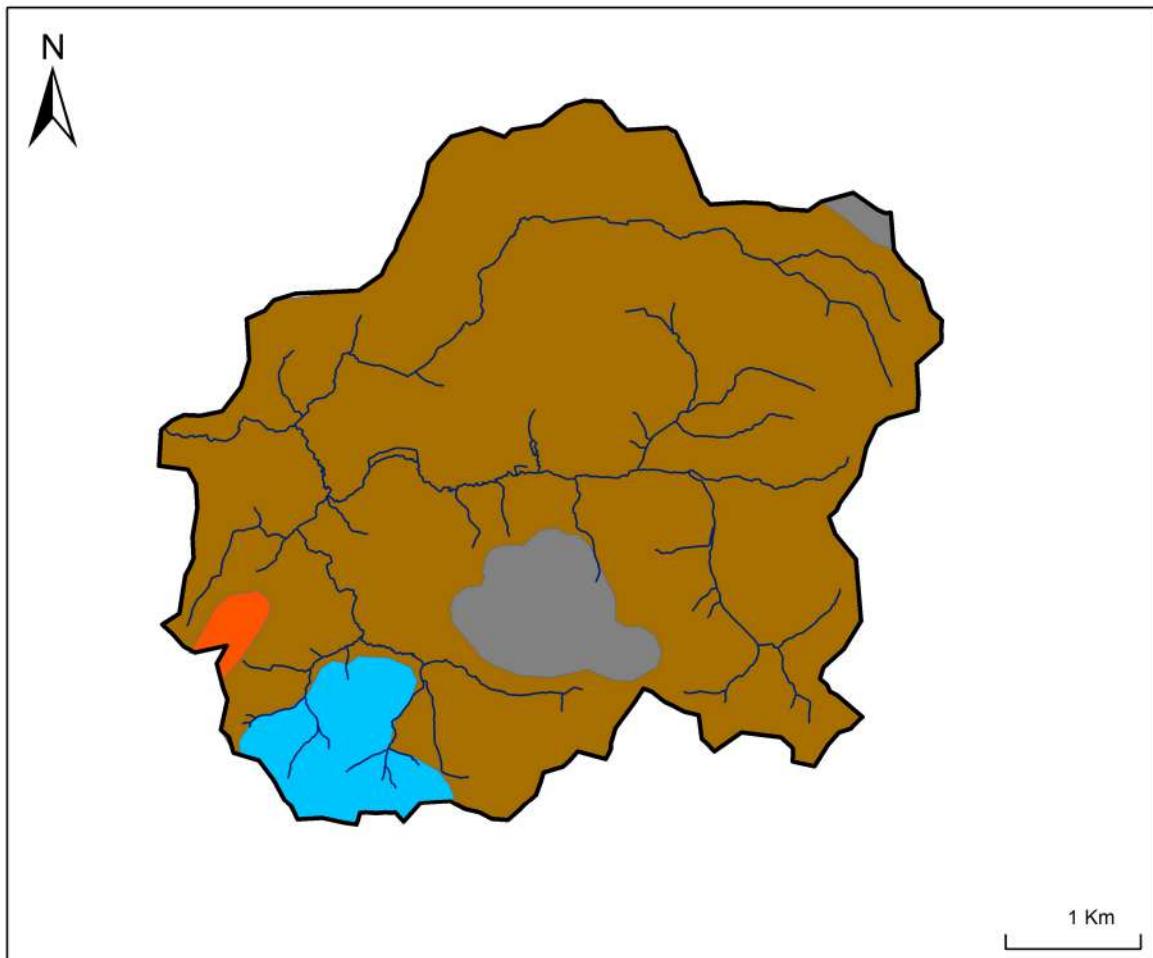
- Des rankosols au sud et au nord-est du bassin versant : les rankosols sont des sols bruns acides peu épais de positions et de pentes hétérogènes reposant sur le granite du Précambrien de l'Avranchin oriental, de la Manche centrale et du Val de Sée [Le Gouée, 2016] . Les rankosols sont des sols peu épais (moins de 30 cm d'épaisseur), peu différenciés, développés à partir de roches non calcaires. Ce sont donc des sols plutôt acides [GISOL].

- Des rédoxisols au sud du bassin versant : les rédoxisols sont des sols acides hydromorphes de milieu et bas de versant et de pentes faibles reposant majoritairement sur les limons du Quaternaire de la Hague, du Cotentin et de la Manche centrale [Le Gouée, 2016]. La principale caractéristique des rédoxisols résulte du fait qu'ils sont saisonnièrement engorgés en eau. Cela se traduit par une coloration bariolée du sol qui débute à moins de 50 cm de la surface et se prolonge voire s'intensifie sur au moins 50 cm d'épaisseur. La circulation difficile de l'eau dans ces sols peut être liée à leur faible perméabilité et/ou à leur position topographique particulière dans le paysage [GISOL].


- Des néoluvisols au sud-ouest du bassin versant : les néoluvisols sont des sols acides lessivés hydromorphes de bas de versant et de pentes faibles reposant sur les limons éoliens du Quaternaire du Cotentin, de la Manche centrale et de l'Avranchin oriental [Le Gouée, 2016].

En général, les sols de cette zone d'étude sont minces, filtrants et vite saturés en eau. Ce sont des sols riches en sable de par la présence d'un sous-sol granitique, ce sable peut alors être mobilisé dans les processus de ruissellement.

Carte pédologique du site d'étude



Légende

-  Brunisols
-  Rankosols
-  Rédoxisols
-  Néoluvisols
-  Cours d'eau
-  Limite du bassin-versant

Source : Géoportail
Réalisation : Solène Lecrosnier

Figure 7 : Carte pédologique du bassin versant de Rouffigny.

2.3.2.3. Un relief énergétique

Le bassin versant présente des dénivelés importants. Le point le plus haut se situe à 226m d'altitude et le plus bas à 121m, cela représente plus de 100m de dénivelé. La carte suivante présente les altitudes du bassin versant. Visuellement on y voit un relief énergétique. Les cours d'eau sont évidemment encaissés tandis que les têtes de bassin présentent les altitudes les plus importantes. Les altitudes baissent donc de l'est vers l'ouest, des têtes de bassin vers l'exutoire.

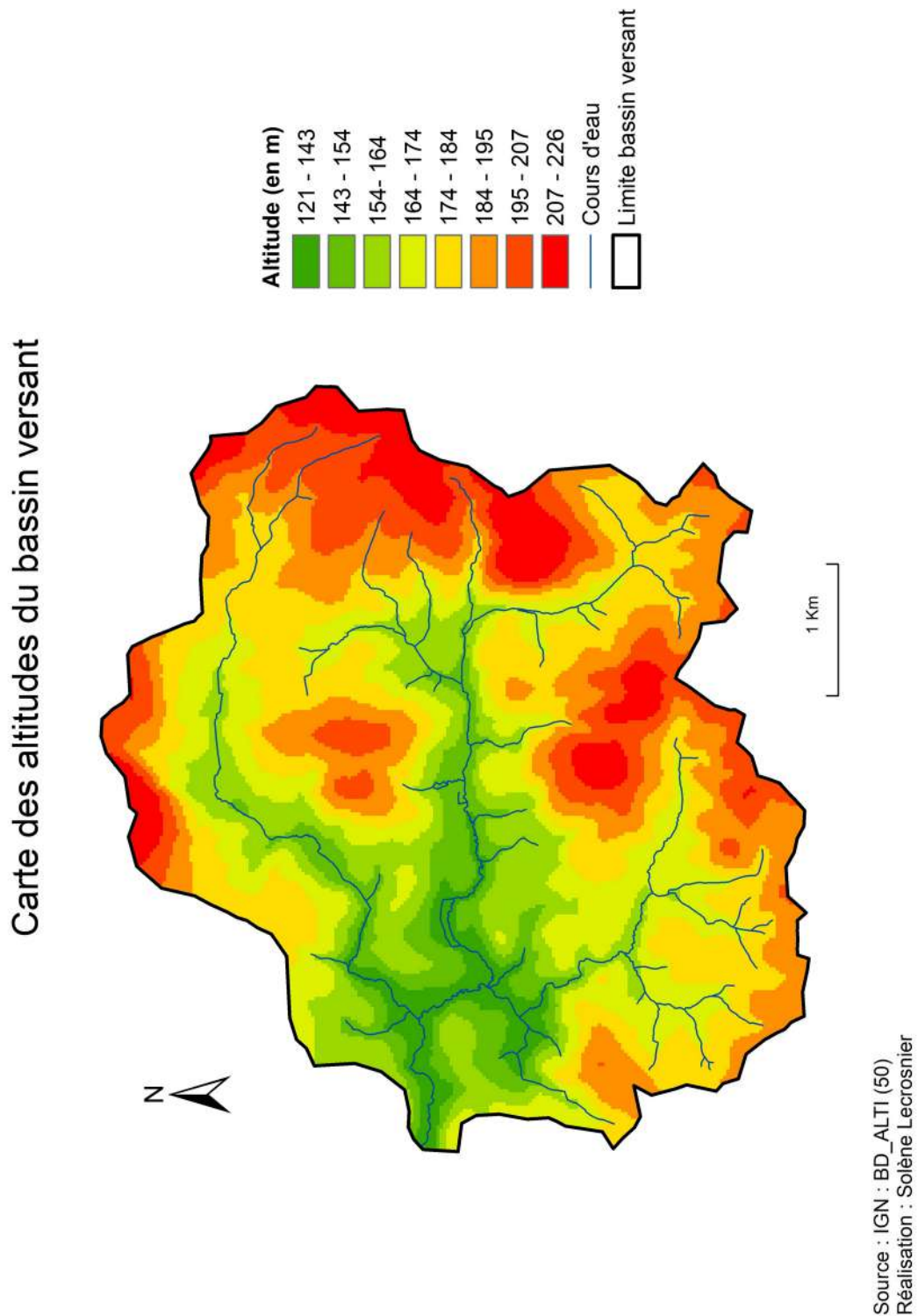


Figure 8 : Carte des altitudes du bassin versant.

2.3.2.4. Un bassin versant drainé par l’Airou et ses affluents

Le bassin versant est drainé par plusieurs cours d’eau permanents et temporaires. Parmi les cours d’eau permanents on retrouve l’Airou et le cours d’eau de la Nouette qui est un affluent de l’Airou en rive gauche. Le principal cours d’eau intermittent est le cours d’eau de la Marchandière localisé au nord du bassin versant. La grande majorité des affluents sont des affluents temporaires mais on trouve trois affluents permanents qui rejoignent l’Airou. Au total on compte environ 40km de cours d’eau sur ce bassin versant, tout régime confondu.



La Marchandière au niveau de son exutoire



L’Airou au niveau de l’exutoire du bassin-versant.



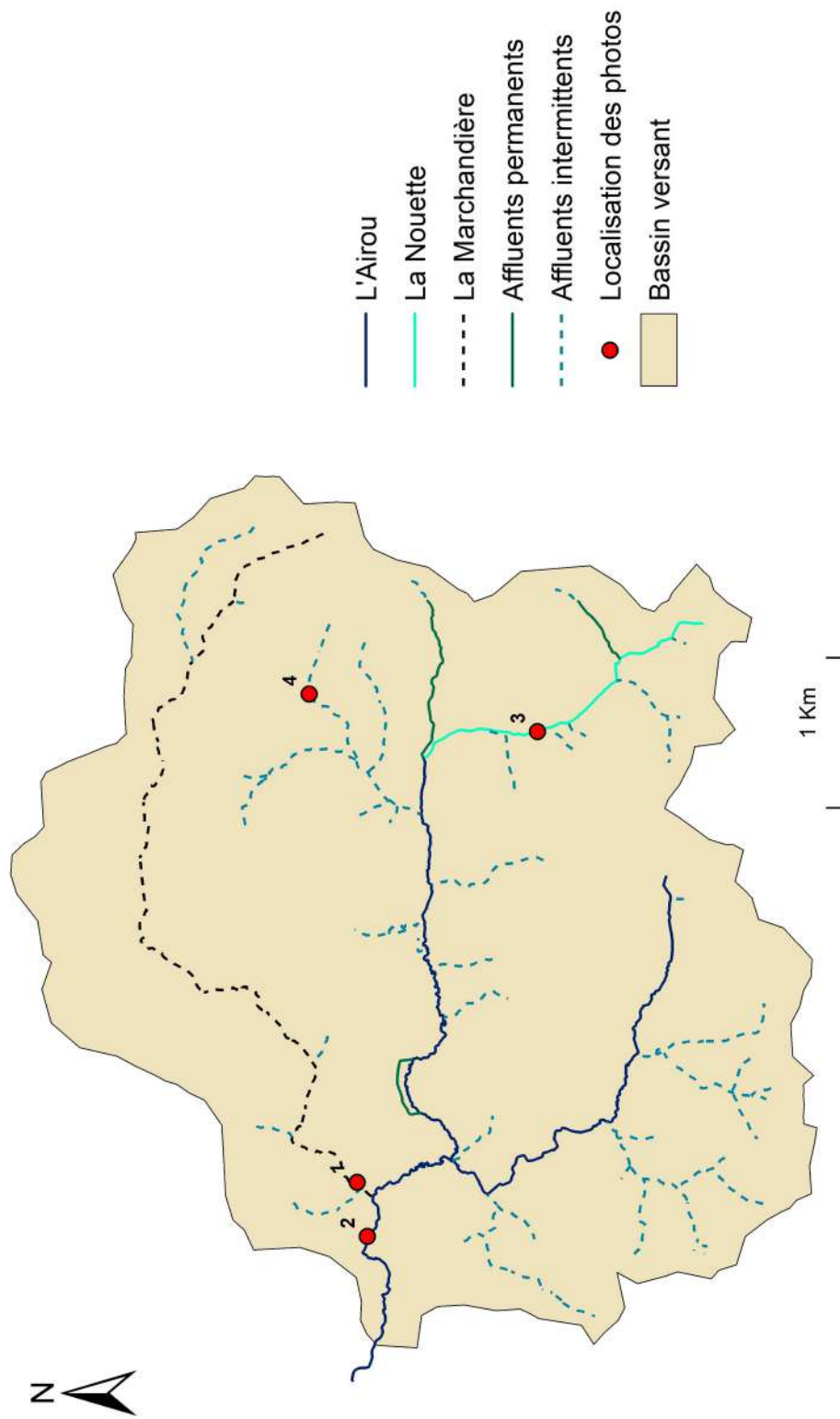
La Nouette



Affluent temporaire de l’Airou

Figure 9 : Photographies des différents cours d’eau du bassin versant. Sources : S.Lecrosnier (28/12/20)

Présentation des cours d'eau et affluents du bassin versant



Sources : IGN : BD_TOPO
Réalisation : Solène Lecrosnier

Figure 10 : Carte des cours d'eau et affluents du bassin versant.

Du fait de l'imperméabilité des sols, les débits des différents cours d'eau du bassin versant sont fortement dépendants des précipitations. Les deux photos suivantes ont été prises au niveau de l'exutoire du bassin versant à cinq mois d'intervalle, l'une en période hivernale et pluvieuse et l'autre en période printanière et sèche. On voit bien la différence à la fois sur le débit du cours d'eau mais également sur sa turbidité.



Exutoire du bassin versant (tunnel permettant le passage du cours d'eau sous l'A84)

Figure 11 : Photographies à l'exutoire du bassin versant à cinq mois d'intervalle. Sources : S.Lecrosnier (28/12/20 ; 20/05/21).



Cette troisième photo a également été prise en période pluvieuse au niveau de l'exutoire, on voit que le cours d'eau déborde ici largement de son lit. L'Airou, comme l'ensemble du cours d'eau de la Sienne, est donc sensible aux phénomènes de crues.



L'Airou à l'exutoire du bassin versant en période hivernale et pluvieuse

Figure 12 : Photographie à l'exutoire du bassin versant lors d'un épisode de crue. Source : S.Lecrosnier (28/12/20).

2.3.2.5. Un climat pluvieux

Le sud-Manche est connu pour être l'une des régions les plus arrosées de Normandie et pour être beaucoup moins sensible à l'effet temporisateur de la mer. Les températures sont donc plus variables d'une saison à une autre. La station météorologique de Fontenermont dans le Calvados est la plus proche du site d'étude, à 12km. La commune de Fontenermont fait maintenant partie de la nouvelle commune Noues de Sienne. Ce sont donc les données de cette station qui seront utilisées afin de réaliser un suivi des précipitations sur le bassin-versant. Cette station n'a cependant été installée qu'en décembre 2019. Afin d'obtenir la normale climatique, une autre station météo sera utilisée à savoir celle de Coulouvray-Boisbenâtre, située à 15km du site d'étude.

Localisation des deux communes de référence pour les relevés météorologiques

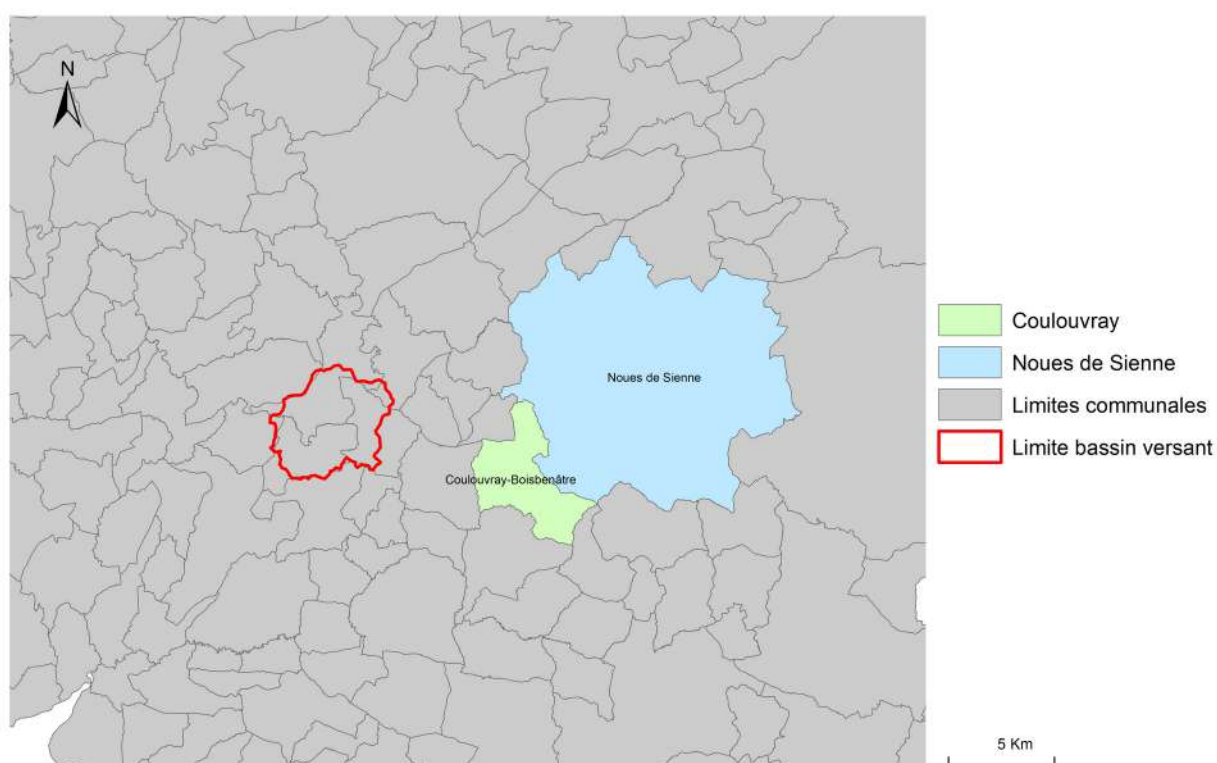
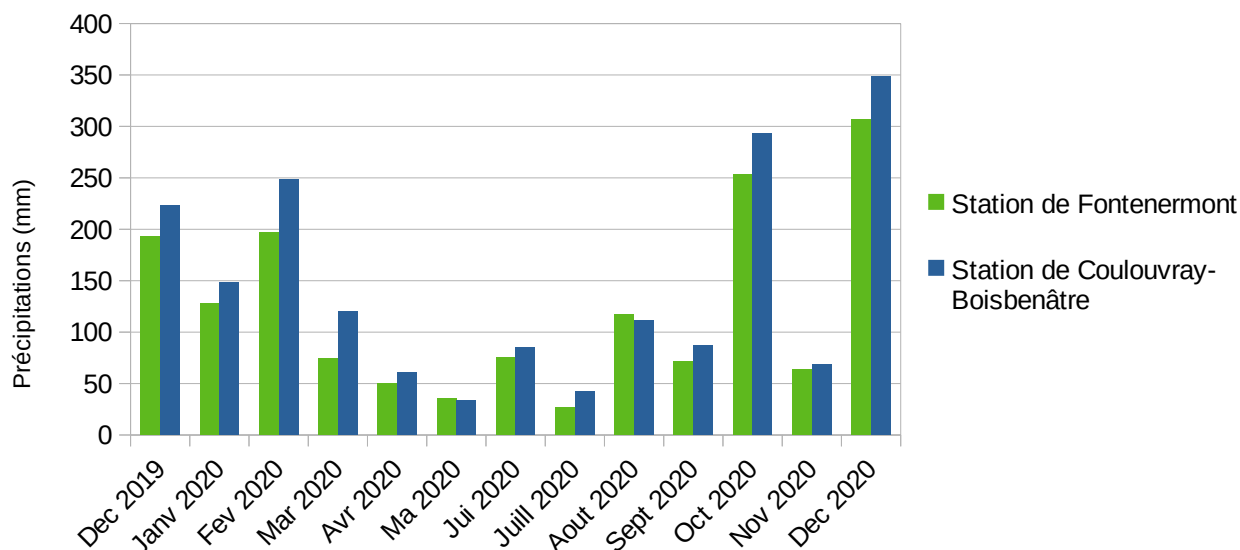


Figure 13 : Carte de localisation des communes de référence pour les relevés météorologiques.

Dans le but de montrer la pertinence de l'utilisation de cette station dans le calcul de la normale climatique, les cumuls pluviométriques de décembre 2019 à décembre 2020 pour les stations de Fontenermont et de Coulouvray-Boisbenâtre sont comparés dans le diagramme en colonne suivant.

Comparaison des cumuls pluviométriques mensuels pour les stations de Fontenermont et Coulouvray-Boisbenâtre de décembre 2019 à décembre 2020



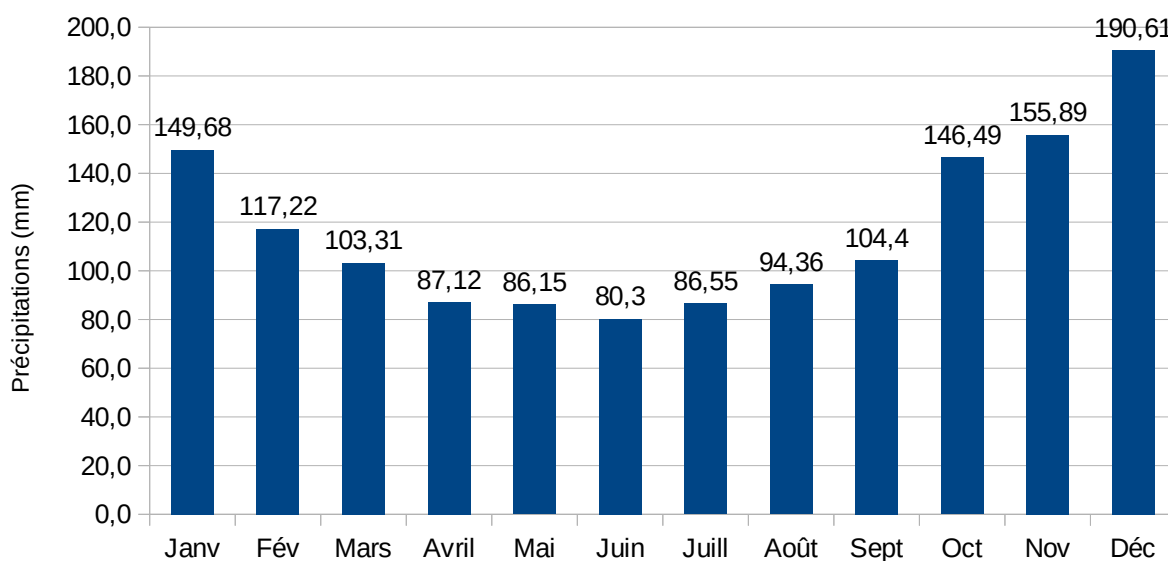
Sources : Infoclimat, Météo France

Figure 14 : Graphique en barres de comparaison des cumuls pluviométriques mensuels des stations de Fontenermont et Coulouvray-Boisbenâtres. Réalisation : S.Lecrosnier.

La station de Coulouvray-Boisbenâtre enregistre des cumuls pluviométriques légèrement supérieurs à ceux de Fontenermont, l'écart est en moyenne de 23mm sur la période étudiée. 300mm de pluie ont été comptabilisés en plus à la station de Coulouvray-Boisbenâtre sur la période.

La normale climatique suivante a été calculée grâce aux moyennes de cumuls pluviométriques mensuels de 1991 à 2020. Sur cette période on peut voir que c'est le mois de décembre qui est le plus arrosé, suivi par novembre puis janvier. Le minimum est observé en juin avec tout de même 80,3mm de pluie comptabilisés. Le cumul total est de 1 402mm. Pour la normale climatique calculée de 1981 à 2010, le cumul total était de 1 378mm, on observe donc une légère hausse des précipitations. En comparaison, la station de Caen-Carpiquet enregistre 740mm de pluie sur la période 1981-2010. La station de Coutances, située non loin de l'exutoire du bassin versant de la Sienne, enregistre une moyenne de 1 061mm sur cette période.

Normale climatique pour la station de Coulouvray-Boisbenâtre de 1991 à 2020 (cumuls pluviométriques)



Sources : Météo France

Figure 15 : Graphique en barres présentant la normale climatique de 1991 à 2020 à Coulouvray-Boisbenâtre. Réalisation : S.Lecrosnier.

2.3.2.6. Un bassin versant agricole partagé entre prairies bocagères et parcelles cultivées

Comme pour l'ensemble du bassin versant de la Sienne, le bassin versant étudié est majoritairement occupé par des exploitations agricoles. La densité de population y est très faible. L'activité prédominante en terme d'agriculture est l'élevage laitier. Selon le recensement du Registre Parcellaire Graphique (RPG) de 2019, ce sont les prairies qui dominent sur ce bassin versant. Trois types de prairies sont présentes sur le bassin versant en 2019 : les prairies permanentes, les prairies en rotation longue de six ans ou plus et enfin les autres prairies temporaires de cinq ans ou moins. Le maïs à ensilage est également très présent sur le bassin versant avec 124 îlots de culture recensés sur les 680 îlots du bassin versant. On trouve ensuite d'autres cultures plus marginales et notamment céréalières : l'avoine d'hiver, le blé tendre d'hiver, le colza d'hiver, le maïs, l'orge d'hiver ou encore la triticale d'hiver. Au total, en 2021, on recense

1 025 parcelles agricoles comprenant 817 prairies et 208 parcelles cultivées en culture d'hiver et de printemps. En terme de surface cela représente 521ha de parcelles cultivées et 1 090ha de prairies. On observe une différence entre le sud du bassin versant et le nord. En effet le long de la Nouette au sud-est du bassin, les parcelles sont majoritairement des parcelles cultivées et de plus grande taille.

Exemples de parcelles cultivées dans le bassin versant



Photo 1



Photo 2



Photo 3



Photo 4

Photo 1 : culture de printemps (sud du bassin versant)

Photo 2 : culture de printemps (sud du bassin versant)

Photo 3 : culture d'hiver (sud du bassin versant)

Photo 4 : culture de colza (nord du bassin versant)

Figure 16 : Photographies de parcelles cultivées sur le bassin versant. Sources : S.Lecrosnier (28/12/20 ; 29/03/21 ; 12/04/21).

Au nord du bassin versant on trouve un paysage bocager, morcelé de petites à moyennes prairies.

Exemples de prairies dans le nord du bassin versant



Figure 17 : Photographies de prairies du bassin versant. Sources : S.Lecrosnier (30/03/21 ; 12/04/21 ; 20/04/21).

On dénombre 229ha de surfaces bâties sur le bassin versant, ces surfaces prennent en compte les habitations ainsi que les jardins individuels. 32 mares et étangs sont recensés sur le bassin versant. Concernant les surfaces boisées, on en dénombre 138ha. Les deux plus grandes de ces surfaces se trouvent au nord du bassin versant, avec une superficie de 9ha chacune. L'une est située au nord-est et l'autre au nord-ouest, au niveau de l'exutoire du bassin versant.



Figure 18 : Surface boisée au niveau de l'exutoire du bassin versant. Source : S.Lecrosnier (20/05/21).

En terme de pourcentages, l'occupation du sol du bassin versant en 2021 se compose de la manière suivante (la partie « autres » correspond principalement aux axes routiers) :

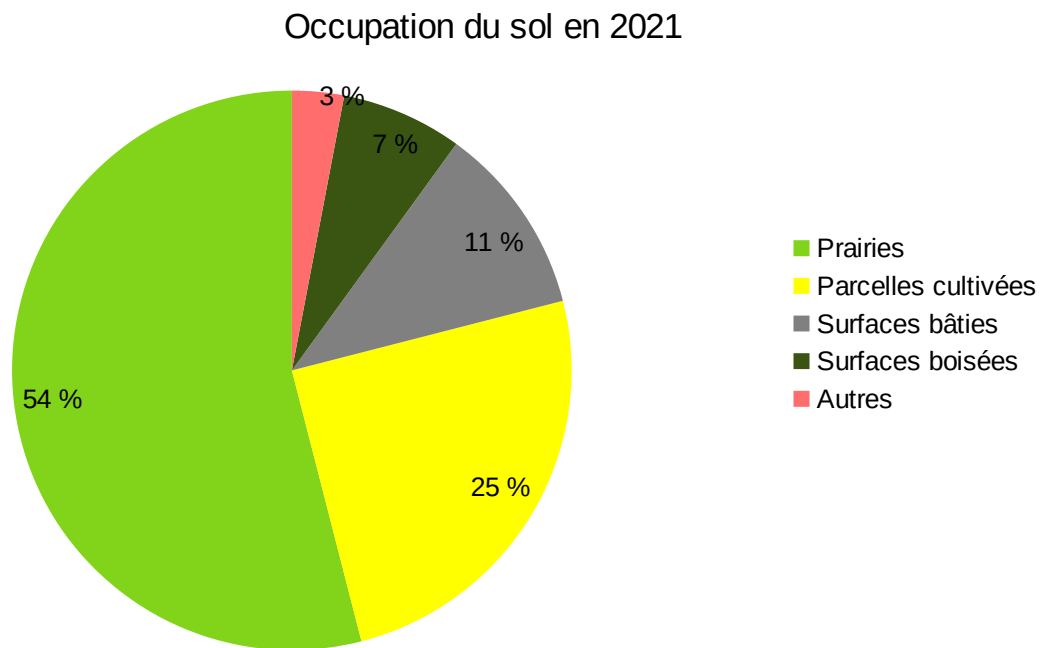


Figure 19 : Graphique en secteur présentant l'occupation du sol en 2021. Réalisation : S.Lecrosnier.

