

Avec le soutien de :

Avec
la contribution
financière du compte
d'affectation spéciale
développement
agricole et rural
CASDAR



MINISTÈRE
DE L'AGRICULTURE
ET DE LA SOUVERAINETÉ
ALIMENTAIRE

Liberté
Égalité
Fraternité

Resp^{haies}

Rapport n°1

Le modèle LASCAR, un outil d'aide à la décision pour la régulation des flux hydro- sédimentaires par les haies

Rapport final — mai 2023



ides

Auteurs :

Romain Reulier - Daniel Delahaye - Mathilde Guillemois

Université de Caen Normandie, laboratoire IDEES UMR 6266 CNRS

Table des matières

PARTIE 1 — PROBLEMATIQUE ET OBJECTIF	4
1.1 — Problématique et état de l’art	4
1.3 — Objectifs	6
PARTIE 2 — METHODOLOGIE ET REALISATIONS	7
2.1 – Méthodologie	7
2.1.1 Optimisation du modèle LASCAR	7
2.1.2 Tests du modèle sur différents bassins versants	14
2.1.3 Développement d’une version simplifiée	24
2.1.4 Fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin versant du Tortillon	24
2.2 – Déroulé du projet	25
2.2.1 – Organisation mise en place	25
2.2.2 – Étapes	25
PARTIE 3 – RESULTATS	27
3.1 – Résultats	27
3.1.1 Optimisation du modèle LASCAR	27
3.1.2 Principaux retours de l’utilisation du modèle sur différents bassins versants	34
3.1.3 Utilisation du LASCAR simplifié avec une classe d’un lycée agricole	59
3.1.4 Fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin versant du Tortillon	59
3.2 – Discussion des résultats	60
3.3 – Liste et descriptif des livrables	61
PARTIE 4 – PERSPECTIVES	63
4.1 – Suites envisagées	63
4.2 – Éléments évaluatifs	64
4.2.1 – Difficultés rencontrées	64
4.2.2 – Analyse d’impact du projet sur les différents publics cibles	64
4.2.3 – Indicateurs de suivis	64
4.2.4 – Indicateurs de résultats	65
PARTIE 5 – ANNEXES	66
Bibliographie	66
Table des figures	69

PARTIE 1 — PROBLEMATIQUE ET OBJECTIF

1.1 — Problématique et état de l'art

Une attention grandissante est portée aux écoulements hydro-sédimentaires de versant dans les hydrosystèmes du Nord-Ouest de la France à cause des conséquences néfastes dont ils sont responsables : perte en terre, pollution, diminution de la fertilité des sols, inondation, crues turbides.... Cependant, quantifier l'impact d'une haie ou d'un fossé sur le parcours des écoulements hydro-sédimentaires est illusoire, sauf si on se trouve à proximité du réseau linéaire au moment même où le processus est en cours. En mesurant les débits entrants et sortants, l'observateur pourrait avoir une idée bien précise du fonctionnement hydrologique de ce linéaire (Ouvry *et al.*, 2012) mais cette connaissance, aussi fine soit-elle, ne pourra pas être dupliquée simultanément sur tous les linéaires du bassin versant étudié. Connaître l'impact de chaque objet du paysage sur la réponse hydrologique globale d'un bassin versant devient alors rapidement compliqué, voire impossible. Les conditions de genèse du ruissellement dans les parcelles agricoles sont aujourd'hui bien établies (Boiffin, 1984 ; Auzet, 1987 ; Boiffin *et al.*, 1988 ; Delahaye, 1992 ; Souchère *et al.*, 1998, Le Bissonnais *et al.*, 2002) mais le parcours des écoulements de surface (dès que ces derniers quittent la parcelle) est bien plus difficile à appréhender, notamment en contexte bocager où la structure paysagère tend à complexifier ce phénomène (Mérot *et al.*, 1998 ; Delahaye *et al.*, 2000, 2002 ; Delahaye, 2002 ; Hauchard *et al.*, 2002 ; Gascuel-Oudoux *et al.*, 2009 ; Viel *et al.*, 2014). Plusieurs travaux ont déjà mis en évidence le rôle des réseaux linéaires d'origines anthropiques tels que les réseaux de haies, de fossés et de routes (Jones *et al.*, 2000 ; Duke *et al.*, 2003 ; Carluer et De Marsily, 2004 ; Viaud, 2004 ; Branger, 2007 ; Le Gouée et Delahaye, 2008 ; Wohlfahrt *et al.*, 2010 ; Viel, 2012 ; Viel *et al.*, 2014). Mérot *et al.* (1998) montrent par exemple que les haies sur talus et perpendiculaires à la pente tendent à bloquer les flux de surface car ils favorisent l'infiltration en pied de talus. Carluer et De Marsily (2004) et Moussa (2002) ont appréhendé les réseaux de fossés comme des vecteurs d'écoulement, tout comme Duke *et al.* (2003) l'ont fait pour les réseaux routiers. Le Gouée et Delahaye (2008) repris par Viel *et al.* (2014) proposent une typologie selon la connectivité au réseau hydrographique : espaces directement connectés grâce à la proximité à un cours d'eau, espaces déconnectés par les haies sur talus ou espaces indirectement connectés *via* les réseaux viaires et de fossés. Ces travaux mettent en évidence la variabilité de l'efficacité hydrologique du bocage et soulignent le rôle fondamental de la densité de drainage (qu'il soit naturel ou anthropique) qui permet une connexion rapide du ruissellement au cours d'eau et des entrées de champs qui permettent le passage d'un ruissellement de surface vers un écoulement de réseau. Il faut donc intégrer l'ensemble des entités composant la structure paysagère pour suivre les dynamiques spatiales des transferts hydro-sédimentaires de versant (Viel *et al.*, 2014).

Au-delà des connaissances empiriques acquises, les gestionnaires et les chercheurs ont aujourd'hui besoin d'outils capables de reconstruire l'ensemble de ces dynamiques et de mesurer le rôle de la structure paysagère (actuelle, passée ou même future) sur les transferts hydro-sédimentaires de versant (Baudry et Jouin, 2003 ; Delahaye, 2008 ; Gascuel-Oudoux *et al.*, 2009 ; Wohlfahrt *et al.*, 2010 ; Delahaye et Douvinet, 2013). Plusieurs modèles intégrant les réseaux linéaires d'origines anthropiques ont été développés ces dernières années. Certains sont d'ores et déjà opérationnels et tous ont prouvé leur efficacité dans leur contexte d'application (Moussa, 2002 ; Duke *et al.*, 2003 ; Carluer et De Marsily, 2004 ; Tortrat, 2005 ; Bocher, 2005 ; Charlier, 2007 ; Doray, 2008 ; Levavasseur, 2012, Landemaine, 2016). Si ces modèles intègrent très bien le rôle hydrologique des réseaux linéaires et proposent des simulations (débits de matières à l'exutoire par exemple) proches de la réalité, ils restent peu adaptés pour mettre en évidence la dynamique spatiale des processus

d'écoulement. Et c'est précisément cette dynamique spatiale, souvent fortement impactée par les objets du paysage, que l'on cherche ici à appréhender par la simulation.

Ainsi, face à ces différents constats, un outil de modélisation a été conçu et développé sous système multi-agents (SMA) pour recréer les dynamiques de ruissellement. Ce système a été choisi pour sa capacité à appréhender un système complexe par l'implémentation de règles d'interactions simples et faciles à comprendre. Le développement de plateformes facilement accessibles telle que *NetLogo* (Wilensky, 1999) ou *MAGéo* (Blanpain *et al.*, 2013) a rendu populaire l'utilisation des SMA en sciences humaines et sociales, et notamment en géographie environnementale (Caillault, 2011, Rebaudo *et al.*, 2011, Vannier, 2011, Schwarz, 2012, Caillault *et al.*, 2013, Anselme *et al.*, 2014). Dans l'étude des processus physiques des écoulements de surface, l'approche par système multi-agents est encore assez récente mais trouve son intérêt dans sa capacité à offrir de l'information spatiale à la fois sur l'origine des écoulements mais aussi sur leur variabilité spatiale et temporelle (Servat, 2000 ; Crave *et al.*, 2001 ; Darboux *et al.*, 2002 ; Reaney, 2008, Rakotoarisoa, 2014). Dans une approche similaire, Delahaye *et al.* (2001) ont montré la pertinence des automates cellulaires pour mettre en évidence le poids de l'organisation spatiale et de la morphologie des bassins sur les processus de ruissellement érosif (Langlois et Delahaye, 2002 ; Delahaye 2002, 2010 ; Douvinet, 2013). Néanmoins, les automates cellulaires restent peu efficaces pour mettre en évidence l'impact des réseaux linéaires, chose plus facile à appréhender avec les systèmes multi-agents. En prenant en compte l'organisation des objets dans l'espace, le modèle LASCAR développé dans le cadre du CASDAR RESP'HAIES cherche à obtenir des indices permettant de quantifier l'impact de la structure paysagère sur les transferts hydro-sédimentaires afin de dépasser les indices classiques de densité de linéaires et d'occupation du sol couramment utilisés dans la caractérisation de la sensibilité des bassins versants aux processus de transferts hydro-sédimentaires.

Objectifs du modèle

Le modèle permet de reconstruire les écoulements de surface par une approche agent, c'est-à-dire par discrétisation de l'élément dynamique, l'eau, en plusieurs agents (Treuil *et al.*, 2008). Les agents se déplacent en fonction de la pente jusqu'à atteindre l'exutoire de l'environnement de simulation (le cours d'eau ou l'exutoire du bassin versant). Au cours de leur déplacement, les agents sont amenés à interagir avec différents éléments de la structure paysagère que sont les haies et les fossés. Il n'y a pas de prise en compte des vitesses d'écoulement : les agents se déplacent en fonction des itérations dites "machine" (appelée tick). D'autres simplifications ont été opérées pour avoir un modèle le plus simple possible (pas de prise en compte de la pédologie, des formations superficielles, de la géologie ou des flux sédimentaires par exemple).

Pourquoi un SMA pour étudier les processus de transfert hydro-sédimentaire ?

La discrétisation des écoulements (en agents) permet de prendre en compte les trajectoires et les historiques de chaque agent au sein d'un système. Cette caractéristique intègre explicitement les comportements individuels et permet d'obtenir de l'information sur l'origine des écoulements et sur leur variabilité spatiale et temporelle. Chaque agent étant relié à une cellule de départ, il est ainsi possible de connaître cette information pour chaque cellule composant l'environnement de simulation.

Tout comme les automates cellulaires, les SMA considèrent l'espace de manière explicite et à un niveau de détails élevé. De cette manière, il est possible d'identifier les structures spatiales qui dictent la dynamique des écoulements de surface. Les SMA sont ainsi un bon outil pour l'étude de l'organisation de l'espace géographique et des dynamiques qui y sont observables.

Les SMA sont à même de mettre en évidence les propriétés émergentes d'un système qui apparaissent à un niveau macro sans être observables, ni prévisibles au niveau des entités qui constituent le système. Un bassin versant peut être vu comme un système complexe à l'intérieur duquel des interactions entre processus et entités paysagères impulsent une dynamique globale. Cette caractéristique est particulièrement intéressante pour mettre en évidence la connectivité hydrologique au cours d'eau. Cela va dans le sens de Bracken *et al.* (2013) : *"We propose that to do so well, modelling should enable hydrological connectivity to emerge due to the operation of processes laws, rather than be defined as a concept that is put into the model in the first place"*. Par ailleurs, la modélisation des processus d'écoulement à base d'agents apparaît comme très souple pour

étudier les interactions processus-paysages. Cette souplesse résulte de la simplicité de la formulation des règles de déplacement des agents ainsi que de la prise en compte de la structure spatiale sous-jacente. Grâce à leur modularité, les SMA sont également de bons outils pour mettre en place et évaluer les conséquences sur les écoulements de scénarios d'aménagements.

Toutes ces raisons ont conduit au développement d'un modèle dédié à ces questions sous système multi-agents : le modèle LASCAR (Landscape Structure And Runoff). Initié au cours d'un travail de thèse par Romain Reulier (2015), le modèle LASCAR a, ensuite, pu être amélioré dans le cadre du projet CASDAR RESP'HAIES (2018–2021). Le modèle a, par ailleurs, fait l'objet de plusieurs publications scientifiques (Reulier *et al.*, 2016, 2017, 2019 ; Cossart *et al.*, 2018) et communications auprès des acteurs du territoire.

1.3 — Objectifs

L'organisation spatiale des haies (localisation et relation) joue un rôle majeur sur la sensibilité des espaces agricoles vis-à-vis des processus d'écoulement de surface (Mérot *et al.*, 1998). Des travaux d'analyse spatiale ont été menés pour mesurer la qualité des continuités écologiques dans les paysages bocagers et leurs effets sur la biodiversité (mise en œuvre de schéma de trames vertes) (Puech *et al.*, 2013 ; Betbeder *et al.*, 2015).

L'objectif est ici d'étudier le rôle de l'organisation des objets du paysages (haies, talus, fossés, routes...) sur la dynamique des écoulements sur un territoire et les connexions/déconnexions hydrologiques issues de cette organisation. Les outils et concepts développés en géographie, et particulièrement en analyse spatiale, sont adaptés pour mener ce travail (Delahaye, 2008, Viel *et al.*, 2014).

Méthode pour la sous-action 2.2.

Le modèle LASCAR (Landscape Structure And Runoff) a été spécifiquement conçu pour mettre en évidence les effets du paysage sur la dynamique spatiale des écoulements de surface (Reulier *et al.*, 2018). Modèle conceptuel, multi-agents, LASCAR s'appuie notamment sur le concept de connectivité pour évaluer la capacité des eaux de ruissellement à rejoindre le cours d'eau.

Le modèle permet à la fois de quantifier la connectivité actuelle mais également d'étudier son évolution récente (modélisation rétrospective) pour caractériser l'incidence des trajectoires paysagères sur la sensibilité aux processus érosifs. Le modèle peut également servir à tester des scénarios d'aménagement et être utilisé comme outil de médiation entre les acteurs locaux.

Indicateurs de résultats

Livrables pour la sous-action 2.2.

1. Test du modèle sur différents bassins
2. Caractérisation de la sensibilité des bassins au ruissellement de surface
3. Evaluation de scénarios d'aménagement à la fois rétrospectifs et prospectifs

Les travaux réalisés dans le cadre de la sous-action 2.2 ont abouti :

- Au développement d'une nouvelle version du modèle LASCAR
- A l'utilisation du modèle sur différents territoires agricoles
- A la création d'une version simplifiée du modèle LASCAR afin d'en faire un outil de sensibilisation à destination des formations agricoles
- A l'élaboration de cinq tutoriels d'utilisation (1 tutoriel d'utilisation du modèle LASCAR sous la plateforme NetLogo, 3 tutoriels expliquant les géotraitements à effectuer sous Arcmap, Arcgis Pro et Qgis, 1 tutoriel + exercices du modèle LASCAR simplifié)
- A la réalisation d'un diagnostic sur le fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin versant du Tortillon

PARTIE 2 — METHODOLOGIE ET REALISATIONS

2.1 – Méthodologie

Le premier travail réalisé a été d'optimiser le modèle LASCAR développé par Reulier (Reulier, 2015, Reulier *et al.*, 2016, 2017, 2019). Pour cela, un stagiaire de Master 2 en informatique a été recruté (Florentin L'Homme) pour la réalisation de cette tâche. Il s'agissait dans un premier temps de s'assurer que la plateforme de systèmes multi-agents NetLogo, initialement retenue, était la plus pertinente au regard d'autres plateformes existantes. Dans un second temps, le modèle LASCAR initial (Reulier, 2015) a été ré-implémenté en vue notamment d'optimiser les temps de calcul du modèle jugés trop longs dans la première version.

2.1.1 Optimisation du modèle LASCAR

a. Recherche de la meilleure plateforme multi-agents pour le modèle LASCAR

La modélisation à base d'agents est une approche plébiscitée pour représenter, étudier ou explorer des systèmes géographiques complexes (Heppenstall, 2011 ; Taillandier *et al.*, 2018). Cette approche de modélisation propose de représenter individuellement les entités composant un système et leurs interactions, et de faire émerger la dynamique globale d'un système à partir des comportements macroscopiques des entités qui le compose. La généralisation des pratiques de simulation multi-agents a été grandement alimentée par le développement de nombreuses plateformes qui permettent de créer facilement et rapidement des modèles (Taillandier *et al.*, 2018). Il est même fréquent que ces plateformes soient accessibles à des modélisateurs sans formation solide en informatique. Cette spécificité permise par certaines plateformes doit surtout aux types de langage utilisé. Les plateformes peuvent ainsi être catégorisées en fonction du type de langage utilisé (Langlois *et al.*, 2015 ; Taillandier *et al.*, 2018). Certaines plateformes utilisent un langage de programmation de bas niveau (Java, Python, C++, etc.) et restent principalement réservées aux informaticiens. C'est le cas de Repast, Cormas, Jade, Flame GPU. D'autres proposent un langage de programmation spécifiquement dédié et adapté à la modélisation multi-agents, c'est le cas de NetLogo (Wilensky, 1999) ou GAMA (Drogoul, 2013). Ces plateformes, plus simples à utiliser, sont davantage accessibles à des non-informaticiens bien qu'elles nécessitent quelques compétences algorithmiques. Enfin, d'autres plateformes multi-agents reposent sur un langage de modélisation graphique : StarLogo TNG (Klopfer *et al.*, 2009) ou Repast Symphony (North *et al.*, 2013). Dans le cadre d'un développement de modèle, le choix de la plateforme utilisée se fait très tôt et reste immuable jusqu'à la fin du projet. Il est ainsi rare de migrer un modèle d'une plateforme à une autre. La littérature scientifique est ainsi peu pourvue d'approches comparatives de plateformes SMA. Les quelques études comparatives restant centrées sur les différences entre plateformes et non sur la capacité des plateformes pour un modèle donné (Kravari and Bassiliades, 2015). Soucieux de tester l'efficacité de la plateforme NetLogo pour le modèle LASCAR, le premier travail de Florentin L'Homme a été de mener une étude comparative portant sur trois plateformes multi-agents.

Présentation du modèle LASCAR

Le modèle LASCAR (LandscApe StruCture And Runoff) a été développé pour étudier le rôle de l'organisation spatiale des entités du paysage (haie, route, fossés, parcelles agricoles, etc.) sur les transferts hydro-sédimentaires. LASCAR cherche à reproduire la dynamique spatiale des écoulements de surface en s'appuyant sur la capacité d'agents à se déplacer dans un environnement avec lequel ils sont capables d'interagir. Cette approche est ainsi similaire à des travaux antérieurs (Servat, 2000 ; Treuil *et al.*, 2008 ; Rakatoarisoa, 2014). En appliquant des règles régissant le déplacement d'agents correspondant à des « paquets d'eau » (appelés « Agentgouttes » dans LASCAR), il s'agit de reproduire la dynamique spatiale des écoulements à la surface d'un bassin versant (Reulier *et al.*, 2017). Pour cela, les agents se déplacent au sein d'un environnement de simulation composé d'agents (appelés « Occpatches ») représentant chacun une maille carrée de résolution 10*10 mètres. Chaque « Occpatches » est caractérisé par une altitude (fournie par un modèle numérique de terrain –MNT-) et une occupation du sol : culture, herbe, eau, zone bâtie, haies, routes. Au cours de leur déplacement, les Agentgouttes s'appuient sur les informations des Occpatches sur lesquels ils se situent ainsi que ceux présents dans leur environnement immédiat (voisinage de Moore). La variable « altitude » leur permet d'identifier l'Occpatch voisin de plus faible altitude sur lequel l'Agentgoutte doit se déplacer. La présence d'Occpatches haie ou fossé qui modifient l'altitude contraignent le déplacement « topographique » des Agentgouttes. Il n'y a pas de prise en compte des vitesses d'écoulement, les « Agentgouttes » se déplacent d'Occpatch en Occpatch à chaque itération du modèle. Face à un obstacle infranchissable (cuvette topographique, rôle barrière d'une haie, etc.), les « Agentgouttes » ont à leur disposition un volume d'eau qu'ils transportent (à l'initialisation, tous les Agentgouttes disposent du même volume d'eau) et qui peut être partiellement ou entièrement utilisé en fonction des contraintes topographiques. Dès qu'un agent n'a plus d'eau, il meurt (Reulier *et al.*, 2016). Un obstacle peut ainsi être surmonté si la somme des volumes d'eau de l'ensemble des Agentgouttes présents est supérieure au volume de la cuvette (Reulier *et al.*, 2017). Le volume d'eau vient, en retour, modifier la variable « altitude » des Occpatches concernés.

Les objectifs initiaux de LASCAR étaient les suivants : 1) reproduire efficacement les dynamiques d'écoulement, 2) mettre en évidence le rôle de la structure paysagère sur ces dynamiques et ce avec peu de données et des règles simples ; 3) offrir des indices sur un processus multi-scalaire qui puisse aider à la prise de décision. LASCAR est un modèle de type KISS (Keep It Simple, Stupid) (Banos et Sanders, 2013). Le modèle ne permet pas d'estimer les taux d'érosion. Il offre en revanche des indices permettant d'évaluer les capacités d'un paysage à limiter la connectivité des surplus hydrologiques aux cours d'eau. La représentation cartographique de ces indices offre ainsi un support de discussion et d'aide à la décision pour les acteurs de l'aménagement du territoire. LASCAR s'avère en effet pertinent pour livrer des diagnostics, et ce, à toutes les échelles spatiales. Depuis l'échelle globale, où la mise en place d'un indice de connectivité permet d'évaluer la prégnance de la structure paysagère sur la connectivité au cours d'eau en tout point de l'espace, jusqu'aux échelles fines, où le modèle permet de mettre en évidence les espaces qui, au sein d'un bassin versant, participent à la (dé)connectivité des écoulements entre les zones de production (les parcelles cultivées) et le cours d'eau. Les simulations, en plus de reconstruire fidèlement les trajectoires des écoulements de surface, permettent d'identifier (i) les haies et les prairies favorisant les piégeages intermédiaires, (ii) les parcelles cultivées hydrologiquement connectées au cours d'eau, (iii) une hiérarchisation des parcelles en fonction de leur niveau de connectivité, (iv) les réseaux de fossés qui connectent au cours d'eau, (v) les points de passage entre un écoulement de parcelle à un écoulement de réseau.

Le modèle LASCAR a été initialement créé sous la plateforme Netlogo. Cependant, Netlogo ne prend en charge que peu de formats de fichiers et reste facile d'utilisation avant tout pour des données de type raster. Bien qu'étant une plateforme simple d'utilisation, la préparation des données en amont résulte d'un long processus de géotraitements peu pratique. De cette réflexion pragmatique, nous avons donc cherché à savoir s'il existait d'autres plateformes à même d'héberger LASCAR, de limiter le nombre de pré-traitements SIG et de réduire les temps de calcul.

Présentation des plateformes testées

Plusieurs plateformes ont ainsi été identifiées pour ce travail comparatif. Cependant de par la complexité du langage (Repast HPC, TurtleKit), la difficulté de prise en main (FLAME GPU) ou l'absence de mise à jour récente (TurtleKit), nous avons restreint ce travail comparatif à trois plateformes : NetLogo, GAMA, Repast Simphony.

NetLogo (Wilensky, 1999) est une plateforme libre de simulation multi-agents qui offre un environnement de programmation particulièrement adapté à la modélisation des systèmes complexes évolutifs naturels et sociaux (Tisue et Wilensky, 2004). Cet environnement, implémenté essentiellement en Scala et en Java, met à disposition de l'utilisateur une interface modulable ainsi qu'un langage basé sur le Logo, offrant un langage de programmation "adapté aux jeunes apprenants" (Amblard et al., 2015). Cette plateforme est ainsi simple d'utilisation, accessible, bien documentée et forte d'une vaste communauté d'utilisateurs. L'environnement de simulation présente un maillage simple (forme carrée) permettant l'utilisation aisée de données géographiques au format raster (MNT, occupation du sol). C'est sous cette plateforme qu'a été implémenté le modèle LASCAR.

GAMA (GIS Agent-Based Modeling Architecture) est une plateforme libre de SMA orientée SIG développée pour créer des modèles à base d'agents spatialement explicites grâce à l'utilisation aisée des données géographiques de type vecteurs ou rasters. Développée depuis 2007, la plateforme, qui utilise un langage agent appelé GAML (prenant racine dans le langage Java et Smalltalk), a été développée pour être utilisée par des non-informaticiens. Sa prise en main est ainsi facile (aidé par un vaste dictionnaire de fonctions et de nombreux exemples) mais la plateforme, récente, reste peu usitée par la communauté de chercheurs.

Repast Simphony est une plateforme de simulation multi-agents utilisant un langage de bas niveau. La plateforme Repast a été spécifiquement développée pour la création de modèles en sciences sociales et contient des outils dédiés (Maftah, 2014). Contrairement à NetLogo et GAMA qui proposent un langage de haut niveau (Logo et GAML), les différentes versions de Repast (Simphony et HPC) permettent de développer des modèles dans différents langages bas niveau : JAVA, C Sharp, Managed C++, Visual Basic.Net, Python, etc. (Maftah, 2014). Repast Simphony fait ainsi partie des plateformes dédiées aux informaticiens permettant le développement de modèles à grande échelle intégrant de nombreuses données et des comportements d'agents riches (Taillandier *et al.*, 2018). Repast HPC offre par ailleurs la possibilité de distribuer les calculs sur plusieurs machines et donc diminuer les temps de calculs.

NetLogo et GAMA sont tous deux implémentés en Java, ce qui signifie que leurs langages sont des surcouches. Ceci peut impliquer un impact sur les temps de calculs, c'est pourquoi le choix de Repast Simphony permet d'avoir une référence entre plateforme haut et bas niveau.

Matériels utilisés

Les caractéristiques du matériel informatique et des logiciels utilisés pour la réalisation des tests comparatifs sont présentées dans le tableau ci-dessous (cf tab.1). Entre chaque simulation l'ordinateur

était éteint et avant de lancer une simulation, la connexion internet était désactivée tout comme toutes les applications d'arrière-plan susceptibles de fonctionner.

Matériel informatique utilisé	MacBook Pro (2016) sous macOS Catalina (10.15.4) Processeur 2,9 GHz Intel Core i5 double cœur 8 Go RAM 2133MHz LPDDR3 Carte graphique Intel Iris Graphics 550 1536 Mo			
Plateforme SMA	NetLogo 6.1.1	Jusqu'à 1 Go RAM allouée		
	GAMA 1.8	Jusqu'à 4 Go de RAM allouée		
	Repast Symphony 2.7	Jusqu'à 1 Go RAM allouée		

Tableau 1 : Caractéristique du matériel et des logiciels utilisés pour les tests comparatifs

Adaptation du modèle LASCAR pour faciliter le travail de comparaison

Par rapport au modèle LASCAR initial quelques modifications ont été apportées en vue des tests comparatifs. Pour faciliter le travail comparatif, le modèle a été simplifié tout en conservant le « cœur » du modèle : la dynamique de déplacement des agents et leur interaction avec l'environnement de simulation : se déplacer, mourir. Les procédures « Ecoule_Réseau », « Ecoule_Topo » et « Ecoule_Ciblé » et le fichier « direction » (Reulier, 2015, Reulier *et al.*, 2016) ont été supprimés. Les procédures ont été remplacées par un module, plus simple, permettant à un Occpatch d'identifier lui-même l'Occpatch voisin de plus faible altitude (et non plus à partir du fichier « direction de flux » généré sous SIG). Ce calcul est réalisé à l'initialisation puis uniquement aux abords des cuvettes topographiques lors de leur remplissage. Une fonction de coalescence des Agentgouttes présents sur un même patch a également été développée. Enfin, pour simplifier le travail comparatif, les modules permettant le calcul d'indices d'analyse spatiale n'ont pas été activés.