La carte suivante présente l'occupation du sol sur le bassin versant.

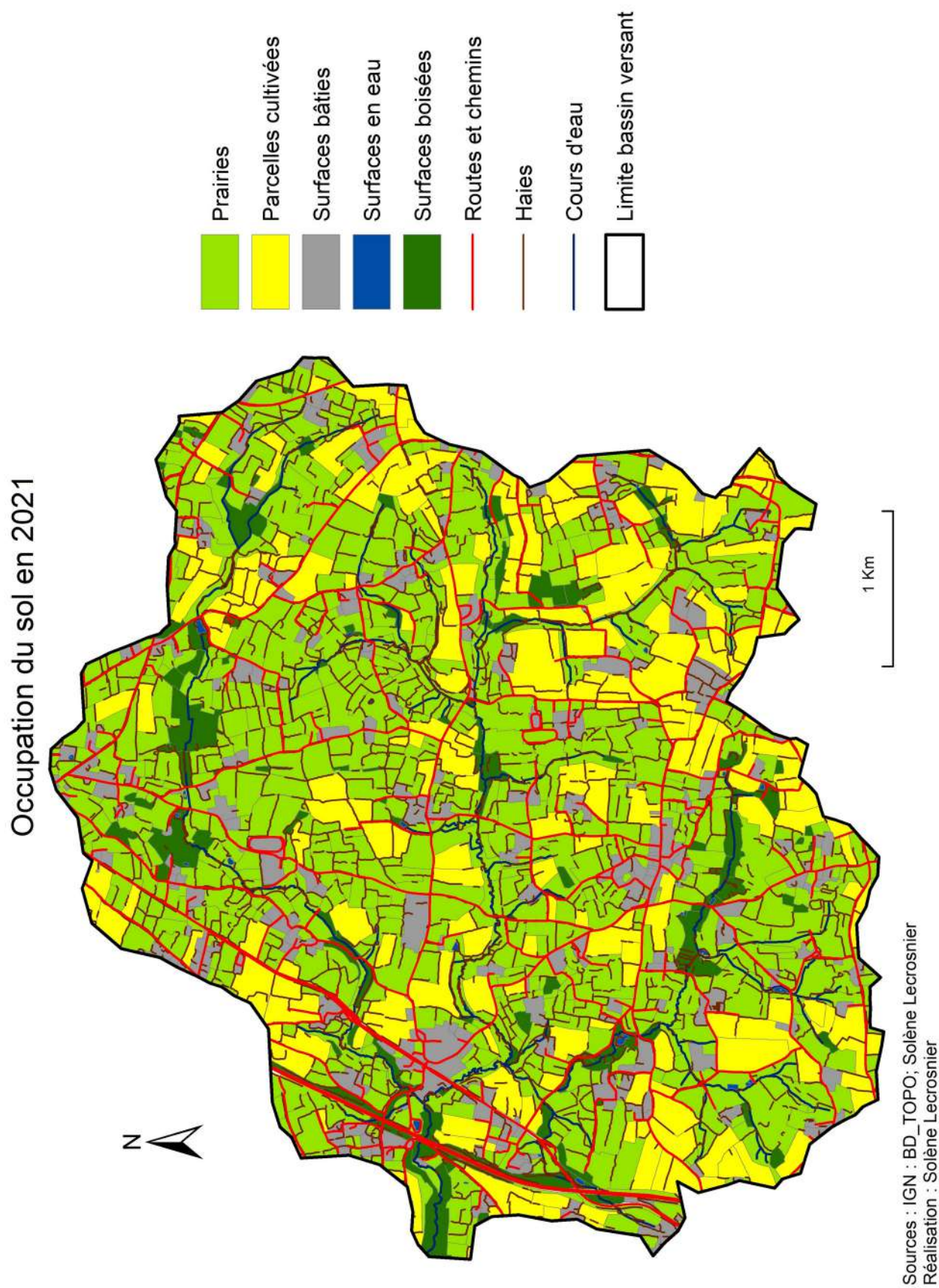


Figure 20 : Carte d'occupation du sol en 2021.

2.4. Pourquoi travailler sur ce bassin versant dans le cadre d'une étude de l'évolution des connectivités hydrologiques en lien avec les évolutions du paysage ?

2.4.1. Un paysage qui a évolué dans un contexte naturel propice aux phénomènes de transferts hydro-sédimentaires

D'un point de vue purement pratique, il était impossible à l'échelle d'une seule année de recherche de travailler sur l'ensemble du bassin versant de 580km², il était donc nécessaire de réduire la superficie étudiée.

Le site d'étude a connu de nombreuses mutations paysagères qui seront exposées plus tard dans ce mémoire. Ce bassin versant semble donc pertinent dans une étude dont le but est de mettre en lien les évolutions du paysage et celles des connectivités hydrologiques.

Le sous-bassin versant étudié repose sur des granodiorites en majorité. La présence de fortes pentes entraînant un relief énergique ainsi que des précipitations importantes, comme les mesures relevées à la station météo de Fontenermont le montre, implique des processus de ruissellement et un cours d'eau dont le niveau est fortement dépendant des précipitations. Ce bassin versant possède en effet un substrat géologique original tout comme sa topographie. Ces deux éléments le différencie des autres sous bassin versant de la Sienne. Les travaux mis en place par le SIAES pour lutter contre le ruissellement et le fait que le bassin de l'Airou soit classé zone Natura 2000 montre bien que des processus de ruissellement existe mais également que c'est un territoire où il a des enjeux qu'ils soient économiques (liés à l'agriculture) ou environnementaux (protection d'espèces aquatiques). On applique donc une étude diachronique des connectivités à un site possédant des caractéristiques naturelles propices aux phénomènes de transferts hydro-sédimentaires.

Le bassin versant est agricole, avec en grande majorité des prairies pour l'élevage laitier bovin, le site d'étude est donc bocager. Cela complexifie l'étude de l'impact du paysage sur les connectivités hydrologiques mais la rend originale dans le sens où peu de travaux ont été réalisés dans ce type de paysage.

2.4.2. Un bassin versant et un cours d'eau qui ont fait l'objet de peu d'études

Peu d'études ont été réalisées sur la Sienne et son bassin versant, même si cela peut être ennuyant pour par exemple comparer des résultats, l'apport de données sur ce bassin versant de Rouffigny peut être un point de départ pour étudier un bassin versant qui repose sur un substrat majoritairement imperméable et qui a évolué au cours des années. Peu d'études ont également été réalisées dans de telles conditions, les données climatiques, géologiques ou encore pédologiques étant différentes dans d'autres études.

III. L'évolution des connectivités hydrologiques dans un bassin versant bocager au cours de trois années d'étude : méthodologie mise en place

3.1. Présentation du système multi-agents utilisé

3.1.1. Présentation du modèle LASCAR (NetLogo)

On peut définir un système multi-agents de la manière suivante : « *Un système multi-agents (Sma) est constitué d'un ensemble de processus informatiques se déroulant en même temps, donc de plusieurs agents vivant au même moment, partageant des ressources communes et communiquant entre eux.* » [Ferber, 1995]. Concrètement le but est de mettre en relation des entités différentes et autonomes qui ont un impact réciproque sur leurs comportements. Le modèle utilisé dans cette étude est le modèle LASCAR développé sur la plateforme NetLogo. Ce modèle a été développé au laboratoire LETG de l'Université de Caen, par Romain Reulier [Reulier, 2015]. La plateforme NetLogo est une plateforme permettant la programmation de modélisations multi-agents.

Sur LASCAR, deux agents sont utilisés afin de modéliser les interactions entre le paysage et les précipitations :

- les agentsgouttes qui sont des agents mobiles



- les occpatches qui sont des agents spatialisés



Les agentsgouttes permettent de représenter les précipitations de manière discrétisée c'est à dire goutte par goutte, de ce fait ces entités sont individuelles. Chaque agentgoutte possède un volume d'eau renseigné par la variable « *hauteur_eau* ». Il se déplace dans le modèle selon l'altitude de chaque patch (voir plus bas) renseignée par le MNT et interagisse avec les patches selon l'occupation du sol renseignée. Du début à la fin de la modélisation, les agentsgouttes savent sur quel patch ils se trouvent.

Les occpatches ou patches, permettent de représenter l'occupation du sol sur LASCAR. Chaque patch représente une portion de l'espace d'étude, à la différence des agentsgouttes ce sont donc des agents non mobiles. Les occpatches sont de forme carrées et sont caractérisés par différents attributs comme l'occupation du sol, mais également par différentes variables comme l'altitude. Un travail préalable sous SIG est nécessaire afin de renseigner les différents attributs et variables des patches. Sous LASCAR, l'occupation du sol est divisée en six classes. Chacune de ces

classes possède une valeur numérique permettant au logiciel de modélisation de les identifier et d'attribuer aux patches une couleur en fonction de leur occupation.

Ces valeurs numériques sont les suivantes :

- Surfaces cultivées : 5000
- Surfaces en herbes : 3000
- Surfaces en eau : 2001
- Surfaces bâties : 1000
- Cours d'eau : 100
- Routes et fossés : 20
- Haies : 10

Le logiciel LASCAR permet de mettre en relation les agentsgouttes et les patches, c'est à dire d'étudier la circulation de ces agents en fonction des attributs et des variables de chaque patch. Les agentsgouttes ont deux actions dans la modélisation : se mouvoir et mourir. Chaque agent possède en effet une quantité d'eau qui s'amenuise au fur et à mesure des interactions avec les patches d'occupation du sol. Par exemple, la quantité d'eau des agentsgouttes va baisser si ils entrent en contact avec une prairie. Quand la quantité d'eau de ces agents atteint 0 ou quand ils atteignent l'exutoire, les agents meurent.

L'interface LASCAR se présente de cette manière :

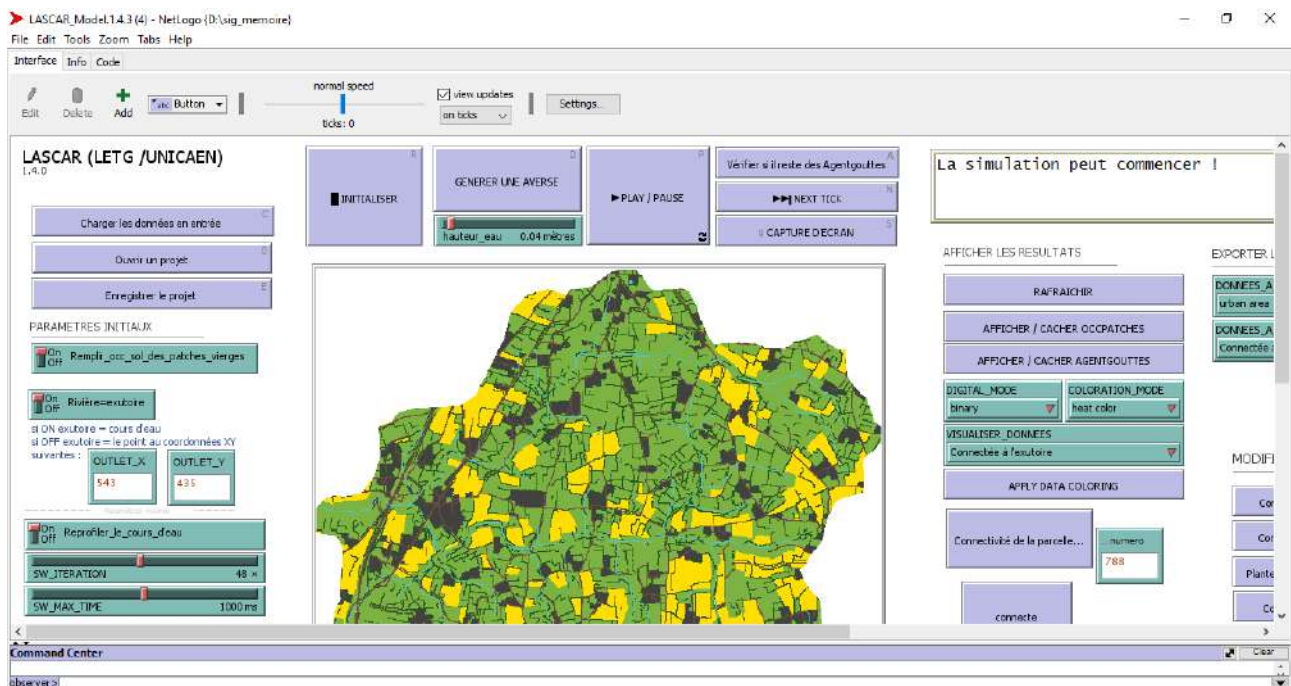


Figure 21 : Capture d'écran de l'interface LASCAR. Source : S.Lecrosnier.

Une fois les données chargées, celle-ci apparaissent au centre avec une couleur associée à leur occupation du sol. Ces couleurs sont les suivantes :

- Surfaces cultivées : jaune
- Surfaces en herbes : vert clair
- Surfaces en eau : bleu
- Surfaces bâties : gris
- Cours d'eau : bleu
- Routes et fossés : marron
- Haies : vert foncé

On peut ensuite générer une averse, c'est-à-dire faire apparaître les agentsgouttes grâce au bouton de simulation « *GENERER UNE AVERSE* ». En appuyant sur « *PLAY/PAUSE* », on lance la modélisation, les agentsgouttes vont alors se déplacer sur les patches en fonction de leurs caractéristiques jusqu'à ce qu'ils meurent.

Les différents résultats obtenus peuvent ensuite être exportés au format ASCII grâce à l'élément « *Exporter les résultats* ».

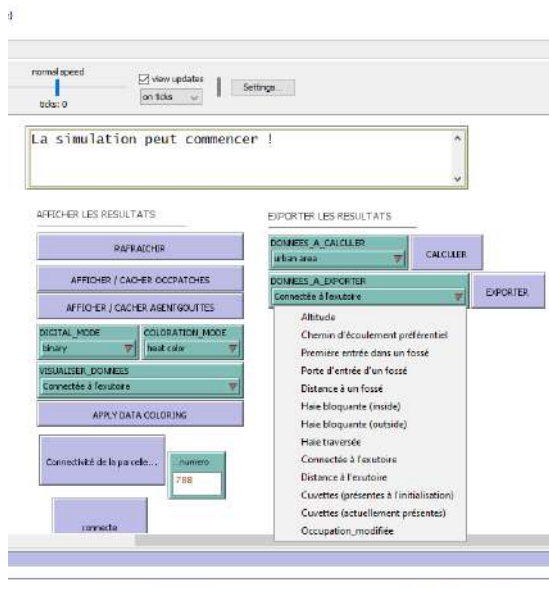


Figure 22 : Deuxième capture d'écran de l'interface LASCAR. Source : S.Lecrosnier.

Dans les modélisations qui seront présentées dans ce mémoire, les cours d'eau sont placés en tant qu'exutoire. C'est en général suffisant pour étudier des bassins versants d'une taille raisonnable. C'est donc à partir des cours d'eau que l'on peut lire les chemins d'écoulement. Il est possible de faire varier l'intensité des précipitations sur le modèle. Pour les modélisations qui seront présentées le choix a été fait de garder la valeur par défaut, à savoir une hauteur d'eau de 0,04m. Cette hauteur d'eau correspond à une pluie de 40mm tombant d'un seul coup sur le bassin versant.

3.1.2. Données nécessaires à la modélisation

Les données nécessaires à la modélisation sous LASCAR sont les suivantes :

- Un modèle numérique de terrain (MNT) du terrain d'étude avec une résolution de 10m
- Le réseau hydrographique
- Les fossés
- Les haies
- Les routes et les chemins
- L'occupation du sol : surfaces en herbe, surfaces cultivées, surfaces en eau et surfaces bâties

Les surfaces en herbe comprennent les prairies mais également les surfaces boisées, les landes ou encore les vergers. De même, on ne fait pas ici de distinction entre les surfaces cultivées, par exemple entre les différentes cultures (blé, orge, colza,...) et leurs saisons d'exploitation (culture d'hiver, culture de printemps,...). Les surfaces en eau comprennent les mares et les étangs. Les surfaces bâties comprennent les surfaces imperméabilisées qui ne sont pas des routes, c'est le plus souvent les surfaces d'habitation. On intègre les jardins des particuliers à ces surfaces bâties, en effet les jardins possèdent leur propre réseau d'assainissement par le biais des égouts et des buses. Il ne serait donc pas pertinent d'intégrer ces surfaces comme si elles jouaient un rôle dans les écoulements de surface naturels.

3.2. Mise en place de la modélisation en 2021

3.2.1. Recueil des données nécessaires à la modélisation en 2021 : complémentarité du travail de terrain et de digitalisation

Afin d'obtenir les données nécessaires à la modélisation, un important travail de terrain a été mis en place afin de caractériser l'occupation du sol, de relever les réseaux de fossés ainsi que les entrées de champs. Les modifications du paysage ont également été prises en compte : construction de surface bâtie à la place d'anciennes surfaces agricoles, suppressions de chemins ou de routes... Ces données ont été relevées à pied. Les photos aériennes de l'IGN ont été utilisées comme plans. Les routes et les chemins issus de la BD_TOPO étaient représentés sur ces photos aériennes pour faciliter le repérage dans l'espace. Le bassin versant a été découpé en quatre parties : quart nord-ouest, quart nord-est, quart sud-ouest et quart sud-est. Chaque quart, d'une superficie d'environ 5km², a nécessité entre quatre et cinq jours de travail de terrain. Une fois les données relevées sur papier, elles ont été digitalisées sur ArcMap toujours à partir des orthophotos de l'IGN. L'image ci-dessous présente la méthode mise en place pour relever les données sur le terrain, sur papier. Les lettres noires correspondent à l'occupation du sol, les points bleus aux entrées de champs et les lignes vertes aux fossés.

Exemple d'une des cartes utilisées pendant les sorties de terrain afin de récupérer les données nécessaires à la modélisation

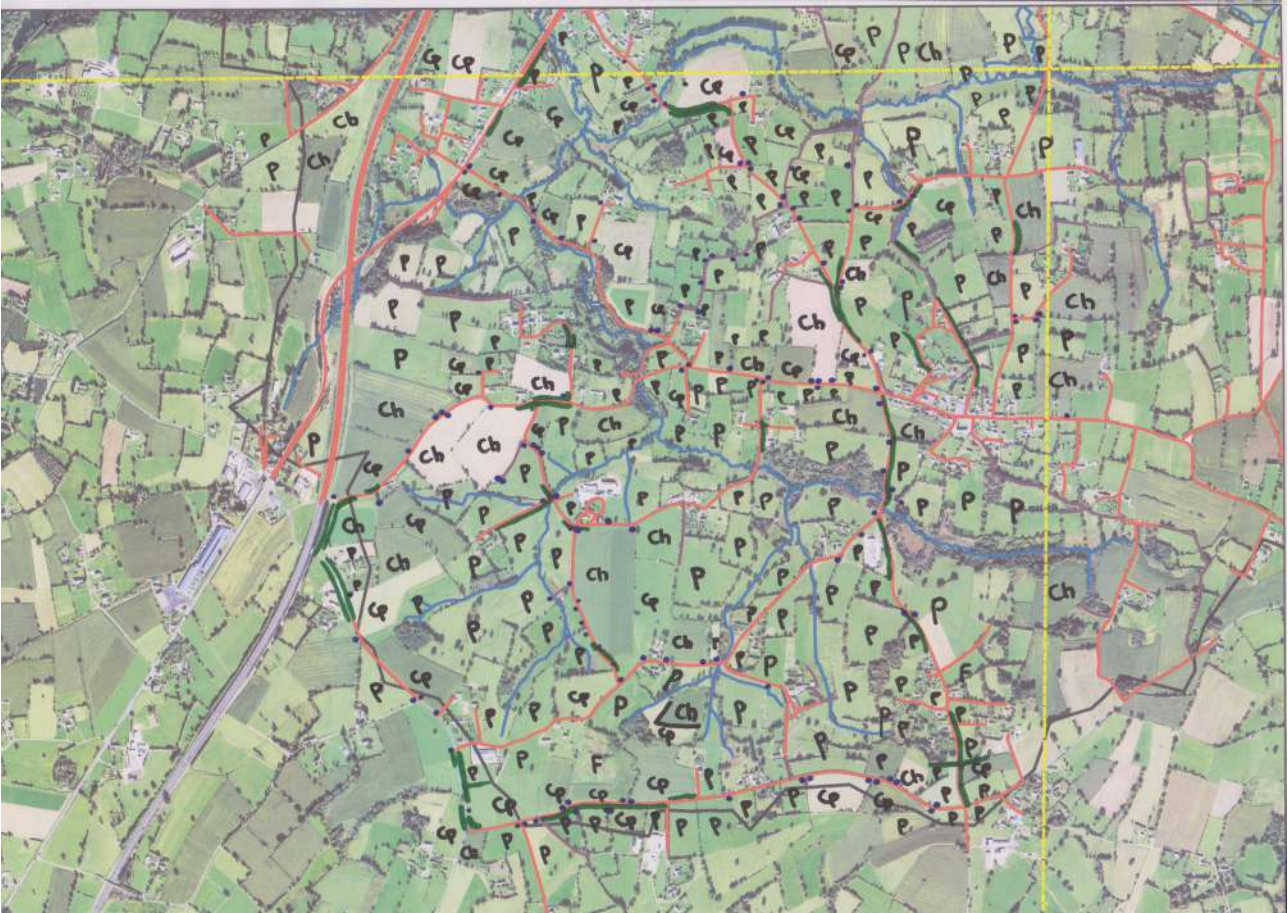


Figure 23 : Exemple d'une des cartes utilisées pour l'inventaire de terrain (quart sud-ouest). Sources : IGN ; S.Lecrosnier.

3.2.1.1. Modèle Numérique de Terrain (MNT)

Le MNT utilisé dans cette étude est issu du site de téléchargement des données de l'IGN : Géoservices. Le MNT utilisé a une résolution initiale de 25m et concerne le département de la Manche, ce MNT a par la suite été recalibré pour avoir une résolution de 10m (voir 3.2.2).

3.2.1.2. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique utilisé sur LASCAR a été généré depuis le MNT. On modifie la symbologie du MNT afin de visualiser les valeurs d'altitude les plus basses permettant ainsi de faire apparaître le cours d'eau.

3.2.1.3. Fossé

A l'heure actuelle aucune donnée n'est disponible pour identifier les réseaux de fossés, le travail de terrain est donc indispensable. Celui-ci consiste à longer tous les axes routiers et piétons afin de voir si des fossés sont présents ou non. Ce travail de terrain est long et peut se révéler parfois complexe pour savoir si les entités creusées le long des routes peuvent réellement être considérées comme des fossés du fait de l'enherbement très important. L'inventaire de terrain a en effet été réalisé au printemps, au moment où la végétation est donc relativement abondante. Les fossés présents entre les parcelles agricoles ont également été relevés, bien qu'ils soient très peu nombreux sur l'ensemble du bassin versant.

Fossés en bord de route



Fossé entre deux parcelles



Figure 24 : Photographies de fossés présents sur le bassin versant. Sources : S.Lecrosnier (30/01/21 ; 30/03/21)

3.2.1.4. Haie

Une toute nouvelle base de données a été mise à disposition par l'IGN le 24 juin 2020 : la BD_BOCAGE. Cette base de données permet de localiser les tronçons de haies sur un territoire. Cependant, elle n'offre pas d'autres informations notamment sur la nature de ces haies, à savoir si celles-ci sont sur talus ou non. Au total, l'IGN recense 3 218 tronçons de haies sur le bassin versant de Rouffigny. Il a évidemment été impossible de vérifier la conformité de la base de données avec la réalité du terrain pour chaque tronçon de haie. Les haies qui ont fait l'objet d'une vérification terrain sont notamment les haies situées en bord de route ou visibles depuis les axes routiers, sans pouvoir réellement les quantifier. Cette base de données a donc été retravaillée par rapport à ce qui a été vu sur le terrain mais également car la BD_BOCAGE recense des haies présentes dans les

jardins des particuliers. Premièrement, les haies dans les jardins ne présentent pas un grand intérêt dans les connectivités hydrologiques « naturelles » et deuxièmement, la digitalisation de ces haies est très approximative. Il n'était pas rare de voir un tronçon de haie traverser une route ou une maison, dans ce cas les haies ont été supprimées. Les haies ont parfois du être redécoupées car la base de donnée digitalise parfois le réseau de haies et pas les haies en elle-même. Cette base de donnée est donc très utile pour localiser les haies, il est cependant indispensable de la retravailler afin qu'elle corresponde au mieux à la réalité actuelle du terrain.



Haies supprimées



Haie redécoupée en deux entités

*Figure 25 : Exemples de haies ayant fait l'objet d'un travail de re-digitalisation.
Sources : IGN ; S.Lecrosnier.*

3.2.1.5. Route et chemin

Les routes et les chemins sont également issus de la base de données topographiques de l'IGN, enrichis par les observations de terrain. Par exemple, sur des zones nouvellement bâties, certaines routes n'existaient plus et ont donc été supprimées de la base de données afin de ne pas fausser les résultats.

3.2.1.6. Occupation du sol

L'occupation du sol a été relevée grâce au travail de terrain qui a permis principalement de relever l'occupation des parcelles entre parcelles en herbe et parcelles cultivées. Au total 1 025 parcelles ont fait l'objet d'un recensement de leur occupation par le biais de ce travail de terrain. Les zones de bâties et les zones boisées ont été relevées par un travail de digitalisation à partir des ortho-photos de l'IGN et enrichi par les modifications relevées sur le terrain. Le découpage cadastral s'est fait à partir de la BD _PARCELLAIRE de l'IGN. Cette base de données a également été retravaillée à partir des ortho-photos et du travail de terrain.

3.2.1.7. Les entités ponctuelles : surfaces en eau et entrées de champ

En plus de l'occupation du sol, les entrées de champs ont également été relevées lors des sorties de terrain, 620 entrées de champs ont été relevées sur le terrain puis digitalisées. Les mares et les étangs ont été relevés par le biais de la base de données topographiques de l'IGN, sous l'appellation SURFACE_EAU. Il a ensuite été possible de vérifier la conformité de ces données sur le terrain.

Le tableau suivant récapitule les données nécessaires ainsi que leurs modes d'acquisition.

Récapitulatif des différentes sources de données

	Base de données	Producteurs	Format	Avantages	Inconvénients
MNT	BD_ALTI	IGN	Raster		Résolution trop importante
Réseau hydrographique	BD_ALTI	IGN	Raster		
Fossé		S. Lecrosnier	.shp	Données précises et actualisées	Temps d'acquisition
Haie	BD_BOCAGE	IGN, S. Lecrosnier	.shp	Permet de faciliter et de rendre plus rapide le travail de terrain	Digitalisation parfois approximative qui nécessite de retravailler les données
Route	BD_TOPO	IGN, S. Lecrosnier	.shp		Pas d'informations sur la nature des haies
Occupation du sol	BD_PARCELLAIRE	IGN, S. Lecrosnier	.shp	Données précises et actualisées	Temps d'acquisition
Entités ponctuelles	BD_TOPO	Entrées de champs : S. Lecrosnier Maires et étangs : IGN, S. Lecrosnier	.shp	Entrées de champs : données précises et actualisées Maires et étangs: données de la base de données suffisantes	Entrées de champs : temps d'acquisition Maires et étangs : difficulté pour vérifier la conformité de la base de données avec le terrain surtout à partir du printemps

Figure 26 : Tableau récapitulatif des différentes sources de données. Source : S. Lecrosnier.

3.2.2. Modifications des données sous ArcMap avant modélisation sur LASCAR

Plusieurs modifications ont du être réalisées sous ArcMap avant d'intégrer les données dans le modèle LASCAR. Tout d'abord concernant le MNT, il a fallu recalibrer la résolution initiale de 25m à 10m. En effet, la résolution de l'environnement de simulation sous LASCAR est fixée à 10m, toutes les données raster doivent donc avoir cette résolution.

Les modifications les plus importantes ont été réalisées sur les routes, les haies et les fossés. La résolution de 10m est trop importante pour les fossés qui dépassent rarement une largeur de 1m, les fossés situés en bord de routes (la grande majorité des fossés pour ce bassin versant) ont donc été supprimés afin d'éviter une sur-représentation des entités linéaires dans le modèle. En effet en imaginant qu'une route est bordée de fossés de part et d'autre, sans aucune modification préalable on se retrouverait avec un linéaire de 30m de large, ce qui est complètement disproportionné par rapport à la réalité.

L'étape la plus longue dans les modifications de pré traitement est le renseignement des tronçons de routes bordées par des haies de part et d'autre ou uniquement d'un seul côté. Le but est d'obtenir dans le modèle les tronçons de routes bordées de part et d'autre par des haies sans que celles-ci soient « mangées » par les autres entités. Pour cela on sélectionne les tronçons de routes bordées par deux haies grâce à un champ de la table attributaire préalablement créé et on supprime les haies qui les bordent. On exporte ensuite les tronçons de routes afin d'avoir une donnée dans le modèle qui renseigne les tronçons de routes bordées par deux haies. On pourra ensuite les recréer sur LASCAR grâce à l'outil « construire une haie sur talus ». Les haies qui bordent une route sur seulement un côté doivent être décalées afin qu'elles soient bien prises en compte en tant qu'entités indépendantes des routes. Cette étape est longue car elle nécessite un redécoupage des tronçons de routes afin d'avoir les tronçons bordés par une haie, deux haies ou aucune.

Enfin toutes les données doivent être transformées en raster, assembler en un seul raster et reclasser afin d'indiquer un indice en fonction de l'occupation du sol qui permettra la modélisation.

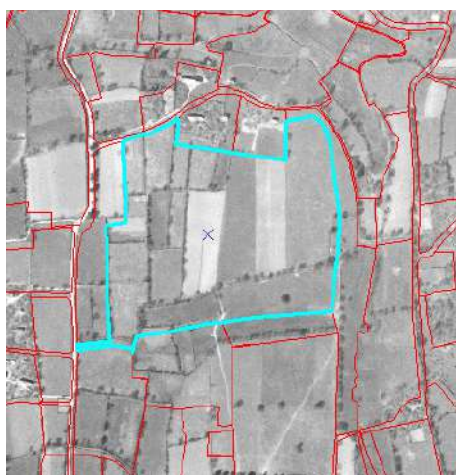
3.3. Mise en place des modélisations de 1992 et 1955 : travail de photo-interprétation

3.3.1. Choix des années d'étude

Dans le cadre de ce mémoire, le choix a été fait d'étudier l'évolution du paysage afin de mettre en lumière le rôle des différentes entités paysagères dans les transferts hydro-sédimentaires. Le remembrement des années 1970 a entraîné une réelle modification des espaces de bocage par le biais d'abattage de haies permettant l'agrandissement des parcelles. Le but de ce remembrement était d'accroître les récoltes mais également d'avoir des parcelles plus adaptées

aux nouvelles machines agricoles. Cet agrandissement des parcelles s'est principalement traduit par un arasement massif des réseaux de haies. Ces changements s'opèrent également à travers le prisme d'un changement des pratiques agricoles avec des fermes moins nombreuses mais plus productrices. La commune de Villedieu-les-Poêles abritait une laiterie dans les années 50/60 dans laquelle la majorité de la population environnante travaillait. Les petites prairies étaient donc très nombreuses. L'agrandissement des troupeaux au fur et à mesure des années pour répondre à une demande toujours plus importante a nécessairement entraîné une augmentation des parcelles cultivées afin de nourrir le bétail mais également un agrandissement des prairies. Ces changements historiques, sociologiques et économiques ont entraîné des modifications environnementales afin d'avoir un territoire adapté aux demandes et nécessités des populations. Cette étude, au-delà de l'aspect physique, rappelle l'importance de toujours s'interroger sur les besoins des populations afin de comprendre les modifications paysagères que celles-ci opèrent sur leur territoire.