Pour s'assurer d'une exécution similaire du modèle par les différentes plateformes, le modèle a été rendu déterministe. En effet, le modèle originel possédait une part de stochasticité lors de la recherche de l'Occpatch voisin de plus faible altitude (pour les Occpatch de type « réseau linéaire »). Plusieurs Occpatches voisins pouvaient être identifiés et l'un d'eux était choisi aléatoirement (Reulier *et al.*, 2016). Pour supprimer cette stochasticité afin de faciliter le travail comparatif, la recherche de l'Occpatch voisin de plus faible altitude se fait selon un ordonnancement précis. Cela permet dès lors de cibler exactement le même voisin d'une plateforme à l'autre.

(→ voir section b) pour plus d'informations)

Environnement de simulation

Deux sites d'études de superficies différentes ont été utilisés pour la réalisation des tests comparatifs. Les terrains d'étude sont représentés sous LASCAR par une grille de pixel de 10 x 10 mètres calquée sur la résolution du MNT fourni par l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (la résolution initiale de 25 m a été ré-échantillonnée à 10 m à partir des outils d'un Système d'Information Géographique).

Le premier site d'étude implémenté correspond au bassin versant du Lingèvres d'une superficie de 16,5 km² et représenté dans l'environnement de simulation par 164 500 Occpatches. Le second site, d'une superficie de 4,5 km² (soit environ 45 000 Occpatches), correspond au bassin versant de la Bouderie (1,52 km²) lui-même sous-bassin du Lingèvres. Ces deux sites d'études ont permis l'évaluation de la

capacité des plateformes à simuler à des échelles différentes (le premier site étant 3,6 fois plus grand que le second).

Le bassin versant de Lingèvres est un bassin versant bocager et agricole avec plus de 95% de sa superficie occupée par l'activité agricole (figure 1). La répartition entre surfaces cultivées et surfaces en herbe est assez équivalente. Les parcelles cultivées occupent 45,7% du bassin (7,80 km²) et les prairies 45,1 % (7,7 km²) (Reulier, 2015). La dispersion dans l'espace des surfaces "bâties" et le dense maillage routier (1,52 km.km⁻²) sont typiques d'un territoire bocager. Bien que bocager, le bassin présente un plateau nord aux paysages plus ouverts sur lequel les parcelles sont majoritairement cultivées et leur superficie moyenne plus importante (4,2 hectares contre 2,9 ha en moyenne sur l'ensemble du bassin). Sur ces parties du bassin, les réseaux bocagers sont quasiment inexistant, seuls quelques reliquats de haies subsistent sur les pentes les plus marquées (rebord de plateau). La densité du réseau routier est également faible. A l'inverse les 4/5ème du bassin se caractérisent par un paysage bocager. La superficie moyenne des parcelles agricoles est moins importante (2,16 hectares). Le parcellaire est plus morcelé et majoritairement herbager. La densité de réseaux linéaires bocagers est plus forte avec 6,17 kilomètres de linéaires par kilomètre carré. Cette dichotomie entre les parties nord et le reste du bassin résulte de la position d'interface du bassin entre deux contextes paysagers bien distincts de la Basse-Normandie.

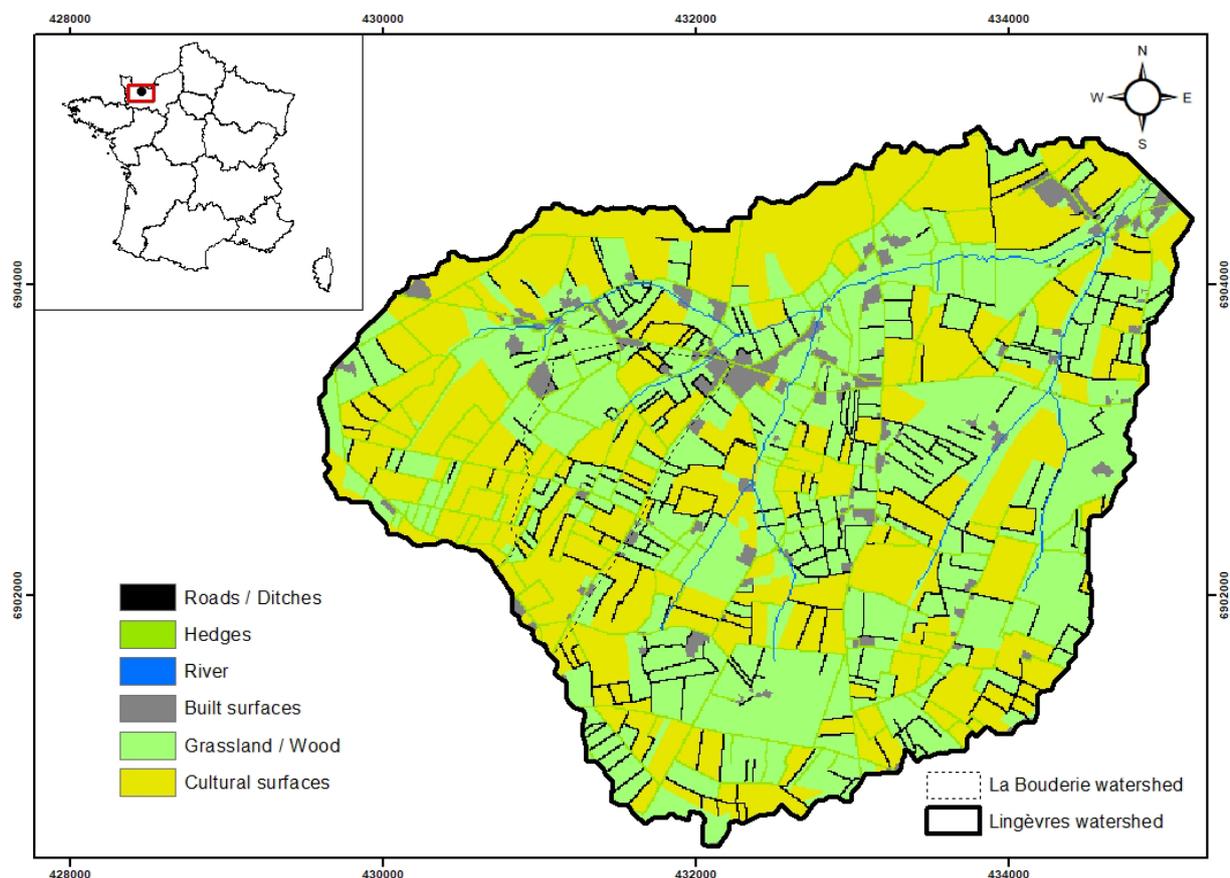


Figure 1 : Présentation du bassin versant du Lingèvres

Déroulé de l'expérimentation

L'analyse comparative porte sur les 200 premières itérations des simulations. C'est, en effet, au cours de ces 200 premières itérations que les temps d'exécution par itération sont les plus longs lorsque l'on fait tourner le modèle LASCAR. Et cela est surtout vrai pour les vingt premières itérations du modèle. Cela s'explique par le nombre très important d'Agentgoutte à l'initialisation. En effet, un Agentgoutte étant affecté à un Occpatch, il y a autant d'Agentgouttes que d'Occpatch ce qui occasionne un très grand nombre de calcul en parallèle. A titre d'exemple, dans le Lingèvres (site d'étude le plus grand) ce sont plus de 300 000 agents qui sont amenés à réagir aux algorithmes du modèle. Ainsi, les temps d'exécutions des premières itérations sont au minimum deux fois plus longs que les temps d'exécutions moyens des itérations au-delà de la vingtième itération. Ce phénomène est inhérent à la simulation multi-agents dès lors qu'un grand nombre d'agents sont stimulés simultanément. Passé cette phase, les temps d'exécution par itération ne cessent de décroître et la simulation s'exécute plus rapidement. Cela s'explique par la diminution du nombre d'Agentgouttes présents dans la simulation, certains étant déjà arrivés à l'exutoire, d'autres étant « morts » et donc supprimés de la simulation.

b. Amélioration et optimisation du modèle LASCAR initial

Un travail visant à optimiser le modèle LASCAR initial a été engagé parallèlement. Différents travers du modèle initial ayant été identifiés, un travail de ré-implémentation a été réalisé. L'impact de ses améliorations sur les temps de calcul a ensuite été évalué.

L'une des erreurs intrinsèques du modèle initial concerne les procédures du modèle (figure 2). Alors que les Agentgouttes n'effectuent qu'une seule « action principale » (mourir, mouvoir ou remplir une cuvette) la procédure « Ecoule_Reseau » en permet deux : si l' Agentgoutte est dans une cuvette, il la remplit puis il effectue directement la procédure « Ecoule_Topo » qui lui permet le déplacement.

Un autre procédé à modifier est la gestion des bordures. Une bordure étant une cellule qui n'a pas 8 voisins valides, il s'agit des cellules formant la limite extérieure de la zone géographique étudiée. Le modèle originel augmente artificiellement l'altitude de ces bordures (Reulier *et al.*, 2016) ce qui empêche les gouttes de sortir hors de la zone et provoque des effets cuvettes supplémentaires. Les procédures initiales (figure 2) permettent de répondre aux spécificités du terrain (fossé, haie, etc.) lors du déplacement des Agentgouttes. Or le phénomène des cuvettes, et leur remplissage, devient alors spécifique aux linéaires. En effet, seules les procédures « Ecoule_Reseau » et « Ecoule_Topo » permettent la considération et le remplissage des cuvettes tandis que « Ecoule_Cible » les ignore en suivant la donnée « direction » issue du fichier homonyme. Autrement dit, les cuvettes de milieu de parcelles sont ignorées dans la version initiale.

L'utilisation des données « direction » apporte, indirectement, un biais au modèle. Ces données sont issues du logiciel ArcGIS, or celui-ci fournit pour direction la cellule voisine dont la pente est la plus raide. Pourtant, aux abords des linéaires, le modèle n'observe que les altitudes des voisins et non les pentes globales. En outre, LASCAR permet la modification des altitudes des linéaires en pré-traitement. Avec une telle modification, les données utilisées dans ArcGIS et celles du modèle ne sont plus les mêmes, les dynamiques non plus.

Enfin, le modèle LASCAR dans sa version initiale mélangeait du code dédié à l'exécution algorithmique de la simulation (mouvement des gouttes, calcul de cible, etc.) et du code dédié à la visualisation (coloration des cellules, etc.). Plus concrètement, cela obligeait à effectuer autant de fois la simulation que

de rendus visuels souhaités (par exemple : un rendu « normal » et un second mettant en évidence les cellules connectées à l'exutoire). Le modèle LASCAR se veut être un outil de gestion. Cela sous-entend l'accès à des visuels illustrant les calculs du modèle (tel que la mise en évidence des chemins préférentiels des eaux, l'identification des haies modifiant ces chemins ou les fossés les plus sollicités, etc). Respecter la différenciation des morceaux de code dédiés à la simulation strictement informatique de ceux dédiés au visuel permet d'accéder à une palette de visuels plus large tout en ne déroulant qu'une seule fois la simulation.

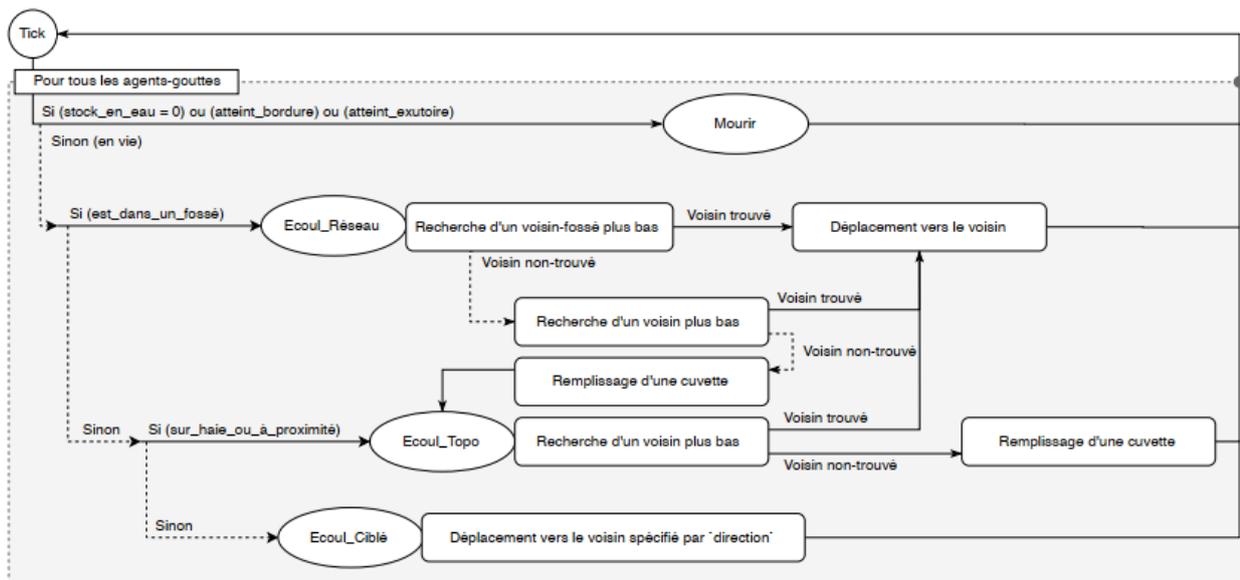


Figure 2 : Récapitulatif des procédures liées aux Agentgouttes dans le modèle initial

L'amélioration des temps d'exécution se fait aussi bien par l'optimisation de l'implémentation que par l'optimisation du modèle même. Dans l'implémentation du modèle, l'un des points les plus impactant est la gestion des boucles. En particulier, à chaque tick une boucle sur les Agentgouttes est effectuée. Dans celle-ci est réalisée l'une des trois procédures (figure 2). Dans deux d'entre elles, un remplissage de cuvette peut être effectué. Or la cuvette ponctionne équitablement de l'eau à chacune des gouttes présentes sur elle. Nous faisons donc face à une boucle sur les gouttes qui boucle sur des gouttes. Étant donné le grand nombre d'Agentgouttes, qui plus est convergent vers les mêmes cellules, cette intrication de boucles peu rapidement impacter les temps d'exécution, il faut alors les éviter.

Enfin, l'ajout du mécanisme de fusion (coalescence) des Agentgouttes est une modification du modèle qui ne change pas pour autant l'issue d'une simulation. Cependant cela peut grandement améliorer les temps d'exécution du modèle. Par exemple, supposons un cas où 100'000 gouttes finiraient par s'engouffrer sur une même cellule sans mourir. Sans fusion des agents, il faudrait continuellement faire mouvoir (sur la même cellule) ces 100'000 Agentgouttes. Avec fusion des agents, le nombre d'agents diminuerait jusqu'à ce qu'il n'en reste plus qu'un seul (une fois toutes les gouttes engouffrées sur la même cellule).

c. Création de quatre tutoriels dédiés

Afin d'accompagner les utilisateurs de LASCAR, quatre tutoriels ont été créés. Nous avons rédigé un tutoriel d'utilisation du modèle sous NetLogo en veillant à être les plus clairs possibles. De nombreuses captures d'écrans ont été insérées pour cela. Le tutoriel a par ailleurs été éprouvé par les différents étudiants en stage au sein des différentes structures d'accueil. Trois tutoriels expliquant la préparation des données préalables sous SIG ont également été créés. Nous avons fait le choix de développer un tutoriel pour chacune des trois plateformes majoritairement utilisées en SIG aujourd'hui : Qgis, Arcmap et Arcgis Pro.

2.1.2 Tests du modèle sur différents bassins versants

Le modèle nouvellement implémenté a ensuite été utilisé au sein de différents territoires du nord-ouest de la France. Ces tests ont été rendus possibles grâce à différents travaux d'étudiants à savoir :

- 3 mémoires de recherche de master 1
- 4 stages de master 2

Nous remercions à ce titre le syndicat mixte Evres-Thau-Saint-Denis, le syndicat mixte du Bas-Léon, la collectivité de Morlaix Communauté et la Communauté d'Agglomération du Cotentin. Que les différents étudiants ayant contribué à ces travaux soient également chaleureusement remerciés. Merci à Romain Quigneaux, Mathilde Guillemois, Laurine Ansart, Elsa Fougeray et Solène Lecrosnier pour le sérieux et la qualité de leur travail qui ont grandement servi au projet RESP'HAIES. Les différents mémoires de recherche et rapports de stage sont disponibles dans les livrables du projet. Nous présentons ci-dessous le résumé de chacun de ces travaux et exposons dans la partie résultat les faits saillants de leurs travaux.

- a. Bassin versant du Guer Amont (Léguer) par le laboratoire IDEES (Mémoire de M1, 2020)

Résumé du mémoire de recherche de master 1 de Mathilde Guillemois. Le mémoire peut être consulté dans les livrables du projet.

Ce mémoire a pour objectif d'étudier la trajectoire historique des mutations paysagères et des connectivités hydrologiques dans le Guer amont, sous-bassin versant du Léguer. Ce territoire breton a connu depuis le XIX^{ème} siècle d'importants changements dans son paysage agricole. Passant d'un vaste bocage aux talus hauts et aux petites exploitations, où règne une agriculture familiale. À un paysage aux champs ouverts, aux parcelles regroupées bien souvent éloignées des exploitations. Ainsi le sous-bassin du Guer connaît dans son changement de paysage toute une révolution agricole qui se met en place. Seulement, les mutations paysagères ont des incidences plus ou moins significatives sur l'hydrosystème. En effet, les connectivités hydrologiques issues des dynamiques d'écoulement, sont contraintes de s'adapter aux modifications de la structure paysagère, notamment à l'arasement des haies, entraînant de nombreuses répercussions : transferts hydro-sédimentaires, érosion des sols, pollution de l'eau, eutrophisation, perte en fertilité des sols...

Afin d'évaluer les impacts des connectivités hydrologiques et des mutations paysagères, la première approche du mémoire est de reconstruire les évolutions du paysage par digitalisation. Par conséquent, le territoire depuis les années 1830 jusqu'à aujourd'hui pourra être reconstitué sous forme de données cartographiques. Ainsi nous pourrons voir les changements qui se sont opérés dans la structure paysagère mais aussi, dans les modes d'occupation des sols à travers 4 périodes. La seconde approche consiste à modéliser les connectivités hydrologiques dans le territoire à l'aide du modèle multi-agent LASCAR. Le modèle permet de représenter la trajectoire des écoulements et d'identifier les parcelles connectées et déconnectées dans le territoire. Aussi il permet de comprendre le rôle des éléments du paysage comme les haies ou bien encore celui des surfaces de sol, dans les connectivités et déconnectivités. Les différentes connectivités hydrologiques, également réalisées pour les 4 périodes, permettront de comprendre la relation entre l'organisation de la structure paysagère et le fonctionnement hydrologique de la zone d'étude. Aussi, la modélisation actuelle permettra d'identifier les parcelles connectées et déconnectées, ainsi que les éléments du paysage ayant un rôle sur les dynamiques d'écoulement. Le modèle sera par la suite vérifié sur le terrain, ce qui permettra de le valider et d'illustrer par des photographies les différentes connectivités. Enfin, la modélisation permettra de fournir un indice d'analyse, représenté également sous forme de plaquette, afin d'aider les gestionnaires de bassin versant à identifier les parcelles qui nécessitent des aménagements.

b. Bassin versant du Tortillon par le laboratoire IDEES (Mémoire de recherche M2, 2021)

Résumé du mémoire de recherche de master 2 de Mathilde Guillemois. Le mémoire peut être consulté dans les livrables du projet.

Le mémoire présente le projet de thèse intitulé « Trajectoires des paysages bocagers de la Normandie au Grand Ouest ». Le bocage, paysage emblématique de la Normandie, se caractérise par une mosaïque de champs enclose par des haies sur talus. Depuis le Moyen-âge, les Hommes ont façonné le bocage, entre développement, expansion et décroissance, le bocage ne cesse d'évoluer au gré des modernisations agricoles. Les haies et les autres objets qui composent le bocage assurent des rôles prépondérants pour l'environnement, notamment dans la régulation des ruissellements et des connectivités hydrologiques. Ainsi, c'est l'organisation spatiale des haies et des autres objets du paysage (parcelles, fossés, routes, chemins...) qui détermine la possibilité pour un ruissellement érosif formé dans les parcelles agricoles de rejoindre le cours d'eau. Un phénomène qui évolue au cours du temps en fonction des mutations paysagères, accentuant ainsi les risques de perte en sol et de pollution des cours d'eau. Ces pollutions peuvent devenir problématiques jusqu'à conduire à des perturbations graves de la distribution d'eau potable. Pour l'environnement, les répercussions sont elles aussi importantes engendrant des risques d'eutrophisations, de colmatages des frayères, de turbidité des eaux, etc. Ces conséquences déjà pressantes et pesantes sur les ressources pourraient devenir chroniques dans un contexte avéré de changement climatique dont les récents scénarios localisés prévoient une augmentation des pluies hivernales pouvant atteindre 25 % (Giec Normand 2020). L'intérêt pour le bocage est grandissant, et les interrogations sur son rôle dans la régulation du ruissellement se précisent.

Le projet de thèse souhaite ainsi participer à la compréhension de l'évolution du bocage depuis 2 siècles, en axant son regard sur l'incidence des mutations paysagères sur le fonctionnement hydrologique des milieux. Il cherchera à répondre à la problématique suivante : quelles incidences de l'évolution des paysages bocagers sur les connectivités hydrologiques dans les petits hydrosystèmes bocagers normands et du Grand Ouest ?

Le présent mémoire présentera également la méthodologie mise en place pour la thèse. Elle consiste en (1) la création d'un inventaire des ressources historiques et actuelles, (2) la reconstruction des paysages sur 8 séquences temporelles et sur plusieurs zones d'études, afin de (3) modéliser avec le modèle multi-agents LASCAR les connectivités hydrologiques au sein des territoires, pour enfin (4) penser à l'agriculture de demain avec le développement d'indicateurs guidant vers une gestion intégrée du paysage de bocage. Améliorer les connaissances pour aider les gestionnaires des bassins versants et les acteurs du territoire à mieux comprendre leur paysage, est une étape importante pour envisager l'adaptation de leur pratique. La thèse a vocation à aider en particulier les agriculteurs, à limiter les connectivités hydrologiques au sein de leur exploitation pour réduire à terme l'érosion hydrique et les pertes en sol. Le recours à la modélisation et la création d'indicateurs pourront servir d'outils d'aide à la décision pour favoriser une implantation durable de haies sur talus et de meilleures pratiques culturales. Longtemps vu comme une contrainte, le bocage aujourd'hui révèle toutes ses spécificités et ses services écosystémiques. Agir sur le bocage de manière intégrée, c'est aussi agir en faveur d'une agriculture durable et résiliente pour répondre au défi climatique de l'heure et de demain.

c. Bassin versant de la Sienne par le laboratoire IDEES (Mémoire de M1, 2021)

Résumé du mémoire de recherche de Solène Lecrosnier. Le mémoire peut être consulté dans les livrables du projet.

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.

d. Bassin versant de la Chippe (Mémoire de M1, 2020)

Résumé du mémoire de recherche d'Elsa Fougeray. Le mémoire peut être consulté dans les livrables du projet.

La question relative aux problèmes de ruissellement érosif des sols s'inscrit à travers plusieurs réglementations françaises et européennes depuis déjà quelques années. En effet, devenus une des préoccupations de la gestion intégrée de l'eau et de son territoire, les phénomènes de transferts et d'érosion des parcelles agricoles interviennent dans les attentes de « bon état écologique des eaux » relevé par la Directive Cadre sur Eau de 2000. Les objectifs de cette loi et d'autres réglementations sont clairs : lutter contre les inondations et l'eutrophisation des eaux superficielles, lutter contre la pollution des eaux souterraines et superficielles et atteindre un bon état physique, chimique, biologique et écologique des eaux. La principale mutation du couvert végétal connue de nos jours résulte de la transformation des modes d'occupation des sols et de l'agriculture. En effet, depuis les années 80 une profonde mutation du système agricole bouleverse les sociétés et leurs relations à leurs environnements. Les cultures pérennes sont échangées par des cultures rotatives, nombreuses et importantes. Les rotations conduisent alors à la mise à nu des sols lors de l'ensilage ou de la récolte. La Normandie, une des premières régions agricoles de France, voit ses surfaces en herbes disparaître chaque année. Entre 2000 et 2010 on note une disparition de 40 000ha de prairies. Dans les années après-guerre, la haie est vue comme encombrante et « inadaptée à l'évolution » et à la modernisation de l'agriculture. Les nouveaux enjeux productivistes induisent le recul des prairies au profit des cultures et d'une réorganisation des structures agraires par arrachage de haies. Les terres arables aux rotations accélérées ont doublé tandis que les prairies ont reculé en dépit des enjeux écologiques, environnementaux qui deviennent désormais des préoccupations principales.

La région du Perche dans l'Orne a connu une évolution rapide de son activité agricole calquée sur le modèle des exploitations de la Beauce. Ancienne région agricole dominée par des paysages de prairie et de vergers, certains secteurs notamment le bassin de la Chippe (affluent de l'Huisne) ont vu leur paysage se métamorphoser par les nouvelles formes d'organisation parcellaire. La faible densité de haie actuelle influence et intensifie alors les processus de ruissellements et les conséquences associées.

Le ruissellement et le transfert hydrosédimentaire se caractérisent par des écoulements de surface pouvant arracher et transporter des sédiments pris du couvert pédologique. Les ruissellements chargés en matières en suspension et en polluants transitent jusqu'au cours d'eau et déposent d'épaisses couches dans le fond du lit de la rivière. Par ailleurs, les conséquences agronomiques relevées s'observent par des étendues de dépôts en bas de parcelle, par des formes d'érosion de tailles variables, et par la dégradation des couches fertiles du sols et du semis. L'ensemble des conséquences engendre des coûts économiques, des dégradations en matières de ressources (eau, sol) et de biodiversité (pédofaune, piscicole, etc). Face à ces constats observés depuis l'été 2019, le Syndicat de la Sarthe Amont et notre recherche avons souhaité analyser les phénomènes sur ce territoire en vue d'un programme d'actions. La communauté scientifique s'est donc emparée de ces différents enjeux en analysant le processus en lui-même ou bien l'influence des terres cultivées afin de constituer un état des lieux des phénomènes et des enjeux en France, par régions, départements, bassins et régions agricoles. Or l'approche des dynamiques d'écoulement dans l'espace et le paysage est assez récente et s'est développée grâce aux SIG. En effet, appréhender les trajectoires des écoulements dans le paysage permet de mettre en évidence les zones émettrices et les secteurs à enjeux hydrologiquement connectés au cours d'eau. Le paysage organisé, structuré comporte un ensemble d'éléments à prendre en compte dans l'analyse (réseau de haies, de fossé, de routes, entrée de champs, étendue d'eau, occupation du sol, etc). Les acteurs sont également à prendre en compte dans la mesure où ils influencent les écoulements par les choix d'occupation et de travail du sol autant qu'ils les subissent. Ce sont eux qui organisent et créent le paysage dans lequel les écoulements circulent. C'est donc grâce à l'approche modélisatrice que les écoulements peuvent être

analysés dans le paysage. L'avantage de la modélisation par Système Multi-Agent est de contribuer à analyser les interactions entre les processus naturels et les entités paysagères.

Problématiques et objectifs : Le point de départ de cette recherche est l'intérêt porté à la compréhension et la maîtrise des écoulements dans le paysage afin d'engager des projets d'aménagement et d'action sur le territoire en question. Suite aux premières approches des phénomènes et des conséquences observées, nous avons voulu expérimenter l'outil de modélisation LASCAR.

- Cette réflexion et l'appropriation du sujet a soulevé plusieurs problématiques :
- Comment et en quoi le paysage peut-il influencer voire contrôler les écoulements ?
- Comment représenter et soulever les rôles des entités paysagères du territoire étudié sur les écoulements (par les observations terrain et la modélisation) ?
- En quoi l'apport de la modélisation multi-agent couplé au travail de terrain peut apporter une aide d'expertise et un diagnostic à de futurs projets d'aménagement ?
- Comment les acteurs et la profession agricole s'emparent-ils et gèrent-ils leurs paysages ainsi que les phénomènes de ruissellement ? Et comment se représentent-ils les rôles des entités paysagères et les enjeux occasionnés ?

e. Bassin versant de la Jouselinière par le syndicat mixte Evres-Thau-Saint-Denis
(Mémoire de stage de M2, 2021)

Résumé du rapport de stage de Laurine Ansart. Le rapport de stage peut être consulté dans les livrables du projet.