Deux années d'étude ont été choisies afin de comprendre les mutations paysagères sur le bassin versant et leurs conséquences: 1955 et 1992. L'année 1955 a été choisie car celle-ci permet de voir à quoi pouvait ressembler le paysage avant le remembrement des années 70. On sait également que les pratiques agricoles étaient différentes à cette époque et que les petites exploitations tournées vers l'élevage étaient prédominantes. Les captures d'écran suivantes réalisées lors des sessions de digitalisation montrent bien l'évolution du paysage entre 2021 et 1955. Le polygone bleu correspond à une parcelle de 2021, les photos aériennes sont celles de 1955.



Capture d'écran 1



Capture d'écran 2

Figure 27 : Photos aériennes du bassin versant en 1955. Sources : IGN (Remonter le temps).

Sur la première photo on distingue environ 14 parcelles en 1955 contre 1 seule parcelle cultivée en 2021 et sur la deuxième photo on en distingue environ 12 sur une seule parcelle en prairie en 2021.

Le travail de digitalisation se base sur les photos aériennes de l'IGN, 1992 est la première année où les photos aériennes sont en couleur. Cette caractéristique permet de faciliter la digitalisation nécessaire à la modélisation. Au-delà de cet aspect pratique, l'année 1992 permet d'étudier l'évolution du paysage entre une année post-remembrement et la période actuelle. Les modifications du paysage ont en effet été très importantes pendant le remembrement, mais ces changements se sont prolongés au fil des années. Là aussi, on peut voir une évolution du paysage par le biais des photos aériennes, présentant les mêmes zones qu'en 1955, qui permettent de valider l'utilisation de cette année d'étude dans le cadre des mutations du paysage.



Capture d'écran 3



Capture d'écran 4

Figure 28 : Photos aériennes du bassin versant en 1992. Sources : IGN (Remonter le temps).

Sur la première photo on compte environ 6 parcelles et 4 sur la deuxième contre une seule en 2021. Il y a donc eu des évolutions entre 1955 et 1992 mais également entre 1992 et 2021.

3.3.2. Acquisition des données

Les données historiques ont donc été recueillies par photo interprétation. Pour les deux années d'étude, les photos aériennes ont été récupérées sur le site de l'IGN : Remonter le Temps. La BD Parcellaire de 2021 a ensuite été retravaillée pour correspondre aux photos de l'IGN géoréférencées sur ArcMap. Le même travail a été effectué pour les haies et les routes. Concernant les fossés, il est impossible de les localiser par photo-interprétation, ce sont donc les fossés de l'année 2021 qui ont été utilisés. On peut déduire que le réseau de fossé actuel représente le réseau à minima, il devait être en effet plus important dans les années passées, notamment en 1955. Les cours d'eau sont les mêmes qu'en 2021. Il était impossible de les distinguer sur les photos de 1992. Sur les photos de 1955, on les distinguait plus, il a donc été possible de voir si le réseau correspondait. Les mares ont été re-digitalisées à partir des photos de 1992, on en trouve en effet moins en 1992 qu'en 2021. On peut penser que des étangs artificiels ont été créés entre ces deux années d'étude. Les mares de 1992 ont été utilisées pour la

modélisation de 1955 afin d'être plus proche de la réalité malgré l'impossibilité de les distinguer sur les photos en noir et blanc.

3.3.3. Limite de l'étude dans l'acquisition des données

L'acquisition des données par photo-interprétation doit toujours faire l'objet d'une mise en perspective des résultats obtenus, puisque l'on parle bien d'interprétation. En effet, certaines entités sont simples à distinguer, les routes, les chemins, le bâti et les limites des parcelles. Cependant comme expliqué plus haut, il est par exemple impossible de digitaliser les fossés. Les surfaces en eau sont également très difficiles à distinguer, que cela soit les mares, les étangs mais également les cours d'eau. Les haies sont plus faciles à distinguer mais encore une fois on ne possède pas d'information sur la nature de ces haies et il est également compliqué de savoir si la haie est à un moment découpée par le biais d'une trouée de talus ou d'une entrée de champ par exemple. Pour ce qui est de l'occupation du sol, les surfaces bâties ne posent pas de problème. Les surfaces boisées sont également relativement faciles à distinguer. La distinction entre prairies et parcelles cultivées pose plus de problème. En effet pour 1992, sur des photos en couleur, on peut se fier à plusieurs éléments : la couleur de la parcelle et/ou la présence de lignes sur la parcelle indiquant un travail du sol. Cela pose tout de même des limites puisqu'il est par exemple impossible de faire la différence entre des parcelles en herbe ou des parcelles cultivées en blé là où le blé est à un stade d'évolution avancé. Sur le terrain il est possible de faire la différence entre de l'herbe et des jeunes pousses de blé ou de maïs, par photo-interprétation c'est impossible. Sur des photos en noir et blanc, comme c'est le cas pour l'année d'étude 1955, on ne peut se fier qu'à la couleur des parcelles : les parcelles blanches et les parcelles noires. Il était parfois possible de distinguer des lignes de culture. On peut également penser que les plus grandes parcelles étaient celles qui étaient cultivées.

IV. Un bassin versant bocager impacté par le remembrement agricole : présentation de l'occupation du sol en 1955, 1992 et 2021

4.1. Présentation de l'occupation du sol pour les trois années d'étude : résultats des travaux de digitalisation et de photo-interprétation

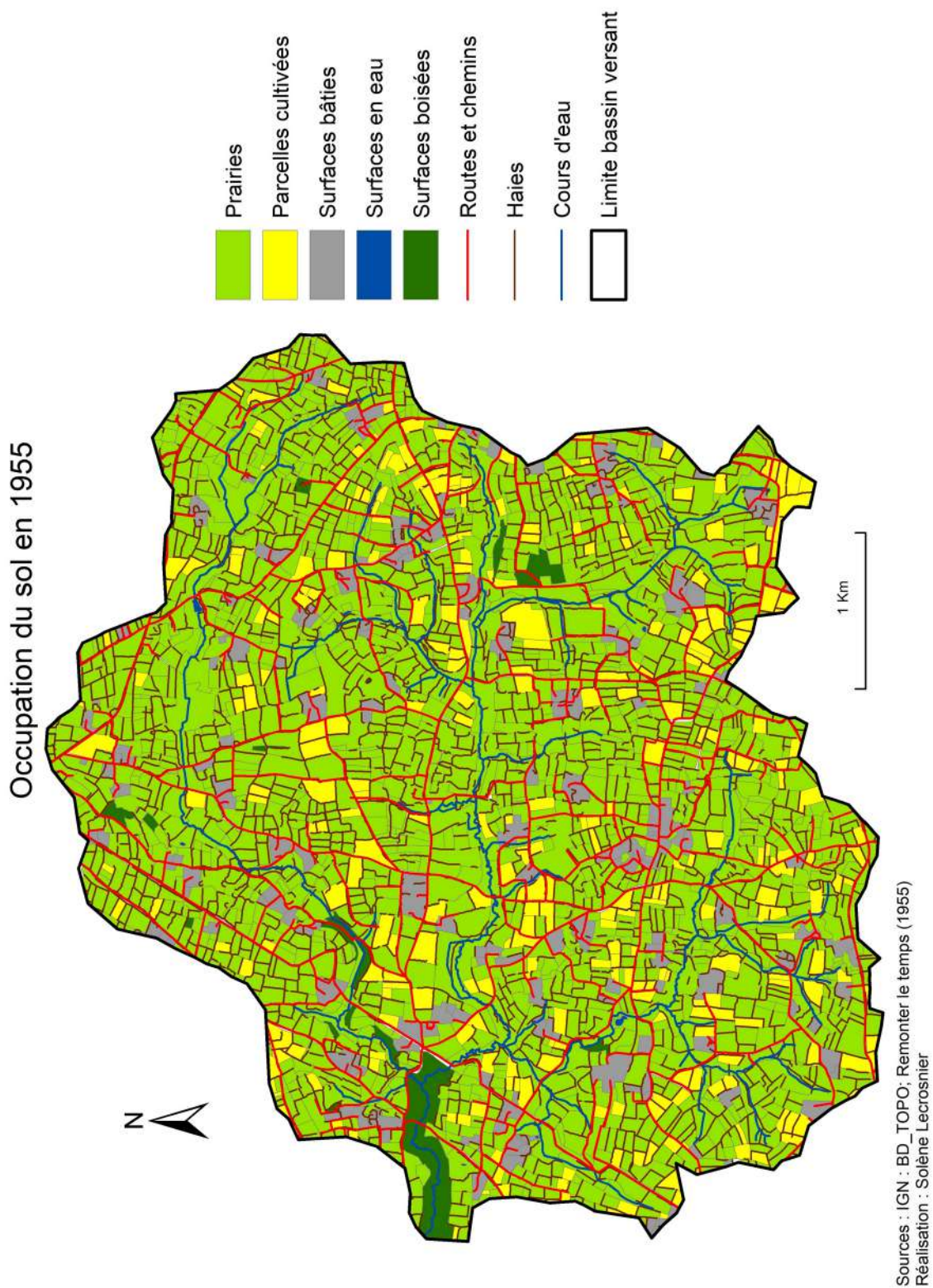
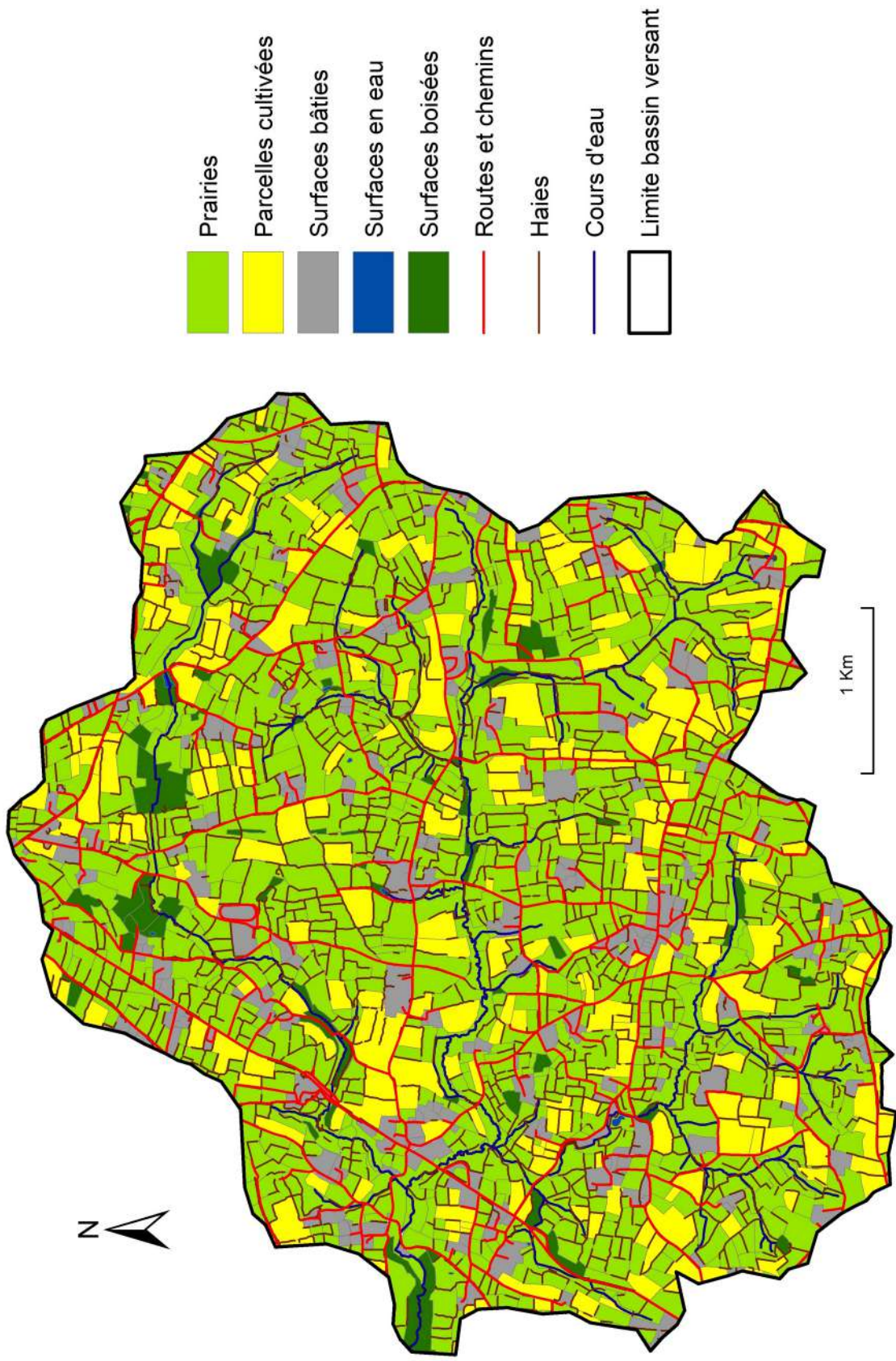


Figure 29 : Carte d'occupation du sol en 1955.

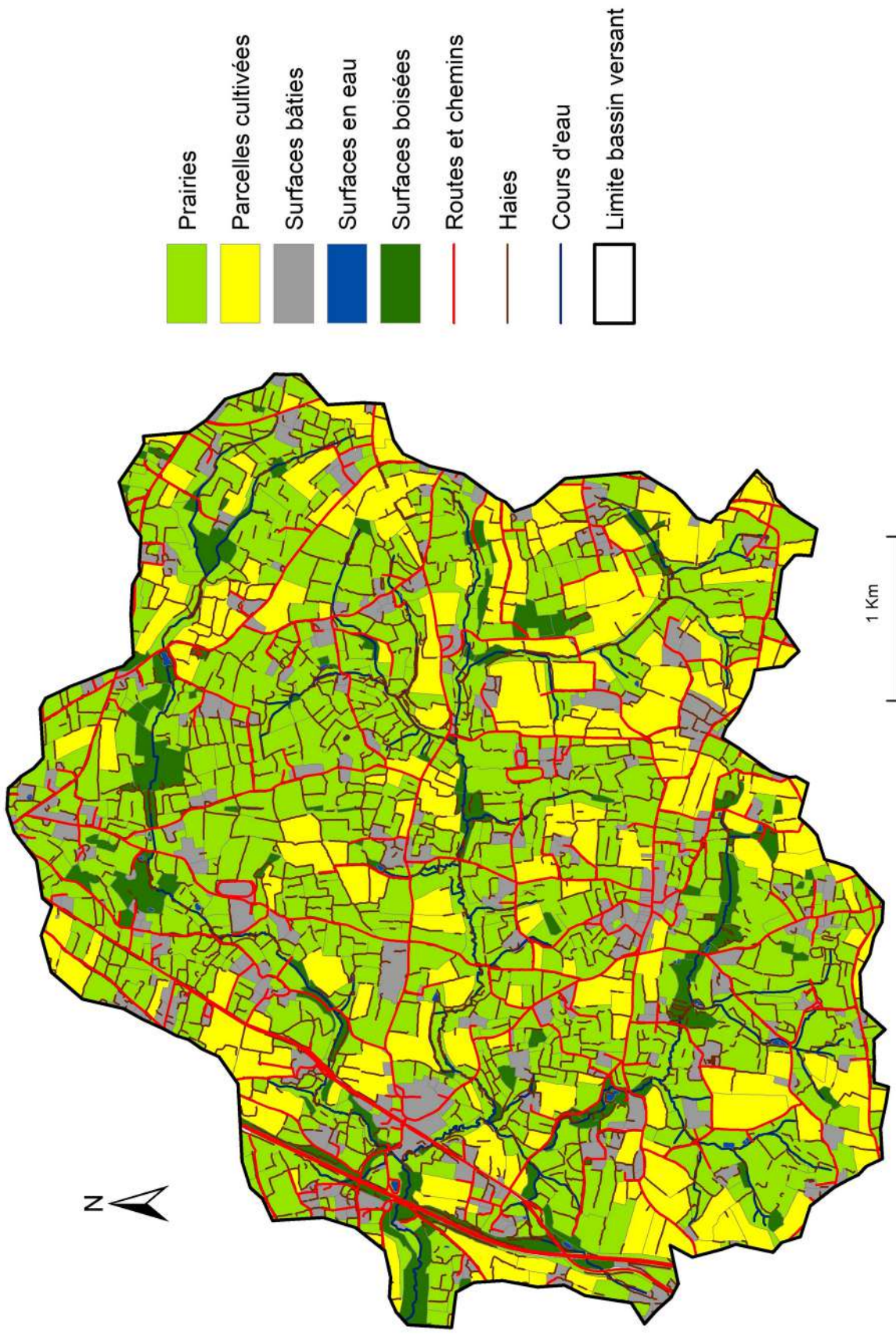
Occupation du sol en 1992



Sources : IGN : BD_TOPO; Remonter le temps (1992)
Réalisation : Solène Lecrosnier

Figure 30 : Carte d'occupation du sol en 1992.

Occupation du sol en 2021



Sources : IGN : BD_TOPO; Solène Lecrosnier
Réalisation : Solène Lecrosnier

Figure 31 : Carte d'occupation du sol en 2021.

4.2. Récapitulatif et comparaison des entités composant le paysage en 1955, 1992 et 2021

4.2.1. Les prairies, les parcelles cultivées, les surfaces bâties et boisées

L'agrandissement des parcelles induit par le remembrement agricole a entraîné la réunification de plusieurs parcelles en une seule. Le nombre de parcelles, prairies et parcelles cultivées confondues, a donc baissé d'année en année passant de 2 464 en 1955, à 1 378 en 1992 et 1 025 en 2021.

Au delà du nombre de parcelles, les pratiques agricoles ont également évoluées. Les prairies dominant largement la carte d'occupation du sol en 1955, contrairement à 2021, où sans observer une domination des parcelles cultivées, il y a un certain équilibre entre les deux. Le nombre de parcelles en herbe a en effet baissé d'année en année. En 2021, on compte 814 prairies contre 1 101 en 1992 et 2 150 en 1955. Bien sûr, les surfaces des prairies ne sont évidemment pas comparables entre ces trois années. En 2021 la taille moyenne des prairies est de 14 022m² soit environ 1,4ha. En 1992 cette moyenne est de 12 063m² soit 1,2ha et elle descend à 7 364m² en 1955 soit 0,7ha. Entre 1955 et 2021, la taille moyenne des prairies a donc doublée. Le tableau suivant résume les caractéristiques des prairies pour les trois années d'étude.

	Nombre de prairies	Surface moyenne des prairies	Surface totale occupée par de la prairie
1955	2 150	0,7ha	1 583ha
1992	1 101	1,2ha	1 328ha
2021	814	1,4ha	1 145ha

Figure 32 : Tableau récapitulatif de l'évolution des prairies entre 1955, 1992 et 2021. Réalisation : S.Lecrosnier.

Pour le nombre de parcelles cultivées on observe le même effet d'augmentation du nombre de parcelles mais avec des valeurs ayant moins d'écart que pour les prairies. On dénombre 208 parcelles cultivées en 2021, 277 en 1992 et 317 en 1955. Ces valeurs sont à prendre avec une grande prudence notamment de part les difficultés pour identifier les parcelles cultivées par photo-interprétation, principalement sur les photos en noir et blanc utilisées pour 1955. Il est tout de fois plus pertinent de regarder l'évolution de la taille de ces parcelles cultivées. En 2021, la taille moyenne des parcelles cultivées est de 25 054m² soit 2,5ha, en 1992 elle est de 15 165m² soit 1,5ha et en 1955 les parcelles cultivées ont une surface moyenne de 7 824m² soit 0,8ha. La différence des tailles moyennes est encore plus importante qu'entre les prairies, elle est plus de trois fois supérieures en 2021 qu'en 1955.

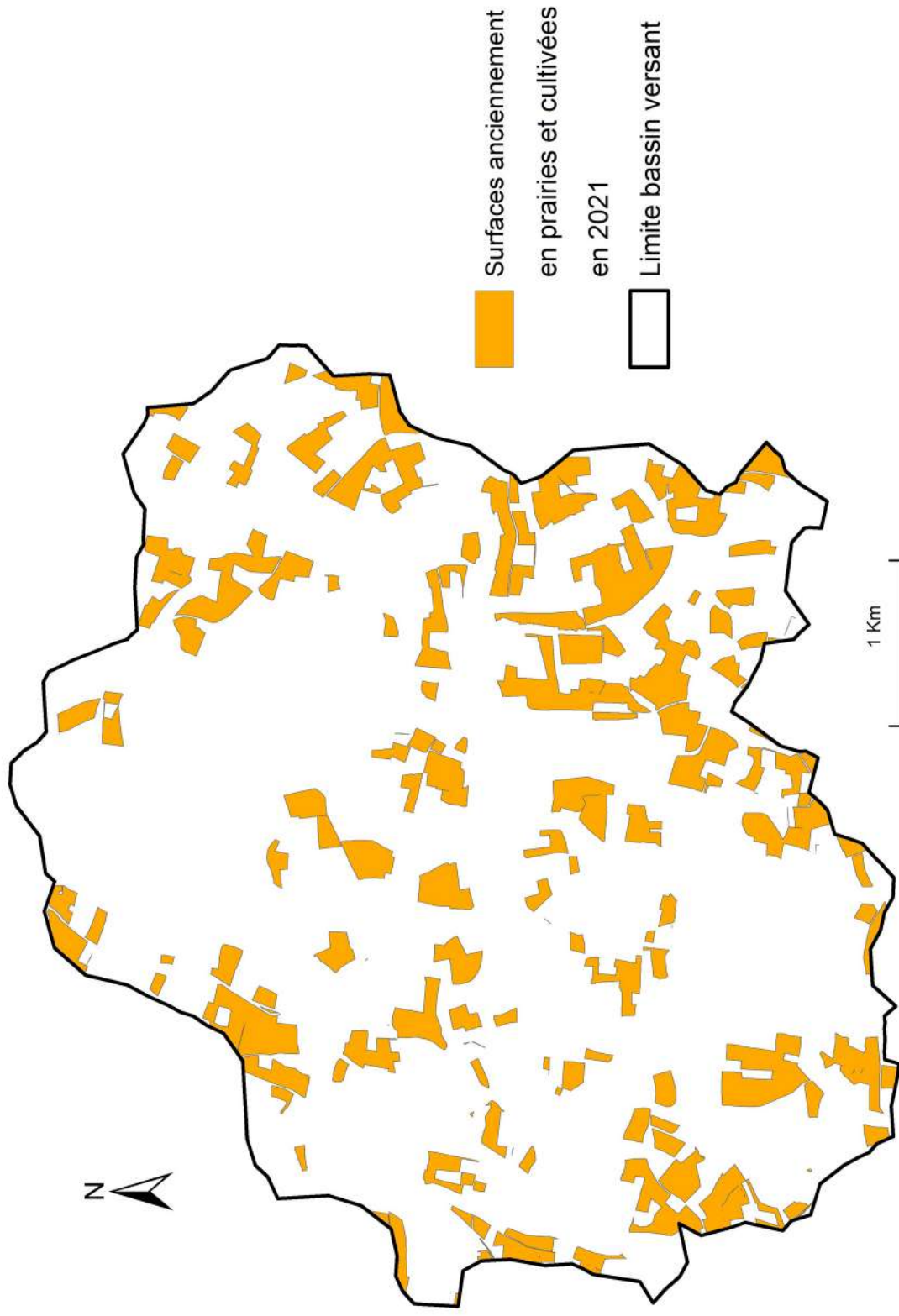
	Nombre de parcelles cultivées	Surface moyenne des parcelles cultivées	Surface totale occupée par des parcelles cultivées
1955	317	0,8ha	248ha
1992	277	1,5ha	420ha
2021	208	2,5ha	521ha

Figure 33 : Tableau récapitulatif de l'évolution des parcelles cultivées entre 1955, 1992 et 2021. Réalisation : S.Lecrosnier.

En comparant les deux tableaux on se rend donc compte que les prairies et les parcelles cultivées suivent une trajectoire inverse. Les surfaces occupées par de la prairie baissent d'année en année, contrairement aux surfaces cultivées qui augmentent graduellement entre 1955 et 2021. Pour ce qui est de la superficie moyenne des parcelles, celle-ci a baissée entre 1955 et 2021, que cela soit pour les prairies et ou les parcelles cultivées. Cela est évidemment à mettre en lien avec la baisse du nombre de parcelles.

La carte suivante présente les surfaces anciennement occupées par de la prairie qui sont actuellement exploitées en tant que parcelles cultivées. Cette carte a été réalisée à partir des prairies de 1955 et des cultures de 2021. Sur les 438ha de prairies qui on disparus entre 1955 et 2021 on compte 403ha de prairies qui ont été convertis en cultures. Sur cette carte on peut voir que c'est le sud-est du bassin versant qui concentre le plus de prairies ayant été transformées en parcelles cultivées. Cette évolution est déjà visible sur les cartes d'occupation du sol présentées précédemment. Sur le reste du bassin versant on observe une distribution plutôt égale de ces prairies transformées en parcelles cultivées. Cette carte vient également appuyer le fait que l'on observe une différence entre le nord du bassin versant plutôt bocager et le sud, et notamment le sud-est, plutôt tourné vers les cultures de céréales et les grandes parcelles ouvertes. Cela peut paraître surprenant du fait de la proximité du cours d'eau de la Nouette dans cette partie du site d'étude.

Localisation des surfaces en prairies ayant été transformées en surfaces cultivées, entre 1955 et 2021



Sources : IGN: BD_TOPO, Remonter le temps, S.Lecrosnier
Réalisation : Solène Lecrosnier

Figure 34 : Carte des surfaces converties en cultures entre 1955 et 2021.

La surface totale des surfaces bâties entre 1955 et 2021 a également évoluée. En 2021 on compte 228ha de bâtis, 221ha en 1992 et 166ha en 1955. L'augmentation n'est donc pas très importante entre 1992 et 2021 mais plus en entre 1955 et 2021 avec 62ha de surfaces bâties en plus. Les surfaces boisées ont également évolué entre ces trois années. En 2021, le bassin est occupé par 138ha de surfaces boisées contre 76ha en 1992 et seulement 40ha en 1955. Ces différences très importantes peuvent s'expliquer par une politique de reboisement mise en place dans la région.

Les graphiques suivant reprennent en pourcentages l'occupation du sol pour chaque année d'étude. La part « autres » désigne notamment les routes et les chemins.

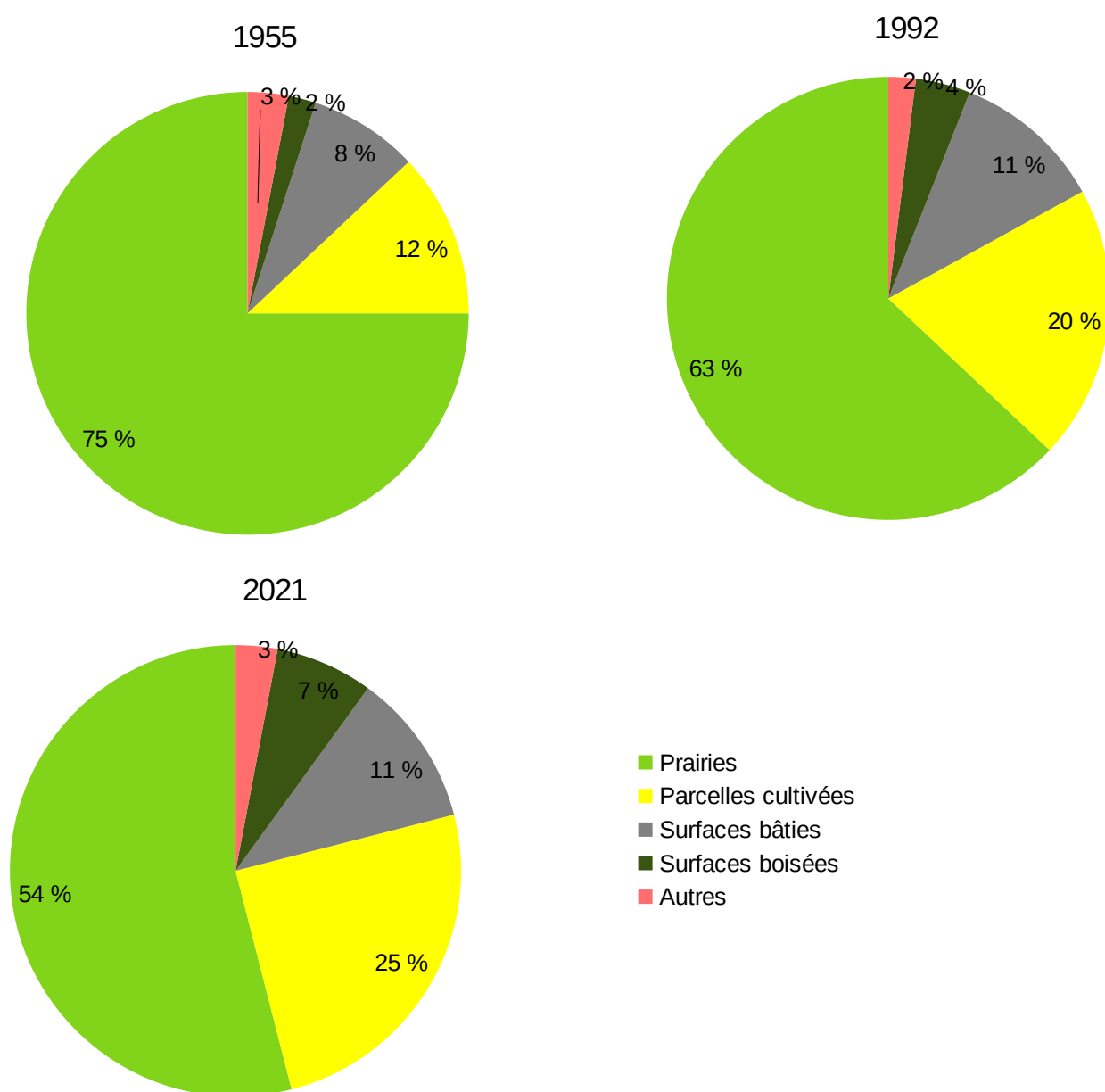


Figure 35 : Graphiques en secteur de l'occupation du sol en 1955, 1992 et 2021. Réalisation : S.Lecrosnier.

La part des prairies a donc baissé d'année en année au profit des parcelles cultivées et des surfaces bâties. Cependant, malgré des mutations paysagères, le bassin versant de Rouffigny reste un bassin versant bocager avec plus de 50 % de sa surface dédiée aux prairies. C'est également un site peu urbanisé, on note une augmentation de seulement 3 % entre 1955 et 2021 pour atteindre 11 % en 2021.

4.2.2. Les haies et les routes

En lien avec les évolutions des entités surfaciques, les entités linéaires et notamment les haies ont fait l'objet de transformations au cours des années. Après modification de la base de données BD_BOCAGE de l'IGN on compte 217km de haies en 2021. En lien avec le redécoupage de certaines entités, le nombre de haies a augmenté entre la base de données initiale et la digitalisation finale passant de 3 218 tronçons de haies à 3 239. Cependant, le linéaire total a diminué passant de 226km à 217km. Cette baisse est en lien avec la suppression des haies dans les jardins et des observations de terrain. En 1992 on dénombre environ 219km de haies et 300km en 1955. Les haies ont donc été graduellement abattues au fur et à mesure des années, lié au remembrement et donc à l'agrandissement des parcelles. En 66 ans, entre 1955 et 2021, 83km de haies ont été abattues, cela représente un peu plus d'1km chaque année. Cependant on voit bien que cette baisse du linéaire de haies s'est majoritairement faite entre 1955 et 1992 puisque seulement 2km de haies ont été abattues entre 1992 et 2021. Ce résultat est évidemment en lien avec le ralentissement des travaux de remembrement.

	Linéaire de haies
1955	300km
1992	219km
2021	217km

Figure 36 : Tableau récapitulatif de l'évolution du linéaire de haies entre 1955, 1992 et 2021. Réalisation : S.Lecrosnier.

Le réseau routier a également légèrement évolué, du fait du nombre plus important de parcelles en 1955, on dénombre plus de linéaire de réseau routier. On peut penser que ce réseau, de chemins notamment, permettait de desservir les nombreuses parcelles du site. 103Km de linéaire routier traversait le bassin versant en 1955 contre 90km en 1992 et 100km en 2021. La différence de 10km entre 1992 et 2021 s'explique par la construction de l'A84 en 2003, traversant le bassin versant à l'est, du nord au sud. En 2021, associés à ce réseau routier, 12km de fossés ont été relevés selon le travail de terrain. Ce réseau n'est donc pas très dense pour une surface de tout de même 21km².

Les cours d'eau sont les mêmes pour les trois années du fait de l'impossibilité de visualiser ces entités par le biais de la photo-interprétation. On dénombre donc environ 40km de cours d'eau sur l'ensemble du bassin versant, tout régime confondu.

4.2.3. Les entités ponctuelles : mares et étangs

Les surfaces en eau ont augmenté entre 1992 et 2021. Les données de 1955 ne sont pas présentées car ce sont les mêmes qu'en 1992, du fait de l'impossibilité de distinguer les mares et les étangs sur les photos en noir et blanc. On dénombre 32 mares et étangs en 2021 contre 13 en 1992. Cette différence peut s'expliquer par l'aménagement d'étangs ou de mares artificiels mais également des erreurs de photo-interprétation.

V. L'évolution des connectivités hydrologiques dans le bassin versant de Rouffigny : impact de la structure paysagère

5.1. Les connectivités hydrologiques entre 1955 et 2021 : présentation des résultats

Comme on a pu le voir précédemment sur les cartes d'occupation du sol du bassin versant, la structure paysagère du site a évolué. Le nombre de parcelles a baissé parallèlement à celui des tailles moyennes qui a augmenté. Les structures linéaires ont également évolué, les haies ont été abattues et les chemins ont diminué en nombre. On observe bien évidemment ici les effets du remembrement, cependant après avoir qualifié et quantifié les évolutions du paysage, le but est de savoir si ces évolutions ont eu un réel impact sur les connectivités hydrologiques. Pour chaque année d'étude, deux cartes présentent les connectivités simples sans identification de l'occupation du sol et les parts des connectivités de chaque parcelle. Chaque parcelle est cartographiée selon un pourcentage de connectivité au cours d'eau. Les haies bloquantes sont également représentées sur ces cartes ainsi que les principaux points d'entrées dans les fossés.

5.1.1. 1955

Surfaces connectées au cours d'eau en 1955 après modélisation

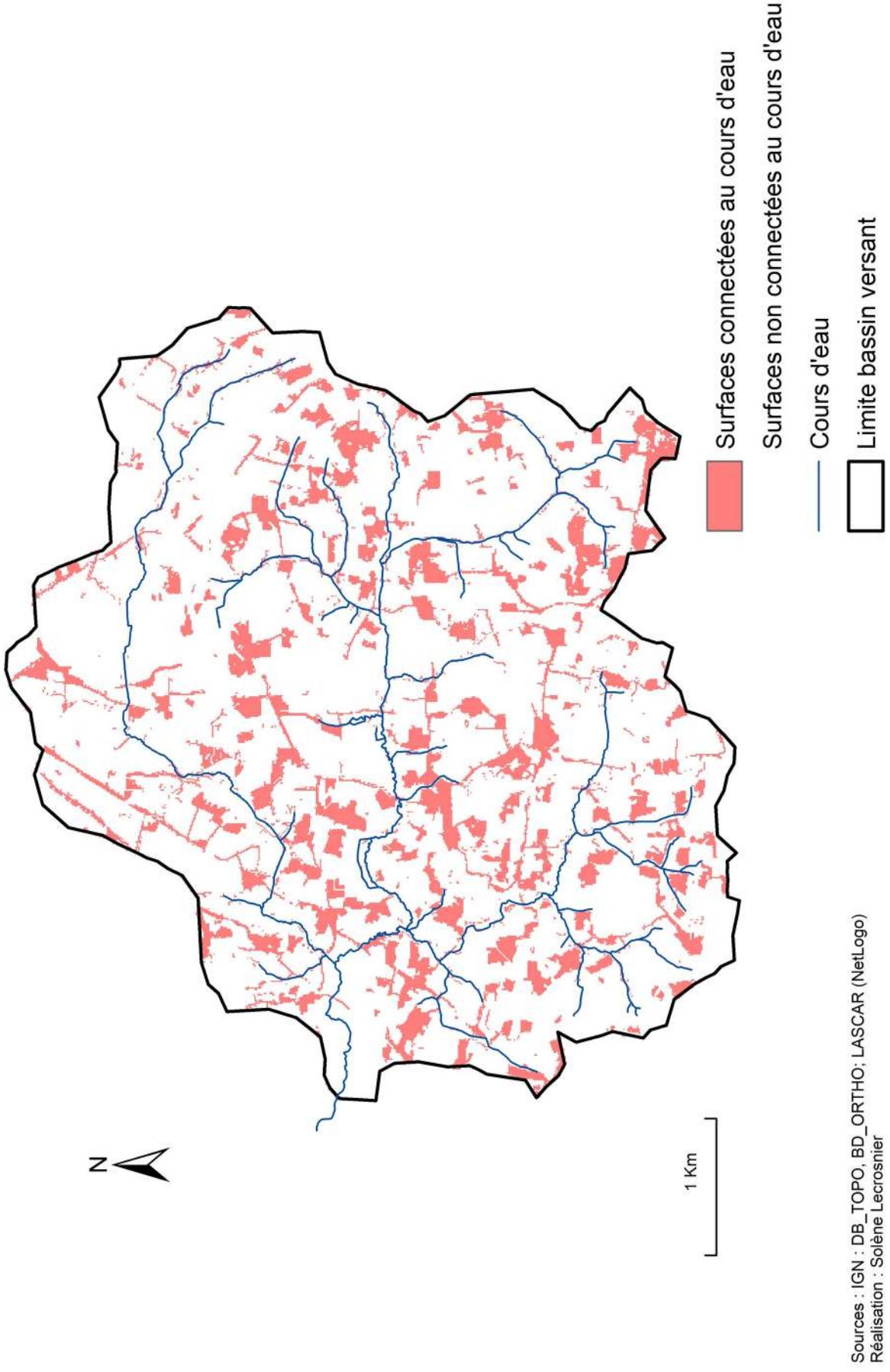
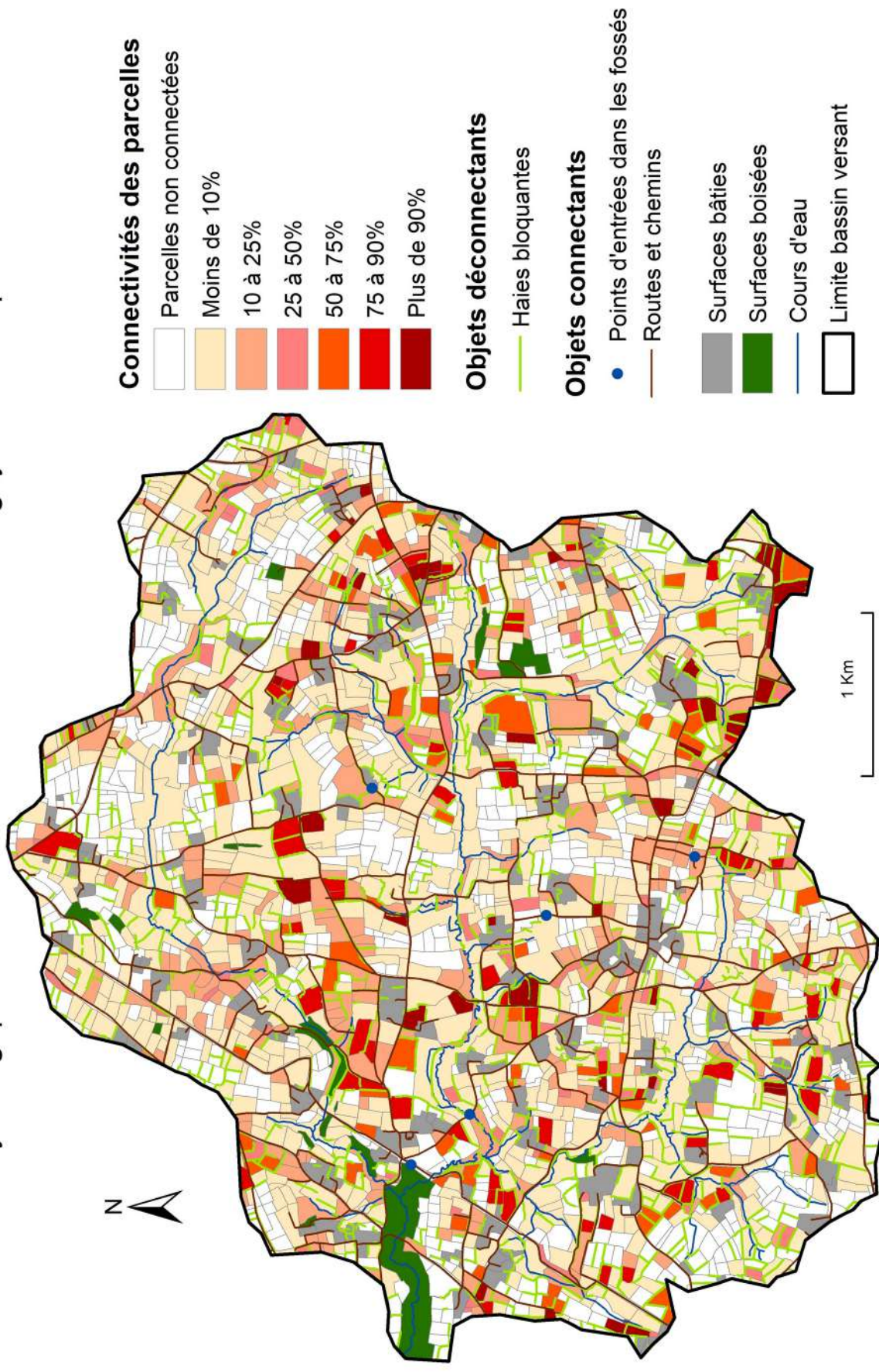


Figure 37 : Carte des surfaces connectées au cours d'eau en 1955.

Connectivités hydrologiques dans le bassin versant de Rouffigny en 1955 après modélisation



Sources : LASCAR (NetLogo); IGN : BD_TOPO
 Réalisation : Solène Lecrosnier

Figure 38 : Présentation des connectivités hydrologiques du bassin versant en 1955.

Surfaces connectées au cours d'eau en 1992 après modélisation

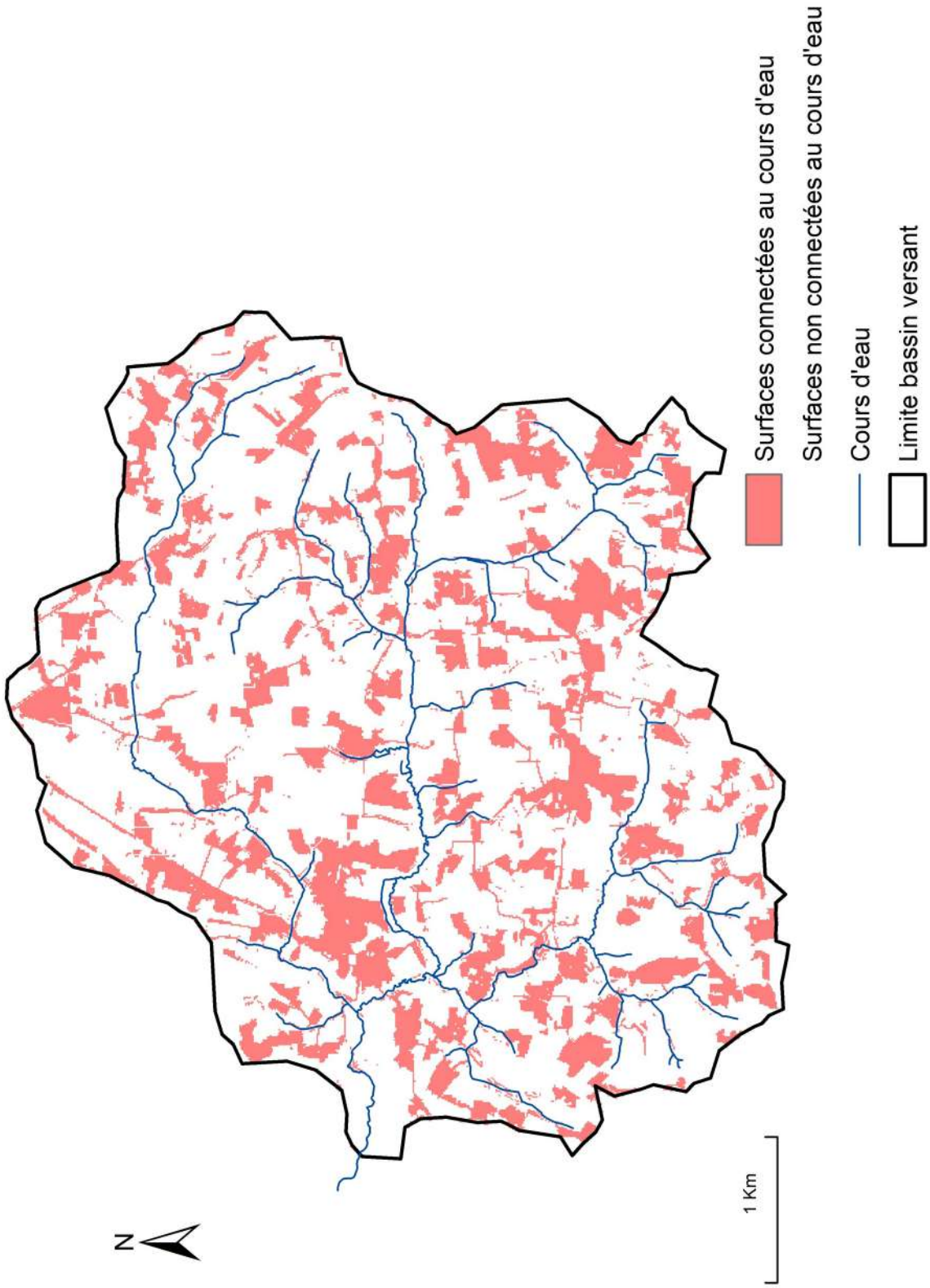


Figure 39 : Carte des surfaces connectées en 1992.

Connectivités hydrologiques dans le bassin versant de Rouffigny en 1992 après modélisation

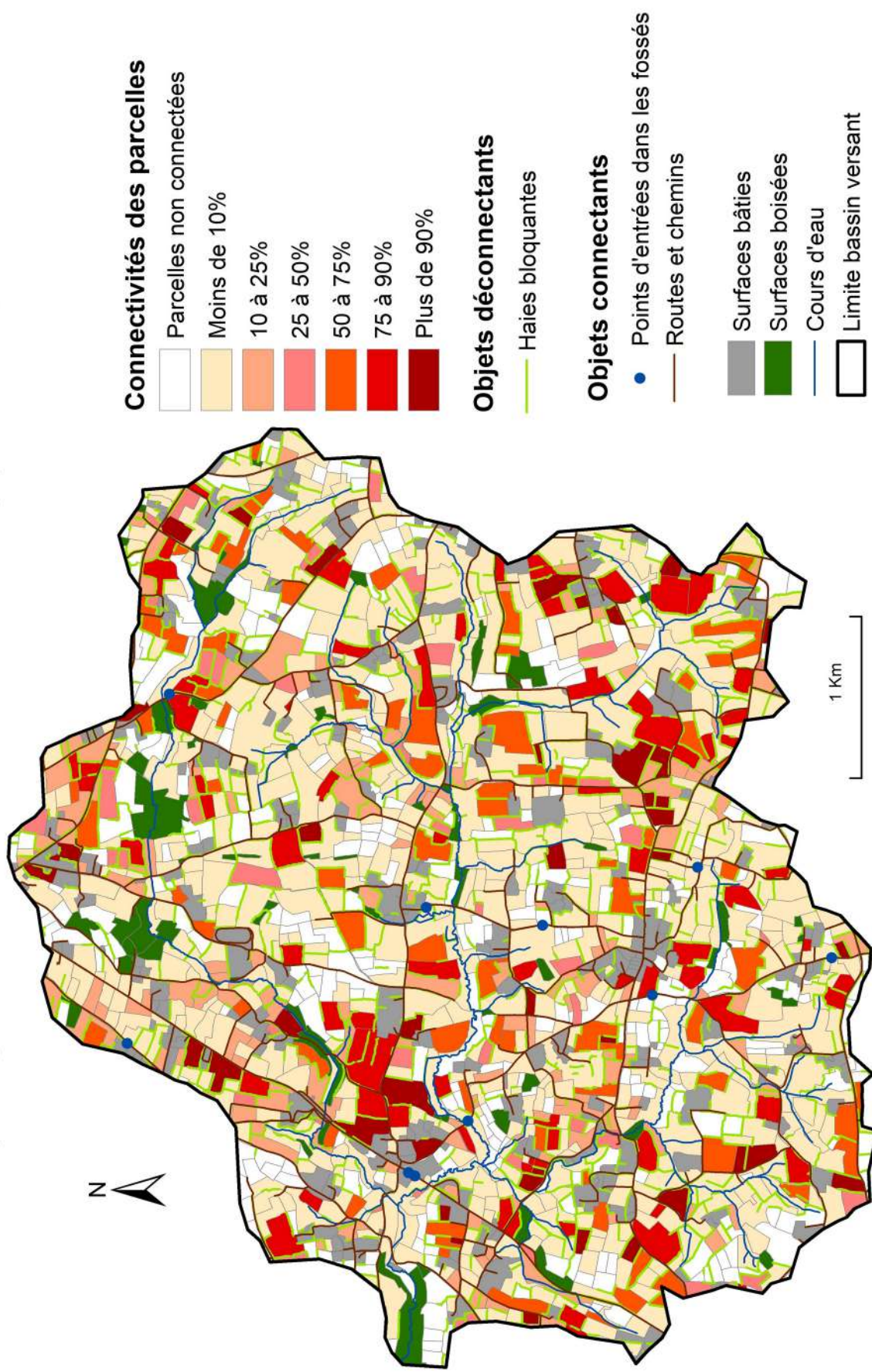


Figure 40 : Présentation des connectivités hydrologiques du bassin versant en 1992.

Surfaces connectées au cours d'eau en 2021 après modélisation

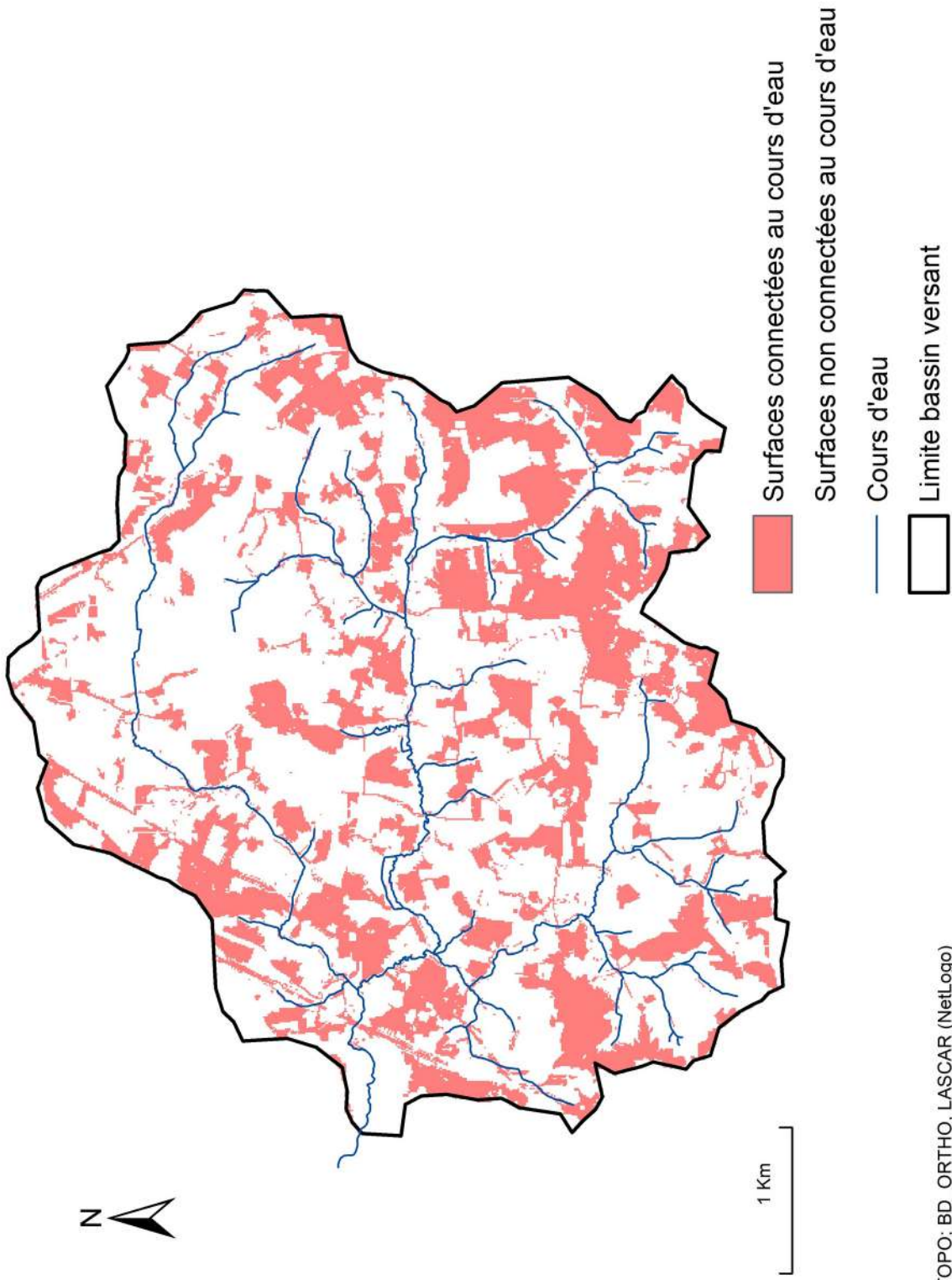
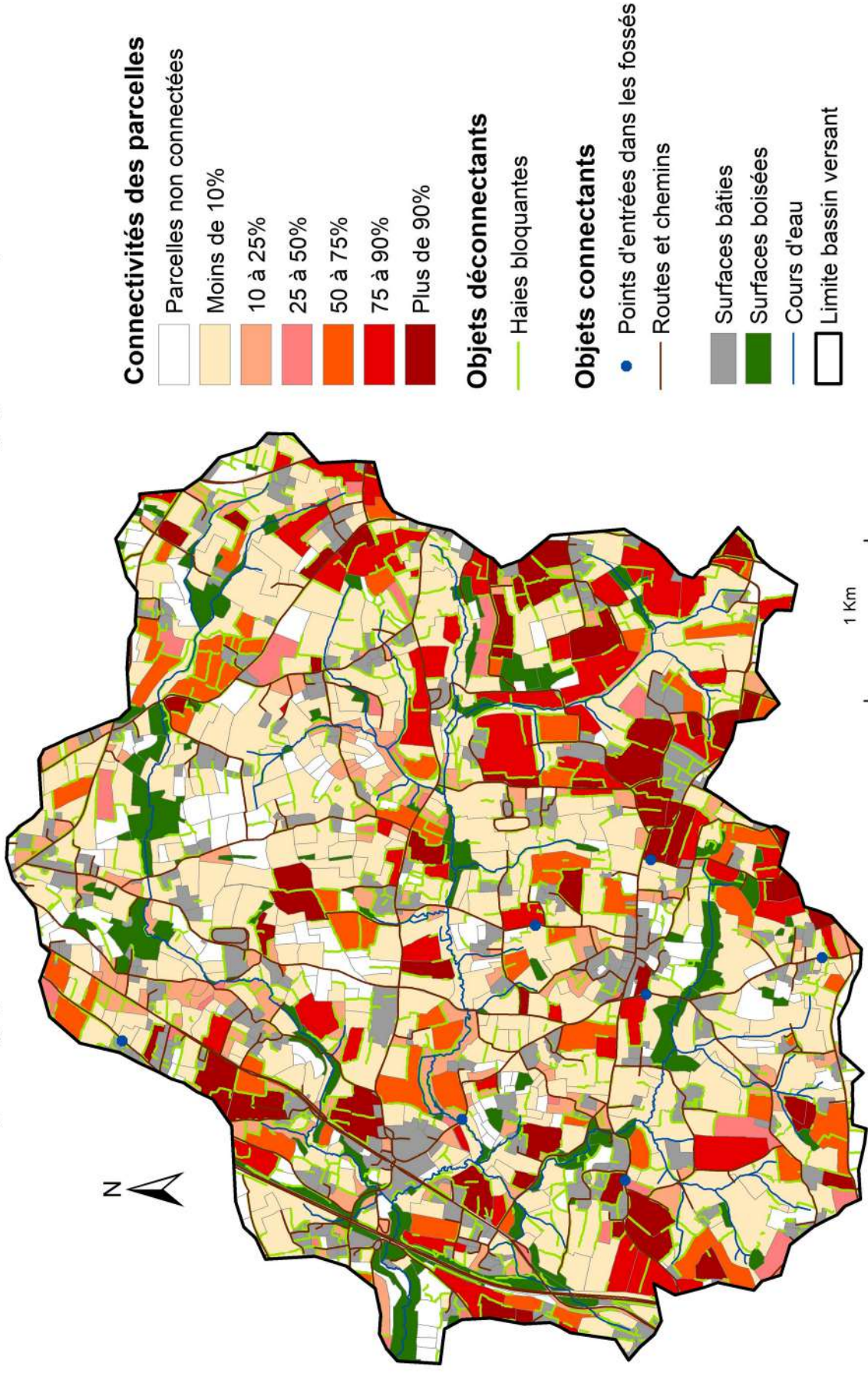


Figure 41 : Carte des surfaces connectées en 2021.

Connectivités hydrologiques dans le sous bassin versant de Rouffigny en 2021 après modélisation



Sources : LASCAR (NetLogo); IGN : BD_TOPO
 Réalisation : Solène Lecrosnier

Figure 42 : Présentation des connectivités hydrologiques du bassin versant en 2021.

5.2. Une évolution ascendante des connectivités hydrologiques en lien avec les mutations paysagères ?

La première donnée que l'on peut obtenir depuis les cartes des surfaces connectées au cours d'eau, est la part de surface connectée et déconnectée pour chaque année. A cette donnée on superpose l'occupation du sol de chacune des « parcelles » connectées afin de savoir la proportion de chaque type d'occupation du sol (prairie, culture, surface bâtie, surface boisée) dans les surfaces connectées et déconnectées.