Le territoire d'étude du SMiB comprend une activité agricole très importante, avec une dominante marquée par l'élevage. Localement, les pentes peuvent être fortes et le maillage bocager est parfois très clairsemé. Le nombre de prairies permanentes diminue et la modification du paysage qui en résulte entraîne des dysfonctionnements récurrents ayant un impact sur la qualité de l'eau et des milieux aquatiques, mais également sur la qualité des terrains agricoles. Depuis plusieurs années, l'érosion récurrente de parcelles agricoles entraînent un colmatage et un transfert de polluants vers les cours d'eau. Le ruissellement, localement important, contribue quant à lui à l'importance des pics de crues, entraînant des destructions ponctuelles de cultures ou de semis, le comblement de fossés ou encore des inondations ponctuelles de certains bourgs et habitations. Ainsi, en 2019, un programme d'actions de lutte contre les pollutions diffuses est mis en oeuvre sur le territoire. Ce programme, porté par le SMiB, comprend un large volet agricole dans lequel s'inscrit un axe sur l'aménagement de l'espace. Dans ce cadre, une étude est menée depuis 2020 pour identifier les secteurs les plus à risque vis-à-vis de l'érosion et du ruissellement. L'objectif de ce stage est donc d'établir un diagnostic de deux têtes de bassins versants tests, afin d'obtenir, grâce à un modèle de recherche « LAndscape StruCture And Runoff (LASCAR) », des pistes de réflexion pour proposer des aménagements efficaces localement pour freiner les écoulements. Après avoir défini ces phénomènes et présenter les aménagements pouvant être mis en place pour limiter leurs impacts, une présentation du territoire et des études préalables menées sur le secteur sera exposée. La suite du rapport est consacrée à la présentation du modèle LASCAR et à la réalisation de l'étude.

f. Bassin versant de la Flèche par le syndicat mixte du Bas Léon (Mémoire de stage de M2, 2021)

Résumé du rapport de stage de Romain Quigneaux. Le rapport de stage peut être consulté dans les livrables du projet.

Dans le cadre du contrat territorial du Bas-Léon 2020-2025, un programme d'actions de lutte contre les pollutions diffuses est mis en oeuvre sur le territoire du SAGE du Bas-Léon. Ce programme comprend un volet agricole dans lequel s'inscrit un axe sur l'aménagement de l'espace. C'est dans ce contexte, qu'une étude pour identifier les secteurs les plus à risque vis-à-vis de l'érosion et du ruissellement est mis en oeuvre.

D'après le glossaire international d'hydrologie (1992), le ruissellement est un « écoulement diffus de l'eau sur le sol avant d'atteindre un cours d'eau ». Celui-ci va se concentrer peu à peu jusqu'à créer des rigoles et dans certains cas des ravines. Il résulte de la pluie tombée une fois celle-ci infiltrée par le sol et par la végétation. Ce ruissellement de l'eau sur les parcelles agricoles est un facteur d'érosion important qui entraîne avec lui des particules de sol (les sédiments) et des particules chimiques.

Ainsi, les particules érodées et transportées sont susceptibles de boucher les fossés, de créer des couches de sédiments mais aussi de créer des coulées de boues et même de diminuer la fertilité des sols (Baize et al, 2013). D'un point de vue chimique, les particules érodées contiennent des polluants (pesticides, engrais...) et des nutriments. Une fois exportées, ces particules peuvent ainsi engendrer des problèmes d'eutrophisation par leur composition chimique. Cette eutrophisation est un « enrichissement d'une eau en sels minéraux (nitrates et phosphates, notamment), entraînant des déséquilibres écologiques tels que la prolifération de la végétation aquatique ou l'appauvrissement du milieu en oxygène » Larousse. Un exemple concret de ce phénomène est observable en Bretagne : les marées vertes.

L'exportation de sédiments en dehors des parcelles est aussi un problème important pour l'agriculture. En effet, la fertilité et la qualité du sol se voient diminuer à cause de l'érosion et du transport des particules à l'extérieur des surfaces cultivées. Cet aspect est souvent négligé, or il faut 2000 ans pour créer seulement 10 cm de sol fertile (IASS Potsdam). Les agriculteurs ont donc tout intérêt à s'intéresser de près à ce phénomène s'ils souhaitent conserver et protéger leur support de culture.

C'est dans ce contexte que le stage a été créé pour réaliser un diagnostic terrain sur trois bassins versants afin d'identifier les parcelles agricoles susceptibles d'être les plus contributrices de sédiments au cours d'eau et notamment celles où un travail d'aménagement serait nécessaire pour limiter les pollutions dans les ruisseaux et à l'exutoire.

g. Bassin versant de Morlaix par Morlaix communauté (Mémoire de stage de M2, 2022)

Résumé du rapport de stage de Solène Lecrosnier. Le rapport de stage peut être consulté dans les livrables du projet.

La Bretagne se classe aujourd'hui à la deuxième place de la production agricole nationale. Partagée entre élevage et culture, la surface agricole utile occupe 62% du paysage breton [bretagne-environnement, 2020]. Depuis les années 50, le paysage breton a donc évolué au gré des évolutions de l'agriculture. Les petites parcelles ont laissé place aux grandes parcelles de culture ou d'élevage industriel. Au milieu de ce paysage évoluant au rythme de la production agricole, les ruisseaux, les cours d'eau et les rivières demeurent. Le productivisme du territoire n'est pas sans conséquences sur les écosystèmes du territoire, que l'on parle de faune et de flore, tout comme sur les risques naturels, et notamment sur les inondations.

La ville de Morlaix s'est établie dans une vallée à l'exutoire d'un bassin versant de quasiment 200km². Cette position a facilité pendant de nombreuses années, les échanges avec le monde et elle occupait une place stratégique pour de nombreux domaines : commercial, militaire, ... La ville s'est construite autour de deux rivières, le Jarlot et le Queffleuth, qui confluent dans le centre-ville pour former la rivière de Morlaix. La ville a donc toujours été exposée à l'aléa inondation, mais ce qui n'a fait qu'évoluer depuis des années, ce sont les enjeux. Rappelons que sans enjeux, un aléa naturel ne constitue pas un risque. Les commerces, les habitations, les structures publiques, sont autant d'enjeux à protéger que cela soit dans une perspective de perte économique ou plus important, humaine.

Depuis le lancement du Programme d'Action et de Prévention des Inondations (PAPI) en 2015, Morlaix a fait l'objet de plusieurs actions pour réduire la vulnérabilité des commerces, des habitations et des populations de son centre-ville. Aujourd'hui, le principal projet de lutte contre les inondations est un projet de réaménagement des galeries qui conduisent les cours d'eau dans le centre-ville. Le stage s'inscrit lui dans la mise en place de solutions d'hydraulique douce qui viendront en complément des travaux d'hydraulique lourde dans le centre-ville.

Morlaix fait partie de la Communauté de Communes de Morlaix Communauté. Morlaix Communauté compte aujourd'hui 26 communes. De nombreuses compétences, notamment en matière d'environnement, sont aujourd'hui assurées par le personnel de la collectivité. Le risque inondation est géré par le service Gestion des milieux Aquatiques et Prévention des Inondations (GEMAPI) et plus précisément par la cellule PAPI et risques naturels. Le stage réalisé s'est donc déroulé au sein de cette cellule, dans les locaux du service GEMAPI de Morlaix Communauté, sur une durée de 5 mois (d'avril à septembre 2022).

Les missions du stage se sont construites en lien avec Romain Reulier, enseignant-chercheur de l'Université de Caen Normandie. Le stage s'articule en effet autour de modèle LandscApe StruCture and Runoff (LASCAR), un modèle de simulation multi-agents développé par Romain Reulier. Le modèle LASCAR est un modèle permettant de représenter les écoulements sur un bassin versant en fonction de la topographie et de l'occupation du sol. Le modèle permet donc de visualiser quels sont les parcelles les plus émettrices de ruissellement et les parcelles qui doivent donc faire l'objet d'une réflexion de re-aménagement dans le but de freiner les écoulements. Le but est ici de proposer des aménagements localisés à des endroits stratégiques en termes de ruissellement. La méthodologie employée pour parvenir à cet objectif s'est divisée en deux parties : mise en place du modèle et réflexion autour des projets d'aménagements. Le but est de faciliter l'appropriation des résultats par les différents acteurs qui s'inscrivent dans les schémas d'aménagement afin d'en faciliter la mise en œuvre. Tout au long de la réalisation de ces missions, il a été nécessaire de réfléchir à la manière d'exploiter et de présenter les résultats.

Ce stage avait pour but de permettre une première entrée dans le monde professionnel. Il s'est réalisé en lien étroit avec le mémoire de recherche réalisé en première année de master qui traitait de la même thématique. Ici, le travail n'a pas été de simplement identifier les zones problématiques sur une surface donnée mais bien de proposer des solutions concrètes et réalisables en termes d'aménagement.

La méthodologie liée à la mise en place du modèle LASCAR suit plusieurs étapes qui seront détaillées dans le rapport suivant. Le modèle ne peut en aucun cas se passer du travail de terrain à la fois pour relever les données nécessaires au modèle mais également pour vérifier les résultats obtenus.

L'objectif de ce rapport est de répondre à la problématique suivante : **Comment les aménagements d'hydraulique douce en têtes de bassin versant peuvent-ils répondre à la problématique des inondations à Morlaix ?**

Le rapport est donc divisé en plusieurs parties afin de répondre à cette problématique. On s'intéressera tout d'abord au contexte dans lequel le stage a pris place mais également au cadre théorique. La deuxième partie de ce rapport présentera la mise en place du modèle sur deux sous bassins versants d'étude, ainsi que les résultats obtenus. Enfin, la dernière partie se consacrera aux réflexions autour de la mise en place opérationnelle du modèle, c'est-à-dire les propositions d'aménagements à réaliser pour réduire les connectivités hydrologiques.

h. Bassin versant de l'Asseline par la Communauté d'Agglomération du Cotentin
(Mémoire de stage de M2, 2021)

Résumé du rapport de stage d'Elsa Fougeray. Le rapport de stage peut être consulté dans les livrables du projet.

La communauté d'Agglomération du Cotentin s'étend sur 1439 km² et 129 communes. Le service Gestion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations (GEMAPI) crée au 1er janvier 2018 (date de la prise de compétence) agit sur l'ensemble des 1976 km de cours d'eau et 278 km de côtes du nord Cotentin. Pour répondre aux objectifs du Contrat Eau et Climat signé le 20 décembre 2019 avec l'Agence de l'eau Seine-Normandie (AESN) dans le cadre du 11ème programme, la Communauté d'agglomération a souhaité se doter d'une méthodologie pour diagnostiquer le ruissellement érosif sur les bassins identifiés comme vulnérables par l'AESN. Il s'agit ainsi de cibler sur le territoire les actions à mettre en oeuvre afin de lutter contre la dégradation de la qualité de l'eau par temps de pluie (Enjeu 1 – Atteinte et/ou maintien du Bon Etat).

2.1.3 Développement d'une version simplifiée

a. Adaptation du modèle LASCAR pour un usage simplifié

Le modèle LASCAR initialement créé ou dans sa version amendée (cf 2.1.1) a pour public cible les gestionnaires travaillant sur les questions liées aux problématiques de gestion du ruissellement érosif, des transferts hydro-sédimentaires ou d'inondation. Le modèle mis à disposition est assez complet et nécessite un peu de temps de prise en main (mais reste tout à fait abordable). Il ne se prête en revanche que très difficilement à des ateliers thématiques de courtes durées tels que l'on peut les concevoir dans l'enseignement ou la formation. Dans le cadre du projet RESP'HAIES, et en lien avec l'axe 4 du projet, le choix a été fait de créer un modèle ad-hoc plus simple afin d'être facilement mobilisable par la communauté des enseignants des lycées agricoles voulant mettre en place un atelier thématique de sensibilisation sur de courtes durées (1/2 journée). Ainsi, une version simplifiée du modèle a été développée. Celle-ci permet de mettre en évidence les principaux concepts de l'analyse spatiale (connectivité notamment) utiles à la compréhension des processus. Tester au lycée agricole de Saint-Lô au printemps 2022, le modèle LASCAR simplifié a été rapidement pris en main par les élèves qui ont montré, en fin de séance, leur intérêt pour ce type d'enseignement.

b. Création d'un tutoriel et des exercices dédiés

Un tutoriel d'utilisation du modèle LASCAR simplifié a également été créé au cours du projet (voir livrable). Celui-ci est accompagné d'un ensemble d'exercices également disponible dans les livrables.

2.1.4 Fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin versant du Tortillon

Publication à venir (juin 2023)

2.2 – Déroulé du projet

2.2.1 – Organisation mise en place

Dans le cadre de cette sous-action 2.2 le laboratoire IDEES Caen a mis à disposition du temps recherche de cinq titulaires : Romain Reulier (maître de conférences), Daniel Delahaye (professeur des universités), Mohand Medjkane (ingénieur de recherche), Robert Davidson (ingénieur d'étude), Marie-Paule Bataillé (assistante-ingénieure) et deux contractuels : Jérémie Leleu et Romain Quigneaux.

Par ailleurs, un stage de master 2 (Florentin L'Homme) de 6 mois a été financé par l'Université de Caen Normandie et quatre étudiants de Master de l'université de Caen Normandie (Mathilde Guillemois, Romain Quigneaux, Elsa Fougeray, Solène Lecrosnier) ont participé à l'action 2.2 au cours du projet. Quatre structures publiques du nord-ouest de la France ont financé chacune un stage de master 2 de 6 mois visant à tester le modèle sur leur territoire. Il s'agit des structures suivantes :

- Syndicat Mixte des Bassins Evre – Thou – St Denis – Robinets – Haie d'Alot
- Communauté d'Agglomération du Cotentin
- Syndicat des Eaux du Bas-Léon, Finistère Nord
- Morlaix Communauté

Enfin, une étudiante a été recrutée au laboratoire IDEES (Céline Toubal) pour caractériser le fonctionnement hydro-sédimentaire d'un des bassins versants de l'étude : le bassin du Tortillon.

2.2.2 – Étapes

Objectifs attendus :

- Etudier le rôle de l'organisation des objets du paysages (haies, talus, fossés, routes...) sur la dynamique des écoulements sur un territoire et les connexions/déconnexions hydrologiques issues de cette organisation
- Quantifier la connectivité actuelle mais également étudier son évolution récente (modélisation rétrospective) pour caractériser l'incidence des trajectoires paysagères sur la sensibilité aux processus érosifs. Le modèle pourra également servir à tester des scénarios d'aménagement voire être utiliser comme outil de médiation entre les acteurs locaux

Méthodes :

- Modélisation sur trois terrains d'études (Tortillon, Jusselinière et Guer amont (sous bassin du Léguer))
- Approche géomorphologique appliquée à 1 territoire (un autre est visé si possible) : suivi et quantification des flux à partir de mesures haute fréquence.
- Approches diachroniques pour reconstruire l'évolution des connectivités hydrologiques au sein des bassins concernés.

La convention fille ayant été signée à la fin de l'année 2019, le travail de l'année 2019 pour l'action 2.1 s'est appuyé sur le travail des permanents (Daniel Delahaye et Romain Reulier).

Le premier travail visant à améliorer le modèle LASCAR et à tester des plateformes de simulation multi-agents a été réalisé par Florentin L'Homme dans le cadre de son stage de Master 2 de fin d'année entre le 1er avril 2020 et fin août 2020. Parallèlement à ce travail d'implémentation informatique, les premières

versions du modèle LASCAR ont pu être utilisées dans le cadre de mémoire de Master 1 d'Elsa Fougeray sur le bassin versant de la Chippe de Mathilde Guillemois sur le bassin versant du Guer amont.

Le nouveau modèle LASCAR a ensuite pu être utilisé en 2021 dans le cadre des stages de Master 2 de Mathilde Guillemois au laboratoire IDEES, de Romain Quigneaux au syndicat des eaux du Bas-Léon dans le Finistère, d'Elsa Fougeray à Cherbourg communauté et de Laurine Ansart au syndicat Evre-Thau-Saint-Denis dans le Maine-et-Loire. Ces stages ont eu lieu entre le 1er avril et le 31 août 2021. Préalablement au début de ces stages, les différents tutoriels d'utilisation du modèle LASCAR ont été réalisés par Romain Reulier en s'appuyant sur un travail de projet tutoré réalisé par des étudiants de la Licence Professionnelle SIG-DAT de l'université de Caen-Normandie.

En 2022, le modèle LASCAR a été testé par Solène Lecosnier dans le cadre de son mémoire de stage de Master 2 au sein de la collectivité de Morlaix communauté. Le 1er décembre 2022 Romain Reulier, Daniel Delahaye et Mathilde Guillemois ont animé le webinaire de restitution de l'action 2.2 du projet RESP'HAIES.

Ainsi, les objectifs fixés ont été atteints dans les temps impartis. Les livrables vont même au-delà des objectifs initiaux puisqu'il n'était pas prévu de tester le modèle sur d'autres territoires que les trois identifiés en amont du projet. Ainsi, en plus d'avoir été testé sur le bassin de la Jousnelinière, du Tortillon et du Guer Amont, le modèle a été utilisé sur le bassin versant de la Flèche, de la Chippe, de la Sienne Amont et de l'Asseline. De même, il n'était pas prévu initialement de développer une version simplifiée à destination de l'enseignement agricole.

PARTIE 3 – RESULTATS

3.1 – Résultats

3.1.1 Optimisation du modèle LASCAR

- a. Amélioration du modèle existant et recherche de la meilleure plateforme multi-agents

Une première modification apportée visait à permettre une utilisation du modèle dans différents territoires aux dimensions et extensions géographiques variées sans recourir à un long travail d'implémentation. Jusque-là, un fichier NetLogo était généralement associé à chacune des zones géographiques étudiées. Cette façon de faire obligeait de renseigner les chemins des fichiers en entrée uniquement dans le code. Pour remédier à cela, le modèle a été doté d'un explorateur de fichiers afin d'accéder facilement et rapidement aux fichiers souhaités. Par ailleurs, le module de visualisation s'adapte désormais automatiquement à l'extension géographique des fichiers en entrée.

Durant la ré-implémentation du modèle, nous avons souhaité apporter une plus grande généricité aux comportements des Agentgouttes et gommer certains défauts originels. Pour se faire, nous avons notamment supprimé les données « direction » (Reulier et al., 2016) pour ne plus utiliser qu'uniquement des MNT et MOS en entrée. Afin de palier à la suppression de cette donnée d'entrée, un algorithme de calcul de cible a été développé et est réalisé à l'initialisation du modèle ainsi qu'aux alentours des Occpatches préalablement identifiées comme des cuvettes (cad sans exutoire). Ces cibles sont déterminées en fonction de la pente qu'elles présentent.

La suppression du fichier « direction » a entraîné la suppression des fichiers « Ecoule_Reseau », « Ecoule_Topo » et « Ecoule-Cible » devenus obsolète. La suppression de ces procédures a permis de revoir le fonctionnement du modèle qui est à présent découpé en deux boucles principales : une première sur les cellules (avec notamment le processus de remplissage des cuvettes) et une seconde sur les gouttes (avec leur mort ou leur mouvement). L'ajout d'attributs tels que « est une bordure » et « est une cuvette » sur les cellules nous permet d'appliquer rapidement les processus nécessaires aux cellules concernées (ex : remplissage des cuvettes).

Ce nouveau découpage du modèle permet de mettre à profit le mécanisme de fusion des Agentgouttes. Désormais, les gouttes présentes sur une même cellule sont fusionnées entre elles et ce dès la première itération du modèle. De cette manière, le nombre d'Agentgouttes présents dans la simulation est réduit, ce qui permet d'optimiser les temps de calculs. A titre d'exemple, si le processus de fusion permet de passer de 200 à 150 agents, ce sera 50 itérations en moins pour la boucle dédiée aux gouttes (et donc 50 tentatives de mort ou mouvement en moins). La figure 3 récapitule la dynamique nouvelle du modèle simplifié. Au-delà de ces avancées, nous avons pu mettre en place de nouveaux pré-traitements tels que l'abaissement et le lissage des cours d'eau, la prise en compte ou non des MOS (à l'instar des linéaires) ou encore la considération des cours d'eau comme exutoire afin d'améliorer les performances en tuant prématurément les gouttes (le cours d'eau étant forcément connecté à l'exutoire). La segmentation du code nous a permis d'augmenter les différentes visualisations mises à disposition de l'utilisateur. Ces modifications apportées au modèle ne changent pas les résultats des simulations.

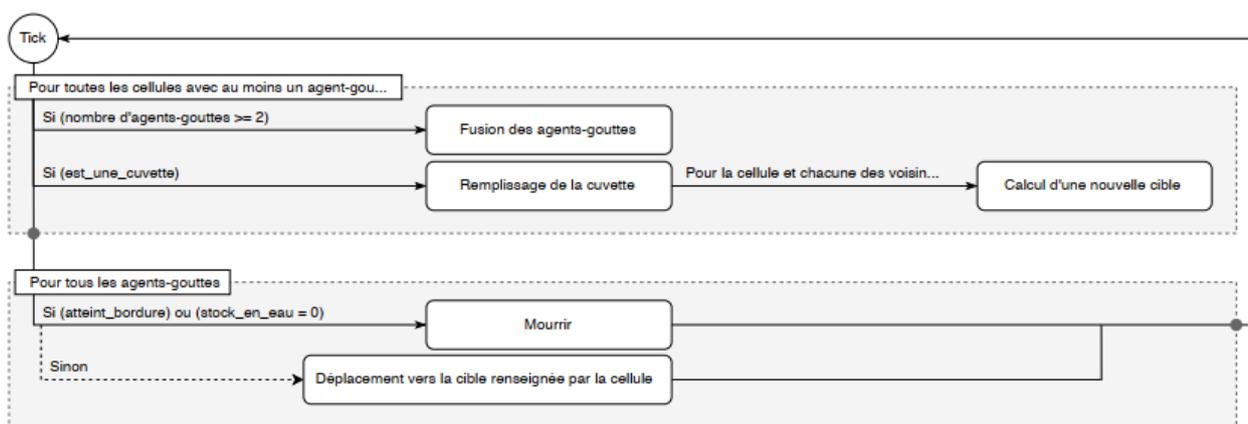


Figure 3 : Récapitulatif du déroulement du modèle simplifié utilisé dans les tests comparatifs de plateforme

Effets de la fonction « fusion » sur les vitesses d'exécution du modèle

Préalablement au lancement des tests comparatifs des trois plateformes, l'impact de la fonction « fusion » des Agentgouttes situés sur un même Occpatch sur les vitesses d'exécution du modèle LASCAR a été vérifié avec la plateforme d'origine NetLogo. Le graphique des temps d'exécution par itération de l'algorithme de calcul (figure 4) présente un pic prononcé au niveau des 2-3 premières itérations machine puis une diminution très marquée avant une stabilisation. Le pic de départ s'explique par la présence d'un très grand nombre d'Agentgouttes qui vont soit se déplacer, soit mourir à la première itération. En permettant aux Agentgouttes situés sur un même patch de fusionner, cela entraîne une diminution très rapide du nombre d'agents présents au sein de la simulation. Cette diminution du nombre d'agents libère de la ressource machine ce qui permet d'améliorer les vitesses d'exécution. Ainsi, la mise en place de ce principe de coalescence des agents mobiles se répercute tout d'abord sur les temps d'exécution des premières itérations. Sous Netlogo, les temps d'exécution de ces dernières augmentent significativement, de + 21% dans le cas de La Bouderie (figure 5). Cette augmentation correspond à l'exécution, par les Agentgouttes, de la fonction « fusion » implémentée dans le modèle. En revanche, cette action permet de faire chuter très rapidement les temps d'exécution des itérations suivantes. Ainsi, sur le site de La Bouderie, dès la 25^{ème} itération, les vitesses d'exécution moyennes tombent à 69 millisecondes (ms) contre 140 ms dans une simulation sans fusion. Les vitesses d'exécution sont ainsi deux fois plus rapides ce qui présente une amélioration non négligeable du modèle. Sur le site de Lingèvres, les temps d'exécution du modèle sont entre 2,5 et 3,9 fois plus longs que sur le site de la Bouderie (le Lingèvres étant 3,6 fois plus grand que celui de La Bouderie).

La fonction « fusion » offrant un gain non négligeable sur les vitesses d'exécution, le choix a été fait de conserver cette modification par rapport au modèle original. Ainsi, cette procédure a également été implémentée sous GAMA et Repast Symphony en vue des tests comparatifs.

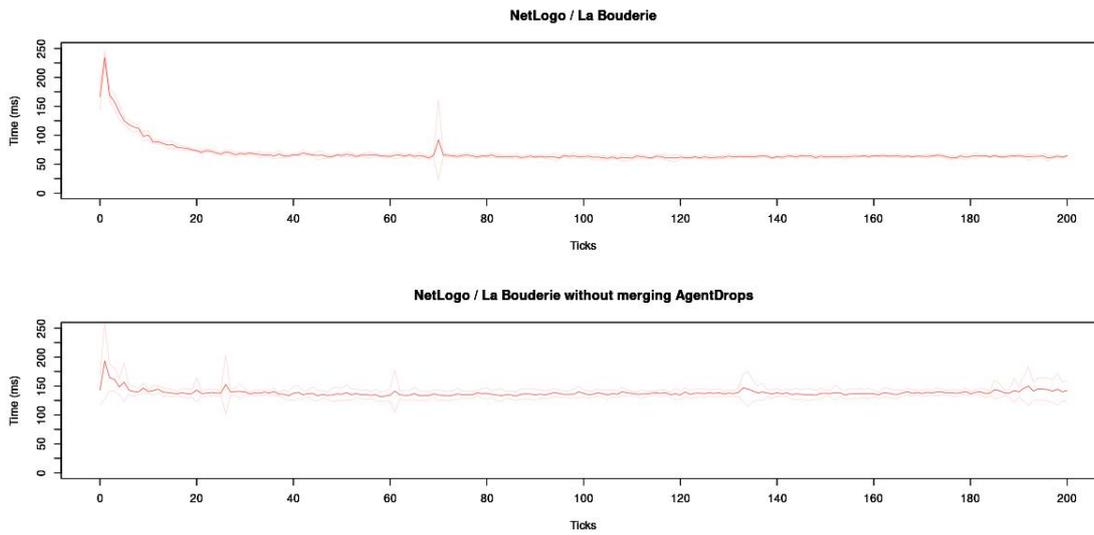


Figure 4 : temps d'exécution (en ms) par itération dans une simulation sous NetLogo avec ou sans fusion, exemple du bassin de la Bourderie

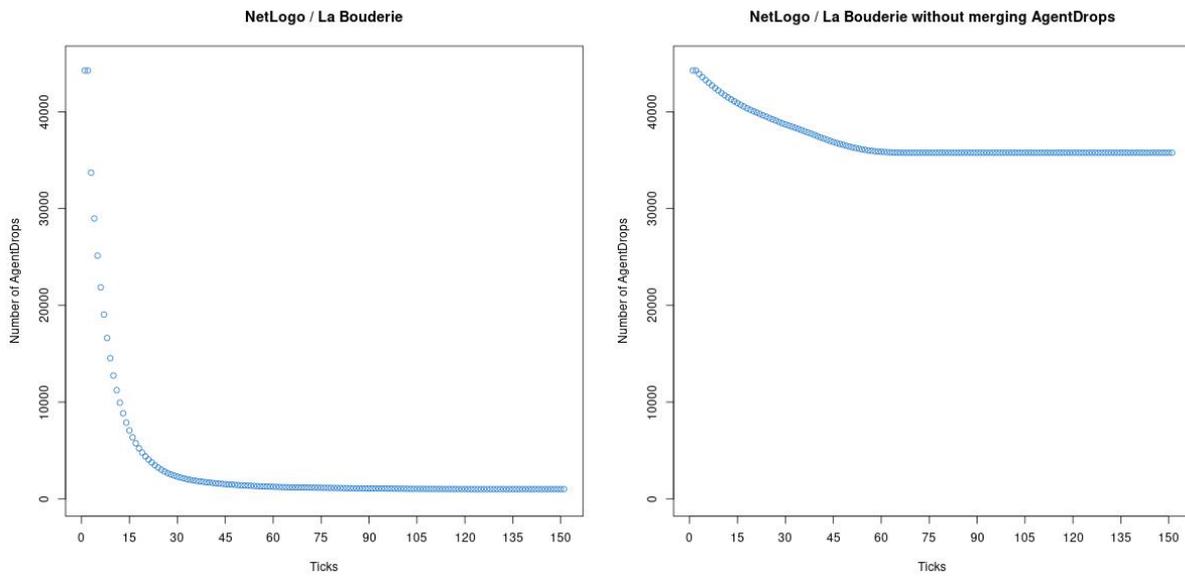


Figure 5 : Nombre d'Agentgouttes présents dans une simulation sous NetLogo avec ou sans fusion, exemple du bassin de la Bourderie

2) Comparaison des vitesses d'exécution sur les 200 premières itérations pour les trois plateformes

Les résultats exposés (tableau 2) présentent 1) le temps d'exécution par itération minimum et 2) le temps d'exécution moyen par itération. Les valeurs présentées correspondent aux valeurs moyennes obtenues pour 10 simulations pour chacune des trois plateformes pour les deux sites d'étude.