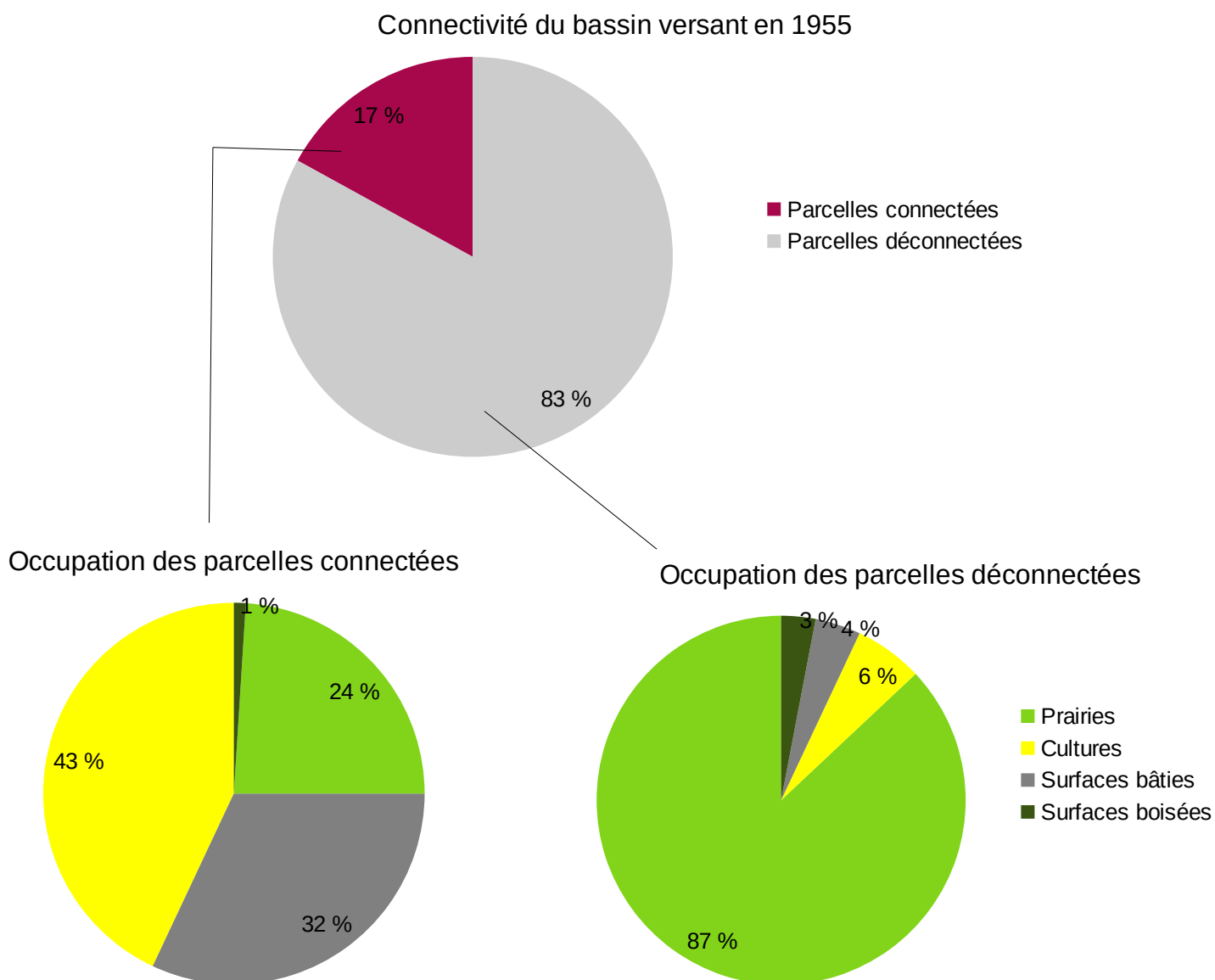
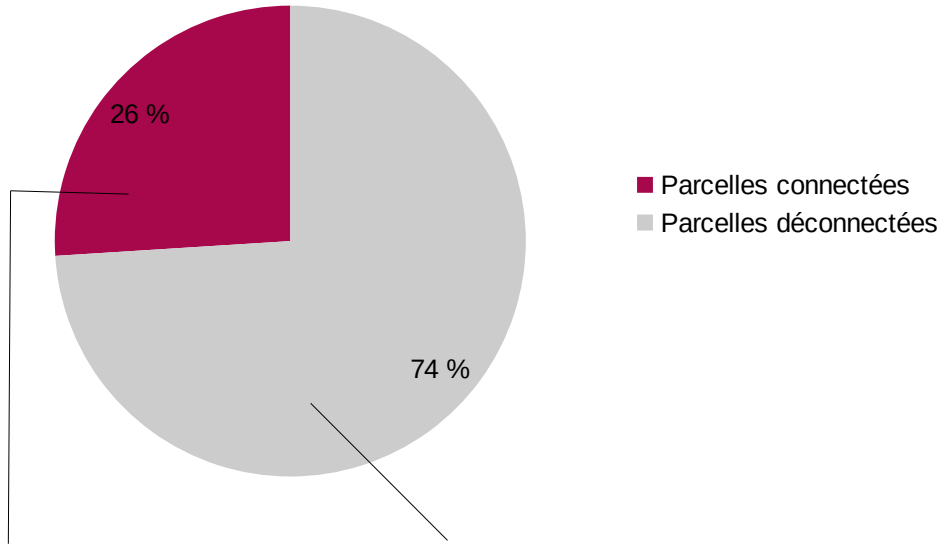
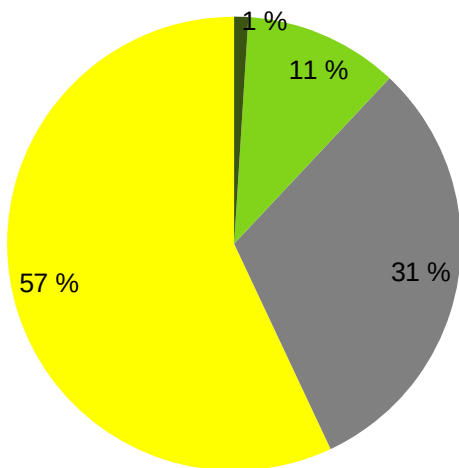


Figure 43 : Graphiques en secteur des connectivités en 1955. Réalisation : S.Lecrosnier.

Connectivité du bassin versant en 1992



Occupation des parcelles connectées



Occupation des parcelles déconnectées

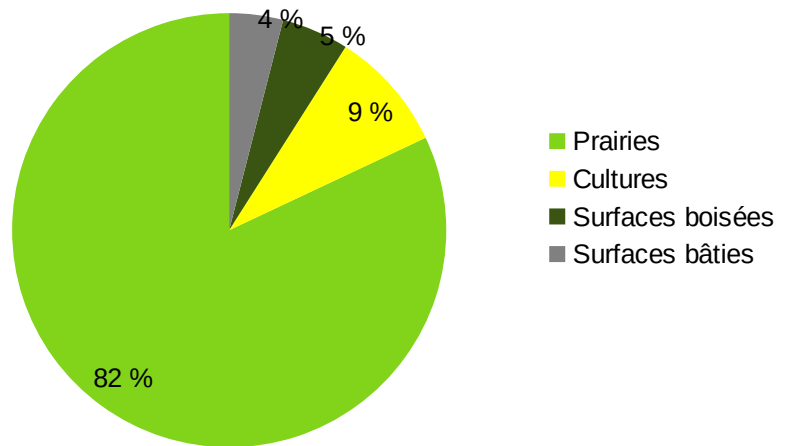
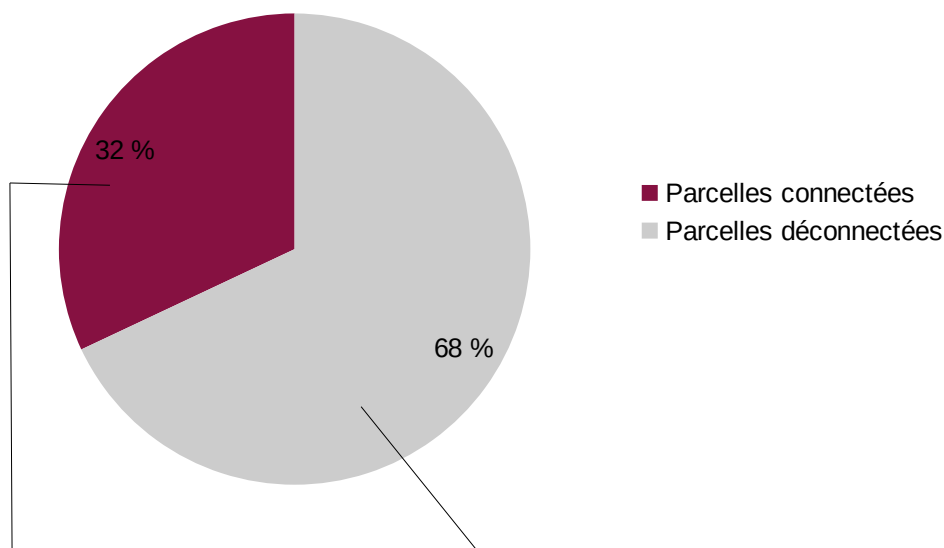
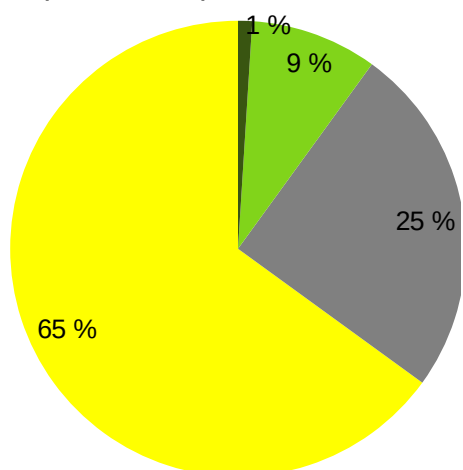


Figure 44 : Graphiques en secteur des connectivités en 1992. Réalisation : S.Lecrosnier.

Connectivité du bassin versant en 2021



Occupation des parcelles connectées



Occupation des parcelles déconnectées

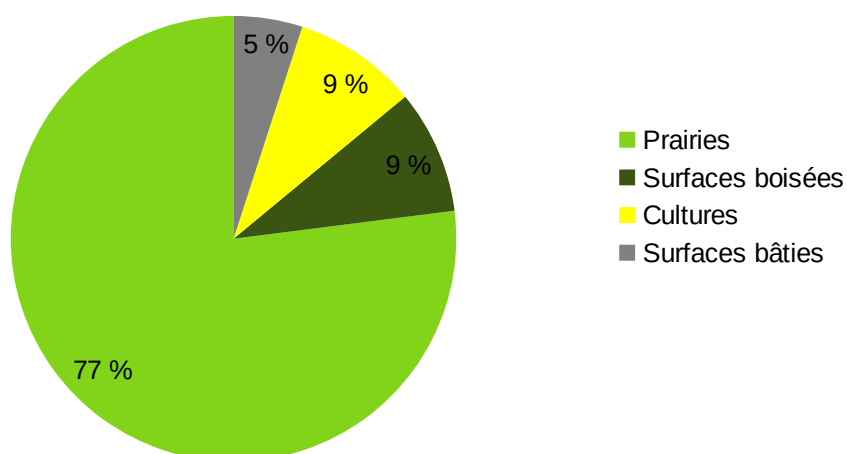


Figure 45 : Graphiques en secteur des connectivités en 2021. Réalisation : S.Lecrosnier.

Ce que l'on observe en premier lieu c'est l'augmentation des surfaces connectées entre les trois années d'étude. En 2021, environ 667ha sont connectés au cours d'eau contre 536ha en 1992 et 365ha en 1955. Les surfaces connectées ont donc quasiment doublé entre 1955 et 2021. Si l'on fait une moyenne des surfaces connectées en plus entre chaque année d'étude on se rend compte que le résultat est le même : entre 1955 et 1992, et 1992 et 2021, on compte environ 5ha connectés en plus par an.

Ce que l'on observe ensuite c'est que peu importe l'évolution du paysage, les types d'occupation du sol les plus connectés restent les parcelles cultivées et les surfaces bâties. Ces surfaces ne possèdent en effet aucun effet d'interception des écoulements. Dans la simulation sous LASCAR, les parcelles cultivées ruissellent dès que des précipitations entrent en contact avec. Sur le terrain, certaines caractéristiques des parcelles cultivées comme l'apparition de croûtes de battance peuvent accélérer la mise en place des processus de ruissellement. Les surfaces bâties n'ont aucune retenue d'eau, l'eau ruisselle selon la pente. Ce que l'on observe en revanche, ce sont les évolutions de l'occupation du sol pour les surfaces connectées et déconnectées au cours d'eau. En 2021, les cultures représentent 65 % des surfaces connectées, soit 398ha. Les surfaces bâties représentent 154ha sur l'ensemble des surfaces connectées. En 1992, les parcelles cultivées représentent 57 % des surfaces connectées soit 284ha et les surfaces bâties 31 %, soit 154ha. En 1955 ces chiffres tombent à 43 % pour les parcelles cultivées soit 140ha et 32 % pour les surfaces bâties soit 104ha. Cette évolution va de pair avec l'évolution progressive des surfaces cultivées. Plus un site compte de surfaces cultivées, plus il possède des zones susceptibles d'émettre des ruissellement et donc de se connecter au cours d'eau. Cette évolution des surfaces cultivées entraîne une évolution des surfaces connectées totales. Cela nous montre aussi que la quasi-majorité des parcelles cultivées sont toujours connectées au cours d'eau. Les surfaces déconnectées sont toujours majoritairement représentées par des prairies. Ce pourcentage suit la trajectoire inverse des parcelles cultivées, plus il y a de parcelles connectées au cours d'eau, moins il y a de prairies déconnectées. Cette évolution est également en lien avec l'évolution du paysage et notamment la baisse progressive du nombre de surfaces en prairies d'année en année. À partir de ces cartes on voit déjà l'importance du réseau routier dans les écoulements puisque l'on distingue les principaux axes routiers du bassin versant à l'est.

Une des observations que l'on peut également faire sur la carte des surfaces connectées en 2021 est que le sud du bassin versant, et notamment le sud-est, semble plus concerné par des connectivités supérieures à 75 %. Au nord, on observe de plus faibles superficies de surfaces connectées au cours d'eau. Ces observations sont évidemment à mettre en lien avec l'occupation du sol du site. On sait en effet que le sud-est du bassin versant est occupé de manière plus importante par des parcelles cultivées, qui plus est, de grande superficie. C'est d'ailleurs dans cette partie du bassin versant que l'on observe le plus d'évolution des surfaces connectées entre les trois années d'étude. En effet, en 1955 on ne distingue que quelques petits îlots isolés tout comme en 1992. En 2021, c'est bien cet espace qui concentre le plus de surfaces connectées. L'ouest du bassin versant présente également plus de surfaces connectées. En 2021, le nord du bassin versant et notamment le nord-ouest semble peu concerné par ces processus de ruissellement jusqu'au cours d'eau. La forte présence de prairies de petite taille peut être un élément de réponse aux faibles résultats de surfaces connectées.

Visuellement, sur les trois cartes qui présentent les parts de connectivité de chaque parcelle, on observe une augmentation des parcelles ayant une forte connectivité (75 à 90 % ou plus de 90%) au fil des années. En 1955, on compte 114 parcelles ayant ce pourcentage, 122 en

1992 et 118 en 2021. Tout comme pour l'occupation du sol, il faut remettre ces chiffres à l'échelle de la taille des parcelles. Comme on a pu le voir précédemment, en lien avec le remembrement, celle-ci n'a fait que diminuer d'année en année. En 1955, 95ha de parcelles sont connectées entre 75 et 90 % ou à plus de 90 %, 200ha en 1992 et 319ha en 2021. Le remembrement a donc eu un réel impact sur l'évolution des connectivités, pas en nombre de parcelles mais au niveau des surfaces fortement connectées au cours d'eau. Le tableau suivant résume l'évolution des connectivités des parcelles entre 1955 et 2021.

	Nombre de parcelles total	Nombre de parcelles connectées à 75 % et plus	Représentation en pourcentage (sur l'ensemble des parcelles)	Représentation en surface sur l'ensemble du bassin versant
1955	2 464	114	5 %	95ha
1992	1 378	122	9 %	200ha
2021	1 025	118	12 %	319ha

Figure 46 : Tableau récapitulatif des parcelles connectées à plus de 75 % en 1955, 1992 et 2021. Réalisation : S.Lecrosnier.

5.3. Le rôle du réseau linéaire dans les connectivités du bassin versant

Ces évolutions des connectivités sont nécessairement à mettre en lien avec l'évolution des objets linéaires à la fois connectants (routes et fossés) et déconnectants (haies bloquantes). On sait que du fait de l'agrandissement des parcelles, le linéaire de haies a fortement diminué. Pour visualiser la part des haies bloquantes dans le linéaire total, il est plus pertinent de parler en terme de pourcentages. Le tableau suivant résume l'évolution du linéaire de haies bloquantes au cours des trois années d'étude.

	Haies totales	Haies bloquantes	Représentation en pourcentage des haies bloquantes
1955	300km	126km	42 %
1992	219km	133km	61 %
2021	217km	144km	66 %

Figure 47 : Tableau récapitulatif de l'évolution des haies bloquantes entre 1955, 1992 et 2021. Réalisation : S.Lecrosnier.

Évolution de la densité de haies totales et bloquantes entre 1955 et 2021 (en km)

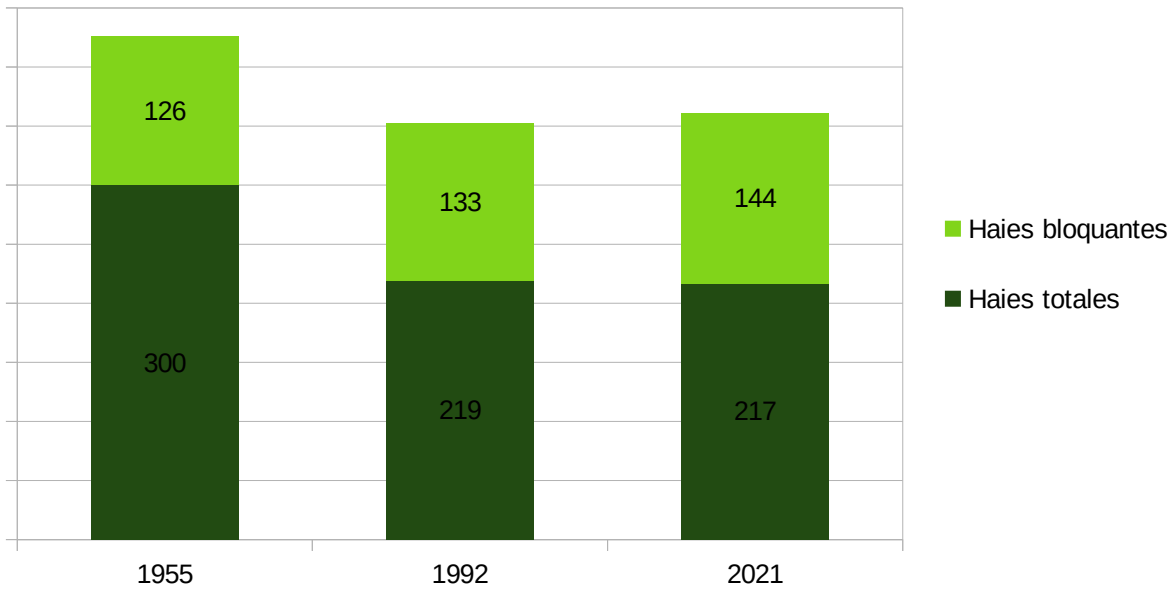


Figure 48 : Diagramme en barres sur l'évolution des haies totales et bloquantes. Réalisation : S.Lecrosnier.

Le linéaire de haies total a diminué graduellement entre 1955 et 2021, cependant dans le tableau et le graphique ci-dessus on observe une augmentation de la part des haies bloquantes dans le linéaire total. On peut penser que la présence plus faible de surfaces initiatrices d'écoulements (les surfaces cultivées et les surfaces bâties) en lien à un forte présence de prairies ayant un rôle d'interception du ruissellement, les écoulements sont moins importants et les haies n'ont donc pas de rôle à jouer. On peut également penser qu'il y a peut-être eu une réflexion autour de l'abattage de ces haies, par exemple le fait d'abattre une haie parallèle à la pente plutôt que perpendiculaire pour agrandir une parcelle. Entre 1992 et 2021, on ne note pas d'évolution importante sur le pourcentage de haies bloquantes puisqu'il n'y a pas de grande différence sur le linéaire total. En effet, en 1992, le remembrement était déjà bien amorcé et les mutations paysagères se sont principalement effectuées dans les années 1970. L'abattage de haies est aujourd'hui moins courant d'une part car ils ont été massifs ces dernières années mais également parce que l'on connaît les effets de cette pratique notamment sur les pertes en sol dut au ruissellement.

Dans un bassin versant, les fossés représentent des couloirs d'écoulement des eaux de surface jusqu'aux cours d'eau. Grâce à la modélisation on peut identifier les « portes d'entrées » de ces fossés. Ces portes d'entrées sont identifiées par la concentration d'agentsgouttes en un même point, ici le seuil des points d'entrées est de 5 agentsgouttes. Les portes d'entrées des fossés étaient moins nombreuses en 1955 qu'en 1992 et en 2021. On en compte 5 en 1955, 10 en 1992 et 12 en 2021. Le nombre de portes d'entrées dans les fossés évoluent donc en lien avec les évolutions des connectivités hydrologiques. Cette donnée complète également celle obtenue pour les haies, moins il y a de surfaces initiatrices de ruissellement, moins les entités du paysage ont un

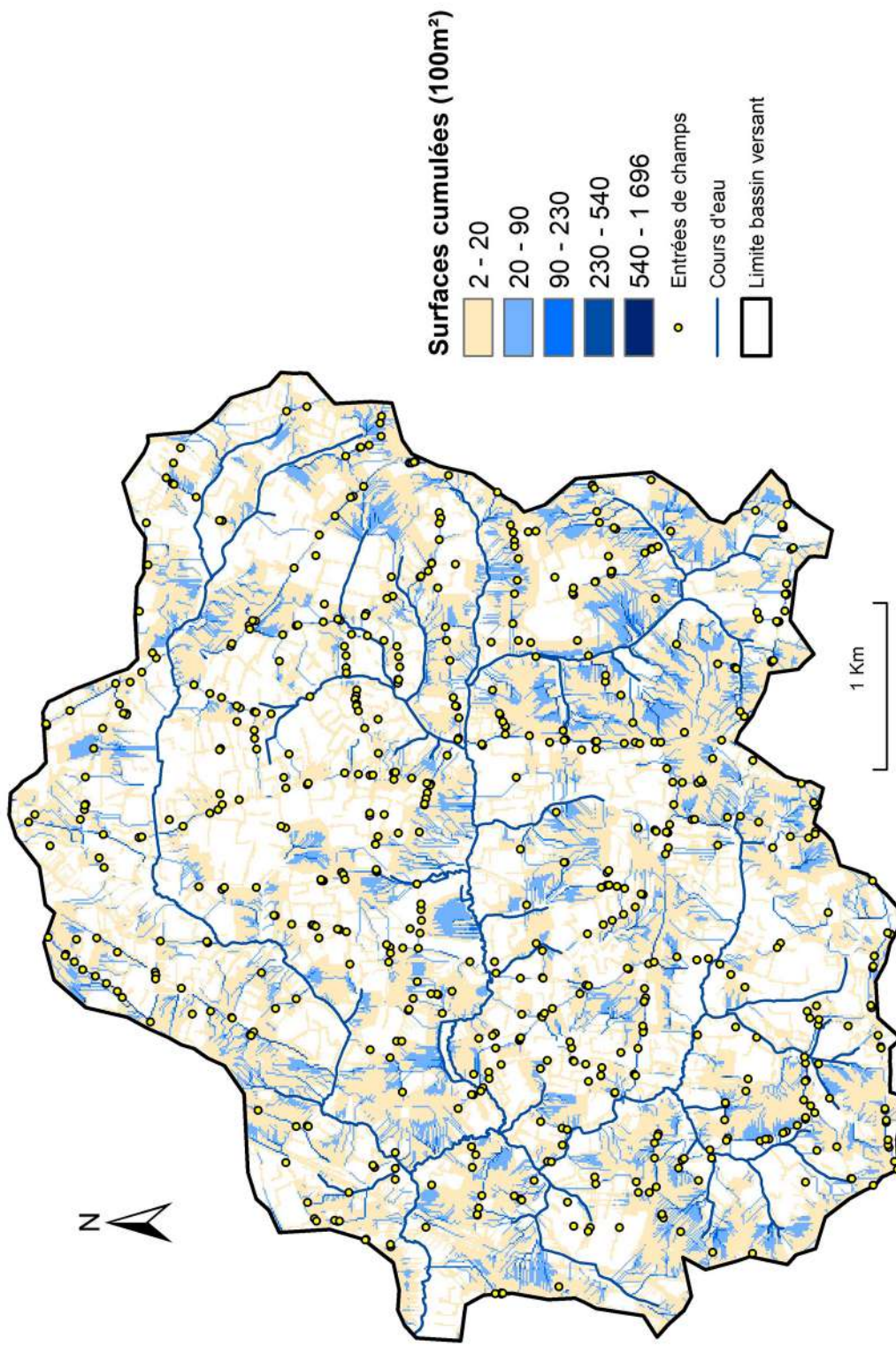
rôle à jouer dans les écoulements. Les haies n'ont pas à intercepter et les fossés n'ont pas à concentrer les écoulements. Pour 2021, du fait de la précision des données pour la digitalisation des réseaux de fossés, les résultats obtenus peuvent être considérés comme pertinents et conformes avec la réalité du terrain. Les portes d'entrées obtenus en 1955 et 1992 sont à prendre avec un peu plus de recul du fait de l'utilisation du réseau de fossés actuel dans l'ensemble des modélisations. Toutefois, à réseau de fossés égal, les points d'entrées augmentent d'année en année, l'occupation du sol et l'organisation spatiale du paysage ont donc un rôle important dans l'apparition de ces entités.

5.4. Le rôle des entités ponctuelles dans les connectivités hydrologiques : les entrées de champ

Pour l'année 2021, il a été possible de cartographier les entrées de champs suite à un travail de terrain. Il n'a pas semblé pertinent d'utiliser les entrées de champs de 2021 pour effectuer des modélisations en 1955 et 1992 du fait des grandes différences dans le découpage parcellaire. Il était également impossible de distinguer ces entrées de champ par photo interprétation pour la grande majorité des parcelles. Pour identifier le rôle des entrées de champs dans le fonctionnement hydrologique du bassin versant, il faut s'intéresser aux chemins d'écoulement. Les chemins d'écoulement désignent les chemins empruntés par les agentsgouttes jusqu'au cours d'eau. La carte suivante présente ces chemins d'écoulements sous la forme de surfaces cumulées. Pour chaque patches on sait combien d'agentsgouttes sont passés dessus et cela permet de voir quelles sont les surfaces où le plus d'agentsgouttes ont circulé. Chaque surface est de 100m², c'est-à-dire la surface des patches sur LASCAR. Comme il a été dit précédemment, les entrées de champs sont représentées par un découpage du réseau linéaire de haie.

En domaine d'openfield ces entrées de champ n'existent pas vraiment, il est possible de pénétrer dans les parcelles à n'importe quel endroit du fait de l'absence de haies notamment. En domaine bocager, les entrées de champs constituent des percées dans les haies suffisamment large pour laisser passer le bétail et les machines agricoles. 620 entrées de champs ont été relevées sur le site d'étude pour 1 025 parcelles. Ce chiffre n'indique pas l'absence d'entrées de champs pour certaines parcelles mais est lié au fait que quelques parcelles sont desservies par une seule et même entrée de champ. Ce résultat provient également du fait que certaines entrées étaient juste représentées par une clôture, il n'y avait pas de haie et donc pas de trouée dans cette haie. Hydrologiquement parlant, ces entrées de champs ne présentent pas d'intérêt puisqu'elles ne modifient en rien le paysage. Ce type d'entrées de champ n'a donc pas été pris en compte.

Représentation des chemins d'écoulement en 2021



Sources : LASCAR (NetLogo); S.Lecrosnier
Réalisation : Solène Lecrosnier

Figure 49 : Carte de présentation des chemins d'écoulement en 2021.

Sur la carte ci-dessus on peut voir le rôle de ces entrées de champs dans la circulation des eaux de surfaces. En effet certaines entrées de champs permettent de laisser passer les écoulements jusqu'au cours d'eau. Ces écoulements auraient été potentiellement bloqués par la présence d'une haie qui n'aurait pas été découpée. Les captures d'écran suivantes montrent des entrées de champs permettant aux écoulements de continuer à circuler sans être interceptés.

Exemples d'entrées de champ permettant le passage des écoulements de surface

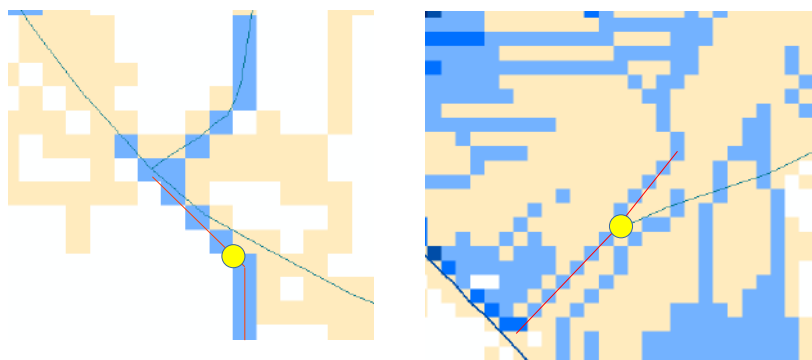


Figure 50 : Zoom depuis la carte de présentation des chemins d'écoulement.

5.5. L'exemple du quart sud-est du bassin versant : mise en évidence du rôle des mutations paysagères dans l'évolution des connectivités

Comme on l'a expliqué précédemment, le quart sud-est concentre le plus de parcelles fortement connectées en 2021. C'est également la partie du bassin versant qui a connu le plus de mutations paysagères comme le montre les cartes d'occupation du sol et celle présentant les prairies transformées en parcelles cultivées, dans la partie IV. La carte présentant les chemins d'écoulement plus haut montre également une présence importante de ces chemins d'écoulement dans le sud-est. Cette partie du bassin versant se situe autour du cours d'eau permanent de la Nouette. Les trois photos aériennes suivantes sont localisées à l'extrême sud-est du bassin versant et montrent les parcelles situées en rive droite de la Nouette. La dernière photo aérienne date de 2015, mais elle correspond également au découpage parcellaire actuel du territoire après vérification terrain.

Photos aériennes du quart sud-est du bassin versant en 1955, 1992 et 2015



Figure 51 : Photos aériennes du quart sud-est du bassin versant en 1955, 1992 et 2015. Sources : IGN (Remonter le temps).

Visuellement la réduction du nombre de parcelles et de leurs taille est évidente. En conséquence de cela, le réseau de haies diminue également à vue d'œil. Le nombre de parcelles cultivées semblent également avoir augmenté. Le tableau suivant résume les caractéristiques de cette partie du bassin versant sur les trois années d'étude.

	1955	1992	2021
Nombre de parcelles	130	62	39
Taille moyenne des parcelles	0,8ha	1,6ha	2ha
Linéaire de haies	16km	11km	11km
Pourcentage de parcelles connectées à plus de 75 %	4 %	16 %	31 %
Représentation en ha connectés	0,5ha	17ha	42ha

Figure 52 : Tableau récapitulatif de l'évolution des parcelles et des connectivités dans le quart sud-est du bassin versant. Réalisation : S.Lecrosnier.

Ces chiffres montrent bien les effets du remembrement sur la réduction progressive du nombre de parcelles agricoles en parallèle avec une augmentation des surfaces cultivées. Entre 1955 et 2021, la taille des parcelles dans cette zone a plus que doublé. 5Km de haies ont été abattu dans cette zone entre 1955 et 2021, toujours en lien avec l'agrandissement des parcelles. On observe cependant une baisse importante du nombre de parcelles entre 1992 et 2021 sans qu'il y ai d'impact sur le linéaire de haies. Cet élément peut être expliqué par l'augmentation des surfaces boisées déjà existantes en 1992. En lien avec cela, on observe une augmentation très importante des surfaces connectées en hectares au fil des années, de 0,5ha en 1955 à 42ha en 2021. En clair, cette zone qui était quasiment déconnectée du cours d'eau en 1955, devient l'une des plus connectée en 2021, du fait des travaux de remembrement et de la modification de l'organisation du paysage.

VI. Mise en place de deux études complémentaires à la modélisation sous LASCAR : étude des rotations culturales et des sédiments transportés sur le bassin versant

6.1. Pourquoi mettre en place ces deux études complémentaires ?

Les deux études complémentaires qui seront mise en place à travers ces deux grandes parties sont les suivantes :

- l'étude des rotations culturales et leurs impacts sur les connectivités hydrologiques
- l'étude des sédiments transportés sur le bassin versant

Les parties précédentes ont permis de mettre en évidence le rôle des évolutions paysagères historiques sur l'évolution des connectivités hydrologiques. Cependant, les paysages n'évoluent pas que sur le temps long par le biais de grandes mutations économiques tel que le remembrement des années 70. Sur un site agricole comme le bassin versant de Rouffigny, l'occupation du sol peut en effet être différente d'une année sur l'autre du fait des rotations culturales. Les rotations culturales sont au même titre que les grandes mutations paysagères des années 70, des modifications de l'occupation du sol. Évidemment, ces rotations n'entraînent pas de grands bouleversements, il n'y a pas d'abattage de haies ou de suppression de routes d'une année sur l'autre. Dans le cadre d'un mémoire ayant pour but de comprendre l'impact des mutations paysagères sur les connectivités hydrologiques, il semble indispensable de s'intéresser à ces évolutions paysagères annuelles, et pas seulement sur des périodes de 50 années. Si l'on souhaite utiliser LASCAR dans la gestion des processus de ruissellement, c'est-à-dire mettre en place des travaux d'aménagements sur les parcelles connectées au cours d'eau pour minimiser les risques de transferts hydro-sédimentaires, l'étude des rotations culturales permet de prévoir les mutations paysagères annuelles et les évolutions des connectivités hydrologiques qui vont avec.

L'étude des rotations culturales permet de compléter les résultats obtenus précédemment, notamment pour l'année 2021. Cependant, d'autres facteurs peuvent jouer un rôle dans les connectivités hydrologiques, à savoir la diversité des caractéristiques des entités ayant un rôle dans ces connectivités. Un fossé peut en effet être très enherbé à une place et complètement nu à une autre. La pente de ces fossés peut également varier. Le but de l'étude des sédiments transportés sur le bassin versant est de visualiser les caractéristiques à très grande échelle d'un fossé, d'une parcelle, ayant un rôle dans la mise en place des connectivités hydrologiques. Ici, on ne parle donc pas d'évolution mais le but est d'offrir un axe de réflexion pour la gestion de ces espaces. Cette étude vient en complément de celles réalisées sur les évolutions du paysage sur le temps long (étude diachronique) et le temps court (étude des rotations culturales), afin de montrer le rôle des caractéristiques de chaque entité qui compose un bassin versant. Cette étude permet également

de montrer que les connectivités hydrologiques ne sont pas toujours synonymes de transferts hydro-sédimentaires importants.

En clair, cette partie a pour but d'agrandir l'échelle des évolutions du paysage et de leurs impacts sur les connectivités hydrologiques. La modélisation à un instant T offre des résultats valides pour une année, pour un mois. Prise individuellement, l'étude des rotations culturales permet de montrer l'impact des évolutions paysagères mais cette fois sur le temps court. En complément des modélisations et de l'étude des sédiments transportés sur le bassin versant, cette étude permet d'apporter de nouveaux éléments de réflexion dans le cadre d'une gestion efficace et durable des surfaces connectées au cours d'eau et donc potentiellement initiatrices de transferts hydro-sédimentaires.

6.2. Les rotations culturales : modélisation en fonction des changements annuels d'occupation du sol

6.2.1. Qu'est ce qu'une rotation culturale et quel est l'intérêt d'étudier ce processus dans le cadre de la compréhension de l'impact du paysage sur les connectivités hydrologiques ?

Les rotations culturales définissent l'alternance d'occupation du sol sur une même parcelle d'une année sur l'autre. La rotation culturale est très présente dans les espaces bocagers puisque l'on doit à la fois produire des céréales et de l'herbe pour nourrir le bétail. Cette alternance peut également se faire plusieurs fois sur une même année. Par exemple après la récolte du maïs, certains agriculteurs sèment un couvert végétal afin de protéger la parcelle le temps de l'hiver, évitant ainsi la perte en terre liée au ruissellement. On sait que l'occupation du sol joue un rôle primordial dans les connectivités d'un site. Les rotations culturales permettent de poser les limites de l'étude des connectivités hydrologiques à un instant T par le biais d'une modélisation multi-agents sous LASCAR. Sous LASCAR, les parcelles cultivées et les prairies sont deux entités distinctes jouant donc un rôle différent dans l'interception des précipitations représentées par les agentsgouttes. Concrètement, sur le terrain, si une parcelle est cultivée pour produire du maïs une année, elle sera potentiellement connectée au cours d'eau du fait de l'absence de capacité interceptrice mais si l'année d'après, cette même parcelle est enherbée alors les processus de ruissellement pourront devenir nuls.

6.2.2. Méthode employée pour identifier les rotations culturales du site d'étude

Dans le cadre de ce travail de recherche, quatre années d'étude seront étudiées afin de pouvoir travailler sur des données en continue. La période d'étude s'étend de 2016 à 2019. L'année 2020 ne pouvait pas être étudiée du fait de l'absence de données du Registre Parcellaire Graphique mais également de photos satellites. Ces quatre années ont donc été choisies car elles sont les plus proches de l'année en cours et permettent d'avoir une continuité dans l'étude.

Dans un premier temps, les données du RPG ont été traitées de manière brute, c'est-à-dire sans être remises à l'échelle des parcelles du bassin versant mais en tant qu'îlots de cultures. Le but de la première étape est de regrouper les codes cultures ensemble afin d'en diminuer le nombre et de faciliter la lecture et l'interprétation des résultats. 23 codes cultures étaient présents dans les données du RPG récupérées pour les quatre années d'étude, ils ont été regroupés en 8 catégories présentées dans le tableau suivant.

Regroupement des 23 codes cultures du RPG en 8 catégories

Éléments de la légende	Cultures comprises dans la catégorie
Prairies permanentes	- Prairie permanente - herbe prédominante (ressources fourragères ligneuses absentes ou peu présentes) - Prairie en rotation longue (6 ans ou plus)
Prairies temporaires	- Autre prairie temporaire de 5 ans ou moins
Cultures de printemps	- Maïs ensilage - Maïs - Betterave fourragère - Luzerne
Cultures d'hiver	- Avoine d'hiver - Blé tendre d'hiver - Colza d'hiver - Orge d'hiver - Triticale d'hiver
Mélange légumineuses et céréales	- Mélange de céréales - Mélange de légumineuses fourragères (entre elles) - Mélange de légumineuses prépondérantes au semis et de graminées fourragères de 5 ans ou moins
Légumes / fruits / fleurs	- Autre légume ou fruit annuel - Verger
Surfaces non exploitées	- Surface agricole temporairement non exploitée - Surface boisée sur une ancienne terre agricole - Bande tampon
Surfaces non agricoles	- Surfaces imperméabilisées (bâti, routes,...) - Chemins - Espaces végétalisés

Figure 53 : Tableau présentant les regroupements des 23 codes cultures du RPG en 8 catégories. Source : RPG. Réalisation : S.Lecrosnier.

Pour étudier plus en profondeur les rotations culturales de ce site, le but est d'arriver à un tableau présentant chacun des îlots de culture et leur occupation pour chaque année. Pour cela des zones tampons de 10m ont été créées autour des îlots des quatre années. En effet, les îlots pouvant éventuellement varier en forme et en taille, il était nécessaire de créer ces zones tampons. Les tables attributaires des îlots de chaque année ont ensuite été regroupées par le biais d'une jointure spatiale. Le nombre d'îlots ayant évolué au cours des années, certains ne possèdent pas de codes cultures pour les quatre années. Après avoir effectué ces jointures, on peut exporter le tableau sur excel afin de supprimer les colonnes inutiles dans cette étude. 680 îlots sont donc présents dans ce tableau, ce nombre correspond aux nombre d'îlots en 2019. On obtient donc un tableau qui ressemble à celui-ci :

Tableau présentant l'occupation du sol de chaque îlots sur les quatre années d'étude

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
83	5424300	PPH	PPH	PPH	PPH								
84	5424301	PPH	PPH	PPH	PPH								
85	5424302	MIE	MIE	ORH	MIE								
86	5424303	PPH	PPH	PPH	PPH								
87	5424304	PPH	PPH	PPH	PPH								
88	5424305	PPH	PPH	PPH	PPH								
89	5424306	PPH	PPH	PPH	PPH								
90	5424307	PPH	PPH	PPH	PPH								
91	5424308	MIE	MIE	MIE	ORH								
92	5424418	BYF	MIE	MIE	PTR								
93	5424420	MIE	MIE	MIE	MIE								
94	5424432	MIE	MIE	BTH	MIE								
95	5424434	MIE	ORH	MIE	MIE								
96	5425824	MIE	MIE	MIE	MIE								
97	5425825	PPH	PPH	PPH	PPH								
98	5425826	MLG	MLG	MH5	MH5								
99	5425835	PPH	PPH	PPH	PPH								
100	12852415	BTH	BYF	MIE	BTH								
101	12852416	BTH	MIE	MIE	BTH								
102	5427335	PPH	PPH	PPH	PPH								
103	5427390	MIE	MIE	MIE	MIE								
104	5427391	PPH	PPH	PPH	PPH								
105	5427947	MIE	MIE	MIE	MIE								
106	10569288	PTR	MIE	PTR	PTR								
107	12875455	PTD	PTD	PTD	MIE								

Figure 54 : Capture d'écran du tableau excel présentant l'occupation du sol sur quatre années. Sources : RPG. Réalisation : S.Lecrosnier.

L'étape suivante est d'identifier les rotations culturales les plus fréquentes. Pour cela le choix a d'abord été fait de ne pas s'intéresser aux rotations en prairies permanentes, prairies temporaires et prairies à rotations longues (vert). En effet, les prairies sont toutes peu susceptibles d'être créatrices de processus de ruissellement. Le maïs est la culture qui est la plus présente sur le bassin versant, toutes les rotations présentant au moins une culture de maïs sur une année ont donc été regroupée (orange). Enfin les rotations ne présentant que des céréales autre que le maïs ont été rassemblées (jaune).

6.2.3. Acquisition des données nécessaires à la modélisation

Pour chaque année d'étude le choix a été fait de conserver le cadastre de 2021 issu de la BD_PARCELLAIRE de 2021. Cette base de données avait en effet déjà été retravaillée pour faciliter la modélisation mais elle offre également une base commune qui permettra plus tard de joindre les différentes années ensemble par le biais des numéros de parcelle. Pour chaque année le travail a été le même, le cadastre a été utilisé comme pochoir sur les données du RPG de chaque année.

On applique ensuite une sélection par location sur arcmap afin d'identifier les parcelles se trouvant sur une surface en culture de printemps, culture d'hiver ou encore en prairies permanentes. Dans le cadre de l'étude des transferts hydro-sédimentaires, il n'a pas semblé nécessaire de faire la distinction entre les différents types de cultures ou de prairies. Les prairies permanentes et temporaires ont donc été regroupées sous l'appellation « p » et les cultures de printemps, les cultures d'hiver et les mélanges de céréales, sous l'appellation « c ». Les mares, les surfaces boisées et le bâti ont été repris par rapport à la base de données de 2021. A la fin de ce travail on obtient une table attributaire présentant pour chaque année l'occupation du sol : prairie, culture, bâti, surface boisée, mare. Les données pour chacune des années d'étude ont ensuite été retravaillées comme pour les données de 2021 dans le but d'être modélisées : conversion en raster, reclassification, etc.

6.3. Qualification et quantification des sédiments transportés sur le bassin versant

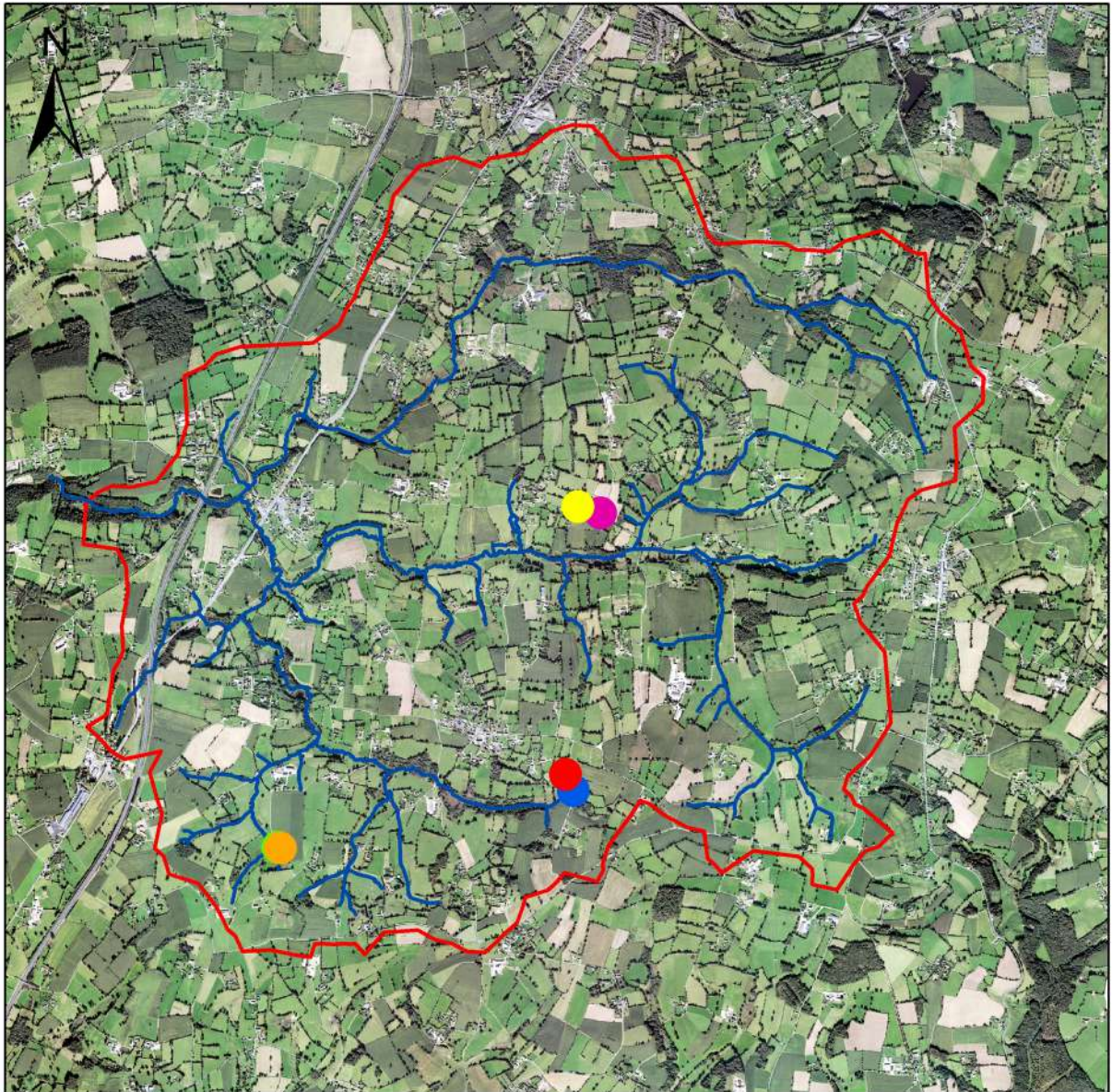
6.3.1. Présentation de l'expérimentation

Le but de l'expérimentation qui va être présentée est de comprendre la circulation des sédiments en cas de ruissellement depuis les parcelles émettrices jusqu'au cours d'eau. Cette expérimentation permet d'apporter des informations concrètes sur la circulation des sédiments. Le but est également de savoir si les connectivités hydrologiques sont nécessairement synonymes de transferts hydro-sédimentaires. Les prélèvements ont été réalisés dans des chemins d'eau ayant des caractéristiques communes. On retrouve à chaque fois une parcelle cultivée en maïs, dont l'entrée de champ donne sur un fossé, lui-même connecté par différents moyens au cours d'eau en amont. Le but est donc également de voir le rôle des fossés dans la circulation des sédiments et notamment de voir si les fossés peuvent également jouer un rôle dans l'interception du ruissellement et des sédiments et pas seulement de couloir d'écoulement vers les cours d'eau. A cet effet, des prélèvements ont été réalisés à la fois dans des parcelles potentiellement émettrices de ruissellement mais également dans les fossés qui y sont connectés. En effet, il a été possible d'observer des dépôts sédimentaires dans ces fossés.

6.3.2. Présentation des sites de prélèvement : localisation

Les sites de prélèvement ont été choisis en fonction de ce qui a été observé pendant les différentes sorties de terrain. Tout d'abord, grâce à l'inventaire réalisé pour la modélisation, il a été possible de localiser les fossés connectés aux différents cours d'eau du bassin versant et les parcelles connectées à ces fossés. Les fossés des chemins 2 et 3 sont connectés à des cours d'eau temporaires de l'Airou, dans le quart sud-ouest du bassin versant. Le fossé du premier chemin d'eau est également connecté à un cours d'eau temporaire de l'Airou, mais dans le quart nord-est du bassin versant. Ensuite, il a fallu vérifier la présence de dépôts sédimentaires dans les fossés afin de prélever des échantillons. Six prélèvements ont au total été réalisés.

Localisation des sites de prélèvements



Légende

- C1P1
- C1P2
- C2P1
- C2P2
- C3P1
- C3P2
- Cours d'eau
- Limite bassin versant

Réalisation : Solène Lecrosnier

Sources : IGN : BDORTHO_50_2015; BDTOPO_2-2_TOUSTHEMES_SHP_LAMB93_D050_2018-03-29

Figure 55 : Carte de localisation des prélèvements.

Les parcelles sont toutes les trois destinées à la culture de maïs. La couverture végétale de ces parcelles était inexistante pour les parcelles du chemin 2 et 3. Sur la parcelle du premier chemin on pouvait observer la présence d'un léger couvert végétal, sûrement semé, mais qui n'empêchait pas les écoulements. Les trois autres prélèvements ont été réalisés dans les fossés, là où l'on pouvait observer des dépôts sédimentaires. Ces dépôts étaient principalement présents à l'entrée des buses présentent le long de ces chemins d'eau. La surface rugueuse des buses et leur positionnement en angle droit facilitent le dépôt des sédiments sur la partie convexe lorsque l'eau y circule.

Les prélèvements ont été réalisés le 12 avril 2021. Le temps était sec depuis plusieurs semaines, il a donc été facile de prélever les sédiments présents dans les fossés. Les prélèvements ont été nommés de C1P1 à C3P2, C correspondant à « chemin » et P à « prélèvement », ils ont donc été nommés selon le chemin d'eau auxquelles ils appartenaient (C1, C2 et C3). Les prélèvements dans les parcelles sont les prélèvements P1 et ceux dans les fossés les P2.

Longueur totale des chemins d'eau et dénivelé

	Longueur totale du chemin	Dénivelé
C1	430m	26m
C2	220m	12m
C3	80m	2m

Figure 56 : Tableau récapitulatif de la longueur des chemins d'eau et du dénivelé entre le point le plus haut et le plus bas. Source : Géoportail.

Altitude des points de prélèvement et dénivelé

	Altitude P1	Altitude P2	Dénivelé de P1 à P2
C1	176m	172m	4m
C2	190m	182m	8m
C3	172m	172m	0m

Figure 57 : Tableau récapitulatif des altitudes des points de prélèvement et du dénivelé entre P1 et P2. Source : Géoportail.

Chemin d'eau n°1 :



Parcelle du prélèvement C1P1



Prélèvement C1P2 : accumulation de sédiments devant la buse



Fossé permettant l'écoulement de la parcelle jusqu'à la buse, puis jusqu'au cours d'eau

Figure 58 : Photographies du chemin d'eau n°1. Sources : S.Lecrosnier (12/04/21)

Chemin d'eau n°2 :



Parcelle du prélèvement C2P1



Prélèvement C2P2: accumulation de sédiments devant la buse



Fossé permettant l'écoulement de la parcelle jusqu'à la buse et jusqu'au cours d'eau

Figure 59 : Photographies du chemin d'eau n°2. Sources : S.Lecrosnier (12/04/21).

Chemin d'eau n°3 :



Parcelle du prélèvement C3P1



Fossé permettant l'écoulement de la parcelle jusqu'à la buse et jusqu'au cours d'eau



Prélèvement C3P2 : accumulation à la sortie de la buse

Figure 60 : Photographies du chemin d'eau n°3. Sources : S.Lecrosnier (12/04/21).

6.3.3. Caractéristiques géologiques et pédologiques des sites de prélèvement

Les chemins d'eau C1 et C2 suivent la configuration suivante : parcelle ⇒ entrée de champ ⇒ fossé ⇒ buse ⇒ fossé ⇒ cours d'eau. Les buses permettent aux écoulements de traverser la route. Le chemin C3 est configuré de cette manière : parcelle ⇒ fossé ⇒ buse ⇒ fossé ⇒ buse ⇒ cours d'eau. La première buse permet également aux écoulements de traverser la route, la deuxième buse, beaucoup plus longue, se trouve sous une prairie permettant ainsi aux écoulement de rejoindre le cours d'eau.

Le tableau suivant présente les caractéristiques pédologiques et géologiques des sites de prélèvements:

	Substrat géologique	Substrat pédologique
C1	Granodiorites cadomiennes à biotite et cordiérite	Brunisols
C2	Altérites des granodiorites cadomiennes à biotite et cordiérite	Rankosols (parcelle) / Brunisols (fossé)
C3	Altérites des granodiorites cadomiennes à biotite et cordiérite	Rédoxisols

Figure 61 : Tableau récapitulatif des caractéristiques géologiques et pédologiques des sites de prélèvement. Réalisation : S.Lecrosnier.

Les deux premiers chemins d'eau, C1 et C2, sont composés de fossés abondamment enherbés tandis que le principal fossé du troisième chemin est complémentent nus. On peut penser que ce fossé est très récent, on peut encore d'ailleurs voir la trace des pelles sur les parois. On peut également penser que ce fossé à été creusé spécifiquement pour permettre l'écoulement des eaux issues de la parcelle qui y est connecté au vu de son positionnement et de l'organisation des buses permettant de conduire facilement les écoulements jusqu'au cours d'eau.

6.3.4. Analyse des échantillons en laboratoire

Le travail en laboratoire s'est effectué sur deux semaines. La première a été consacrée à la préparation des échantillons pour l'analyse avec le granulomètre laser. La première étape est tout d'abord de bien laisser sécher les échantillons sur une plaque afin de travailler sur des échantillons parfaitement secs. On numérote chaque plaque avec le numéro de l'échantillon mis au séchage. Les échantillons sont ensuite broyés à l'aide d'un mortier puis passés au tamis afin de récupérer les particules inférieures à 2mm. Ce qui est supérieur ou égal à 2mm fait partie de ce que l'on appelle le refus. Les deux fractions des échantillons sont ensuite pesés en étant répartis dans deux coupelles distinctes.



Figure 62 : Répartition des échantillons dans les coupelles après séchage, broyage au mortier et passage au tamis. Source : S.Lecrosnier (14/04/21).

Les étapes qui suivent ont pour but de détruire la matière organique présente dans les échantillons afin que de possibles éléments organiques (racines, herbe, insectes,...) ne viennent pas fausser les résultats granulométriques. Pour cela, il faut déposer 5g d'échantillon inférieur à 2mm dans un bécher de 500ml. La quantité nécessaire varie en fonction du type de sol mais également en fonction de la méthode utilisée pour analyse. La pipette de Robinson demande 15g d'échantillons. A ces 5g on ajoute de l'eau déminéralisée ainsi que du peroxyde d'hydrogène. On

laisse agir cela pendant 24h avant de rajouter de nouveau du peroxyde et de l'eau distillée mais cette fois en faisant chauffer l'échantillon à 70°C pendant plusieurs heures. Les échantillons doivent ensuite décanter afin de ne récupérer que les sédiments, on enlève le liquide grâce à une pipette munie d'une poire. On récupère ces échantillons dans de petits flacons à laquelle auquel on ajoute du dispersant avant de les placer dans un rotateur mécanique. Après cette étape les échantillons peuvent être analysés grâce au granulomètre laser.

Les échantillons analysés étaient très concentrés en matière organique, l'étape de la destruction organique a été plus longue que prévue. Les échantillons provenaient en effet de parcelles cultivées en maïs avec des épis et des racines datant de la dernière récolte. Beaucoup de brins d'herbe, de racines et parfois même d'insectes étaient présents dans les échantillons des fossés. L'étape de destruction organique aura nécessité quasiment une semaine au lieu des trois jours prévus.



Figure 63 : Échantillons après destruction de la matière organique et décanlage. Source : S.Lecrosnier (29/04/2021)

Le choix a été fait d'utiliser un granulomètre laser, celui-ci permet de gagner du temps par rapport à la pipette de Robinson et offre des résultats relativement fiables et précis. Les échantillons ont tous été analysés trois fois afin de faire une moyenne de ces trois résultats et donc d'avoir un résultat le plus proche possible de la réalité. Certains échantillons ont du être analysés cinq fois car les résultats étaient très variables notamment sur les quantités de sables, ce fut le cas des échantillons C1P1 et C2P1. En effet l'une des limites de l'analyse granulométrique réside dans la sur représentation ou sous représentation de certains sédiments. Il est très compliqué de prélever un échantillon parfaitement homogénéisé. De plus, de part leurs tailles beaucoup plus importante que les limons ou les argiles, les sables présents dans tous les échantillons peuvent considérablement faire varier le taux de sable dans les résultats de l'analyse. Pour analyser les échantillons ont prélevé une quantité permettant d'obtenir un taux d'obscurité autour de 10, cela correspond à environ 1 pipette et demie. Pour prélever dans les petits bocaux en plastique on agite l'échantillon avec la pipette en même temps que l'on prélève afin de ne pas laisser les sables

retomber et donc fausser l'analyse avec une sur ou sous représentation des sables. Les échantillons qui ont fait l'objet de cinq analyses présentaient un taux trop important de sable sur un des résultats obtenus. Cela est dû à un mauvais pipetage, trop important en sable. On dépose l'échantillon dans la cuve du granulomètre laser qui est remplie d'eau puis on active le système. L'échantillon va être envoyé entre deux hublots où passe un rayon de lumière UV. La machine va calculer les phénomènes de réflexion de chacun des grains présents et va donc pouvoir déterminer la proportion de chacun des sédiments. En effet, les sables ont un angle de réflexion moins large que les limons du fait de leur taille plus importante. On obtient ensuite les résultats que l'on peut transférer sur excel.



Figure 64 : Granulomètre laser utilisé pour l'analyse des sédiments. Source : S.Lecrosnier (30/04/2021).

VII. Mise en évidence de l'impact des évolutions paysagères annuelles sur les connectivités hydrologiques et du rôle des entités du paysage dans les transferts hydro-sédimentaires

7.1. Présentation des principales rotations culturales du bassin versant de Rouffigny à partir des îlots de culture du RPG

Après étude du tableau obtenu par le biais des jointures entre les quatre années d'étude, on compte 164 îlots concernés par une rotation comprenant au moins une fois du maïs sur un total de 680 îlots. 52 îlots présentent une rotation avec trois années de cultures de maïs, 39 avec deux années de culture, 38 avec quatre années et 35 avec une seule année en maïs. Concernant les rotations culturales comprenant du maïs, elles sont majoritairement représentées par une rotation avec trois ans de maïs et une année de céréales d'hiver (blé, orge, colza et tritiche). On trouve également des rotations qui intègrent une année de prairie temporaire. On peut trouver d'autres céréales présentes sur une année comme la betterave fourragère, le trèfle ou encore les mélanges légumineuses / céréales.

On trouve ensuite des rotations avec deux années en maïs sur les quatre. On retrouve en majorité une alternance avec d'autres cultures céréalières notamment des céréales d'hiver. Ces rotations prennent deux formes : soit une année sur deux (maïs – blé tendre d'hiver – maïs – blé tendre d'hiver) soit deux années consécutives pour chaque culture (maïs – maïs – blé tendre d'hiver – blé tendre d'hiver). Dans cette configuration on retrouve également certains îlots qui alternent maïs, culture d'hiver et prairie temporaire. Plus rarement on trouve des alternances prairie temporaire et maïs.

Enfin les rotations présentant une seule culture de maïs sur quatre années sont très diversifiées. Elles comprennent cependant en grande majorité des cultures céréalières. On retrouve beaucoup de configuration où les céréales d'hiver sont cultivées pendant trois années et le maïs une seule année. Ces cultures d'hiver peuvent être ponctuellement remplacées par des mélanges légumineuses / céréales, de la betterave fourragère ou encore de la luzerne. On retrouve également des rotations avec trois années de prairie temporaire ou à rotation longue.

Seulement 11 îlots sont concernés par une rotation sans maïs, ne comprenant que des céréales. Ces îlots alternent en majorité trois cultures de céréales d'hiver : le blé tendre d'hiver, le colza d'hiver et l'orge d'hiver. Les rotations entre ces trois cultures varient d'une parcelle à l'autre avec tout de même une prédominance du blé qui est cultivé deux années sur les quatre. On trouve ensuite des parcelles avec quatre années de luzerne ou de mélange légumineuses / céréales.