	<i>NetLogo</i>		<i>GAMA</i>		<i>Repast Symphony</i>	
	Peak	Mean	Peak	Mean	Peak	Mean
La Bouderie	234 ms	69 ms	1039 ms	190 ms	863 ms	99 ms
Lingèvres	911 ms	175 ms	6504 ms	548 ms	3848 ms	595 ms

Tableau 2 : Récapitulatif des temps d'exécution du modèle LASCAR par plateforme (fonction « fusion » activée)

Avec NetLogo sur le site de La Bouderie, le modèle présente un pic de temps d'exécution de 234 ms pour une moyenne de temps d'exécution à 69 ms par tick pour 200 ticks. Sur le Lingèvres le pic d'exécution est de 911 ms pour un temps d'exécution moyen de 175 ms par tick pour 200 ticks.

Avec GAMA sur le site de La Bouderie les résultats présentent un pic de temps d'exécution de 1 039 ms pour une moyenne de temps d'exécution à 190 ms par tick pour 200 ticks. Sur le Lingèvres le pic d'exécution est de 6 504 ms pour un temps d'exécution moyen de 548 ms par tick pour 200 ticks. Ces temps sont 2,9 à 6,3 fois élevés que pour la Bouderie. On peut alors noter la difficulté rencontrée par GAMA pour gérer un grand nombre d'Agentgouttes en interaction (pic 6,3 fois plus long) mais un temps d'exécution moyen concordant avec le passage à l'échelle, le Lingèvres étant 3,6 fois plus grand que la Bouderie.

La plateforme Repast Symphony présente des temps d'exécution moyen par itération de 99 ms par tick pour 200 tick, avec un pic à 863 ms sur le site de la Bouderie. Sur le site de Lingèvres, le temps d'exécution moyen par itération est de 595 ms pour 200 itérations avec un pic à 3 848 ms.

Les résultats montrent ainsi que la plateforme Netlogo, dans laquelle le modèle LASCAR a été initialement développé, présente les meilleures performances en termes de temps d'exécution du modèle (figure 6). Par ailleurs, les performances de Netlogo sont encore plus marquées sur le site de Lingèvres présentant le plus grand nombre d'agents. En effet, si Netlogo affiche des temps d'exécution 2,7 fois plus rapide que GAMA et 1,4 fois plus rapide que Repast Symphony sur le site de La Bouderie, ces temps sont respectivement 3,1 et 2,3 fois plus courts sur le site de Lingèvres.

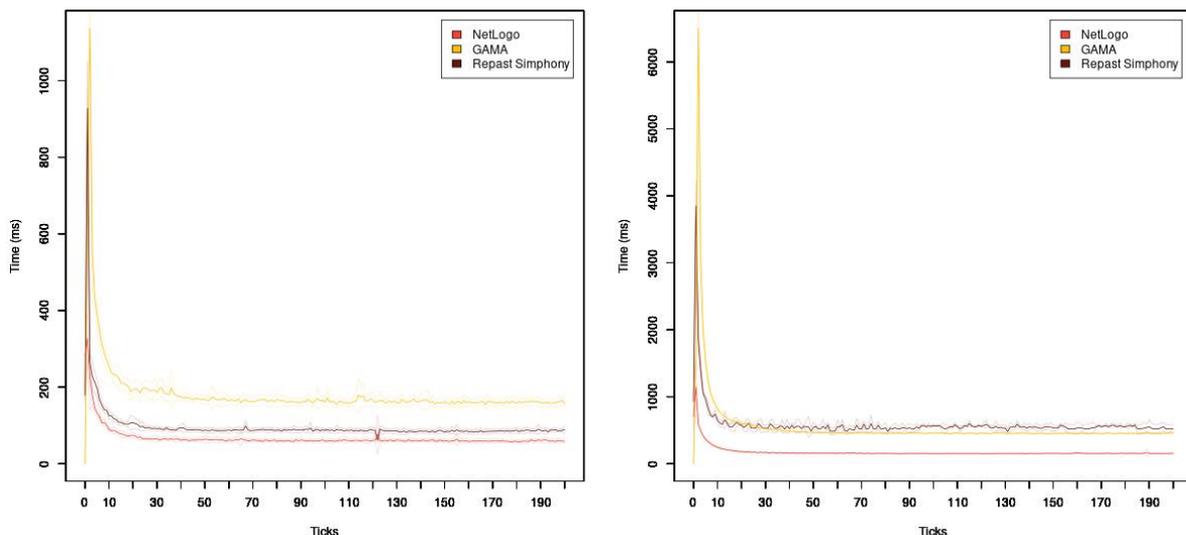


Figure 6 : Comparaison des temps d'exécution sur les trois plateformes (exemple sur la Bouderie (à gauche) et sur le Lingèvres (à droite)).

3) Décomposition des temps d'exécution par plateforme

En décomposant les temps d'exécution par itération il est possible d'appréhender les :

- temps d'exécution des Occpatches : fusion des agents et modification de la variable altitude ;
- temps d'exécution des Agentgouttes : déplacement ou suppression ;
- temps d'exécution « autre » correspondant essentiellement au rendu visuel.

Sous la plateforme Netlogo, comme pour chacune des plateformes, les temps alloués aux Occpatches sont plus conséquents en début de simulation du fait de la fusion des Agentgouttes présents sur les Occpatches (ou cellule, en vert dans la figure) (figure 7). Le temps « consommé » par les Occpatches diminue ensuite pour se stabiliser à un niveau élevé lié aux remplissages des cuvettes (impactant la variable d'altitude). La présence de nombreux Agentgouttes à l'initialisation impacte également la durée des exécutions en début de simulation avant de rapidement devenir peu significatif (en bleu sur le graphique). Enfin, il apparait à la lecture de ces données décomposées, que les opérations liées au rendu visuel des données (fonctionnement indispensable) impactent les temps d'exécution à hauteur de 29 %. Au final, les temps d'exécution du modèle par itération sont d'abord et surtout liées aux fonctions des Occpatches, puis au besoin de calcul pour le rendu visuel et enfin, de manière très marginale passé les 10 premières itérations, par les Agentgouttes.

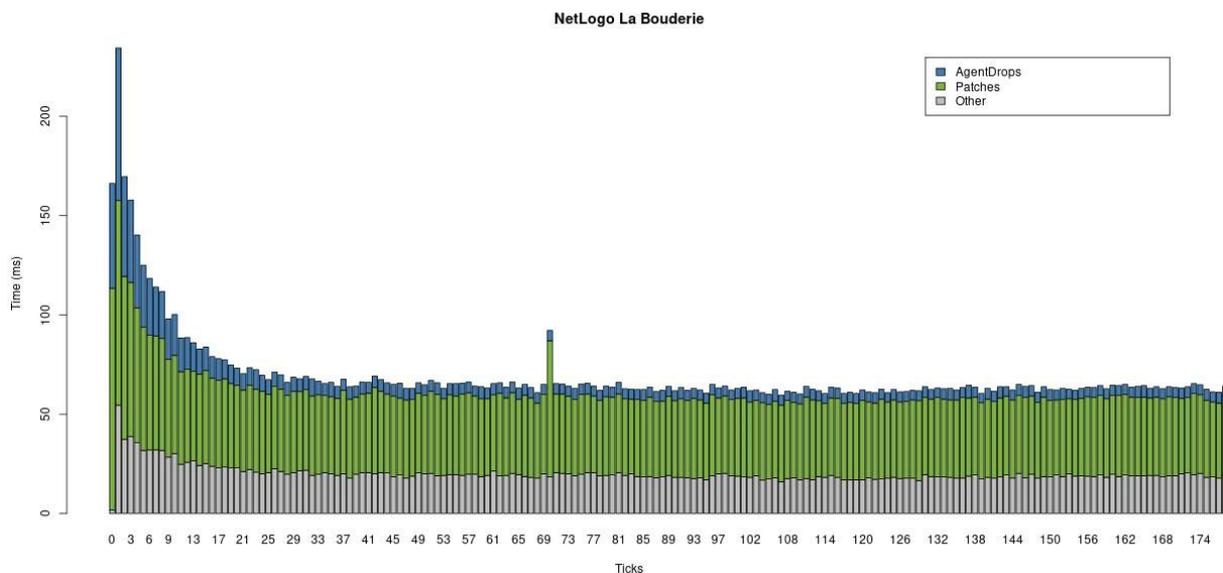


Figure 7 : Décomposition des temps d'exécution sous NetLogo (exemple du bassin de La Bouderie)

Sous GAMA, l'analyse des temps d'exécution spécifiques aux fonctions des Agentgouttes (mourir et mouvoir) montre qu'ils sont plus imposants et traduisent, semble-t-il, une certaine difficulté de la plateforme à gérer la mort et/ou le mouvement des Agentgouttes (figure 8). Les temps d'exécution des algorithmes propres aux Occpatches restent stables tout au long des 200 premières itérations. Comme sous NetLogo, les Occpatches consomment la majorité des ressources en calculs de la plateforme, il est cependant quasiment exclusif sous GAMA. Le profil ne montre pas la présence d'un temps « autre ». Ainsi GAMA semble « cacher » le temps de rendu visuel dans les temps alloués aux Agentgouttes ou aux Occpatches. La plateforme semble maintenir son rendu visuel simultanément aux calculs de la simulation (fusion des agents, suppression des agents, mouvement ...). Ce temps de calcul dédié au rendu graphique semble ainsi se « cacher » soit dans les temps alloués aux Agentgouttes, soit ceux alloués aux Occpatches soit les deux.

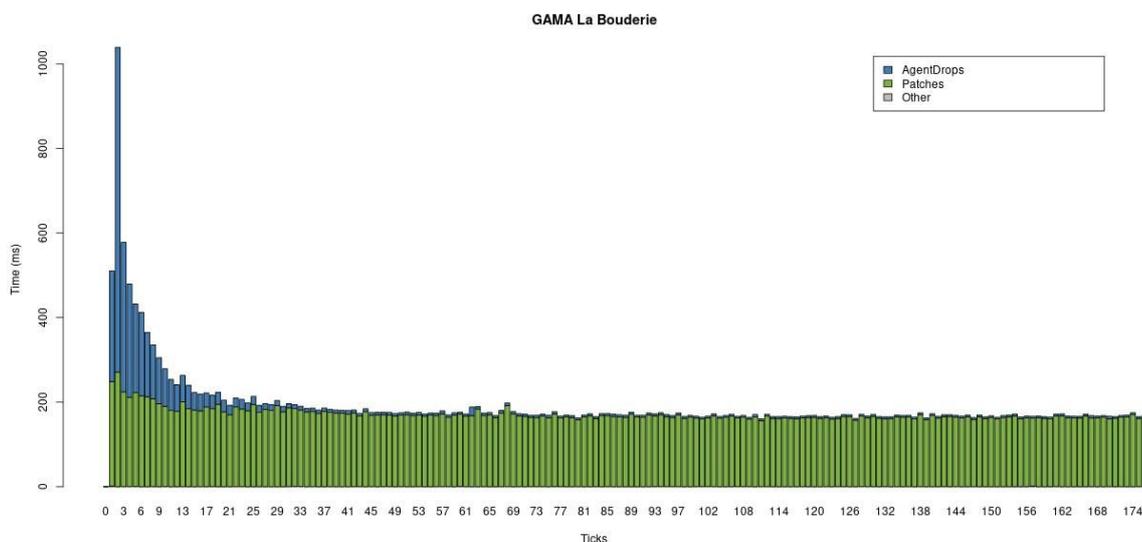


Figure 8 : Décomposition des temps d'exécution sous GAMA (exemple du bassin de La Bouderie)

L'analyse des temps d'exécution sous Repast Symphony montrent que ces derniers semblent être grandement impactés par la suppression d'Agentgouttes que traduit un pic de départ conséquent, composé à deux tiers par cette activité « suppression » (figure 9). Par ailleurs, il est à noter une augmentation du temps d'exécution alloué à « autre », correspondant en majorité au rendu visuel. Le temps d'exécution moyen alloué au rendu visuel est ainsi de 43 ms soit 43 % du temps d'exécution moyen, ce qui est plus que NetLogo (29%).

La décomposition des temps d'exécution par itération montre l'importance des Occpatches, ce qui est logique puisque contrairement aux Agentgouttes les Occpatches « restent en vie » tout au long de la simulation. Pour chaque Agentgoutte « vivant » ce sont systématiquement neuf Occpatches qui sont activés. Il s'agit de l'Occpatches sur lequel se situe l'Agentgouttes ainsi que ses huit voisins (voisinage de Moore). Ceci est inhérent aux modèles LASCAR puisqu'aucun chemin d'écoulement ne peut être préalablement défini à l'initialisation. C'est en effet la spécificité et l'objectif du modèle que de mettre en évidence l'évolution des chemins d'écoulement en fonction des actions des Agentgouttes (remplissage, coalescence, etc.). Le temps usité par les rendus visuels est également très impactant sur la durée des simulations. Ce rendu visuel instantané est indispensable car il offre au modélisateur, qui peut être le gestionnaire du site, des éléments de compréhension du fonctionnement de son territoire. Cependant, au regard des performances de Repast et de l'absence de temps « rendu visuel » pour GAMA, le paragraphe suivant vise à mieux comprendre l'impact de cette fonctionnalité sur l'efficacité des plateformes.

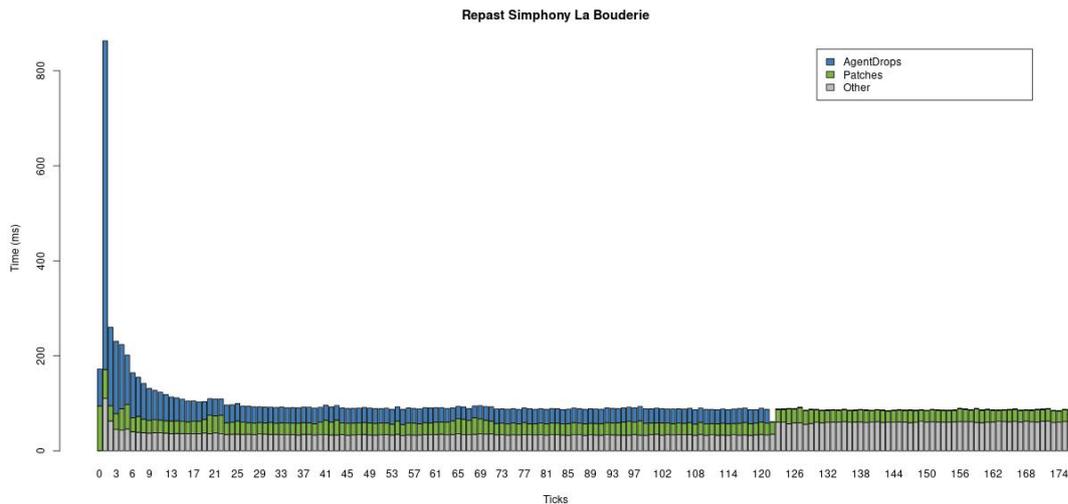


Figure 9 : Décomposition des temps d'exécution sous Repast Simphony (exemple du bassin de La Bouderie)

3) Performances des plateformes sans le rendu visuel

Avec la plateforme Netlogo, les simulations réalisées sans rendu visuel sur le site de La Bouderie montrent une diminution du pic de 10 % (210 ms contre 234 ms avec rendu visuel). Avec Repast Simphony, l'absence de rendu visuel améliore la performance de la plateforme. La version Java de Repast Simphony est 1,5 fois plus rapide que NetLogo (figure 10). Sous Gama, pour déterminer la part de temps réellement allouée au rendu visuel, une simulation sans rendu visuel a été réalisée sur le site de la Bouderie. Les résultats indiquent un pic de temps d'exécution à 940 ms (-99 ms soit -10 % par rapport à une simulation avec rendu visuel) et un temps d'exécution moyen de 105 ms par tick (-85 ms soit -45 %) sur 200 ticks. Ainsi, le temps consacré au rendu visuel sur la plateforme GAMA est estimé à 85 ms par tick soit 45 % du temps d'exécution moyen. En outre, les résultats montrent qu'avec le rendu visuel, environ 15 % du temps alloué aux Agengouttes correspondent dans les faits au rendu graphique et environ 11 % pour temps alloué aux Agentgouttes.

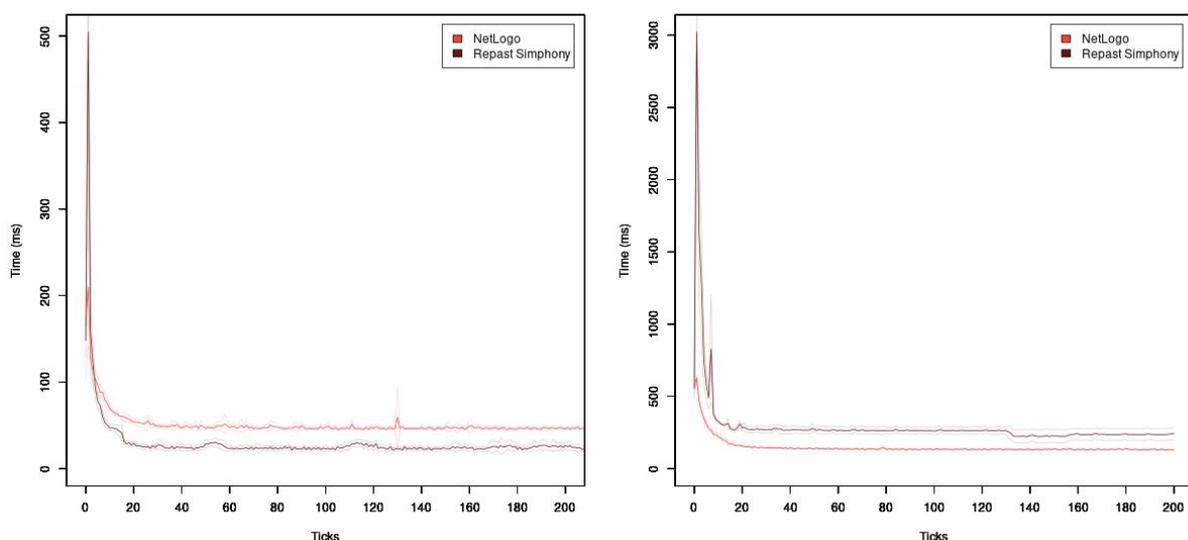


Figure 10 : Comparaison entre Netlogo et Repast Simphony sans rendu visuel pour la Bouderie (à gauche) et le Lingèvres (à droite)

Les différents tests réalisés montrent que NetLogo, la plateforme actuellement utilisée pour le modèle LASCAR, semble être la meilleure plateforme face à GAMA et Repast Simphony. Cela est vrai que ce soit en temps d'exécution ou en termes d'accessibilité. La forte communauté de simulateur sous NetLogo

contribue à son rayonnement international et alimente continuellement la plateforme en nouveaux modèles, forums et tutoriel. La plateforme étant également fréquemment améliorée, la dernière version (6.3.0) étant sortie en septembre 2022. Les performances de NetLogo s'avèrent moins bonnes lorsque l'on retire le rendu visuel et Repast Symphony a, sur ces aspects, présenté de meilleurs résultats. Néanmoins, le rendu visuel est absolument nécessaire au modèle LASCAR qui reste avant tout un modèle destiné aux gestionnaires de bassins versants. Les interprétations de ces bonnes performances de la plateforme NetLogo avec le modèle LASCAR doivent cependant être tempérées. En effet, dans quelles mesures la plateforme influence-t-elle la construction du modèle ? Le modèle ayant été développé sous NetLogo, la construction du code du modèle a été optimisé pour fonctionner avec la plateforme, dans quelles mesures les sémantiques usitées sont-elles prégnantes sur les performances du modèle. Aujourd'hui la littérature scientifique reste peu abondante à cet égard.

b. Création de quatre tutoriels dédiés

Les différents tutoriels sont disponibles dans la partie livrable du projet. Nous ne développerons pas davantage ici.

3.1.2 Principaux retours de l'utilisation du modèle sur différents bassins versants

i. Bassin versant du Guer Amont (Léguer) par le laboratoire IDEES (Mémoire de M1)

Le bassin versant du Guer amont situé dans le département des Côtes d'Armor en Bretagne couvre les communes de Pont-Melvez, Bulat-Pestivien, Maël-Pestivien et Bourbriac. Il est traversé par le Léguer, un fleuve côtier récemment labellisé « site rivière sauvage ». Le relief y est faible mais marqué par le passage du cours d'eau. Le bassin repose sur le massif Armoricain, ses sols correspondent à des sols bruns. L'activité agricole est majoritaire dans le bassin : les cultures dominent le paysage et les prairies se concentrent dans les fonds de vallées (figure 11). Au sud du bassin, les surfaces boisées sont dominantes. Le linéaire de haies est assez dense, et représente 62 kilomètres soit une densité de 62m/ha. En 2018, l'occupation du sol est assez segmentée, on retrouve au nord une proportion importante de culture, contrairement au sud dominé par les prairies et les bois.

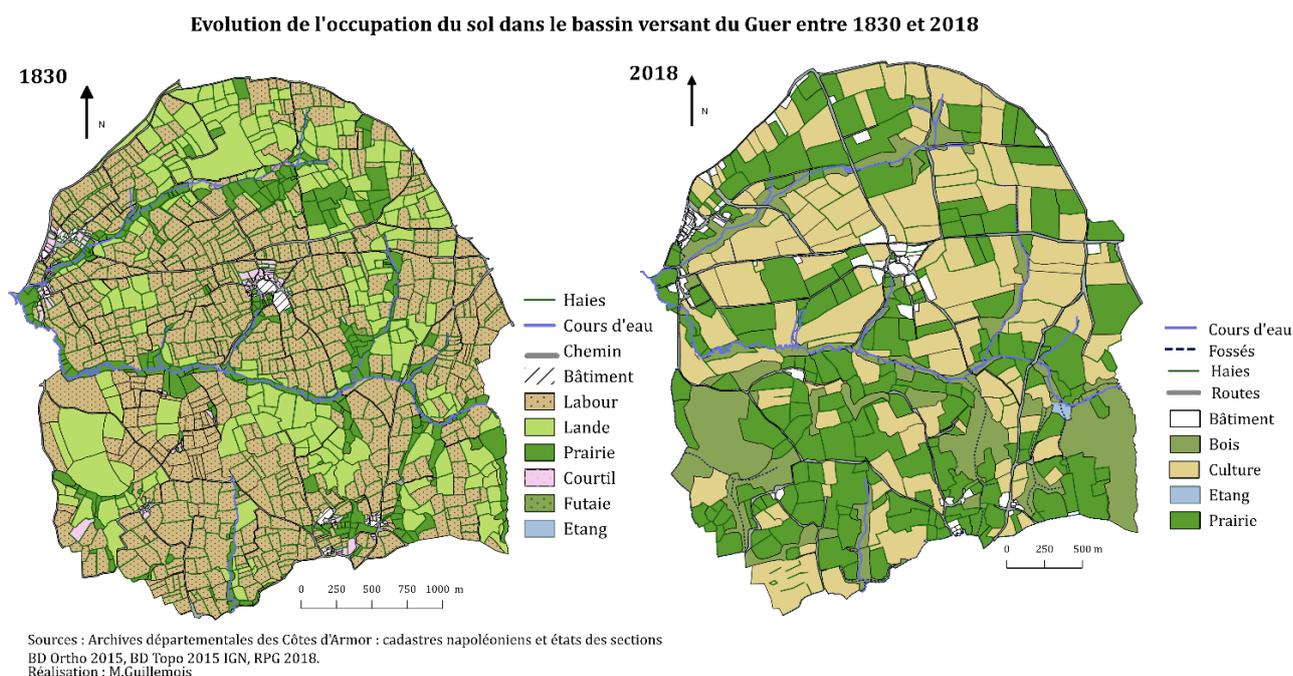


Figure 11 : Evolution de l'occupation du sol dans le bassin versant du Guer entre 1830 et 2018. Réalisation : M.Guillemois, 2020.

Depuis 1830, différentes périodes ont pu être reconstituées et illustrent l'évolution de l'occupation du sol dans le bassin du Guer amont. Au XIX^{ème} siècle les parcelles sont étroites et morcelées du fait de l'importance de la division des terres. Les cultures occupent la majorité de la surface agricole utile du bassin alors que les prairies sont condensées dans les fonds de vallées. En 200 ans d'évolution, les surfaces agricoles se sont transformées, notamment les cultures, dont les surfaces augmentent depuis les années 1970 en lien avec le développement du « modèle agricole breton ». La rationalisation et l'agrandissement du parcellaire des exploitations agricoles vont dans ce sens permettre de produire davantage sur des parcelles de plus en plus grandes. De fait, la superficie moyenne des parcelles de cultures dans le bassin a nettement augmenté passant de 1,5 hectare en 1952 à plus de 3 hectares en 2018.

Les prairies ont quant à elles progressé dans le bassin jusqu'en 1952, en lien avec l'essor de l'élevage au début du XX^{ème} siècle, avant de diminuer progressivement dans les années 1980. Aujourd'hui elles occupent 241 hectares dans la surface totale du bassin versant, contre 535 hectares de cultures.

Par ailleurs, les linéaires de haies ont diminué depuis les années 1950. La transformation des pratiques agricoles notamment l'usage de la motorisation et la rationalisation parcellaire ont fait table rase des haies. De fait, le linéaire de haies passe de 120 km en 1952 à 62 km en 2018. Un arasement massif qui va avoir des conséquences directes sur la dynamique des écoulements et sur les connectivités hydrologiques dans le bassin versant.

En effet, les modélisations effectuées avec le modèle multi-agents LASCAR révèlent l'augmentation des surfaces connectées hydrologiquement au cours d'eau au cours du temps (figure 12). Au final, la proportion de parcelles connectées double entre 1830 et 2020 de par l'augmentation des surfaces de cultures et la réduction des surfaces de prairies. La hausse des connectivités est davantage visible à partir des années 1978 où la surface des parcelles connectées passe de 239 hectares à 428 hectares en 2018. A cette même période, la rationalisation du parcellaire a fortement impacté le linéaire de haies et augmenté la surface des cultures. Par conséquent, la hausse des surfaces de cultures et de leur superficie est l'un des facteurs qui favorise la circulation des écoulements lors des pluies et donc les connectivités hydrologiques. De plus, la réduction continue des parcelles de prairies, capables de limiter les ruissellements, et la réduction des linéaires de haies participe également, à favoriser les connectivités hydrologiques.

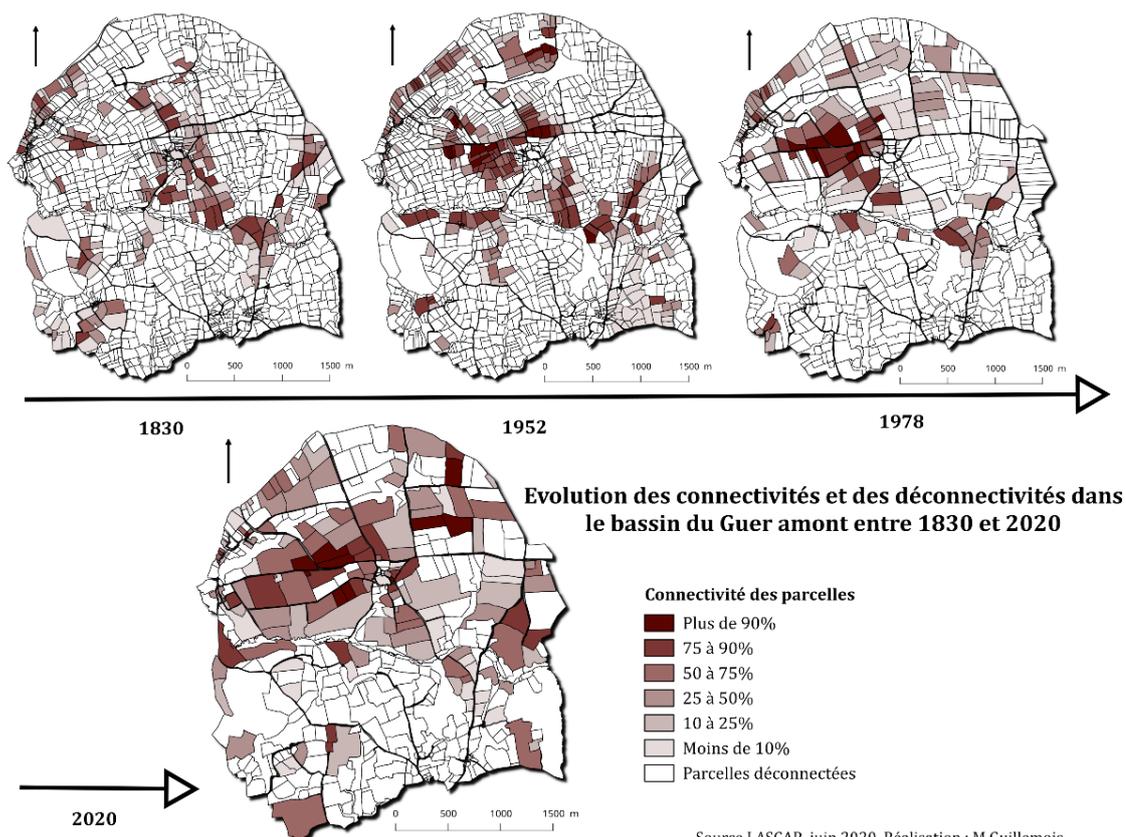


Figure 12 : Evolution des connectivités hydrologiques dans le bassin versant du Guer entre 1830 et 2018. Réalisation : M.Guillemois, 2020.

Le modèle met également en évidence l'impact de la réduction des linéaires de haies sur les chemins d'écoulement. Ces derniers parcourent moins de distance pour rejoindre le cours d'eau, au fur et à mesure que le paysage se simplifie. La diminution des haies, notamment bloquantes, qui constituaient un frein aux écoulements, permet aujourd'hui à ces derniers de rejoindre le cours d'eau plus aisément.

j. Bassin versant du Tortillon par le laboratoire IDEES (Mémoire de M2)

Le bassin versant du Tortillon (10km²) situé dans le sud-ouest du Calvados a également fait l'objet de reconstructions et de modélisations sur une période de 200 ans, de 1830 à 2020 (figure 13). Les mutations paysagères qui se sont opérées depuis deux siècles ont totalement modifié le paysage du bassin versant. Au XIX^{ème} siècle, le parcellaire est très morcelé et dédié à la culture céréalière, les prairies se situent uniquement aux abords des cours d'eau. Dans la première partie du XX^{ème} siècle, une vague herbagère s'installe et retourne un nombre important de labour en prairie. Le paysage se verdit et s'enclot puisque les haies accompagnent ce mouvement. En 1944, les prairies occupent 619 hectares, contre seulement 329 hectares de cultures, les haies comptabilisent un linéaire total de 187 km. A partir des années 1960 l'agriculture est alors en pleine modernisation, la part des cultures dans la surface totale du bassin versant progresse. Ce n'est réellement qu'à partir des années 1980 que la part des cultures dépasse largement celle des prairies et occupe 46% de la SAU du bassin, soit 511 hectares. Les cultures deviennent majoritaires dans le paysage et leur superficie s'élargit, en lien avec la mécanisation, et passe en moyenne de 1,14 hectares en 1944 à 2,4 hectares à la fin des années 1990. Depuis les années 2000 le paysage évolue par touche, les cultures, en moyenne de 3 hectares, priment sur les prairies. Ces dernières se localisent essentiellement au niveau du cours d'eau, comme elles pouvaient l'être en 1830. Ces mutations paysagères ont également affecté au fil du temps le linéaire de haies qui a diminué de 60% depuis 1944. Aujourd'hui, le bassin versant comptabilise un linéaire de haies de 73 km, ce qui représente une densité bocagère de 65 ml/ha.

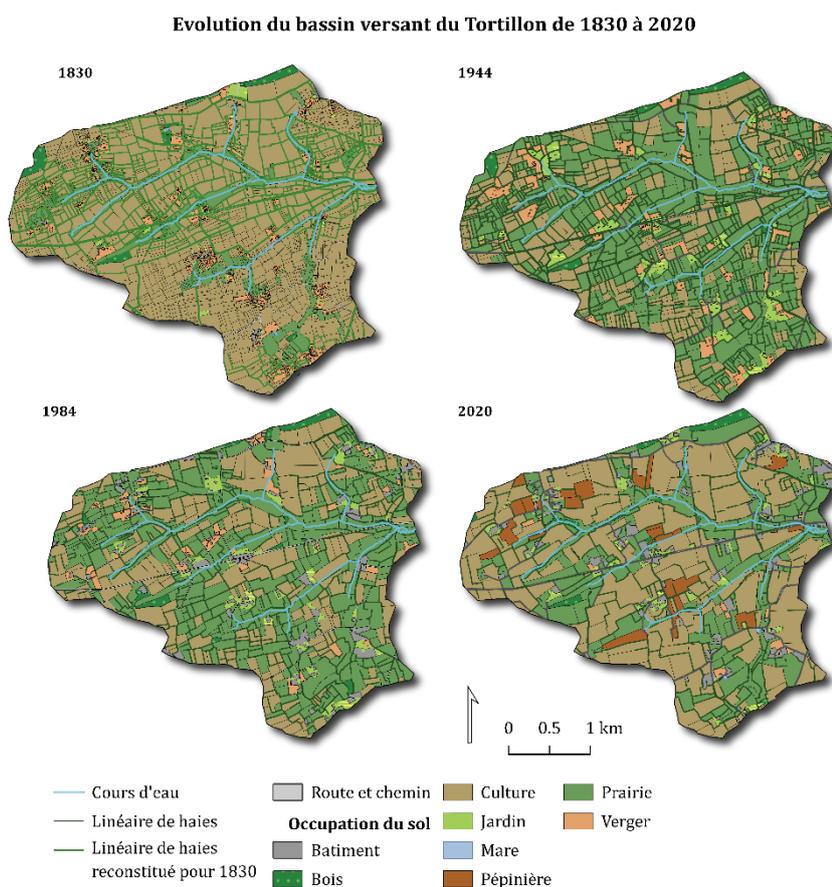


Figure 13 : Evolution de l'occupation du sol dans le bassin versant du Tortillon entre 1830 et 2020. Réalisation : M.Guillemois, 2022.

L'utilisation du modèle LASCAR pour modéliser l'évolution des connectivités hydrologiques depuis 1830, a mis en évidence l'impact des mutations paysagères sur les dynamiques des écoulements (figure 14). De manière générale ces dernières augmentent au fur et à mesure que le paysage s'ouvre, que les îlots cultureux s'agrandissent et que les prairies et les haies en régression ne permettent plus d'agir sur l'ensemble des ruissellements. En 1944, alors que le paysage se compose essentiellement de prairies (en tout 619 hectares), seulement 144 hectares de cultures sont traversés par des ruissellements qui parviennent au cours d'eau. Dans les années 1980, alors que les cultures occupent plus de la moitié de la SAU du bassin, 502 hectares de cultures sont connectés au cours d'eau, ce qui représente 45% de surface connectée. L'essor des cultures et de leur superficie a un impact direct sur les écoulements qui se multiplient dans le bassin. Cette dynamique se poursuit, en 2020, 671 hectares de cultures sont connectés au cours d'eau soit 60% de surfaces connectées (figure 15).

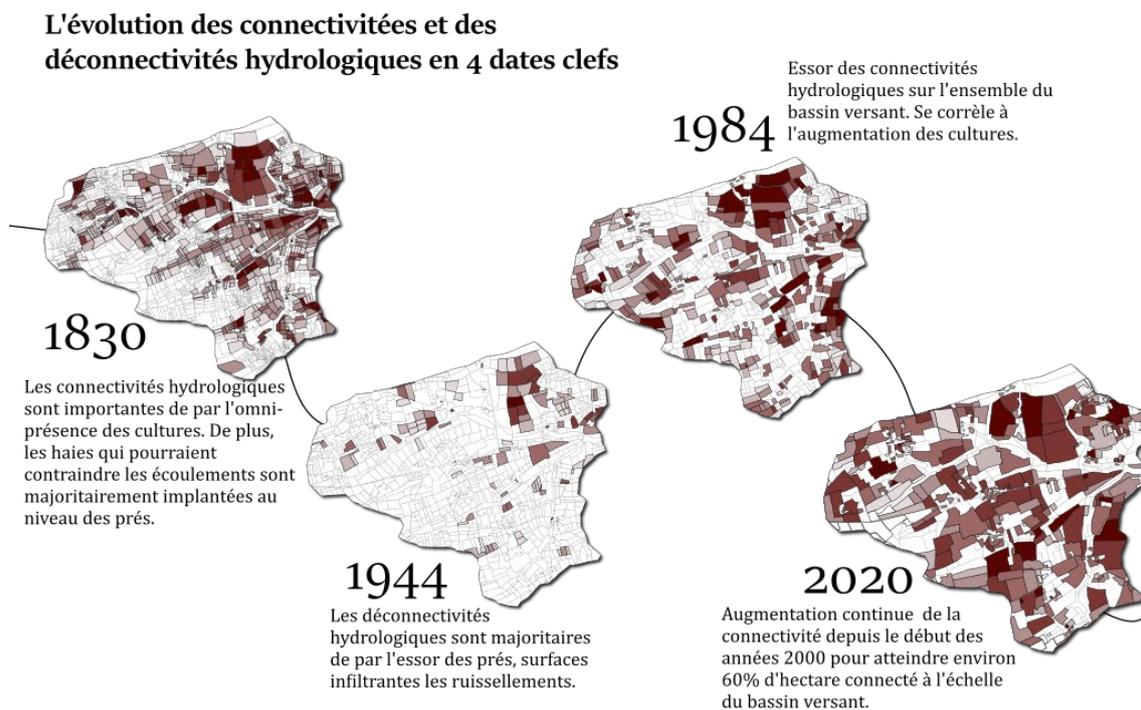


Figure 14 : Evolution des connectivités hydrologiques dans le bassin versant du Tortillon entre 1830 et 2020. Réalisation : M.Guillemois, 2022.

Ainsi, les connectivités hydrologiques augmentent au fur et à mesure que les cultures prennent de l'essor dans le bassin versant. Néanmoins, l'augmentation des surfaces de culture n'est pas forcément synonyme d'augmentation des connectivités, c'est plutôt leur positionnement dans l'espace et leur regroupement sous forme d'îlot qui va venir favoriser la concentration des flux sur ces parcelles et augmenter ainsi les connectivités. De fait, le remaniement des parcelles à la fin des années 1940 a eu pour conséquence d'augmenter la surface des parcelles et leur regroupement. Ainsi les cultures sont de moins en moins morcelées dans le bassin, sur certains secteurs des îlots de culture apparaissent autour d'un siège d'exploitation.

La réduction des prairies est un facteur important de l'augmentation des connectivités. De fait, leur forte présence dans les années 1940 et le faible taux de connectivité, illustre bien le rôle des surfaces en herbe dans l'infiltration des écoulements. Aujourd'hui, les prairies régressent et se situent en fond de vallée, proche des cours d'eau. Leur présence est indispensable puisqu'elles agissent comme dernier rempart avant que les écoulements n'atteignent le cours d'eau. Enfin, la réduction continue des haies qui agissaient en bloquant les écoulements participe également à l'augmentation des ruissellements.

Les connectivités et les déconnectivités hydrologiques dans le bassin versant du Tortillon en 2020

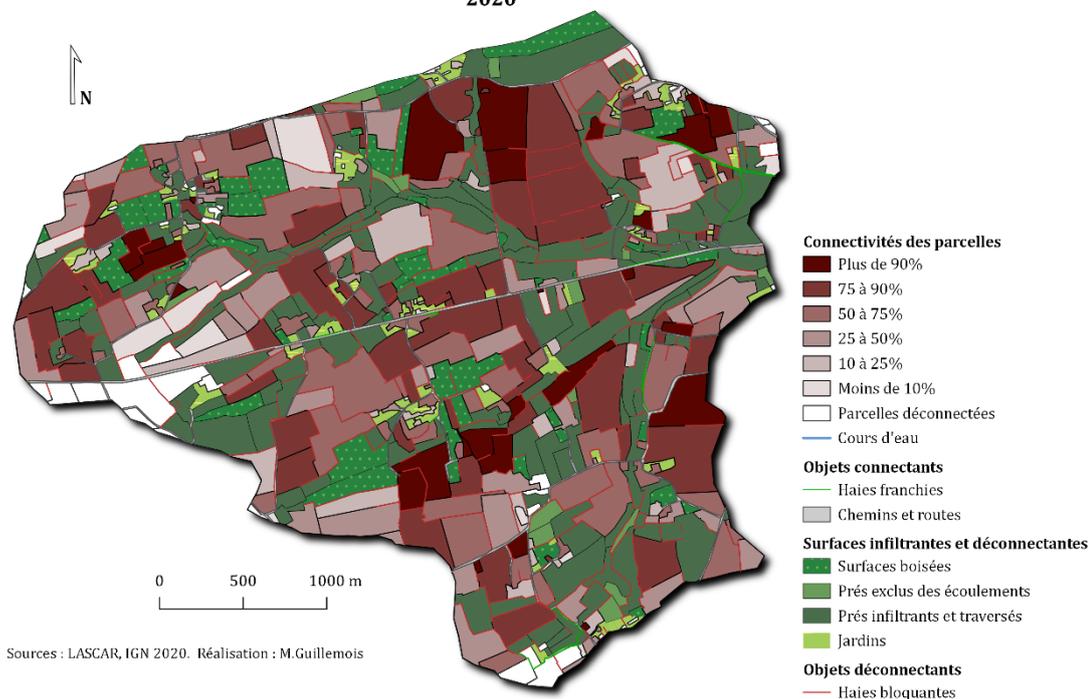


Figure 15 : Les connectivités hydrologiques dans le bassin versant du Tortillon en 2020. Réalisation : M.Guillemois, 2022.

k. Bassin versant de la Sienne amont par le laboratoire IDEES (Mémoire de M1)

Dans le cadre de ce travail, le modèle LASCAR a été utilisé sur un bassin versant normand pour un travail diachronique centré sur l'évolution des connectivités à partir de trois dates : 1955, 1992 et 2021.

Le bassin versant de Rouffigny (21 km²) est situé en tête de bassin de la Sienne sur trois communes de la Manche Villedieu-les-Poêles-Rouffigny, Chérencé-le-Héron et La Trinité à environ 30km à l'ouest de Vire et à 20km au nord-est d'Avranches. Le bassin versant repose sur le synclinal primaire du massif Armoricaïn normand avec un socle majoritairement composé de granodiorites à biotite et cordiérite. Seule la partie nord-ouest repose sur des siltites et grès briovériens indifférenciés. Les fonds de vallée sont eux tapissés d'alluvions. Le sous bassin versant est majoritairement recouvert de brunisols ou sols bruns. Les altitudes maximales culminent à 226 mètres et l'exutoire à 121 mètres. Le bassin versant est drainé par 40 km de cours d'eau permanents et temporaires. En 2021, le bassin est majoritairement herbagé (57%) mais présente également 25% de surfaces cultivées, 11% de surfaces bâties et 7% de surfaces boisées (figure 16). On dénombre par ailleurs 32 mares et étangs.

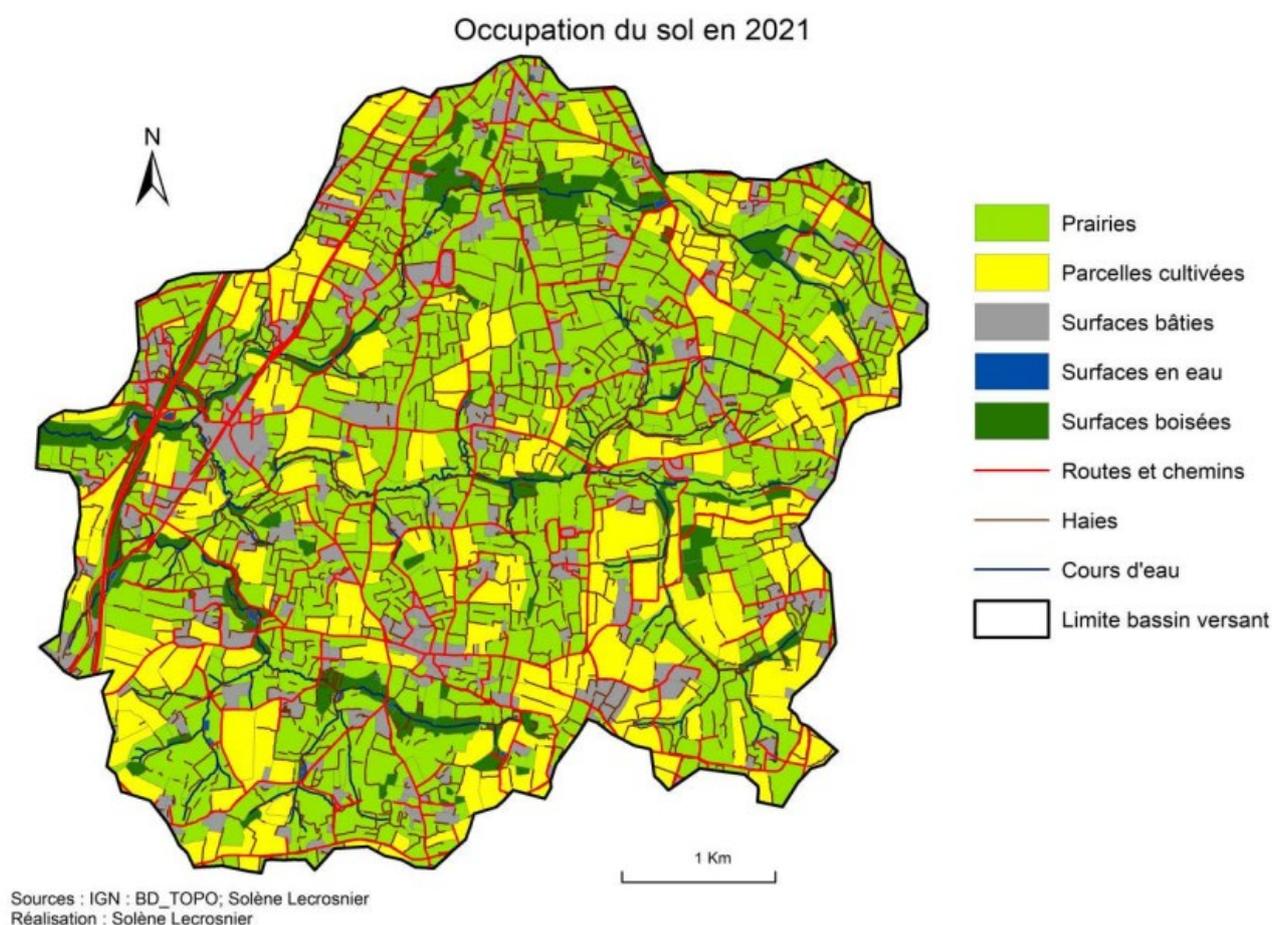


Figure 16 : Carte d'occupation du sol de la Siennes amont. Réalisation : Solène Lecrosnier

Depuis 1955, la part des surfaces en herbe diminue passant de 1583 ha en 1955 à 1145 ha en 2021 quand la part des surfaces cultivées augmente (de 248 à 521 ha en 2021) (figure 17). Dans le même temps, la superficie moyenne des parcelles a augmenté. Elle a doublé pour les prairies (0,7ha en 1955, 1,4 ha en 2021) et plus que triplée pour les parcelles cultivées (0,8 ha à 2,5 ha aujourd'hui). Par ailleurs, entre 1955 et 2021, 83km de haies ont été supprimées, cela représente un peu plus d'1km par an.

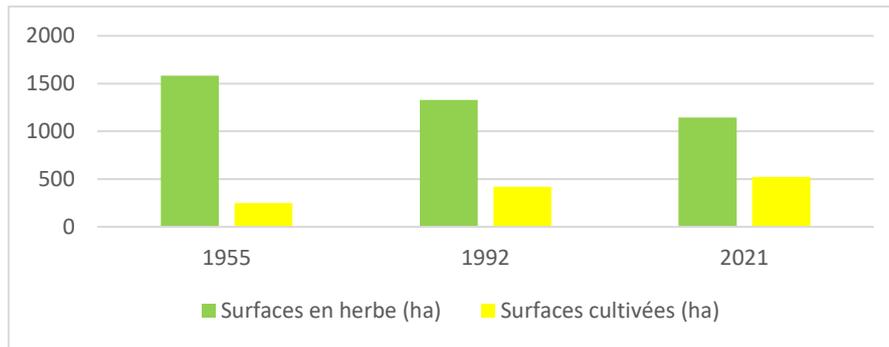


Figure 17 : Evolution des principaux modes d'occupation du sol entre 1955, 1992 et 2021

Le modèle LASCAR montre qu'environ 667ha du bassin sont hydrologiquement connectés au cours d'eau en 2021 contre 536ha en 1992 et 365ha en 1955. Les surfaces connectées ont donc quasiment doublé entre 1955 et 2021 (figure 18). En 2021, les cultures représentent 65 % des surfaces connectées soit 398ha (contre 57% en 1992 et 43% en 1955) (tableau 3).

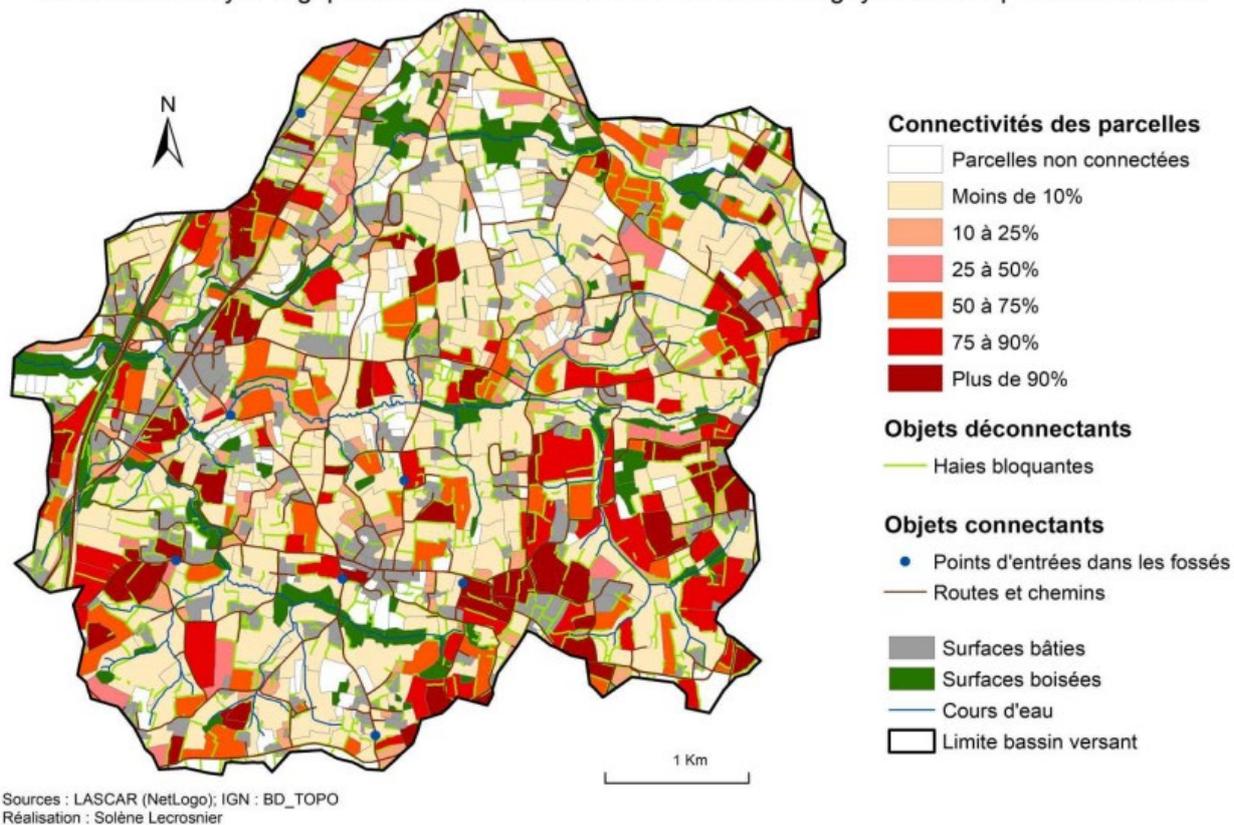
Les résultats montrent que le sud-est du bassin est davantage sensible avec de nombreuses parcelles présentant des taux de connectivités supérieurs à 75%. En 1955, 114 parcelles présentent un taux de connectivité supérieurs à 75%, elles sont 122 en 1992 et 118 en 2021. La surface moyenne de ces parcelles ayant augmenté, cela se traduit par un triplement des surfaces connectées à plus de 75% (95 ha en 1955 contre 319ha en 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

Tableau 3 : Tableau récapitulatif des parcelles connectées à plus de 75 % en 1955, 1992 et 2021. Réalisation : S.Lecrosnier.

Sur les 300 km de haies que comptait le bassin versant en 1955, 126 km jouaient un rôle hydrologique important (blocage ou déviation des écoulement). En 2021, sur les 241 km de haies restantes, 144 km ont un rôle important. Cette augmentation du nombre de haies au rôle hydrologique important n'est pas surprenante. D'autres travaux l'ont mis en évidence (Reulier, 2015). Cela s'explique par l'augmentation des surfaces cultivées potentiellement ruisselantes qui pèsent davantage sur les haies encore présentes. L'augmentation des surfaces cultivées amplifie le rôle protecteur des haies...encore présentes.