Les rotations qui reviennent le plus souvent sur le site d'étude sont donc les suivantes :

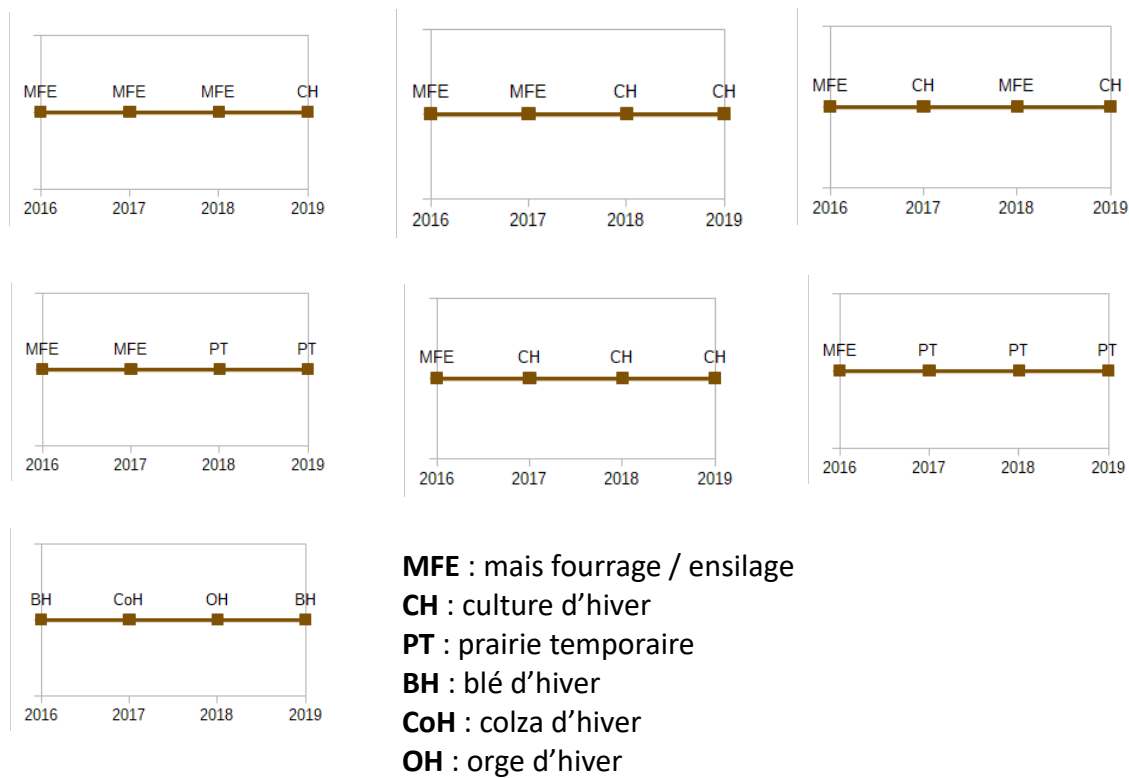
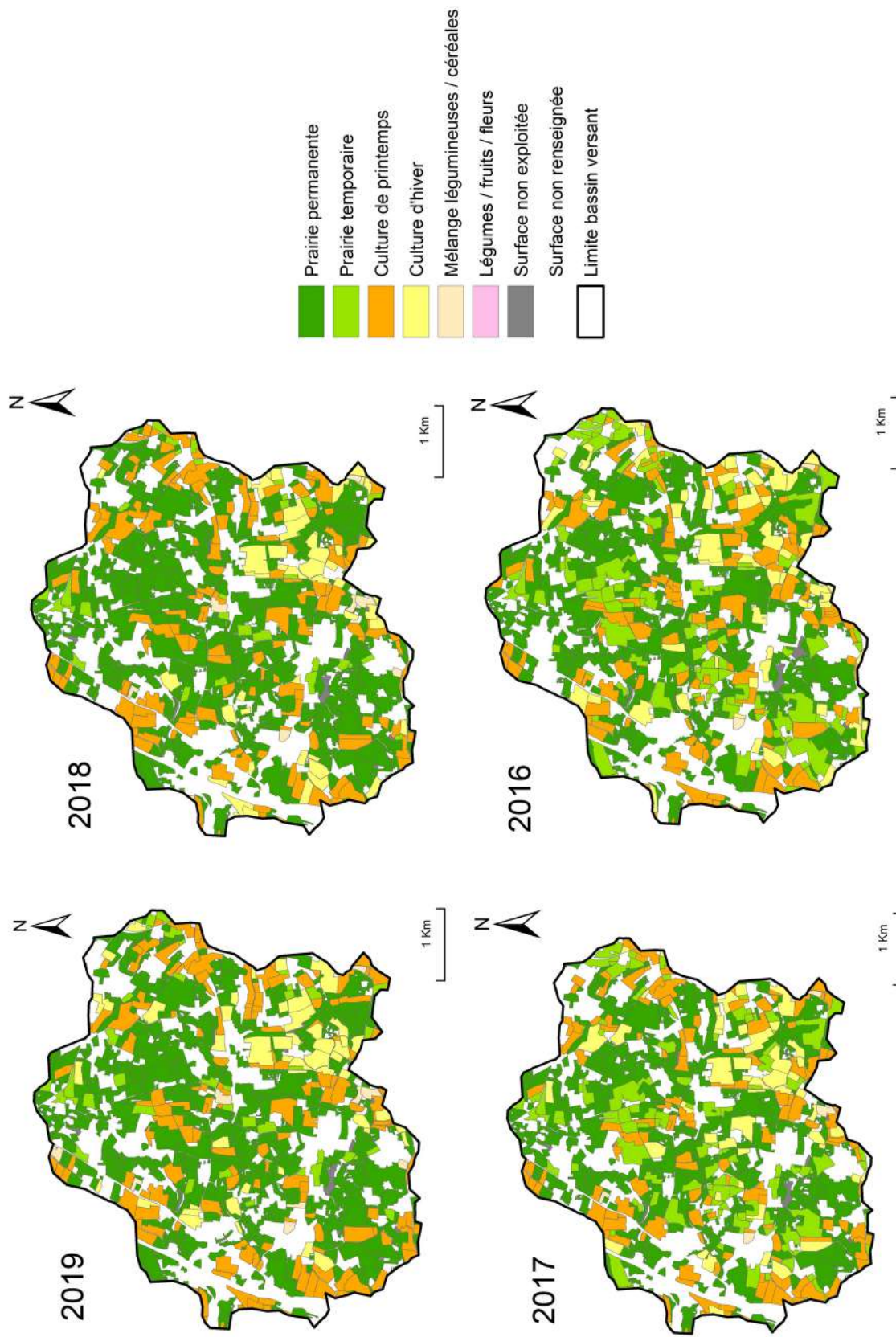


Figure 65 : Présentation des principales rotations culturales du bassin versant. Réalisation : S.Lecrosnier.

La carte suivante présente l'occupation du sol du bassin versant sur quatre années en fonction des îlots de culture du RPG.

Occupation des îlots de culture selon le RPG en 2019, 2018, 2017 et 2016



Sources : RPG_2-0_SHP_LAMB93_R28-2019 / 2018 / 2017 / 2016
 Réalisation : Solène Lecrosnier

Figure 66 : Carte présentant l'occupation des îlots de culture selon le RPG en 2019, 2018, 2017 et 2016.

7.2. Des connectivités hydrologiques influencées par les rotations culturales en fonction des caractéristiques des parcelles

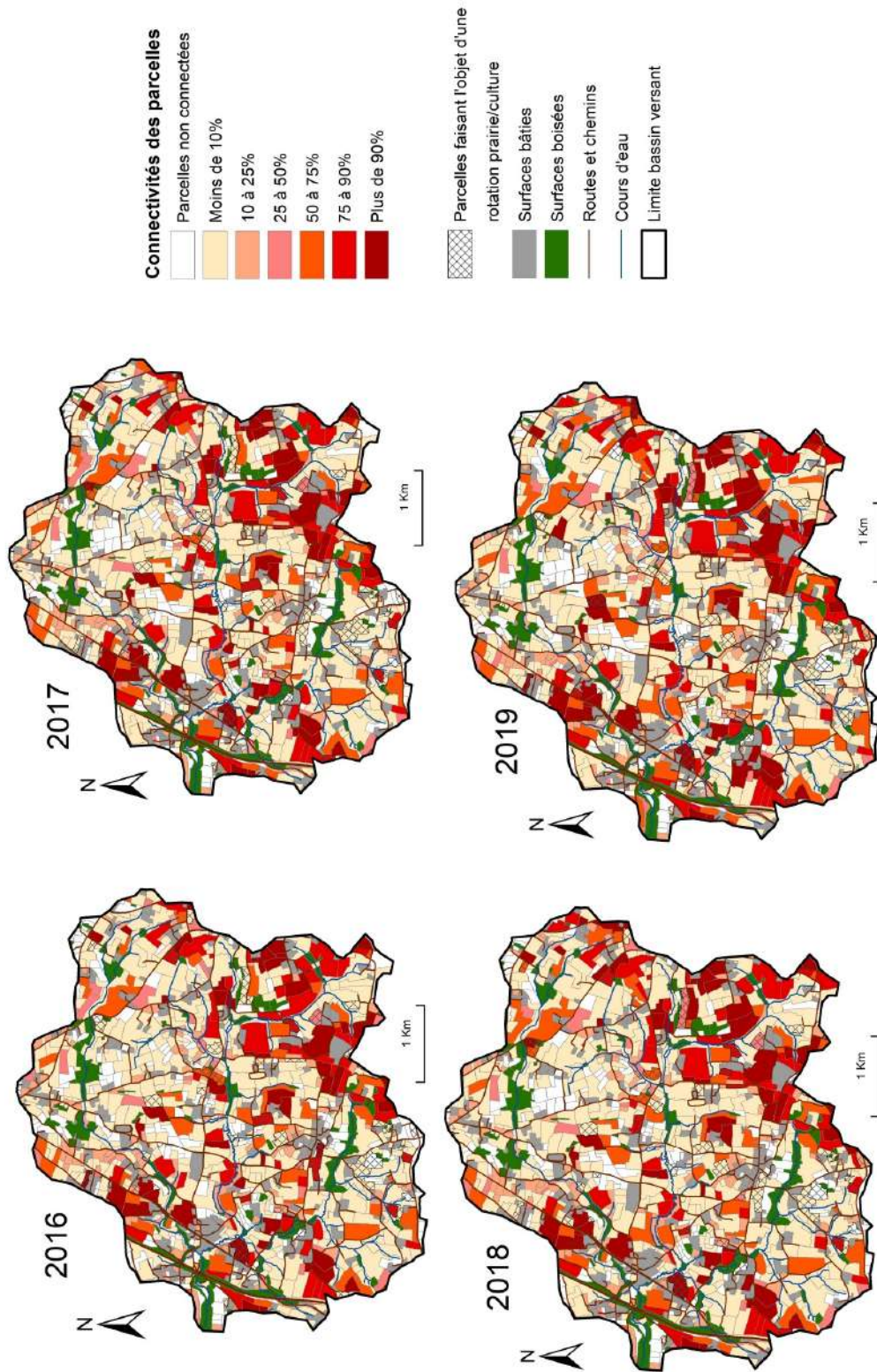
Afin d'étudier le rôle des rotations culturales dans les connectivités hydrologiques, les données du RPG préalablement traitées ont été remises à l'échelle de parcelles de 2021. Les parcelles faisant l'objet d'une rotation entre culture et prairie sur quatre ans ont donc été recensées par le biais d'une jointure des tables attributaires des parcelles pour les quatre années d'étude. On obtient alors un tableau excel avec les numéros de parcelle ainsi que l'occupation du sol sur les quatre années. Comme expliqué précédemment, l'occupation du sol n'est renseignée ici que par une occupation en prairie ou en culture, il n'y a pas de distinction entre les différents types de prairies ou de cultures. Les parcelles faisant l'objet d'une rotation uniquement en parcelles cultivées n'ont pas été prises en compte dans l'étude qui suit.

Au total, 53 parcelles présentent une rotation culturale avec une alternance prairie et parcelle cultivée sur les 1 025 parcelles recensées. Sur ces 53 parcelles, le but est donc de voir quel est le taux de connectivité au cours d'eau en fonction de l'année et de l'occupation du sol, soit en prairie soit en culture. On pourra ainsi définir si les rotations culturales permettent de connecter ou de déconnecter certaines parcelles du cours d'eau.

7.2.1. Présentation des résultats obtenus après modélisations

La carte suivante présente les connectivités de chacune des parcelles en fonction de son occupation sur chaque année. Les 53 parcelles faisant l'objet d'une rotation culturale prairie / culture sont indiquées.

Évolution des connectivités des parcelles en fonction des rotations culturales sur le bassin versant de Rouffignac entre 2016 et 2019



Sources : LASCAR (NetLogo); IGN; BD_TOPO
Réalisation : Solène Lecrosnier

Figure 67 : Carte des connectivités hydrologiques en 2016, 2017, 2018 et 2019.

7.2.2. Changement d'occupation du sol, changement des taux de connectivité ?

Sur les 53 parcelles présentant au moins une alternance prairie / culture sur les quatre années d'étude, 24 parcelles ont des taux de connectivité qui évoluent en lien avec l'occupation du sol. Le tableau suivant présente les taux de connectivité en fonction de l'occupation du sol : en jaune, la parcelle est cultivée, en vert elle est occupée par de la prairie.

Numéro de parcelle	2019	2018	2017	2016
10	0 %	Plus de 90 %	Plus de 90 %	0 %
11	Moins de 10 %	50 à 75 %	50 à 75 %	Moins de 10 %
14	0 %	75 à 90 %	75 à 90 %	75 à 90 %
21	25 à 50 %	25 à 50 %	Moins de 10 %	Moins de 10 %
24	25 à 50 %	25 à 50 %	Moins de 10 %	Moins de 10 %
26	Plus de 90 %	Moins de 10 %	Moins de 10 %	Moins de 10 %
71	Moins de 10 %	25 à 50 %	25 à 50 %	25 à 50 %
72	Moins de 10 %	Moins de 10 %	Moins de 10 %	Plus de 90 %
83	Moins de 10 %	Moins de 10 %	75 à 90 %	75 à 90 %
96	75 à 90 %	75 à 90 %	75 à 90 %	Moins de 10 %
104	10 à 25 %	0 %	0 %	0 %
109	50 à 75 %	50 à 75 %	50 à 75 %	Moins de 10 %
114	Plus de 90 %	Moins de 10 %	Moins de 10 %	Plus de 90 %
117	75 à 90 %	75 à 90 %	10 à 25 %	10 à 25 %
123	Plus de 90 %	Moins de 10 %	Moins de 10 %	Moins de 10 %
128	Moins de 10 %	50 à 75 %	50 à 75 %	50 à 75 %
130	75 à 90 %	75 à 90 %	75 à 90 %	Moins de 10 %

131	Moins de 10 %	Moins de 10 %	Moins de 10 %	50 à 75 %
139	Moins de 10 %	75 à 90 %	75 à 90 %	75 à 90 %
171	Moins de 10 %	75 à 90 %	75 à 90 %	75 à 90 %
181	50 à 75 %	50 à 75 %	Moins de 10 %	Moins de 10 %
183	Moins de 10 %	Moins de 10 %	Moins de 10 %	75 à 90 %
191	Plus de 90 %	25 à 50 %	25 à 50 %	25 à 50 %
198	75 à 90 %	75 à 90 %	75 à 90 %	Moins de 10 %

Figure 68 : Tableau récapitulatif de l'évolution des taux de connectivités pour les parcelles ayant une rotation prairie / culture. Réalisation : S.Lecrosnier.

Ces résultats montrent bien le rôle non négligeable des rotations culturales dans les connectivités hydrologiques du site d'étude. Une même parcelle peut en effet être connectée à moins de 10 % lorsqu'elle est cultivée en tant que prairie et avoir un taux de connectivité supérieur à 90 % lorsque l'on y cultive des céréales. On note des écarts plus ou moins importants en fonction des caractéristiques de chacune des parcelles. On note également que les écarts les plus importants sont présents quand les parcelles en prairies ne sont quasiment pas connectées. Certaines parcelles comme la parcelle n°26 passe de plus de 90 % de connectivité en tant que culture à moins de 10 % en tant que prairie. Cette parcelle se situe au centre du bassin versant et sa superficie est de 35 500m². Globalement c'est le type de caractéristiques que l'on retrouve pour les parcelles dont le taux de connectivité évolue en fonction des rotations culturales : un positionnement à l'intérieur du bassin versant et une superficie plus élevée que les parcelles qui n'évoluent pas. Pour les parcelles dont ce taux varie, la surface moyenne est de 1,9ha avec un minimum de 8 139m².

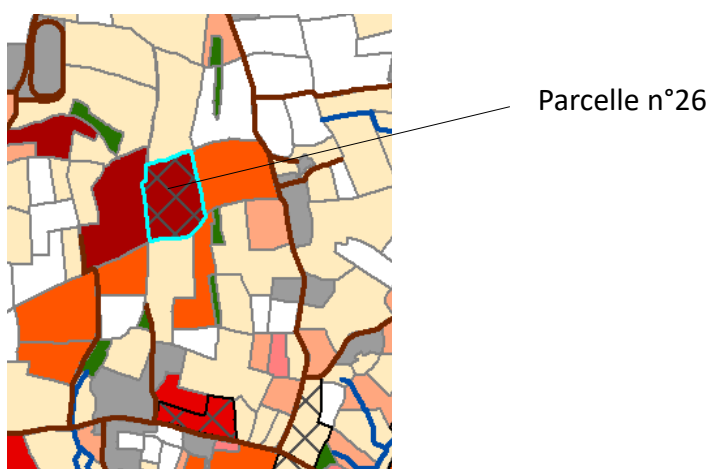


Figure 69 : Zoom sur la parcelle n°26 depuis la carte des connectivités hydrologiques de 2019.

Les 29 autres parcelles faisant l'objet d'une rotation prairie / culture ont toutes les mêmes taux de connectivité, peu importe si elles sont en prairies ou cultivées. La grande majorité présentent des taux de connectivité faibles sur les quatre années, à moins de 10 %. 22 parcelles sur les 29, ont un taux de connectivité à moins de 25 % sur les quatre années. Les 5 parcelles qui présentent un même fort taux de connectivité sur les quatre années, à plus de 75 %, sont des parcelles en limite des cours d'eau. On note plusieurs points communs entre les parcelles qui présentent le même taux de connectivité sur les quatre années : soit ces parcelles sont en limite de bassin versant, soit elles longent les cours d'eau, soit ces parcelles sont de petite taille. La surface moyenne des parcelles dont les taux de connectivités n'évoluent pas est de 1,4ha avec un minimum de 481m², ce qui est inférieur aux parcelles dont le taux de connectivité évolue en fonction des rotations culturales.

Certaines parcelles restent complètement déconnectées des cours d'eau, en étant cultivées en prairie ou en culture. C'est par exemple le cas de la parcelle n°457, celle-ci cumule plusieurs éléments pouvant expliquer ce taux de connectivité nul : un positionnement en limite de bassin versant, une faible superficie (1,5ha) mais également d'autres éléments comme une entrée de champ (représentée par une croix jaune) orientée vers la route entraînant des écoulements le long de celle-ci.

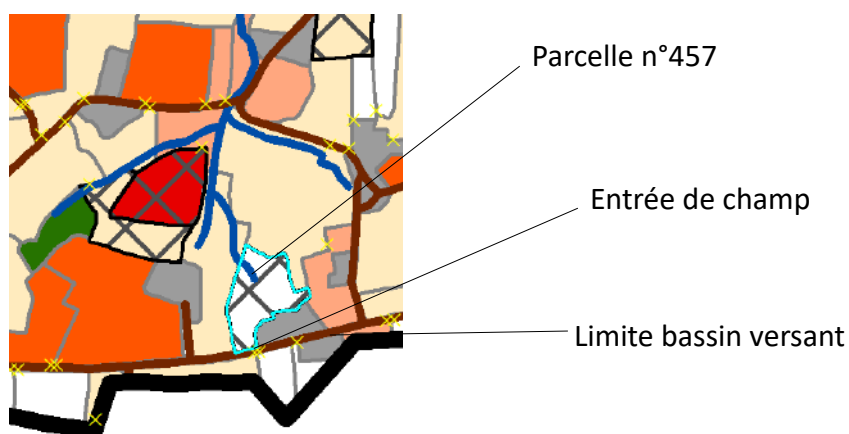


Figure 70 : Zoom sur la parcelle n°457 depuis la carte des connectivités hydrologiques de 2019.

7.2.3. Des limites à poser quant à l'interprétation des résultats obtenus

Sur le terrain il a été possible de voir que ces rotations culturales ne sont pas seulement annuelles. En effet, certaines parcelles en prairies lors des premières sorties de terrain avaient ensuite été labourées à la belle saison afin de cultiver du maïs ou une autre culture de printemps. Certaines parcelles, notamment celles cultivées en maïs, sont recouvertes d'un léger couvert végétal pendant l'hiver afin de protéger les parcelles. Ce couvert végétal, en fonction de sa densité, peut donc également avoir un impact sur les processus de ruissellement en les stoppant, ou tout du moins en les amenuisant.

Les données du RPG sont très faciles à manipuler et permettent de voir l'évolution de l'occupation du sol. Cependant ces données manquent parfois de précision du fait qu'elles ne soient pas à l'échelle des parcelles mais à l'échelle d'îlots de culture. Les données sont également issues des déclarations des agriculteurs eux-mêmes, il peut donc y avoir des imprécisions ou des parcelles faussement déclarées. L'idéal serait d'avoir un suivi de terrain régulier sur plusieurs années mais également d'aller interroger les agriculteurs pour savoir quels types de rotations culturales ils mettent en place. Ce contact avec les agriculteurs permettrait également d'avoir plus d'informations sur les rotations saisonnières et pas seulement d'une année sur l'autre.

Dans un travail plus poussé sur les rotations culturales il serait possible de mettre en lumière l'impact du type de culture pour les parcelles qui restent toujours cultivées. En effet, des alternances entre cultures d'hiver comme le blé et les cultures de printemps comme le maïs, laissent les parcelles à nu pendant des périodes différentes. Il serait donc pertinent de visualiser ces rotations culturales et leurs impacts à l'échelle des saisons.

En résumé, ce travail sur les rotations culturales permet de montrer que ces processus peuvent avoir un impact non négligeable sur les connectivités hydrologiques globales. D'une année sur l'autre les connectivités évoluent donc et avec elles, les processus de ruissellement et le transport de sédiments jusqu'aux cours d'eau. Cette étude remet donc en perspective les modélisations multi-agents à un instant T, cependant il serait toujours possible de préciser les données de départ afin d'avoir des résultats encore plus précis et proches de la réalité du terrain.

7.3. Mise en évidence de l'impact des caractéristiques des entités paysagères sur les transferts hydro-sédimentaires

7.3.1. Présentation des résultats de l'expérimentation

Le tableau suivant résume les résultats non corrigés de Malvern sous forme de pourcentages. Les chiffres rouges représentent les pourcentages les plus importants dans chaque classe de sédiments et les jaunes, les plus faibles.

	C1P1	C1P2	C2P1	C2P2	C3P1	C3P2
Argile	3,16	2,20	3,13	1,04	2,31	2,82
Limon fin	23,34	24,97	23,29	12,41	25,59	35,99
Limon grossier	17,88	18,07	23,41	11,34	32,34	37,64
Sable fin	17,07	28,67	30,52	28,23	25,53	21,26
Sable moyen	9,27	15,66	11,28	23,09	3,93	0,53
Sable grossier	29,29	10,45	8,38	23,86	10,31	1,75

Figure 71 : Tableau récapitulatif des résultats de la granulométrie pour chaque prélèvement. Réalisation : S.Lecrosnier.

Les graphiques suivants reprennent les pourcentages du tableau pour chacun des prélèvements.

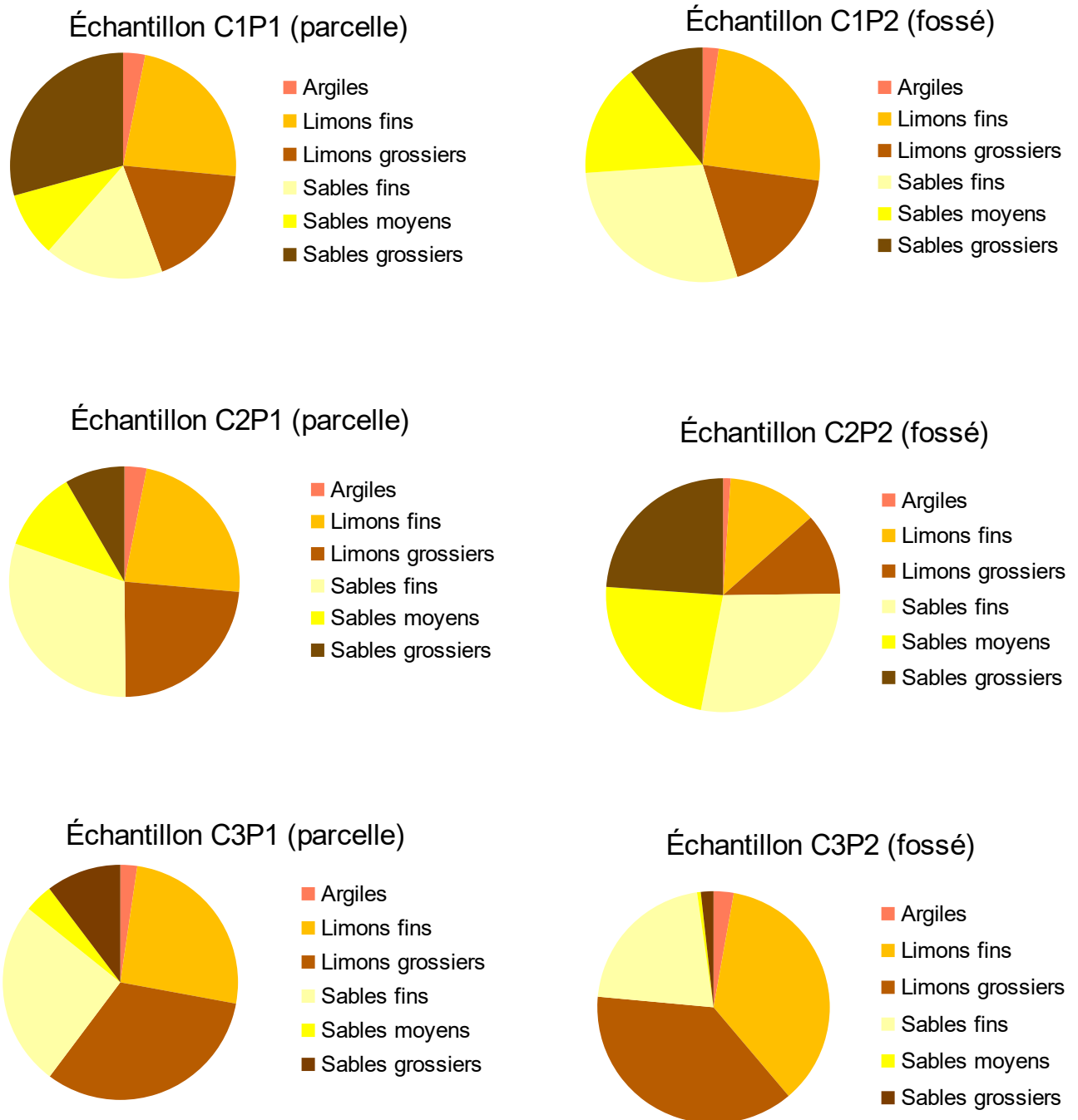


Figure 72 : Graphiques en secteur reprenant les résultats de la granulométrie pour chaque prélèvements.
Réalisation : S.Lecrosnier.

Le tableau suivant présente les évolutions en pourcentages entre les prélèvements dans les parcelles et dans les fossés pour chaque chemin d'eau.

	De C1P1 à C1P2	De C2P1 à C2P2	De C3P1 à C3P2
Argile	- 0,96	- 2,09	+ 0,51
Limon fin	+ 1,73	- 10,88	+ 10,4
Limon grossier	+ 0,19	- 12,07	+ 5,3
Sable fin	+ 1,16	- 2,29	- 4,27
Sable moyen	+ 6,39	+ 11,81	- 3,4
Sable grossier	- 18,84	+ 15,48	- 8,56

Figure 73 : Tableau présentant les évolutions pour chaque famille de sédiments entre P1 et P2 (en%).
Réalisation : S.Lecrosnier.

7.3.2. Des parcelles plus ou moins initiatrices de transferts hydro-sédimentaires

Ce que l'on observe tout d'abord c'est que pour les fossés enherbés (C1 et C2), les variations les plus importantes s'observent sur les sables grossiers. Pour le fossé à nu, la variation la plus importante s'observe sur les limons fins. On observe également que la parcelle la plus riche en sables est la C1P1 avec une substrat granodiorites et brunisols. En général on trouve très peu d'argiles et beaucoup de sables. Cette absence d'argiles s'explique par le fait de leur légèreté, les argiles ont besoin de beaucoup de temps pour se déposer. Le fossé à nu a une teneur très faible en sables mais importante en limons. Le deuxième chemin d'eau présente le plus de différences sur les pourcentages de sédiments entre la parcelle et le fossé.

Malgré des caractéristiques similaires, les chemins d'eau C1 et C2 présentent des résultats très différents. Au niveau du premier chemin, on observe une baisse des sables grossiers dans le fossé de 18,84 %. Dans le deuxième chemin d'eau, on observe une hausse importante du taux de sables grossiers de 15,48 %. Cette différence peut venir de plusieurs aspects. Tout d'abord le type de ruissellement en action, en effet sur la première parcelle on pouvait observer un ruissellement diffus, peu concentré, et donc avec une faible capacité érosive. Celui-ci n'était donc pas en mesure de transporter des particules de taille importante en dehors de la parcelle. De plus, la parcelle n'avait pas été retravaillée au moment des prélèvements, cela rendait la terre compacte et donc peu sensible au ruissellement. La parcelle du deuxième chemin d'eau avait été retravaillée depuis un certain temps, les particules étaient donc plus facilement transportables par le ruissellement. Ce même ruissellement était possiblement concentré et avait donc la capacité de transporter des particules d'une taille importante. La pente peut également jouer un rôle, si elle est importante les sédiments grossiers vont se déposer en bas de pente par effet de gravité. Le deuxième chemin d'eau présente le dénivelé le plus important des trois chemins d'eau entre le premier prélèvement et le deuxième. Avec 8m de dénivelé il est deux fois supérieur à celui du premier chemin d'eau. Le

prélèvement dans le fossé au niveau du deuxième chemin d'eau s'est fait plus bas que sur le premier chemin d'eau. Pour le deuxième chemin on peut calculer le nombre de kilos de terre nécessaire pour atteindre un taux de sables (fins, moyens et grossiers) de 75,18 % pour le fossé. La parcelle présente un taux de sables de 50,18 %. En grammes, sur l'échantillon analysé de 5g, cela représente 2,51g. Pour le fossé cela représente 3,76g. Pour plus de facilité, les résultats ont été recalculés à l'échelle d'un échantillon de 1kg. Dans la parcelle, pour 1kg de terre on trouve 502g de sables, et dans le fossé pour 1kg de terre on trouve 752g de sables. Il faut donc 1,5kg de terre pour obtenir 752g de sables dans le fossé. A partir de ce calcul on peut estimer quelle quantité de terre a été exportée jusque dans le fossé.

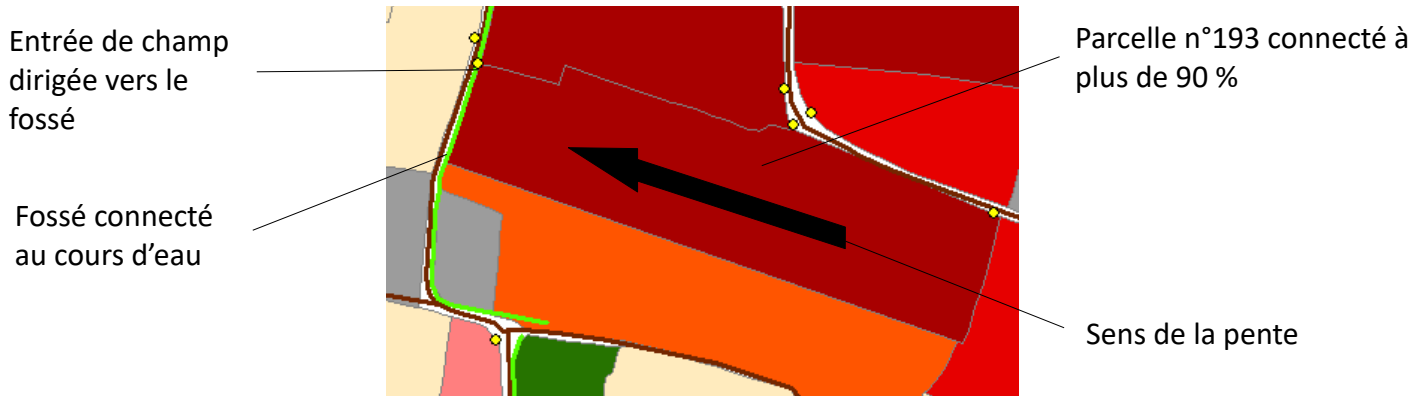
Le troisième chemin d'eau présente des caractéristiques très différentes et donc des résultats différents. Les variations entre la composition des deux prélèvements varient beaucoup moins. Cette variation se fait principalement au niveau des limons. On peut supposer que du fait du dénivelé inexistant entre les deux points de prélèvement, les sables ne circulent pas et sont « plaqués » au fond du fossé juste au niveau de la sortie du champ. Les limons, plus légers, peuvent être transportés jusqu'au cours d'eau.