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



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

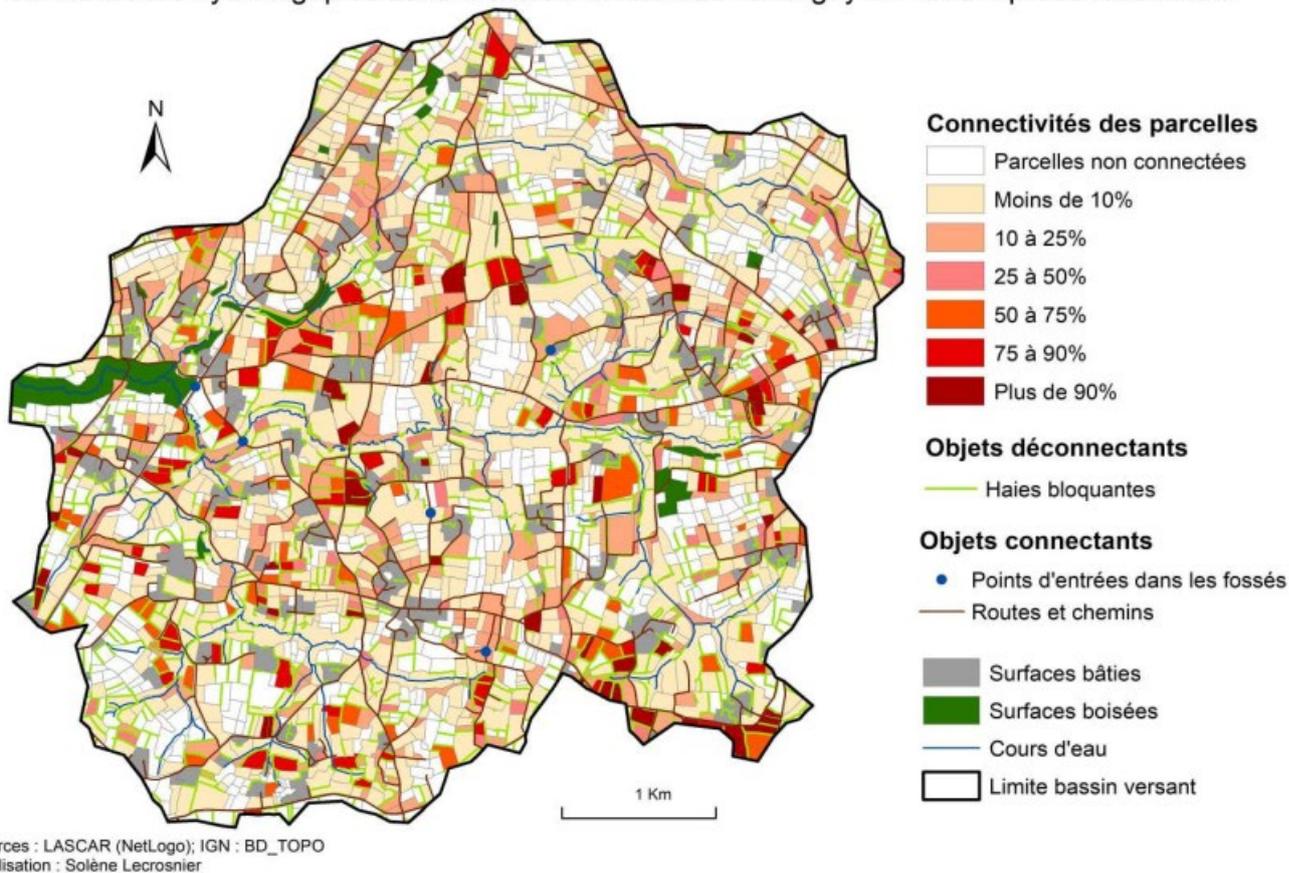


Figure 18 : Connectivité hydrologique en 1955 et 2021 d'après le modèle LASCAR

I. Bassin versant de la Jouselinière par le syndicat mixte Evres-Thau-Saint-Denis (Mémoire de stage de M2)

Le bassin versant de la Jouselinière est situé à l'est du bassin versant de l'Èvre, il a une superficie de 16 km². La Jouselinière est un affluent du Frémérit, lui-même affluent de la Bellière, puis du Pont-Laurent. Ce dernier est un affluent de l'Èvre. Le relief y est faible, variant entre 85 mètres et 150 mètres d'altitude. Le bassin de la Jouselinière appartient à l'unité géologique dite des Mauges. Cette dernière est formée de micashistes du Précambrien. Ces formations sont surmontées d'une épaisse couche argileuse résultant de l'altération du socle. Des remplissages colluvio-alluviaux issus des formations superficielles sont présents dans les fonds de vallées. En bordure de plateau, les têtes de vallons "constituent des dépressions mal drainées, marécageuses à sols hydromorphes" . Sur ces formations géologiques la longueur du réseau hydrographique est de 24,4 km, soit une densité de drainage de 1,6 km.km². Des problématiques liées à l'érosion ont déjà été constatées, comme en mai 2011, après un violent orage ayant déversé 100 mm de précipitations en l'espace d'une heure sur la Chapelle-Aubry. La conséquence immédiate est la montée brutale du niveau d'eau du ruisseau de la Jouselinière. En aval, 12 maisons ont été inondées et des coulées de boue constatées dans le bourg. Ce type d'évènement a eu lieu plusieurs fois lors des 30 dernières années. Des inondations ont également souvent lieu dans les jardins de ce village. En mars 2020, l'état de catastrophe naturelle est mis en place suite à des inondations par ruissellement et débordement. Les cultures sont prédominantes sur ce territoire avec 50,4 % de la surface totale du BV en mai 2021. Elles sont surtout situées sur les zones de plateaux, laissant les prairies temporaires et permanentes en fond de vallée. Ces prairies représentent 39,2% de l'occupation du sol. Quelques surfaces boisées et en eau sont également présentes et les surfaces bâties dispersées sur le territoire. La densité des haies a diminué depuis 1959, passant de 9,66 km/km² de haies à 6,19 km/km² en 2016.

Un premier travail a consisté à comparer les résultats de simulations réalisées avec et sans présence de contrainte paysagère. Ces simulations sont intéressantes pour mettre en évidence le poids de la structure paysagère sur le parcours des écoulements de surface.

Sans la contrainte des réseaux linéaires, les ruissellements ne sont régis que par la topographie. Les résultats montrent que les chemins d'écoulement sont plus nombreux et plus diffus sur le territoire. En effet, dans ce cas, l'eau peut circuler à travers les parcelles pour rejoindre le cours d'eau en suivant le chemin topographique. Ceci amène une plus forte connectivité des parcelles. Avec les contraintes paysagères linéaires (fossé, route, haie), on observe très bien la perturbation des écoulements par les réseaux (figure 19). Ainsi, les chemins d'écoulement sont moins nombreux et sont plus concentrés le long des routes ou des haies. Lorsque les haies sont bloquantes, l'eau modifie son chemin en les contournant avant de rejoindre les cours d'eau. Nous pouvons également constater que les écoulements peuvent être complètement bloqués et ne jamais rejoindre la rivière, comme c'est le cas au niveau du figuré (1).

En revanche, ces réseaux permettent de concentrer plus de flux, ce qui peut également drainer plus de surfaces. Au niveau du figuré (2) sur la carte, on remarque que le chemin de l'eau ne se termine pas dans la rivière, mais dans une surface artificialisée. Il s'agit ici du bourg de la Chapelle-Aubry, qui a été touché en 2011 après une pluie de 100 mm en 1h, par une coulée de boue. Sur les parcelles en amont, aucune haie n'est présente.

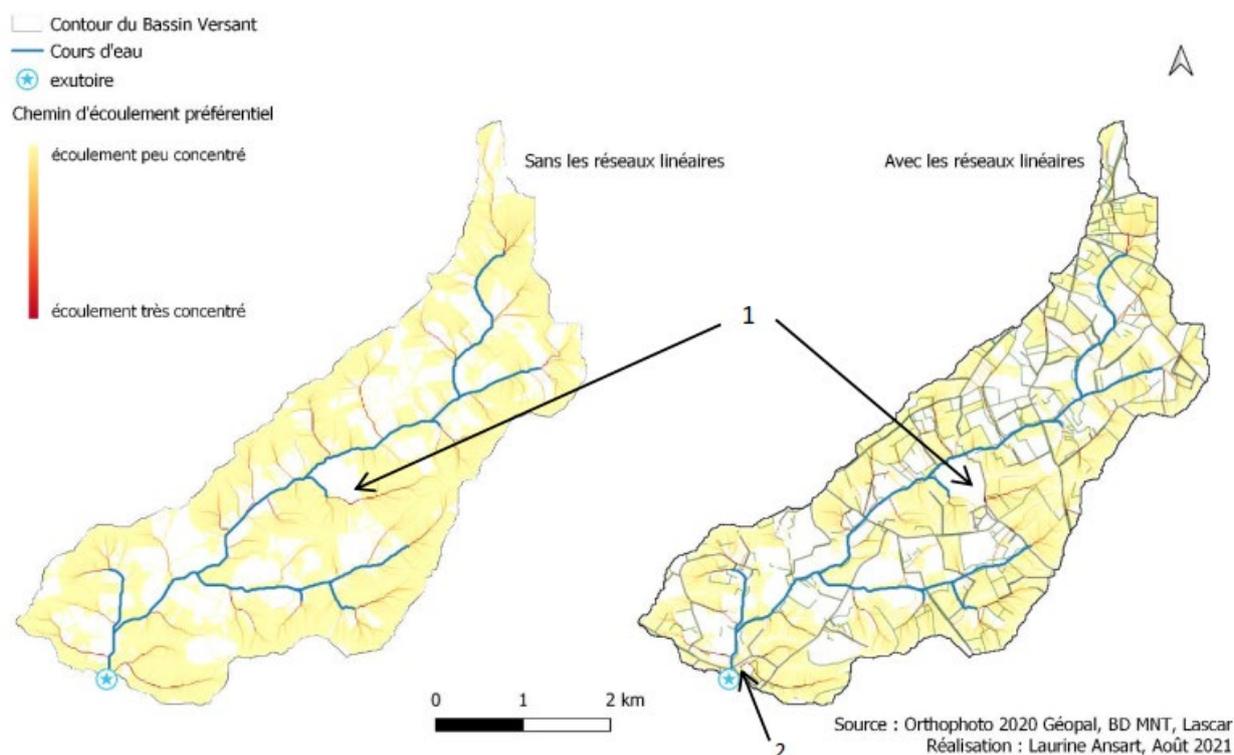


Figure 19 : Evolution des chemins d'écoulement en fonction des contraintes linéaires

Concernant la connectivité au cours d'eau, les résultats montrent que les surfaces cultivées représentent 91 % de la surface connectée (figure 20). La plupart sont présentes à proximité du cours d'eau. Certains aménagements peuvent augmenter la connectivité, comme les fossés et les routes. Plusieurs éléments du paysage permettent en revanche la déconnexion des surfaces.

Les bois et les prairies sont des surfaces qui vont infiltrer l'eau et permettre de diminuer ou stopper le ruissellement. Dans le modèle LASCAR, les bois et les prairies sont représentés par les surfaces en herbe, qui représentent majoritairement les surfaces déconnectées à 51 %. Certaines surfaces cultivées sont également déconnectées. Ceci est dû à la présence des prairies à l'aval ou des haies bloquantes qui agissent comme des barrières au ruissellement.

Au sud du territoire d'étude, des parcelles cultivées sont non connectées au cours d'eau. Il s'agit des parcelles dont les écoulements se terminent dans le bourg de la Chapelle-Aubry. Ceci permet de comprendre l'origine de la coulée de boue ayant eu lieu, qui provient donc des parcelles à l'amont du bourg. En combinant les résultats obtenus sur le bassin versant, nous obtenons donc une vue d'ensemble des facteurs influençant les dynamiques d'écoulement et les problématiques que cela peut soulever sur le territoire. Ainsi, ces résultats visent à aider les gestionnaires des territoires quant à l'implantation de nouveaux aménagements pour lutter contre l'érosion et le ruissellement, ou pour protéger certaines haies.

Le rôle des haies dans le bassin versant de la Jouselinière

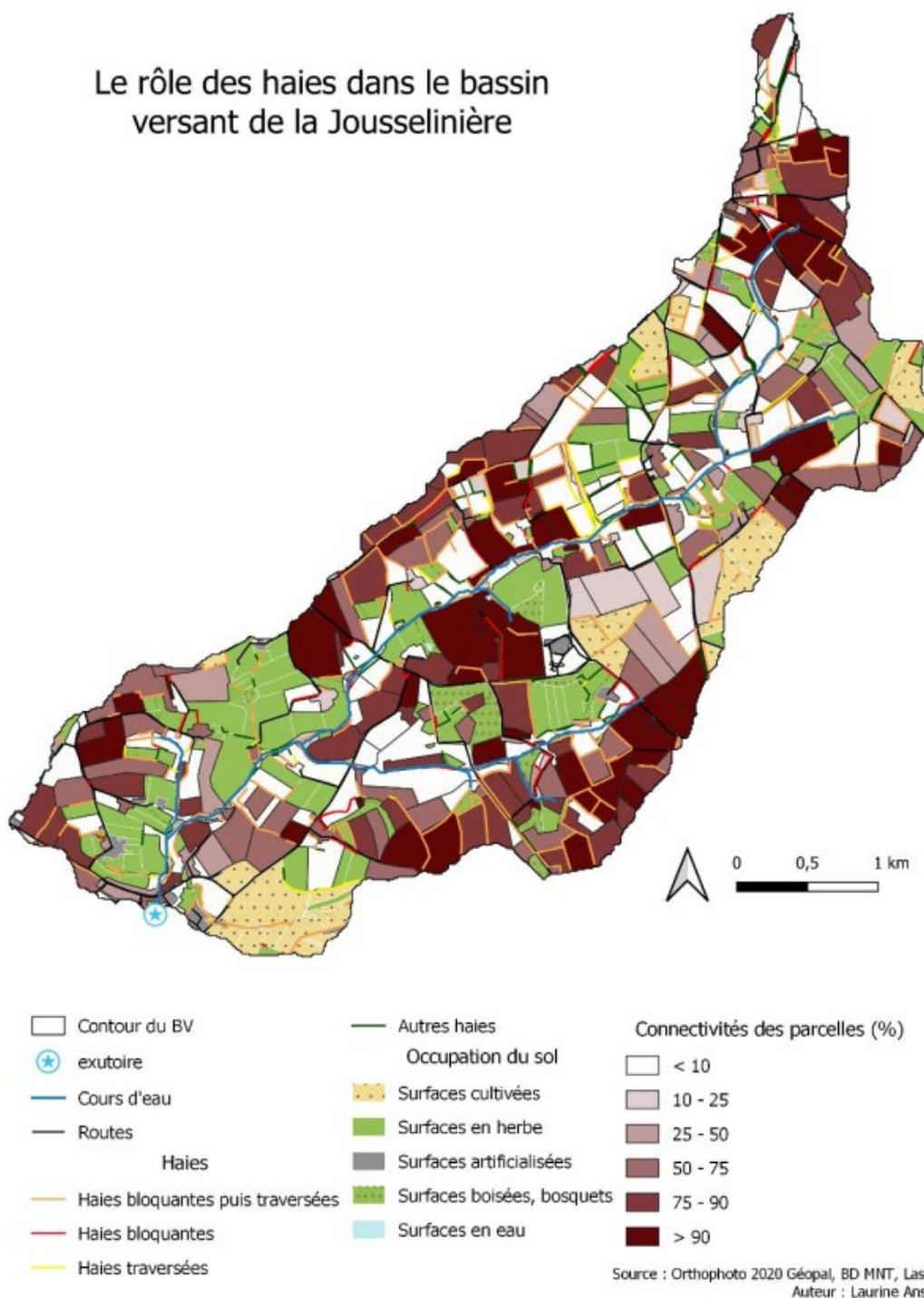


Figure 20 : Mise en évidence des entités de la (dé)connectivité

Pour confirmer les résultats et sensibiliser au maximum les élus, une carte pédagogique a pu être créée (figure 21). L'objectif était de se rendre sur le terrain et de vérifier les chemins d'écoulement pour relever les problématiques que ceux-ci génèrent. Du fait de la période à laquelle le terrain a été réalisé, les sols étaient encore à nu et les chemins d'écoulement visibles.

LES PROBLÉMATIQUES DU BASSIN VERSANT DE LA JOUSSELINIÈRE

Le modèle a permis de mettre en évidence les chemins d'écoulement. Le diagnostic de terrain permet ensuite de confirmer les problèmes soulevés par la modélisation LASCAR.



A l'aval de la parcelle, il y a une forte érosion avec un ruissellement partant directement dans l'écoulement présent. On remarque l'absence de bande enherbée.



De l'autre côté de la route, des bandes enherbées sont présentes le long de l'écoulement, ce qui permet de limiter l'érosion.



A gauche, en mai 2021, les fossés ont été curés. En juin 2021, après 20 mm de pluie, ceux-ci sont saturés et s'écoulent mal sur ce secteur.



Le ruissellement est bien visible sur ce chemin, comme le met en évidence le modèle. Cette eau rejoint ensuite les fossés en bord de routes.



La turbidité de la Jousselinère montre bien la problématique de l'érosion sur le bassin versant. Cette turbidité est due en partie à l'érosion des berges mais également à l'apport et à la remise en suspension des sédiments issus du bassin versant.



Ces parcelles cultivées ne sont pas connectées à l'exutoire. Le modèle montre que le ruissellement se termine dans le bourg de La-Chapelle-Aubry. Ce village a déjà connu des coulées de boues en 2011.

- Surfaces cultivées
- Surfaces en herbe
- Surfaces artificialisées
- Surfaces boisées, bosquets
- Surfaces en eau



Erosion en ravines en bas de la parcelle.

Source : Orthophoto 2020 Géopal, BD MNT, Lascar
Réalisation : SMiB, juin 2021

Figure 21 : Document pédagogique élaboré par Laurine Ansart

m. Bassin versant de la Flèche par le syndicat mixte du Bas Léon (Mémoire de stage de M2)

Sur le territoire du SAGE du Bas-Léon, les phénomènes d'érosion et de ruissellement sont présents mais parfois peu visibles et difficilement localisables. La présente étude concerne trois bassins versants répartis sur les trois EPCI du Bas-Léon : La Flèche (CLCL), l'Ascouet (CCPA) et le Ploudalmézeau (CCPI). Nous présentons ci-dessous les résultats du travail réalisé sur le bassin de la Flèche.

Le bassin versant de la Flèche est situé en Bretagne dans le Finistère (29). Il est localisé sur le territoire de la CLCL (Communauté Lesneven Côte des Légendes) et majoritairement sur la commune de Plouider. Ce bassin versant de **13.6 km²** possède un réseau hydrographique de **20.4 km** convergeant vers l'exutoire situé à Leuré Braz. Le bassin repose sur un socle granitique et gneisseux surmontés de sols moyennement profonds à profonds (60 à 100 cm) de type sable argilo limoneux en majorité et de type limon sablo-argileux au sud (*Agrocampus Ouest*). D'après le RPG 2019 corrigé et complété par le terrain et la photo interprétation, les surfaces en herbe (prairies, forêts) représentent environ 1/3 des surfaces du bassin versant de la Flèche, alors que les surfaces cultivées presque **60 %** (figure 22). Dans les surfaces cultivées on retrouve majoritairement des céréales (maïs, blé, orge...) à hauteur de **82 %** et des légumes (oignons, choux, betterave ...) avec **12 %** des surfaces cultivées. Le reste se composant des protéagineux (colza) et du fourrage (luzerne, pois...).

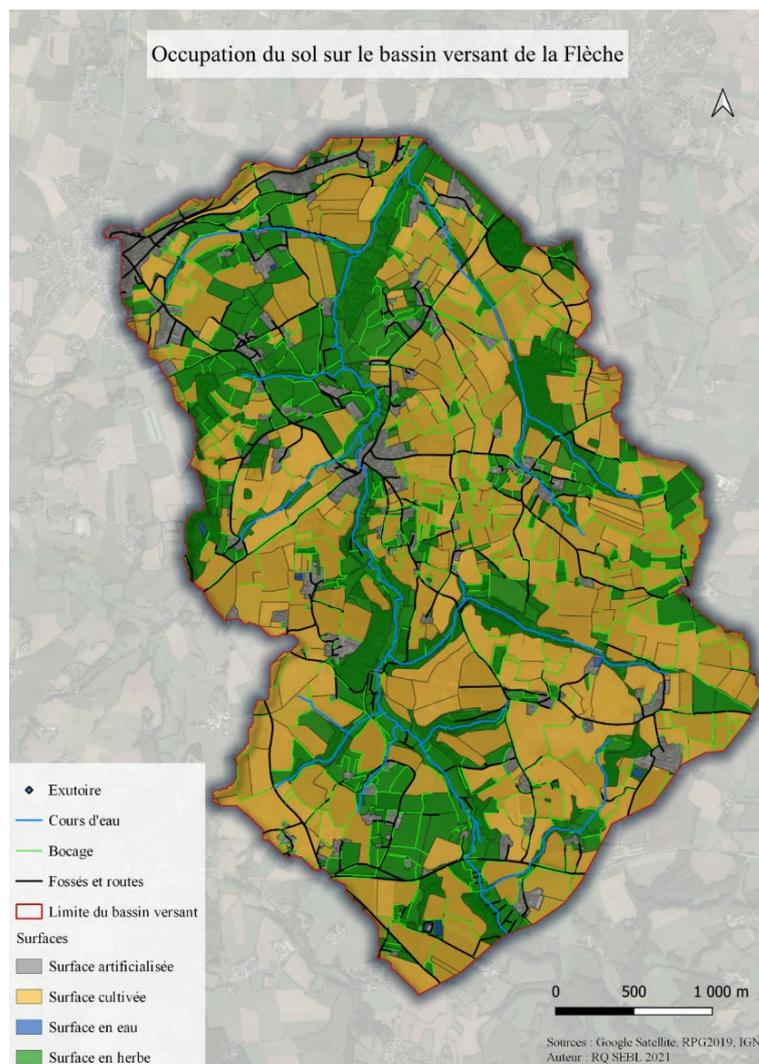


Figure 22 : Cartographie de l'occupation du sol. Réalisation : Romain Quigneau

Ce bassin versant est caractérisé par un linéaire bocager important d'un total de **101.9 km** soit une densité de **7.5 km de bocage/km²** ou **75 ml/ha**. Cette densité de bocage reste tout de même en dessous de la moyenne nationale de **88 ml/ha** (*DRAAF Bretagne*). Le bassin versant de la Flèche est caractérisé par un paysage particulier avec un cours d'eau encaissé et des pentes assez importantes. Les pentes les plus fortes étant situées en bas de versant avec des cultures majoritairement positionnées sur les plateaux, facilitant l'entretien et la production sur les parcelles. Ainsi 1/3 de la surface du bassin versant a des pentes variant entre 2 et 5 %. On retrouve 1/3 de la surface avec des pentes de 5 à 10 % et ¼ du secteur caractérisé par des pentes supérieures à 10 %. La majorité des pentes (**57 %** de la surface du bassin versant) sont donc supérieures à **5 %**.

On observe une connectivité assez importante sur le bassin versant de la Flèche avec **78 %** des parcelles connectées plus ou moins au cours d'eau. De plus, **35,4 %** des parcelles sont connectées à plus de 50 % de leur surface dont **14,6 %** connectées à plus de 75 %. Sur les 35,4 % des parcelles connectées à plus de 50 %, **89,5 %** sont des surfaces cultivées. Cette connectivité s'explique par des parcelles assez grandes, en majorité cultivées, avec des zones sans bocage. On les retrouve principalement en haut de versant (sur les plateaux) alors qu'en bas de versant, où le cours d'eau est présent, les prairies dominent (figure 23).

Classes de connectivité	< 10 %	10 - 25 %	25 - 50 %	50 - 75 %	> 75 %
Surface en eau	0,04%		0,05%	0,02%	0,02%
Surface artificialisée	0,39%	0,29%	1,84%	3,05%	2,05%
Surface en herbe	26,51%	5,30%	0,77%	0,04%	0,07%
Surface cultivée	3,58%	2,63%	8,42%	29,27%	15,67%

Tableau 4 : Parts de chaque type de surface pour chaque classe de connectivité

En effet, les surfaces cultivées sont les parcelles les plus connectées avec une majorité des surfaces comprises entre 50 et 75 % de connectivité (tableau 4). Au contraire, les surfaces en herbe sont majoritairement connectées à moins de 10 % voire totalement déconnectées. Ainsi, plus la connectivité augmente moins les parcelles en herbe sont présentes. Enfin, les surfaces artificialisées ont le même schéma de connectivité que les surfaces cultivées avec une majorité de la surface urbaine connectée à plus de 50 %.

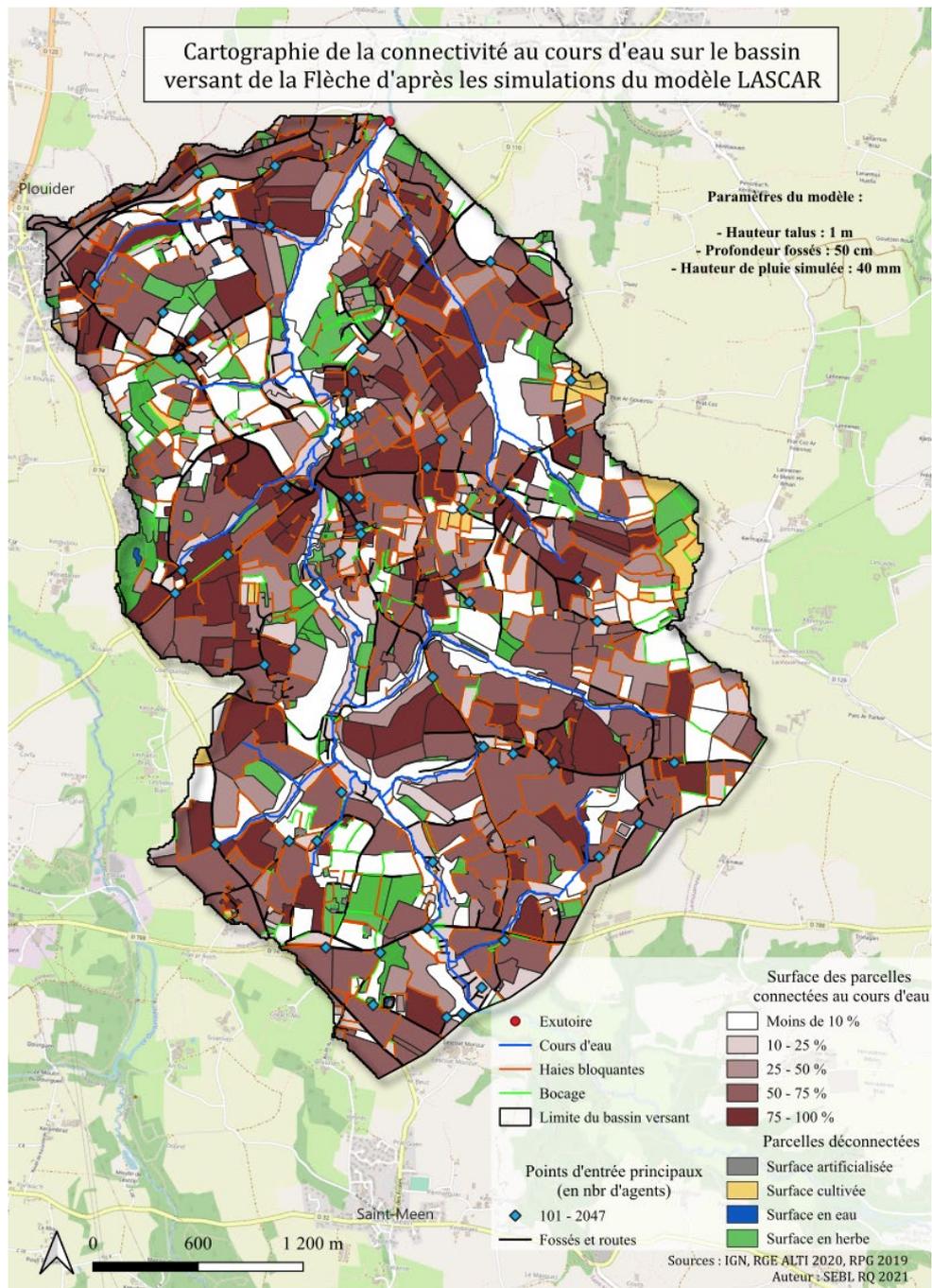


Figure 23 : Carte de la connectivité des parcelles au cours d'eau pour le bassin versant de la Flèche. Réalisation : Romain Quigneaux

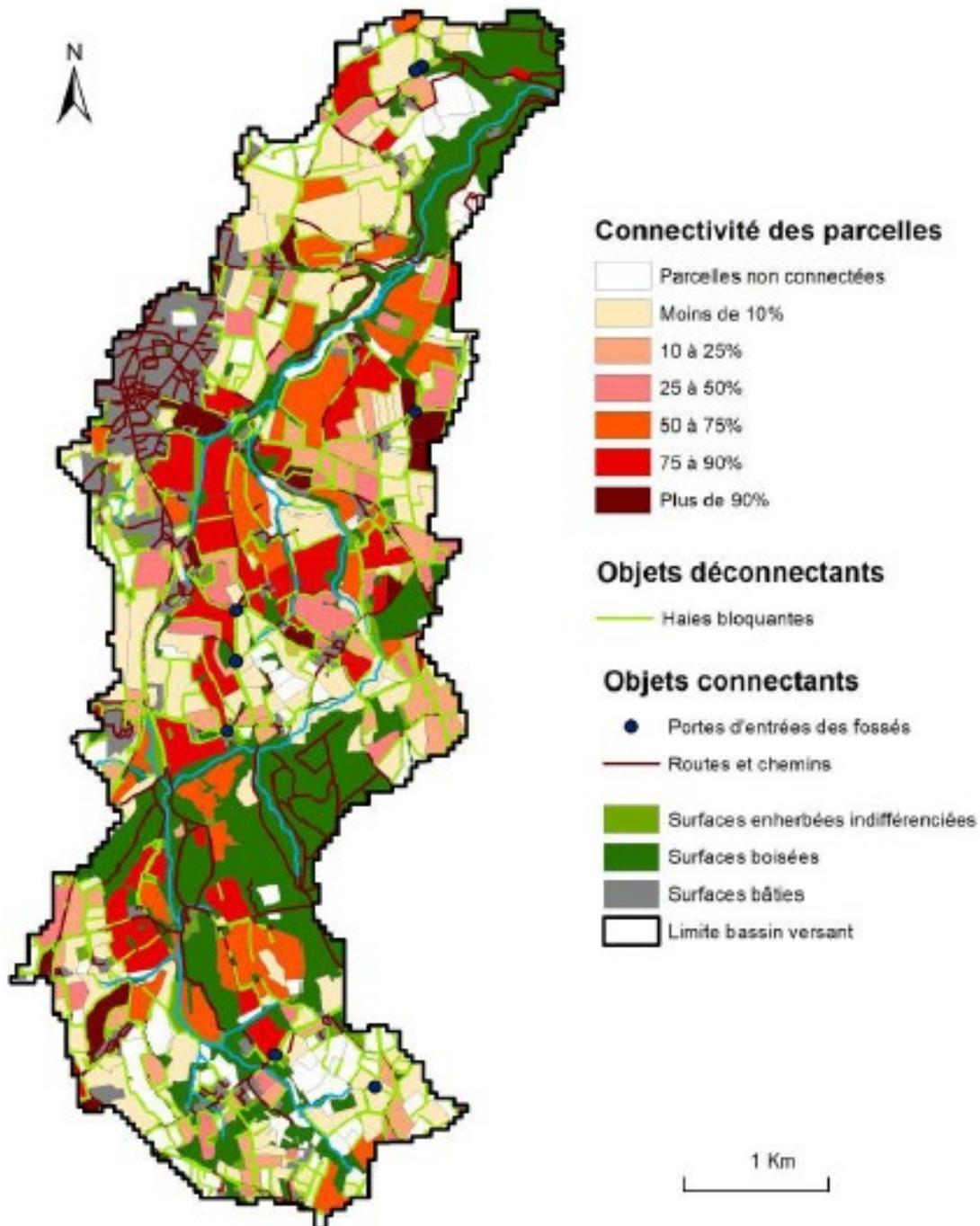
Malgré une forte présence de parcelles connectées, il est tout de même intéressant d'identifier quelques secteurs et quelques parcelles à enjeu fort où l'aménagement et la plantation pourrait avoir un rôle crucial sur la qualité de l'eau. Ces parcelles ont été identifiées lors de phases de terrain et d'après les traces de ruissellement sur les parcelles. Cependant, ces observations sont non exhaustives et demandent un travail de terrain plus poussé notamment lors de grosses pluies.

n. Bassin versant de Morlaix par Morlaix communauté (Mémoire de stage de M2)

Deux sites d'étude ont été choisis préalablement au début du stage de Solène Lecrosnier par les agents de la collectivité de Morlaix. Les deux sites d'études sont situés sur le bassin versant du Queffleuth dont le cours d'eau déborde parfois dans le centre-ville de Morlaix. Plusieurs critères ont été retenus pour la sélection de ces deux sous bassins versants : l'occupation du sol, la densité du réseau routier, la superficie, la position amont de ces bassins. Le premier site d'étude, appelé BV8 dans la suite de ce rapport, est un bassin versant de 16,5 km² situé sur deux communes : Plounéour-Ménez et Pleyber-Christ. Ce bassin versant est occupé à 36,6 % par les espaces cultivés à 28 % par les prairies 23,2 % par les surfaces boisées. Le deuxième site d'étude, appelé BV13/14 dans la suite de ce rapport, est un bassin versant de 15,5 km², situé sur les communes de Le Cloître-Sainte-Trégonnec et de Plourin-lès-Morlaix. Ce bassin versant est occupé à 33,2 % par des espaces cultivés, à 32,8 % par des espaces en herbe et à 19,9 % par des surfaces boisées. Les deux bassins versants sont majoritairement composés de granites et de schiste surmontés d'un sol principalement de type brunissol. Les pentes de ces deux bassins versants sont par ailleurs majoritairement comprises entre 4 et 16 %. Un travail d'inventaire sur le terrain a permis de relever toutes les entrées de champs, les trouées de talus, la longueur totale des routes, des chemins et des fossés. Toutes ces données étant nécessaires au modèle LASCAR. Sur le BV8 on dénombre ainsi 362 entrées de champs, et 95 trouées de talus, 136 km de haies/talus, 91 km de routes et chemins, et 33 km de fossés. Sur le BV13/14 on dénombre 249 entrées de champs, 15 trouées de talus, 105 km de haie, 84 km de routes et chemins et 40 km de fossés.

Le modèle LASCAR montre des taux de connectivité significatifs. 68 % des parcelles sont hydrologiquement connectées au cours d'eau dont 24 % à plus de 50 % (figure 24 et 25). Le graphique (figure 26) montre les différents types d'occupation du sol des parcelles connectées et déconnectées. Les surfaces connectées sont majoritairement représentées par les parcelles cultivées et les surfaces bâties. En effet, ces deux types d'occupation du sol ont une moindre capacité d'infiltration ce qui permet aux précipitations tombées de rejoindre plus facilement le cours d'eau. Sur le terrain, les surfaces bâties ont une capacité d'infiltration complètement nulle, cependant ces surfaces sont très souvent évacuées par le biais d'un réseau d'eau souterrain. Ces réseaux n'étant pas pris en compte dans les modélisations réalisées sous LASCAR, il serait pertinent de s'intéresser davantage à ces réseaux et au volume d'eau qui peuvent éventuellement apporter au cours d'eau par d'autres approches méthodologiques. Les surfaces déconnectées sont majoritairement représentées par les prairies et les surfaces boisées. Enfin sur les 136 km de haies, 120 km semblent jouer un rôle hydrologique important, soit 88 % des haies. Ces haies bloquantes ont permis d'intercepter à un moment ou un autre de la simulation des Agentsgouttes. Sur le BV8, ce sont donc 88 % des haies qui ont un rôle hydrologique important. Ces haies bloquantes sont très présentes au centre du bassin versant alors que c'est à cet endroit que les surfaces connectées sont les plus présentes. Cependant, s'il y a moins de haies, celles-ci sont plus à même de stopper des écoulements qui n'ont pas été interceptés par des haies plus en amont des écoulements. Moins il y a de haies, plus celles présentes ont un rôle hydrologique fort point. Pour appuyer ce propos il pourrait être intéressant de réaliser des modélisations sur des années antérieures aux remembrements pour comprendre le devenir afin de voir si effectivement, plus il y a de haies, moins la part des bloquantes est importante. 33 haies présentent des points de traverse. Sur le modèle cela correspond au fait que des volumes d'agents concentrés à ces endroits est supérieur à la hauteur du talus. Ces points de traverse nécessitent cependant une vérification terrain avant de statuer sur l'inefficacité réelle de ces talus. On dénombre 95 trouées de talus sur l'ensemble du bassin versant et 89 de ses trouées de talus se trouvent sur des bloquantes. Lors de l'inventaire de terrain les largeurs de ces trouées ont également été relevées. Ces trouées de talus pourront faire l'objet d'aménagements prioritaires c'est-à-dire de comblement. Il sera également intéressant de prioriser les talus sur lesquels on compte plusieurs trouées, ces derniers se concentrent principalement dans l'extrême sud du bassin versant, en lien avec un linéaire de plus important dans cette partie du bassin versant.

Connectivités hydrologiques dans le sous bassin versant n°8 en 2022 (Pleyber-Christ / Plounéour-Ménez)



Sources : LASCAR; IGN (BD_TOPO)
Réalisation : S.Lecrosnier

Figure 24 : Connectivité hydrologique dans le BV8. Réalisation : Solène Lecrosnier

Répartition des taux de connectivité pour l'ensemble du BV8

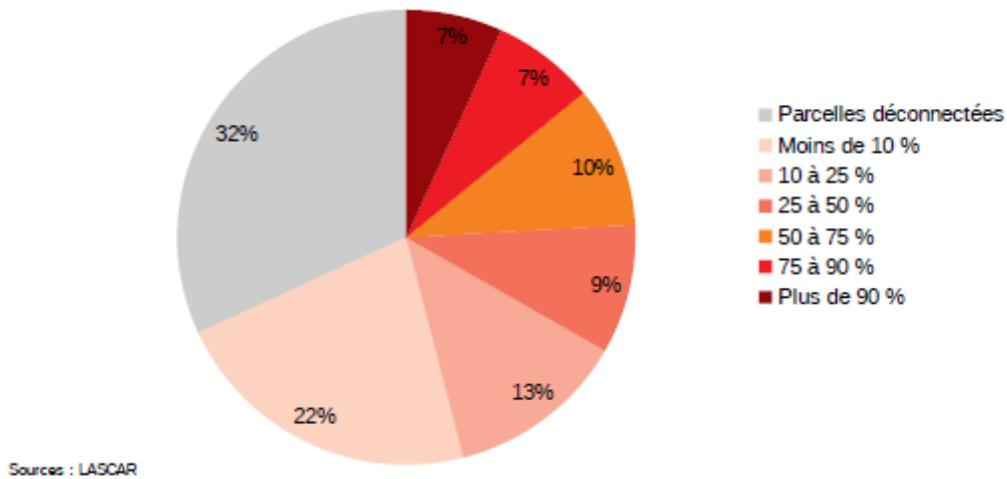


Figure 25 : Représentation statistique de la connectivité sur le BV8

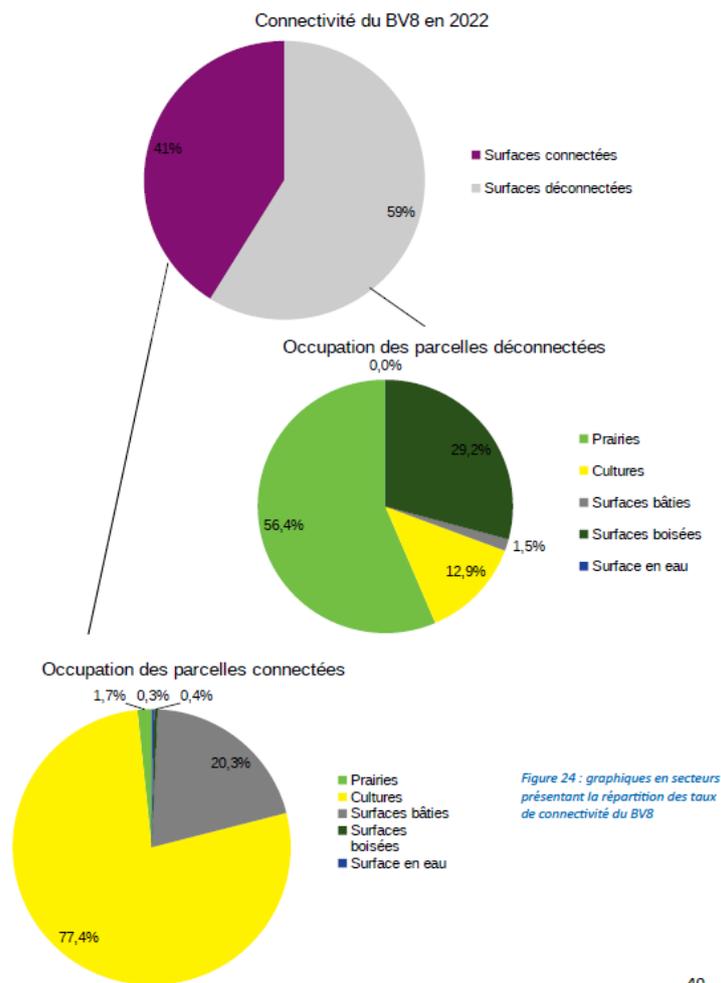


Figure 26 : Type d'occupation connecté ou déconnecté

Sur le second bassin versant les résultats montrent que 66 % des parcelles sont hydrologiquement connectées au cours d'eau dont 22% des parcelles sont hydrologiquement connectées à plus de 50 % (figure 27 et 28). Les parcelles cultivées représentent plus de la moitié des surfaces connectées au cours d'eau. Concernant les surfaces déconnectées, il s'agit principalement de prairie ou de surfaces boisées ainsi que quelques parcelles cultivées souvent isolées. Sur les 105 km de haies identifiées sur le bassin versant, 96 km ont un rôle hydrologique important soit 91% du linéaire. 32 haies bloquantes présentent des points de traverse. Celles-ci devront faire l'objet de vérification de terrain plus approfondies. 15 haies bloquantes présentes également une trouée de talus, ces trouées pourraient donc également faire l'objet de comblement afin de pas altérer la capacité d'interception des haies.

Au final les modélisations réalisées ont permis de comprendre la circulation des écoulements sur les deux bassins versants étudiés et de comprendre le rôle des entités qui composent le paysage. A la suite de ces modélisations, le choix a été fait d'identifier les parcelles à aménager en priorité afin de permettre un travail plus efficace et plus rapide. Pour cela une méthodologie d'identification de ses parcelles a été mise en place. Le choix a également été fait de s'intéresser au rôle des prairies temporaires dans les connectivités hydrologiques. Après avoir identifié les parcelles prioritaires, la réflexion s'est portée sur les aménagements à mettre en place pour limiter les écoulements et réduire les taux de connectivité sur les bassins versants. Pour cela, les réflexions se sont faites à l'échelle de chaque parcelle prioritaire. Plusieurs documents ont été réalisés afin de représenter les aménagements à mettre en place. Ces documents ont pour but d'être complémentaires entre des documents visuels et synthétiques et d'autres plus techniques. Globalement les objectifs du stage ont été atteints dans le sens où le modèle a pu être appliqué sur l'ensemble des terrains à étudier. Le travail a permis de mieux comprendre la circulation de l'eau sur les deux bassins versants et à la suite de cela il a été possible de réfléchir aux aménagements pertinents pour limiter le ruissellement. Les difficultés rencontrées lors des missions réalisées ont été liées à la saisonnalité du travail. En effet, l'absence de précipitation une fois les résultats de la modélisation obtenus, il n'a pas été possible de vérifier les résultats sur le terrain. Concrètement, il n'a pas été possible d'observer les chemins d'écoulement identifiés par le modèle et le rôle des entités qui composent le paysage.

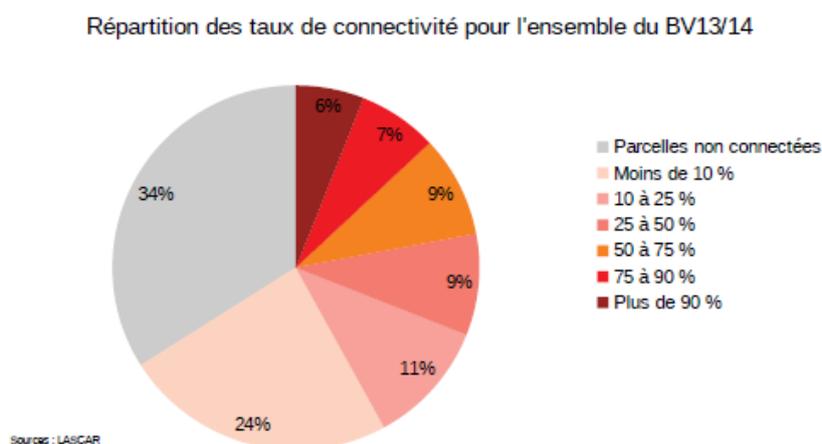


Figure 27 : Représentation statistique de la connectivité sur le BV13/14

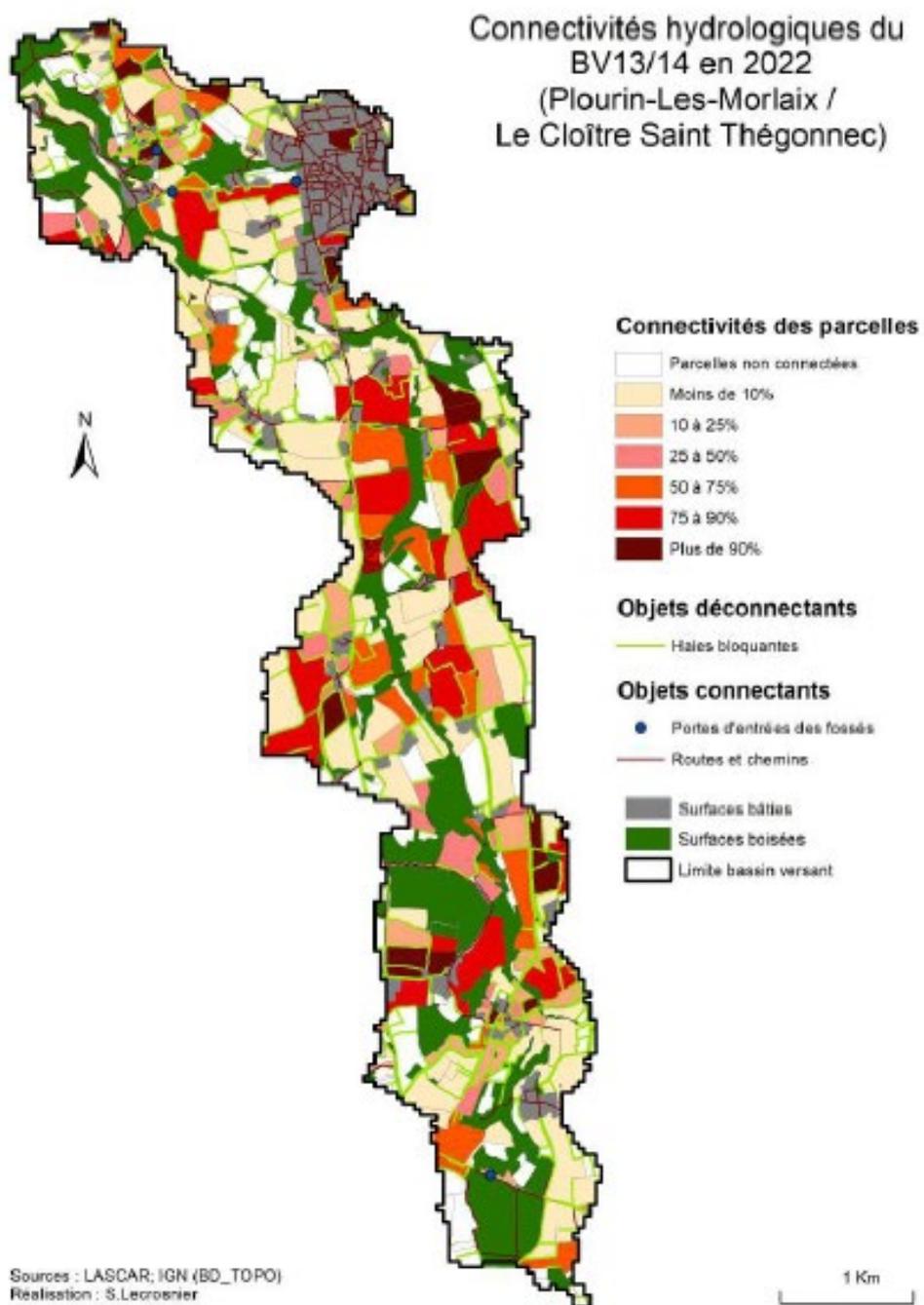


Figure 28 : Connectivité hydrologique dans le BV13/14. Réalisation : Solène Lecrosnier

o. Bassin versant de l'Asseline par la Communauté d'Agglomération du Cotentin
(Mémoire de stage de M2)

Le bassin versant de l'Asseline est un sous bassin de la Douve. Le secteur étudié (4,3km²) est un sous bassin versant en partie amont du ruisseau du Montvasons (aussi appelé Asseline amont). Le Montvasons prend sa source à 120m d'altitude à l'ouest du bassin. Il est alimenté par deux affluents (La Pente et le Saint-Laurent) ainsi que par deux sources. Le bassin repose sur des ensembles imperméables de grès et de schistes paléozoïques surmontés de sols bruns et hydromorphes. Le bassin versant est occupé par des prairies (47%) principalement situées sur les sols hydromorphes présents dans la partie méridionale du bassin. Les parcelles cultivées (45%) sont majoritairement situées sur les sols bruns présents dans la partie nord du bassin. Le bassin présente également 8% de surfaces artificialisées et 5% de surfaces boisées (figure 29). L'acquisition des données nécessaires au fonctionnement du modèle LASCAR a nécessité un travail d'inventaire de terrain de 2 semaines. Après plusieurs essais du modèle, il a été décidé de paramétrer la hauteur de talus à 1 mètre et de diminuer la profondeur des fossés à 0,8 mètres de manière à les faire correspondre aux observations terrain.

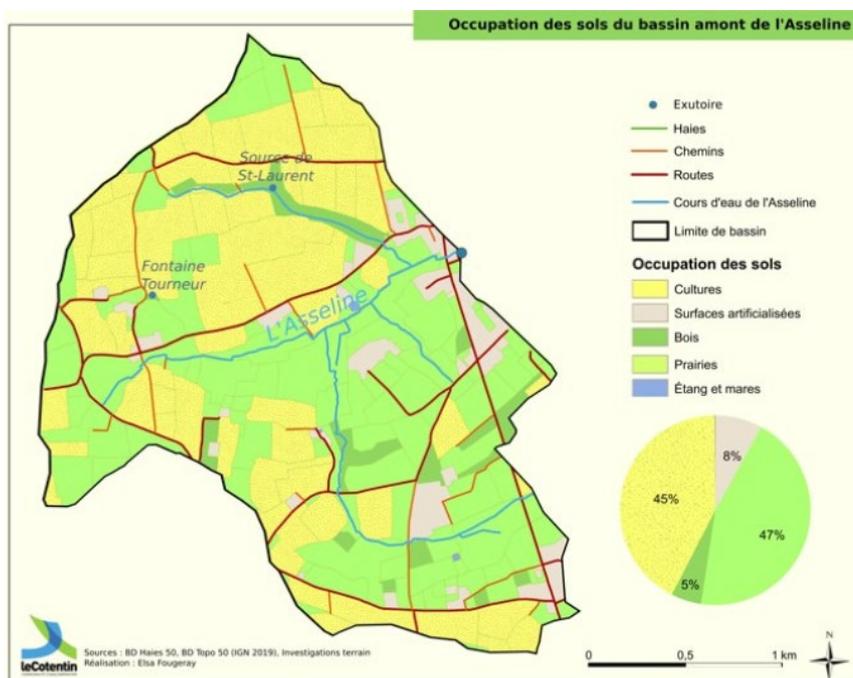


Figure 29 : Occupation du sol du bassin versant amont de l'Asseline (Fougeray Elsa)

Concernant le niveau de connectivité des parcelles (en considérant ici que toutes les parcelles sont susceptibles de ruisseler –prairies comprises–), les résultats montrent que cela concerne 53 % des surfaces cultivées, 41 % des prairies, 8 % des surfaces artificialisées et 3 % de bois et forêts (cf. diagramme figure 20). La plupart des parcelles connectées sont localisées dans le secteur des Renardières, du Hameau Simon et aux alentours du château de la Chênaie. Elles regroupent des parcelles de cultures souvent positionnées proche du cours d'eau ou connectées à la voirie par les entrées de champs et/ou lorsque la haie aval est absente voire discontinue. Concernant les principaux points d'entrée dans le réseau de linéaire, les 30 principaux points d'entrée dans le réseau de routes/fossés ont été identifiés par le travail de diagnostic. Au regard de la période de prospection (été), seuls les 20 premiers points sont présentés dans la figure suivante (figure 30). 9 ont pu être validés. 8 points d'entrée correspondent à des entrées de champs en aval des parcelles, attestant du rôle crucial de ces entités sur les transferts hydro-sédimentaires.

Certaines parcelles classées prioritaires par le modèle (ainsi qu'une dizaine d'autres) ont ensuite fait l'objet d'un travail de préconisation sur d'éventuels aménagements possibles (figure 31).