7.4. Les rotations culturales et les analyses de sédiments : des études complémentaires à la modélisation dans le cadre d'une gestion efficace et durable des surfaces connectées

L'étude des transferts hydro-sédimentaires peut se faire par modélisation mais celle-ci doit toujours être relativisée. Les paysages évoluent sur le temps long mais également sur le temps court. Entre 1955 et 2021 on note évidemment de grandes mutations paysagères du fait des évolutions de l'agriculture en lien avec les évolutions sociales et économiques. Les paysages évoluent également d'une année à l'autre du fait des rotations culturales, et parfois même d'un mois à l'autre. Il est indispensable de prendre en compte ces évolutions sur le temps court afin de proposer des solutions durables dans le temps face à ces phénomènes d'érosion des sols et de transferts hydro-sédimentaire. Le type de ruissellement qui se met en place est également un bon indicateur de la capacité érosive du ruissellement. Cette étude permet d'intervenir de manière préférentielle sur les parcelles où un ruissellement concentré et donc érosif se met en place. L'ensemble de ces éléments permet de savoir quelles parcelles doivent faire l'objet d'une plus grande attention. Des parcelles connectées aux cours d'eau selon la modélisation, cumulé à une rotation culturale qui laisse la terre à nu pendant les périodes pluvieuses, cumulé à un ruissellement de type concentré. On peut prendre l'exemple de la parcelle d'étude dans le deuxième chemin d'eau étudié, identifié par le numéro 193. En 2021, cette parcelle présente un taux de connectivité de plus de 90 %, en plus de cela entre 2016 et 2019 cette prairie n'a pas connu de rotation culturale, c'est à dire qu'elle est constamment cultivée en culture de printemps. Les cartes de connectivité réalisées entre 2016 et 2019 montrent donc un taux de connectivité toujours supérieur à 90 %. Après analyse du prélèvement dans le fossé qui est connecté à cette parcelle, on sait également que celle-ci exporte une grande quantité de sable à travers la mise en place d'un ruissellement concentré. D'autres éléments s'ajoutent à cela comme la présence d'une

entrée de champ en bas de pente, qui débouche dans un fossé connecté au cours d'eau. En résumé cette parcelle cumule tous les attributs permettant la mise en place de processus de ruissellement et de transferts hydro-sédimentaires importants :

Des caractéristiques propices aux phénomènes de ruissellement



+

Une parcelle cultivée uniquement en maïs laissant la terre à nu l'hiver

192	ch16	ch17	ch18	ch19
193	cp16	cp17	cp18	cp19
194	cp16	cp17	cp18	cp19

+

Une augmentation du taux de sables entre la parcelle et le fossé

	De C2P1 à C2P2
Sable moyen	+ 11,81 %
Sable grossier	+15,48 %

Figure 74 : Schéma de présentation des caractéristiques de la parcelle n°193. Réalisation : S.Lecrosnier.

L'accumulation de ces résultats pourrait éventuellement aboutir à une sorte d'indice de risque plus ou moins importants de transferts hydro-sédimentaires pour chaque parcelle. Chaque caractéristique pourrait apporter un point à chaque parcelle. Par exemple on peut ici comparer les risques entre les deux parcelles où des prélèvements ont été effectués, la parcelle n°130 dans le chemin d'eau n°1 et la parcelle n°193 dans le chemin d'eau n°2. Ces deux parcelles présentent en effet à première vue les mêmes caractéristiques et donc les mêmes facteurs de risques de transferts hydro-sédimentaires.

Comparaison de la parcelle n°193 et n°130

	Parcelle n°193	Parcelle n°130
Type de culture en 2021	Culture de printemps	Culture de printemps
Part de connectivité	Plus de 90 %	75 à 90 %
Type de rotation culturale sur 4 ans (2016 – 2019)	CP – CP – CP - CP	P – CP – CP - CP
Fossé relié au cours d'eau	Oui	Oui
Présence de sable dans le fossé	+++	+

Figure 75 : Tableau de comparaison des caractéristiques de la parcelle n°193 et n°130. Réalisation : S.Lecrosnier.

Sur deux parcelles en culture, possédant une entrée de champ qui donne dans un fossé relié au cours d'eau et avec chacune une connectivité importante, l'étude des rotations culturales et des sédiments transportés permet de considérer que c'est la parcelle n°193 qui est la plus susceptible de transférer le plus de sédiments dans le cours d'eau. A caractéristiques égales, s'il est nécessaire de choisir entre plusieurs parcelles, ces études peuvent être de bons compléments dans la gestion de ces processus. Dans l'étude des rotations culturales on montre également que la taille des parcelles jouent un rôle important dans les connectivités de celles-ci. Ainsi, agir sur une grande parcelle en prairie qui fait l'objet d'une rotation culturale en culture semble plus pertinent que d'agir sur une parcelle cultivée de taille plus modeste. L'étude des rotations culturales est assez simple à mettre en place et demande peu de moyen. Au mieux, il serait envisageable de disposer de données plus précises que celles fournies par le RPG. L'étude des sédiments demande plus de moyens, de techniques et de matériels, mais celle-ci apparaît comme un bon moyen de savoir quelles parcelles entraînent des processus de transferts hydro-sédimentaires sans être sur place aux moments des épisodes de ruissellement.

Il faut évidemment prendre d'autres éléments en compte comme la superficie de la parcelle ou encore la pente plus ou moins importante. Des éléments encore plus précis peuvent être pris en compte afin d'obtenir un outil de gestion efficace et pertinent, comme la nature des fossés. Au delà de leur rôle de conducteur de ruissellement, ils peuvent également intercepter des sédiments de part leur enherbement ou leur pente. On agit alors sur le problème à la base et on apporte ainsi une solution plus durable dans le temps du fait de la prise en compte de l'évolution et des caractéristiques à grande échelle des paysages.

Conclusion générale :

La géographie a pour but d'étudier les relations entre les Hommes et leur territoire. À travers l'étude des évolutions paysagères et leurs impacts sur les connectivités hydrologiques, ce travail de recherche montre à quel point les évolutions sociales ou économiques peuvent modifier un territoire, un environnement.

Le remembrement a permis le développement de l'agriculture, la simplification du travail à travers notamment la mécanisation des travaux agricoles. Les rendus ont été grandement améliorés et il est aujourd'hui difficile d'imaginer manquer de quoi que ce soit en France. Cependant, ces mutations ont eu un réel impact sur l'environnement au sens large du terme. Les connectivités hydrologiques et les phénomènes de transferts hydro-sédimentaires qui peuvent aller avec, ont un impact à l'échelle d'une parcelle mais également de tout un bassin versant, de tout un écosystème. Ce mémoire a prouvé le lien entre agrandissement des parcelles, abattage des haies et augmentation des taux de connectivités au cours d'eau, même dans un paysage de bocage. Les parcelles sont donc plus à même de déverser des sédiments mais également des polluants dans les cours d'eau. L'Airou, mais également la Sienne, sont donc impactés par ces processus locaux. Le cours d'eau de la Sienne qui se jette dans la mer de la Manche joue un rôle indéniable dans la qualité des écosystèmes qu'il traverse.

Dans le cadre de ce travail de recherche, on a également montré la nécessité de prendre en compte tous les éléments qui constituent le paysage. Les parcelles sont les initiatrices de ces processus de ruissellement mais les haies, les fossés, les routes ou encore les entrées de champs, jouent un rôle indéniable dans le jeu des connectivités et des déconnectivités. Quand toutes ces entités sont renseignées, la modélisation multi-agents devient un réel outil de gestion de ces espaces et permet d'imaginer des solutions concrètes pour protéger les hydrosystèmes.

Ce travail a également montré l'importance des évolutions du paysage sur le court terme. Les rotations culturales entraînent des modifications paysagères annuelles ayant un impact non négligeable dans l'augmentation ou la baisse des surfaces connectées. Les caractéristiques des entités du paysage ont également un rôle notamment dans les transferts hydro-sédimentaires. Le type de ruissellement qui se met en place, l'enherbement des fossés et leurs pentes sont autant d'éléments pouvant avoir un impact à très grande échelle sur l'apport plus ou moins important de sédiments au cours d'eau.

Le bassin versant de la Sienne a été peu étudié tout comme le cours d'eau en lui-même. Avec une superficie de 580km², ce bassin versant et ce cours d'eau jouent nécessairement un rôle dans des processus environnementaux dans le département de la Manche. Il serait intéressant d'étudier d'autres zones de ce vaste bassin versant, par exemple dans une zone plus en aval que celle étudiée dans ce mémoire.

Au-delà de l'aspect environnemental, les évolutions du paysage et des processus qui y sont liés peuvent avoir un réel impact social sur les agriculteurs qui perdent de la terre comme sur les touristes qui se baignent dans une eau avec une qualité qui se dégrade à Régnerville-sur-Mer, du fait de l'apport d'intrants agricoles. Ce phénomène touche tout le monde, il serait évidemment préférable de changer le système agricole, en faisant rentrer moins d'intrants, en modifiant la structure des parcelles. Il faut cependant envisager des solutions rapides, efficaces et réalisables. L'implantation de haies, le déplacement des entrées de champ, la prévention auprès des agriculteurs, sont autant de moyens de mettre en place des actions capables de protéger les hydrosystèmes normands, sources de nombreuses richesses.

Bibliographie :

Auzet A.V. (1987a). L'érosion des sols cultivés en France sous l'action du ruissellement. Annales de Géographie, 537p, pp 529-556.

Lien URL : https://www.persee.fr/doc/geo_0003-4010_1987_num_96_537_20627

Bureaux des recherches géologiques et minières. (1988). Notice explicative de la feuille Villedieu-les-Poêles à 1/50 000, 50p.

Cosandey C., Robinson M. (2012). Hydrologie continentale. 2^{de} édition, Armand Colin, 447 p.

Delahaye D. (1996). Processus de ruissellement et d'érosion des sols en Basse-Normandie. Norois. N°169, La Basse Normandie, pp 45-59

Lien URL : https://www.persee.fr/doc/noroi_0029-182x_1996_num_169_1_6681

Ferber, J. (1995). Les systèmes multi-agents. Vers une intelligence collective. InterEditions, Paris.

Lien URL : <http://cormas.cirad.fr/fr/demarch/sma.htm>

Gis Sol. (2011). Synthèse sur l'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 24 p

Lien URL : http://147.100.179.105/gissol/rapports/synthese_HD.pdf

Guillemois, M. (2020). Trajectoire d'un hydrosystème : le Guer amont sous-bassin du Léguer. Géographie, 125p.

Lien URL : <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02942640/document>

Jean Boiffin, François Papy, Micheline Eimberck. (1988). Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. I. – Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. Agronomie, EDP Sciences, 8 (8), pp 663-673.

Lien URL : [ffhal-00885148f](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00885148f)

Le Breton, M. (2019). Étude de la variabilité de la réponse hydro-sédimentaire d'un bassin versant en contexte sédimentaire : l'exemple de la Mue. Géographie, 100p.

Le Gouée, P. (2016). Référentiel Régional Pédologique du département de la Manche (Étude n°30235).

Le Gouée, P. (2004). Le ruissellement et l'érosion des sols dans le bassin versant du Moulin de Pontorsier (Sud-Manche), Une étude expérimentale pour une gestion concertée des ressources environnementales en domaine bocager, 153p.

Marie, M. (2009). Des pratiques des agriculteurs à la production de paysage de bocage. Étude comparée des dynamiques et des logiques d'organisation spatiale des systèmes agricoles laitiers en Europe (Basse-Normandie, Galice, Sud de l'Angleterre). Géographie. Université de Caen, 2009. Français. tel-00441117, 520p.

Merot, P., Gascuel-Oudou, C., Walter, C., Zhang, X. & Molenat, J. (1999). Influence du réseau de haies des paysages bocagers sur le cheminement de l'eau de surface. Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, 12 (1), pp 23–44.

Lien URL : <https://doi.org/10.7202/705342ar>

Reulier, R ; Delahaye, D ; Viel, V ; Davidson, R. (2017). Connectivité hydro-sédimentaire dans un petit bassin versant agricole du nord-ouest de la France : de l'expertise de terrain à la modélisation par Système Multi-Agent. Géomorphologie : relief, processus, environnement, vol. 23 - n° 4

Lien URL : <http://journals.openedition.org/geomorphologie/11857>

Reulier, R ; Delahaye, D, Viel, V ; Preux, T. (2015). L'érosion des sols sévit aussi dans le bocage !. Faune Sauvage, p. 43-47.

Lien URL : <ffhal-01485837>

Reulier, R. (2015). Structure paysagère et dynamiques spatiales des transferts hydro-sédimentaires. Approche par simulation multi-agents, Thèse de doctorat, 350p.

Viel, V ; Delahaye, D ; Reulier, R. (2014). Impact de l'organisation des structures paysagères sur les dynamiques de ruissellement de surface en domaine bocager. Étude comparée de 3 petits bassins versants bas-normands. Géomorphologie : relief, processus, environnement, vol. 20 - n° 2

Lien URL : <http://journals.openedition.org/geomorphologie/10619> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.10619>

Sites Internet :

Association Patrimoine Géologique de Normandie : <http://apgn.fr/bassenormandie.php>

Bureau de recherches géologiques et minières : <https://www.brgm.fr>

DREAL Normandie : <http://normandie.developpement-durable.gouv.fr/>

Géoportail : <https://www.geoportail.gouv.fr>

Infoclimat : <https://www.infoclimat.fr>

Syndicat Intercommunal d'Aménagement et d'Entretien de la Sienne : <http://www.siaes.net/>

Wikipédia : <https://fr.wikipedia.org/>

Table des figures :

Figure 1 : Photographie de la Sienna à Gavray-sur-Sienne. Source : S.Lecrosnier (12/04/21).....	P14
Figure 2 : Carte de localisation du bassin versant de la Sienna.....	P15
Figure 3 : Carte de présentation des principaux ensembles climatiques de Basse-Normandie. Source : DREAL Normandie (2013).....	P16
Figure 4 : Carte des sites de l'inventaire du patrimoine géologique de Basse-Normandie. Source : APGN.....	P18
Figure 5: Carte de localisation du bassin versant de Rouffigny.....	P20
Figure 6 : Carte géologique du bassin versant de Rouffigny.....	P22
Figure 7 : Carte pédologique du bassin versant de Rouffigny.....	P24
Figure 8 : Carte des altitudes du bassin versant.....	P25
Figure 9 : Photographies des différents cours d'eau du bassin versant. Sources : S.Lecrosnier (28/12/20).....	P26
Figure 10 : Carte des cours d'eau et affluents du bassin versant.....	P27
Figure 11: Photographies à l'exutoire du bassin versant à cinq mois d'intervalle. Sources : S.Lecrosnier (28/12/20 ; 20/05/21).....	P28
Figure 12 : Photographie à l'exutoire du bassin versant lors d'un épisode de crue. Source : S.Lecrosnier (28/12/20).....	P28
Figure 13 : Carte de localisation des communes de référence pour les relevés météorologiques.....	P29
Figure 14: Graphique en barres de comparaison des cumuls pluviométriques mensuels des stations de Fontenermont et Coulouvray-Boisbenâtres. Réalisation : S.Lecrosnier.....	P30
Figure 15 : Graphique en barres présentant la normale climatique de 1991 à 2020 à Coulouvray-Boisbenâtre. Réalisation : S.Lecrosnier.....	P31

Figure 16 : Photographies de parcelles cultivées sur le bassin versant. Sources : S.Lecrosnier (28/12/20 ; 29/03/21 ; 12/04/21).....	P32
Figure 17 : Photographies de prairies du bassin versant. Sources : S.Lecrosnier (30/03/21 ; 12/04/21 ; 20/04/21).....	P33
Figure 18 : Surface boisée au niveau de l'exutoire du bassin versant. Source : S.Lecrosnier (20/05/21).....	P33
Figure 19 : Graphique en secteur présentant l'occupation du sol en 2021. Réalisation : S.Lecrosnier.....	P34
Figure 20 : Carte d'occupation du sol en 2021.....	P35
Figure 21 : Capture d'écran de l'interface LASCAR. Source : S.Lecrosnier.....	P38
Figure 22 : Deuxième capture d'écran de l'interface LASCAR. Source : S.Lecrosnier.....	P39
Figure 23 : Exemple d'une des cartes utilisées pour l'inventaire de terrain (quart sud-ouest). Sources : IGN ; S.Lecrosnier.....	P41
Figure 24 : Photographies de fossés présents sur le bassin versant. Sources : S.Lecrosnier (30/01/21 ; 30/03/21).....	P42
Figure 25 : Exemples de haies ayant fait l'objet d'un travail de re-digitalisation. Sources : IGN ; S.Lecrosnier.....	P43
Figure 26 : Tableau récapitulatif des différentes sources de données. Source : S.Lecrosnier.....	P45
Figure 27 : Photos aériennes du bassin versant en 1955. Sources : IGN (Remonter le temps).....	P47
Figure 28 : Photos aériennes du bassin versant en 1992. Sources : IGN (Remonter le temps).....	P48
Figure 29 : Carte d'occupation du sol en 1955.....	P50
Figure 30 : Carte d'occupation du sol en 1992.....	P51
Figure 31 : Carte d'occupation du sol en 2021.....	P52
Figure 32 : Tableau récapitulatif de l'évolution des prairies entre 1955, 1992 et 2021. Réalisation : S.Lecrosnier.....	P53

Figure 33 : Tableau récapitulatif de l'évolution des parcelles cultivées entre 1955, 1992 et 2021. Réalisation : S.Lecrosnier.....	P54
Figure 34 : Carte des surfaces converties en cultures entre 1955 et 2021.....	P55
Figure 35 : Graphiques en secteur de l'occupation du sol en 1955, 1992 et 2021. Réalisation : S.Lecrosnier.....	P56
Figure 36 : Tableau récapitulatif de l'évolution du linéaire de haies entre 1955, 1992 et 2021. Réalisation : S.Lecrosnier.....	P57
Figure 37 : Carte des surfaces connectées au cours d'eau en 1955.....	P60
Figure 38 : Présentation des connectivités hydrologiques du bassin versant en 1955.....	P61
Figure 39 : Carte des surfaces connectées en 1992.....	P62
Figure 40 : Présentation des connectivités hydrologiques du bassin versant en 1992.....	P63
Figure 41 : Carte des surfaces connectées en 2021.....	P64
Figure 42 : Présentation des connectivités hydrologiques du bassin versant en 2021.....	P65
Figure 43 : Graphiques en secteur des connectivités en 1955. Réalisation : S.Lecrosnier.....	P66
Figure 44 : Graphiques en secteur des connectivités en 1992. Réalisation : S.Lecrosnier.....	P67
Figure 45 : Graphiques en secteur des connectivités en 2021. Réalisation : S.Lecrosnier.....	P68
Figure 46 : Tableau récapitulatif des parcelles connectées à plus de 75 % en 1955, 1992 et 2021. Réalisation : S.Lecrosnier.....	P70
Figure 47 : Tableau récapitulatif de l'évolution des haies bloquantes entre 1955, 1992 et 2021. Réalisation : S.Lecrosnier.....	P70
Figure 48 : Diagramme en barres sur l'évolution des haies totales et bloquantes. Réalisation : S.Lecrosnier.....	P71
Figure 49 : Carte de présentation des chemins d'écoulement en 2021.....	P73
Figure 50 : Zoom depuis la carte de présentation des chemins d'écoulement.....	P74

Figure 51 : Photos aériennes du quart sud-est du bassin versant en 1955, 1992 et 2015. Sources : IGN (Remonter le temps).....	P75
Figure 52 : Tableau récapitulatif de l'évolution des parcelles et des connectivités dans le quart sud-est du bassin versant. Réalisation : S.Lecrosnier.....	P75
Figure 53 : Tableau présentant les regroupements des 23 codes cultures du RPG en 8 catégories. Source : RPG. Réalisation : S.Lecrosnier.....	P79
Figure 54 : Capture d'écran du tableau excel présentant l'occupation du sol sur quatre années. Source : RPG. Réalisation : S.Lecrosnier.....	P80
Figure 55 : Carte de localisation des prélèvements.....	P82
Figure 56 : Tableau récapitulatif de la longueur des chemins d'eau et du dénivelé entre le point le plus haut et le plus bas. Source : Géoportail.....	P83
Figure 57 : Tableau récapitulatif des altitudes des points de prélèvement et du dénivelé entre P1 et P2. Source : Géoportail.....	P83
Figure 58 : Photographies du chemin d'eau n°1. Sources : S.Lecrosnier (12/04/21).....	P84
Figure 59 : Photographies du chemin d'eau n°2. Sources : S.Lecrosnier (12/04/21).....	P84
Figure 60 : Photographies du chemin d'eau n°3. Sources : S.Lecrosnier (12/04/21).....	P85
Figure 61 : Tableau récapitulatif des caractéristiques géologiques et pédologiques des sites de prélèvement. Réalisation : S.Lecrosnier.....	P85
Figure 62 : Répartition des échantillons dans les coupelles après séchage, broyage au mortier et passage au tamis. Source : S.Lecrosnier (14/04/21).....	P86
Figure 63 : Échantillons après destruction de la matière organique et décantage. Source : S.Lecrosnier (29/04/2021).....	P87
Figure 64 : Granulomètre laser utilisé pour l'analyse des sédiments. Source : S.Lecrosnier (30/04/2021).....	P88
Figure 65 : Présentation des principales rotations culturales du bassin versant. Réalisation : S.Lecrosnier.....	P90

Figure 66 : Carte présentant l'occupation des îlots de culture selon le RPG en 2019, 2018, 2017 et 2016.....	P91
Figure 67 : Carte des connectivités hydrologiques en 2016, 2017, 2018 et 2019.....	P93
Figure 68 : Tableau récapitulatif de l'évolution des taux de connectivités pour les parcelles ayant une rotation prairie / culture. Réalisation : S.Lecrosnier.....	P94-P95
Figure 69 : Zoom sur la parcelle n°26 depuis la carte des connectivités hydrologiques de 2019....	P95
Figure 70 : Zoom sur la parcelle n°457 depuis la carte des connectivités hydrologiques de 2019.....	P96
Figure 71 : Tableau récapitulatif des résultats de la granulométrie pour chaque prélèvement. Réalisation : S.Lecrosnier.....	P97
Figure 72: Graphiques en secteur reprenant les résultats de la granulométrie pour chaque prélèvements. Réalisation : S.Lecrosnier.....	P98
Figure 73 : Tableau présentant les évolutions pour chaque famille de sédiments entre P1 et P2 (en%). Réalisation : S.Lecrosnier.....	P99
Figure 74 : Schéma de présentation des caractéristiques de la parcelle n°193. Réalisation : S.Lecrosnier.....	P101
Figure 75 : Tableau de comparaison des caractéristiques de la parcelle n°193 et n°130. Réalisation : S.Lecrosnier.....	P102

Table des matières :

Remerciements.....	P1
Résumé.....	P2
Sommaire.....	P3
Introduction générale.....	P4-P6
I. État de l'art.....	P7-P13
1.1. Ruissellement, érosion hydrique et transferts hydro-sédimentaires : définitions.....	P7-P8
1.2. Les processus de ruissellement, d'érosion hydrique et de transferts hydro-sédimentaires en domaine d'open field.....	P8-P9
1.3. Les processus de ruissellement, d'érosion hydrique et de transferts hydro-sédimentaires en domaine bocager.....	P9-P11
1.4. La modélisation multi-agents comme outil de présentation des connectivités hydrologiques.....	P11-12
1.5. Les études diachroniques dans le cadre de l'évolution des connectivités hydrologiques.....	P12-P13
1.6. Les rotations culturales dans le sud de la Manche.....	P13
II. Le bassin versant de Rouffigny, sous bassin versant de la Sienne : présentation.....	P14-P36
2.1. La Sienne et son bassin versant.....	P14-P18
2.1.1. La Sienne.....	P14
2.2.2. Le bassin versant de la Sienne : un hydrosystème en milieu bocager.....	P15-P18
2.1.2.1. Localisation et gestion.....	P15
2.1.2.2. Climat et précipitations.....	P16-P17
2.1.2.3. Géologie.....	P17-P18
2.1.2.4. Activités.....	P18
2.2. Pourquoi travailler sur la Sienne et son bassin versant ?.....	P18-P19
2.3. Le bassin versant de Rouffigny : présentation.....	P19-P35

2.3.1. Localisation.....	P19-P20
2.2.2. Caractéristiques du bassin versant.....	P21-P35
2.3.2.1. Un substrat géologique imperméable.....	P21-P22
2.3.2.2. Des sols agricoles sensibles au ruissellement.....	P23-P24
2.3.2.3. Un relief énergique.....	P25
2.3.2.4. Un bassin versant drainé par l’Airou et ses affluents.....	P26-P28
2.3.2.5. Un climat pluvieux.....	P29-P31
2.3.2.6. Un bassin versant agricole partagé entre prairies bocagères et parcelles cultivées.....	P31-P35
2.4. Pourquoi travailler sur ce bassin versant dans le cadre d’une étude de l’évolution des connectivités hydrologiques en lien avec les évolutions du paysage ?.....	P36
2.4.1. Un paysage qui a évolué dans un contexte naturel propice au phénomènes de transferts hydro-sédimentaires.....	P36
2.4.2. Un bassin versant et un cours d’eau qui ont fait l’objet de peu d’études.....	P36
III. L’évolution des connectivités hydrologiques dans un bassin versant bocager au cours de trois années d’étude : méthodologie mise en place.....	P37-P49
3.1. Présentation du système multi-agents utilisé.....	P37-P40
3.1.1. Présentation du modèle LASCAR (NetLogo).....	P37-P39
3.1.2. Données nécessaires à la modélisation.....	P40
3.2. Mise en place de la modélisation en 2021.....	P40-P46
3.2.1. Recueil des données nécessaires à la modélisation complémentarité du travail de terrain et de digitalisation.....	P40-P45
3.2.1.1. Modèle numérique de terrain (MNT).....	P41
3.2.1.2. Réseau hydrographique.....	P41
3.2.1.3. Fossé.....	P42
3.2.1.4. Haie.....	P42-P43

3.2.1.5. Route et chemin.....	P43
3.2.1.6. Occupation du sol.....	P43
3.2.1.7. Les entités ponctuelles : surfaces en eau et entrées de champ.....	P44
3.2.2. Modifications nécessaires des données sur ArcMap avant modélisation sur LASCAR.....	P46
3.3. Mise en place de la modélisation en 1992 et 1955 : travail de photo-interprétation.....	P46-P49
3.3.1. Choix des années d'étude.....	P46-P48
3.3.2. Acquisition des données.....	P48-P49
3.3.3. Limite de l'étude dans l'acquisition des données.....	P49
IV. Un bassin versant bocager impacté par le remembrement agricole : présentation de l'occupation du sol en 1955, 1992 et 2021.....	P50-P58
4.1. Présentation de l'occupation du sol pour les trois années d'étude : résultats des travaux de digitalisation et de photo-interprétation.....	P50-P52
4.2. Récapitulatif et comparaison des entités composant le paysage en 1955, 1992 et 2021.....	P53-P58
4.2.1. Les prairies, les parcelles cultivées, les surfaces bâties et boisées.....	P53-P57
4.2.2. Les haies et les routes.....	P57-P58
4.2.3. Les entités ponctuelles : mares et étangs.....	P58
V. L'évolution des connectivités hydrologiques dans le bassin versant de Rouffigny : impact de la structure paysagère.....	P59-P76
5.1. Les connectivités hydrologiques entre 1955 et 2021 : présentation des résultats.....	P59-P65
5.1.1. 1955.....	P60-P61
5.1.2. 1992.....	P62-P63
5.1.3. 2021.....	P64-P65
5.2. Une évolution ascendante des connectivités en lien avec les mutations paysagères ?....	P66-P70
5.3. Le rôle du réseau linéaire dans les connectivités du bassin versant.....	P70-P72

5.4. Les rôle des entités ponctuelles dans les connectivités hydrologiques: les entrées de champ.....	P72-P74
5.5. L'exemple du quart sud-est du bassin versant : mise en évidence du rôle des mutations paysagères dans l'évolution des connectivités.....	P74-P76
VI. Mise en place de deux études complémentaires à la modélisation sous LASCAR : étude des rotations culturelles et des sédiments transportés sur le bassin versant.....	P77-P88
6.1. Pourquoi mettre en place ces deux études complémentaires ?.....	P77-P78
6.2. Les rotations culturelles : modélisation en fonction des changements annuels d'occupation du sol.....	P78-P81
6.2.1. Qu'est ce qu'une rotation culturelle et quel est l'intérêt d'étudier ce processus dans le cadre de la compréhension de l'impact du paysage sur les connectivités hydrologiques ?	P78
6.2.2. Méthode employée pour identifier les rotations culturelles du site d'étude....	P78-P80
6.2.3. Acquisition des données nécessaires à la modélisation.....	P80-P81
6.3. Qualification et quantification des sédiments transportés sur le bassin versant.....	P81-P88
6.3.1. Présentation de l'expérimentation.....	P81
6.3.2. Présentation des sites de prélèvement : localisation.....	P81-P85
6.3.3. Caractéristiques géologiques et pédologiques des sites de prélèvement.....	P85-P86
6.3.4. Analyse des échantillons en laboratoire.....	P86-P88
VII. Mise en évidence de l'impact des évolutions paysagères annuelles sur les connectivités hydrologiques et du rôle des entités du paysage dans les transferts hydro-sédimentaires.....	P89-P102
7.1. Présentation des principales rotations culturelles du bassin versant de Rouffigny à partir des îlots de culture du RPG.....	P89-P91
7.2. Des connectivités hydrologiques influencées par les rotations culturelles en fonction des caractéristiques des parcelles.....	P92-P97
7.2.1. Présentation des résultats obtenus après modélisations.....	P92-P93
7.2.2. Changement d'occupation du sol, changement des taux de connectivités ?.....	P94-P96

7.2.3. Des limites à poser quant à l'interprétation des résultats obtenus.....	P96-P97
7.3. Mise en évidence de l'impact des caractéristiques des entités paysagères sur les transferts hydro-sédimentaires.....	P97-P100
7.3.1. Présentation des résultats de l'expérimentation.....	P97-P99
7.3.2. Des parcelles plus ou moins initiatrices de transferts hydro-sédimentaires....	P99-P100
7.4. Les rotations culturales et les analyses de sédiments : des études complémentaires à la modélisation dans le cadre d'une gestion efficace et durable des surfaces connectées.....	P100-P102
Conclusion générale.....	P103-P104
Bibliographie.....	P105-P107
Table des figures.....	P108-P112
Table des matières.....	P113-P117