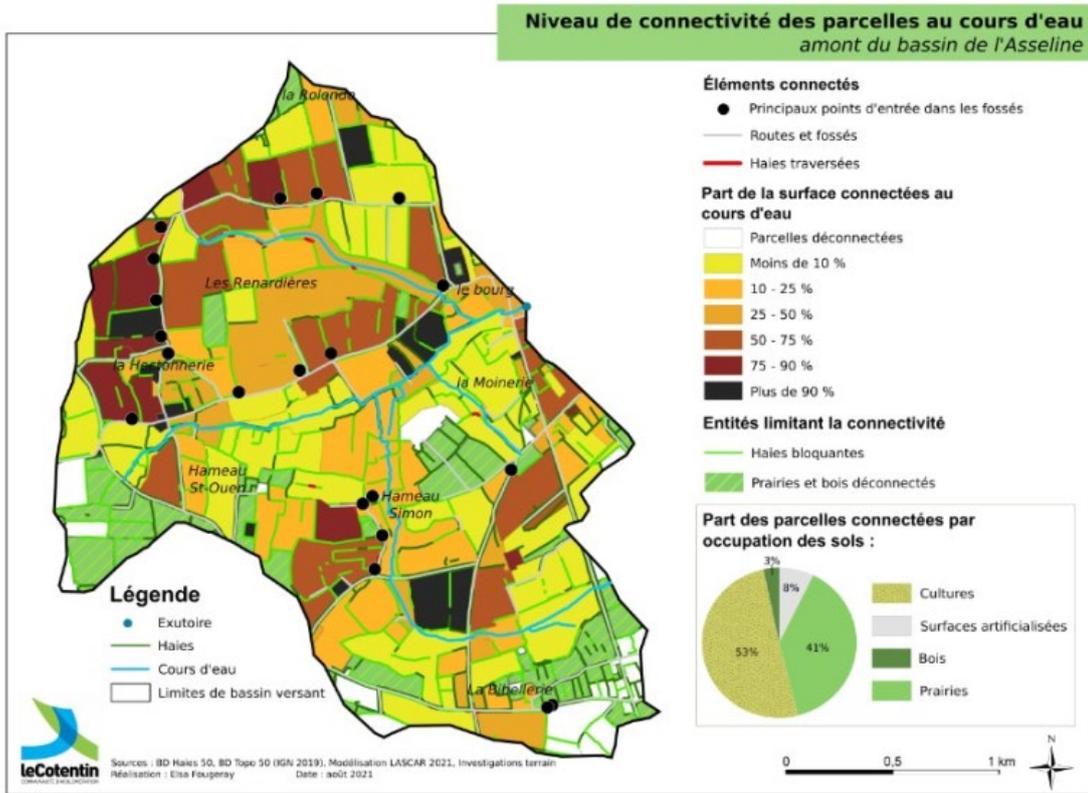


Figure 30 : Connectivité hydrologique dans le bassin amont de l'Asseline. Réalisation : Elsa Fougeray

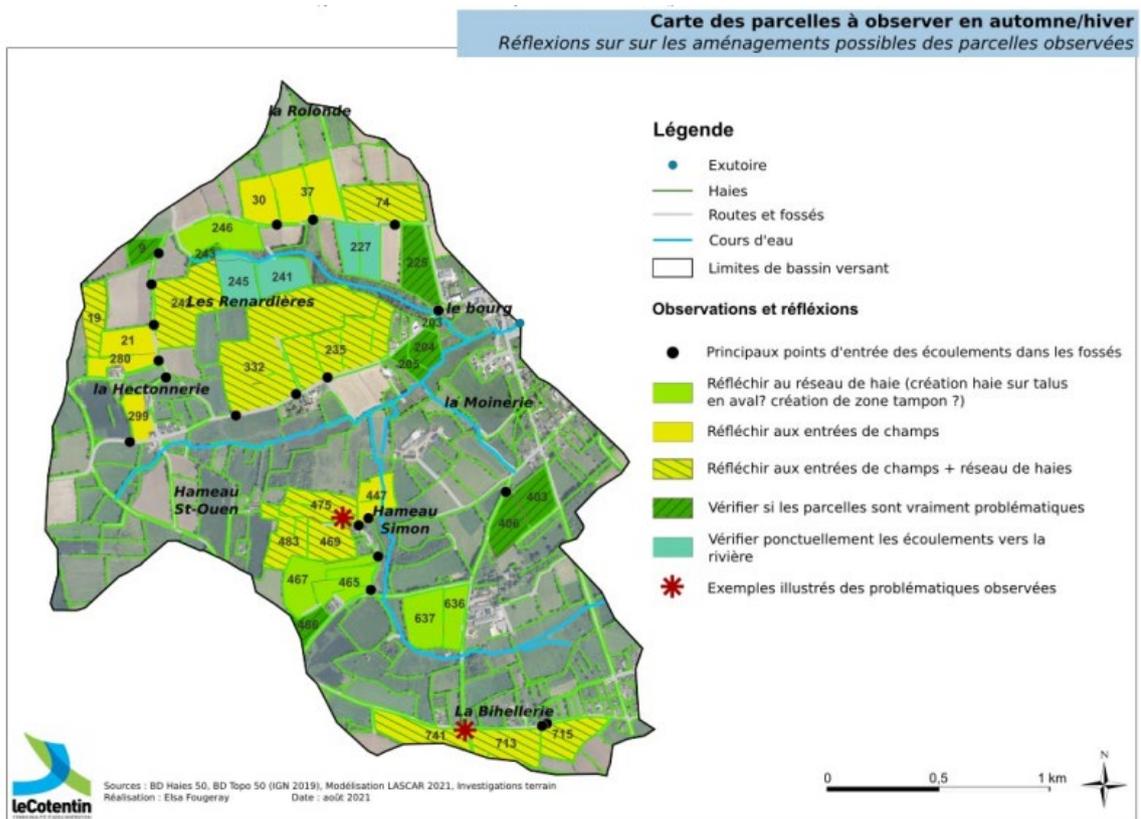


Figure 31 : Proposition d'aménagement au regard des résultats du modèle LASCAR

p. Bassin versant de la Chippe (Mémoire de M1)

Le bassin versant de la Chippe se situe dans le sud-est de la Normandie, dans le département de l'Orne sur le territoire de la Communauté de Communes (CDC) du Bassin de Mortagne-au-Perche. La Chippe est un affluent de L'Huisne (affluent de la Sarthe) et fait partie plus largement du bassin de la Loire. La Chippe s'installe dans un paysage vallonné et accidenté des collines sableuses et crayeuses du Perche parsemées de bois et forêts. La zone d'étude se concentre sur deux sous entités du bassin de la Chippe sur les hauteurs de Mortagne-au-Perche. Les têtes de bassins versants étudiées représentent des secteurs sur lesquelles se déroulent de nombreux processus hydrologiques et sédimentaires pour lesquels il convient d'agir « à la source ». Par ailleurs, de grandes entités cultivées ont été identifiées comme potentiellement sensibles aux phénomènes érosifs dans un premier diagnostic en 2019. La Chippe s'étend sur un bassin versant de 35km² et présente une pente générale de 6%.

Les nappes phréatiques présentent ont une capacité de stockage intéressante (craie Cénomaniennes et calcaire, sable de Mortagne) permettant d'alimenter l'Huisne et la Chippe durant les périodes d'étiage. Le bassin de la Chippe est situé sur la bordure occidentale du bassin parisien, à proximité du Massif Armoricain. La faille de Mortagne sépare la zone d'étude en deux grandes zones : au Sud un compartiment abaissé faiblement incliné vers l'Est, alors qu'au Nord elle est remontée et basculée vers le Nord-Est. Au Nord de la faille, sur le site d'étude, le basculement de la série sédimentaire permet aux terrains jurassiques calcaires de l'Oxfordien d'affleurer largement sur les versants dégradés en contrebas de la cuesta sur la Glauconie armant le plateau structural du Crétacé. Les bassins versants de l'Huisne et de la Chippe sont dominés par les dépôts du Crétacé, discordant sur le Jurassique. Le terrain jurassique calcaire au nord de la faille donne naissance à des sols bruns acides sensibles au lessivage. Les pentes où les craies Cénomaniennes affleurent sont riches en argile et également en sable et limon. La plupart des sols de la zone d'étude sont peu épais (entre 20 et 30cm pour les sols bruns, calciques et calcaires). Ces sols bruns mésotrophes et eutrophes de pentes sont relativement friables. En termes d'occupation du sol, les cultures couvrent 49% de la superficie du bassin contre 32% pour les prairies localisées principalement en tête de bassins et dans les fonds de vallée (figure 32). 12% de la superficie du bassin est artificialisée et 7% sous couverts boisés.

Les résultats du modèle, montre qu'une très grande partie du bassin versant est hydrologiquement connecté (figure 33). Presque toutes les parcelles cultivées sont connectées au cours d'eau. La présence de route et surtout de haies permet la déconnexion de quelques parcelles en transférant les écoulements en dehors de la zone d'étude.



Figure 32 : Présentation du bassin versant de la Chippe. Réalisation : Elsa Fougeray

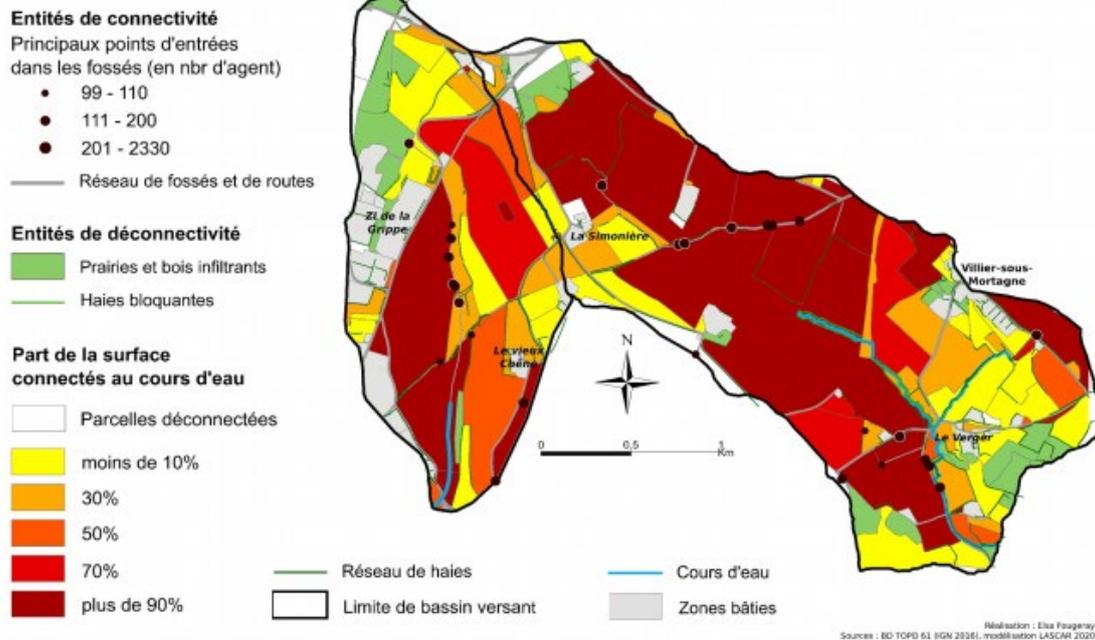


Figure 33 : Entités de la (dé)connectivité. Réalisation : Elsa Fougeray

3.1.3 Utilisation du LASCAR simplifié avec une classe d'un lycée agricole

a. Adaptation du modèle LASCAR pour un usage simplifié

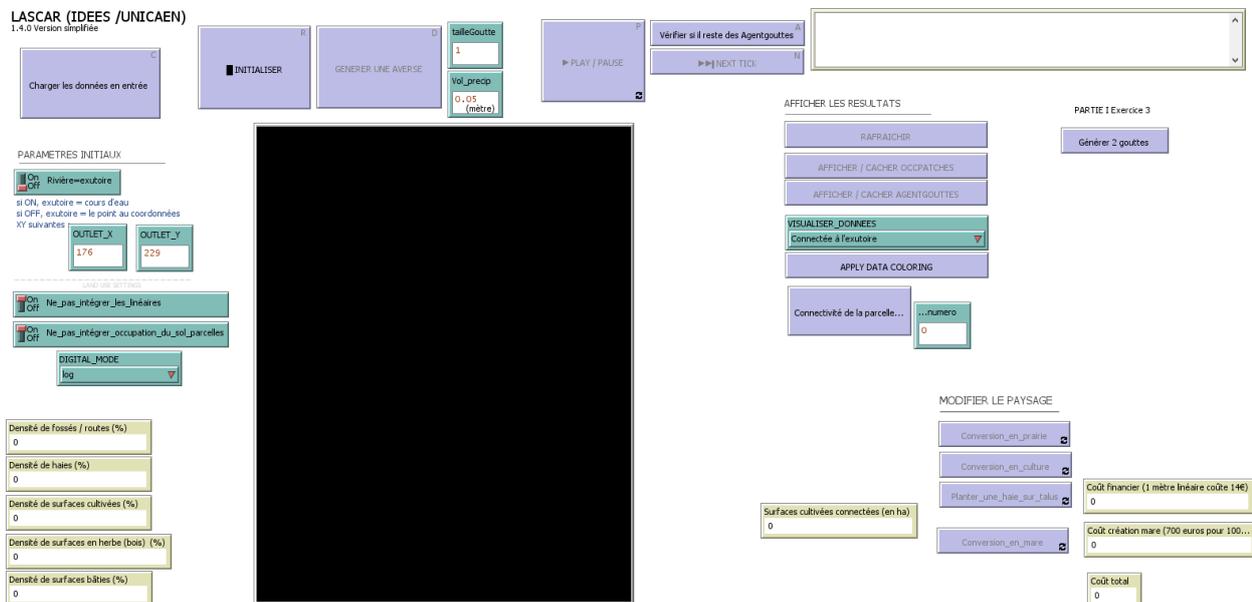


Figure 34 : Interface du modèle LASCAR simplifié

Le modèle simplifié a été épuré de façon à simplifier son utilisation. Plusieurs paramètres ont été supprimés et implémentés directement dans la partie code. Il n'est plus possible d'exporter des données. Quelques fenêtres de visualisation (taux d'occupation du sol de chaque mode d'occupation du sol) ont été rajouté pour faciliter la compréhension.

b. Création d'un tutoriel et des exercices dédiés

Voir livrable.

3.1.4 Fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin versant du Tortillon

Publication à venir (juin 2023)

3.2 – Discussion des résultats

Trois plateformes multi-agents ont été testées afin de comparer leur vitesse d'exécution pour le modèle LASCAR. Les objectifs de ce travail étaient triples. Tout d'abord il s'agissait d'évaluer les capacités de vitesses d'exécution de la plateforme Netlogo au regard d'autres en vue d'une potentielle migration de plateforme pour le modèle LASCAR. Ensuite, il s'agissait de s'interroger sur les capacités de plateformes jugées plus compatibles à l'utilisation de données géographiques en entrée de simulation. La volonté de mener un travail de comparaison de plateformes, encore rare dans la littérature, constitue le troisième objectif. Trois plateformes ont ainsi été testées : Netlogo (plateforme initiale du modèle LASCAR), GAMA (plateforme gérant aisément les fichiers SIG) et REPAST (plateforme très répandue dans la communauté des simulateurs multi-agents). La comparaison de modèle s'est faite sur les rapidités d'exécution du modèle lors des 200 premières itérations et pour deux environnements de simulation de tailles différentes (17,6 km² et 1,52 km²). Les résultats montrent que Netlogo est respectivement 2,7 fois et 1,4 fois plus rapide que GAMA et REPAST dans un environnement de simulation comprenant 45 000 cellules actives et 3,1 fois et 2,3 fois plus rapide dans un environnement de simulation comprenant 164 500 cellules actives. En retirant le visuel de rendu (bien que peu pertinent pour nos objectifs de simulation), la plateforme REPAST présente des temps d'exécution plus rapide en étant 1,5 et 1,8 fois plus rapide que NetLogo. GAMA restant 1,4 et 4 fois moins rapide que NetLogo. Alliant simplicité d'accès, rapidité d'exécution et bon rendu visuel, la plateforme NetLogo reste ainsi la solution idoine pour le modèle LASCAR.

Parallèlement à ce travail, la ré-implémentation du modèle a permis d'optimiser la durée des simulations. Le modèle présente désormais des temps d'exécution acceptable de l'ordre de moins de 3 minutes pour des bassins inférieurs à 15 km². L'utilisation du modèle sur des bassins versants de plus grandes tailles reste cependant difficiles au regard du nombre de cellules supplémentaires que cela générerait. Ce travail de passage à l'échelle reste encore à travailler.

Le modèle LASCAR a pu être testé sur plusieurs bassins versants situés au sein de différents territoires du nord-ouest de la France. Il a été utilisé par des étudiants dans le cadre de leur stage de Master 2 mais également dans le cadre de mémoire de recherche de Master 1 encadré par l'Université de Caen Normandie. Le modèle a été utilisé pour des diagnostics actuels, pour des démarches rétrospectives, parfois sur 2 siècles, et également pour la proposition de plan d'aménagement. Ainsi, les différents débouchés permis par le modèle ont pu être testés. Le modèle LASCAR s'avère être un outil pertinent pour les gestionnaires et ce pour plusieurs raisons. Premièrement, il permet de mieux comprendre la circulation des eaux de surface et de mieux identifier les entités du paysage dont le rôle sur les dynamiques d'écoulement est important. A ce titre, un résultat fréquemment soulevé par les utilisateurs est la mise en évidence que moins il y a des haies dans un territoire plus ces dernières ont un rôle hydrologique important. Ce raisonnement peut paraître contre intuitif. Au contraire, il souligne le rôle fondamental des espaces bocagers denses qui assurent la protection des territoires face aux transferts hydro-sédimentaires en cassant la connectivité très amont dans les bassins.

Secondement, le modèle a prouvé son efficacité dans différents contextes géomorphologiques du nord-ouest français, ce qui offre une gamme de fonctionnement étendue très intéressante et en fait un modèle générique pertinent. Il s'avère également très souple pour des études rétrospectives et prospectives qu'il n'est pas possible de réaliser sans outil infortique.

Troisièmement, le modèle permet d'identifier et de prioriser les zones d'intervention et de réaliser des cartes pertinentes dans le cadre de discussion avec l'ensemble des acteurs du territoire. Sa prise en main facile (quelques semaines) permet d'élaborer rapidement ces cartes et les indices associés et peut s'intégrer parfaitement dans la durée d'un stage court de 4 à 6 mois (partie inventaire de terrain inclus).

En revanche les utilisateurs du modèle LASCAR soulignent le temps passé au recueil des données. Cela concerne principalement les données relatives à la présence de talus et de fossés dont il n'existe aucune base de données. Les utilisateurs du modèle LASCAR ont donc dû constituer ces bases de données ce qui a pris un temps certain sur le terrain. La réalisation des géotraitement sous SIG, préalables à l'exécution du modèle LASCAR, est aussi assez chronophage. Néanmoins des solutions basées sur des

procédures traitements automatisés pourraient permettre d'améliorer et de réduire ce temps passé à la préparation des données en entrée. Néanmoins pour l'instant cette option n'a pas été travaillée. *A contrario*, ces inventaires terrain garantissent une certaine compréhension de ce que fait le modèle. On évite un effet « jeu vidéo » qui pourrait conduire à un manque de bon sens dans le diagnostic. Autre remarque soulevée, l'absence de prise en compte de caractères plus pertinents et plus justes visant à prendre en compte les capacités d'infiltration, de rétention en eau et plus globalement les types de sol. Ces caractéristiques permettraient de rendre le modèle plus réaliste bien que les résultats et les cartographies finales aient été majoritairement vérifiées et validées sur le terrain quand il était possible de le faire.

3.3 – Liste et descriptif des livrables

Dans le cadre de la sous-action 2.2 de ce projet plusieurs livrables ont été réalisés.

Livable 1 : tutoriel d'utilisation du modèle LASCAR sous NetLogo

L'objectif était ici de réaliser une notice afin d'aider les utilisateurs dans leur utilisation du modèle. Le tutoriel développé comprend 41 pages. Une partie introductive permet de rappeler les enjeux d'un tel modèle. Les notions fondamentales de la simulation multi-agents est ensuite présentée, ainsi que les données nécessaires indispensables au fonctionnement du modèle. Une très large partie du tutoriel est consacré à la présentation de l'interface d'utilisation du modèle. Le tutoriel se termine par la présentation des erreurs susceptibles d'être rencontrées et par quelques exemples de mises en forme des données exportées sous un logiciel SIG et leur interprétation.

Livable 2 : tutoriel de préparation des données d'entrée sous le logiciel SIG Qgis

L'objectif était ici de réaliser une notice afin de guider les utilisateurs dans la préparation des données d'entrée indispensables au fonctionnement du modèle LASCAR ainsi que la valorisation des résultats, le tout sous le logiciel Qgis. Le tutoriel développé comprend 41 pages.

Livable 3 : tutoriel de préparation des données d'entrée sous le logiciel SIG ArcMap

L'objectif était ici de réaliser une notice afin de guider les utilisateurs dans la préparation des données d'entrée indispensables au fonctionnement du modèle LASCAR ainsi que la valorisation des résultats, le tout sous le logiciel ArcMap. Le tutoriel développé comprend 50 pages.

Livable 4 : tutoriel d'utilisation du modèle LASCAR simplifié et exercices pratiques pour un public d'apprenant dans les lycées agricoles

L'objectif était ici de développer un tutoriel du modèle LASCAR adapté à l'utilisation du modèle dans un enseignement de courte durée (1/2 journée) pour des élèves de classes de lycée agricole. Le tutoriel comprend une partie expliquant l'intérêt du modèle et une partie exercice. Deux exercices sont proposés. Le premier visant à comprendre le fonctionnement d'un système multi-agents, le second visant à utiliser pleinement le modèle LASCAR et à tester des scénarios d'aménagements. Le tutoriel développé comprend 20 pages. *Livable finalisé prévu pour fin juin 2023.*

Livable 5 : comprend les huit mémoires de recherche et rapports de stage des étudiants impliqués dans le projet RESP'HAIES.

Livable 6 : le modèle LASCAR

Livable 7 : le modèle LASCAR simplifié

Livrable additionnel : correspond au webinaire de présentation du modèle LASCAR du 1er décembre 2022

Résumé : *Pour ce premier webinaire thématique de présentation des résultats du projet RESP'HAIES, nous vous invitons à découvrir un nouvel outil d'analyse spatiale, LASCAR, qui aide à mieux appréhender les fonctionnalités des haies sur le ruissellement et l'érosion. LASCAR est un modèle spatialisé d'aide à la décision pour une gestion intégrée et raisonnée des petits bassins versants agricoles sujets à des processus chroniques de ruissellement érosif et de transferts de matières vers les cours d'eau. Basé sur une approche spatialement explicite, sans mesurer quelconque volume, le modèle se révèle être un bon outil de sensibilisation et d'aide à la décision auprès des différents acteurs de l'aménagement des territoires ruraux. Ce webinaire qui s'est tenu le 1er décembre 2022 est le premier événement du cycle de restitution du projet RESP'HAIES*

Disponible ici : <https://afac-agroforesteries.fr/webinaire-1/>

Durée : 54 minutes

Livrable additionnel (non intégré dans le projet Resp'haies) : vidéo de présentation du modèle LASCAR - *Livraison prévue au printemps 2024*

Livrable additionnel (non intégré dans le projet Resp'haies) : tutoriel de préparation des données d'entrée sous le logiciel SIG ArcGis Pro

L'objectif était ici de réaliser une notice afin de guider les utilisateurs dans la préparation des données d'entrée indispensables au fonctionnement du modèle LASCAR ainsi que la valorisation des résultats, le tout sous le logiciel ArcGis Pro. *Livraison prévue au printemps 2024*

PARTIE 4 – PERSPECTIVES

4.1 – Suites envisagées

Suite 1 : développer un vrai moteur hydrologique afin de mieux simuler les volumes d'eau en transit
Nous travaillons actuellement sur l'implémentation d'un modèle hydrologique visant à mieux prendre en compte la sensibilité des sols en vue d'obtenir un modèle LASCAR à même de générer des réponses hydrologiques plus réalistes qu'aujourd'hui. Ce travail passe notamment actuellement par un mémoire de recherche consacré à la mise en place d'un moteur hydrologique dans chaque cellule.

Suite 2 : mieux comprendre le rôle des bords de route dans les dynamiques de transferts hydrosédimentaires

Les interactions dépendances routières (haies, fossés, bandes enherbées) / écoulements hydro-sédimentaires de versant n'ont jamais fait l'objet d'études approfondies et restent un angle mort de la recherche. Si de nombreuses études portent sur les surfaces (parcelles) ou les réseaux (routes), ces interfaces ne sont jamais considérées comme un objet hydrologique à part entière. Surement imputable à leur caractéristique « statique » ou « immuable » dans le temps le rôle hydrologique des dépendances routières mérite cependant une attention particulière et une meilleure compréhension est nécessaire. Les volumes d'eau et de matières évacués vers les cours d'eau par ces dépendances restent largement méconnus. Les services rendus par ces dépendances (interception des pluies, infiltration, stockage de sédiments) sont tout aussi largement ignorés. En résulte une gestion ancestrale basée sur le curage systématique des zones de stockages sédimentaires. En contraste total avec les pratiques de gestion douce des dépendances vertes (fauches tardives, choix des espèces semées, écoducs). Pour ce faire, le projet de recherche Dépendances Routières et Transferts Hydro-Sédimentaires (DARTHYS) a été lancé en 2022 par Romain Reulier. Ce projet a permis de lancer un travail exploratoire sur cette thématique à l'échelle du département du Calvados. Le projet vise 1) Appréhender la diversité des bords de routes au sein des différents terroirs hydro-paysagers d'un département ; 2) Quantifier les volumes hydro-sédimentaires en interaction avec les réseaux routiers et leurs dépendances ; 3) Identifier les pratiques de gestion des bords de route et les mettre au regard des particularités des territoires (sensibilité à l'érosion et organisation paysagère).

4.2 – Éléments évaluatifs

4.2.1 – Difficultés rencontrées

Le retard pris à la signature des conventions a décalé le départ de l'action 2.2 (signatures décembre 2019). La crise sanitaire a perturbé le stage de Master 2 de Florentin L'Homme sans pour autant remettre en cause les objectifs fixés dans le cadre de son projet.

4.2.2 – Analyse d'impact du projet sur les différents publics cibles

Comme évoqué préalablement, l'utilisation du modèle LASCAR dans les différentes structures a permis de mettre en évidence l'intérêt du modèle LASCAR dans les diagnostics de sensibilité des territoires aux transferts hydro-sédimentaires. Parmi les points forts identifiés, les gestionnaires soulignent l'intérêt du modèle pour mieux comprendre le fonctionnement hydrologique de leur territoire en posant un diagnostic pertinent. Les différents indicateurs de sortie ont offert des arguments scientifiques non négligeables dans la recherche de solutions d'hydrauliques douces, dans l'identification des zones d'interventions prioritaires, des entités du paysage jouant un rôle non négligeable. Les sorties du modèle offrent des arguments scientifiques utiles pour le travail de concertation auprès des élus et des agriculteurs.

Les gestionnaires regrettent cependant l'absence de prise en compte de la nature des sols et de la réserve utile associée (comme évoqué précédemment un travail est en cours à ce sujet). L'absence de base de données génériques et libres sur les fossés et les entrées de champs obligent à un long travail chronophage d'inventaire de terrain.

Le modèle simplifié à destination des élèves de formations agricoles a pu être testé devant une classe de 1^{ère} STAV au lycée agricole de Saint-Lô. Les élèves et les enseignants ont fait part de leur satisfaction quant à l'utilisation de LASCAR dans le cadre de cet atelier thématique « haie » d'une demi-journée.

4.2.3 – Indicateurs de suivis

Les indicateurs de suivis mentionnés dans le dépôt de projet étaient les suivants : *« La première année sera consacrée aux tests du modèle LASCAR sur les quatre sites de suivis grâce à un stage de 6 mois de master 2 au sein de l'université de Caen Normandie. La seconde année sera l'occasion de confronter les résultats des simulations avec les attentes en matière de gestion et d'aménagement et de confronter cela avec les processus de ruissellement sur un site de suivi dans le cadre d'un mémoire de master 1. La troisième année aura pour objectif de tester différents scénarios d'aménagement possible et d'en évaluer les conséquences tout en mesurant les effets des aménagements passés (scénarios rétrospectifs et prospectifs). Une réunion annuelle avec le comité de suivi permettra de discuter de l'avancée des travaux. Les gestionnaires des différents sites de suivis seront parties prenantes de ces travaux (concertation, visite de site, proposition d'aménagement, etc.). »*

Les différentes étapes ont été respectées, d'autres ont même pu être ajoutés grâce à différentes opportunités (étudiants motivés par ces questions de recherche, structures publiques souhaitant tester rapidement le modèle LASCAR).

4.2.4 – Indicateurs de résultats

Trois indicateurs de résultats (livrables) étaient mentionnés dans le projet pour la sous-action 2.2 :

1. Test du modèle sur différents bassins (4)
2. Caractérisation de la sensibilité des bassins au ruissellement de surface
3. Evaluation de scénarios d'aménagement à la fois rétrospectifs et prospectifs

Comme évoqué précédemment, ces indicateurs de résultats ont été suivis et même dépassés.

PARTIE 5 – ANNEXES

Bibliographie

- Anselme B., Beck E., Marilleau N., Rousseaux F., Schmitt C., Vannier C. (2014)** – Modèle Bestiole. *Fiche pédagogique, collectif MAPS*, 20 p.
- Auzet A.V. (1987)** – L'érosion des sols cultivés en France sous l'action du ruissellement. *Annales de Géographie*, 537, pp. 529-556.
- Baudry J., Jouin A. (2003)** – De la haie aux bocages. Organisation, dynamique et gestion. *Inra Editions*. 435 p.
- Blanpain B., Langlois P., Daudé E. (2013)** – MAGéo, a user-friendly platform for agent-based modeling and simulation, 18th European Colloquium on Theoretical & Quantitative Geography, 5-9 sept. 2013, Dourdan, France.
- Bocher E. (2005)** – *Impact des activités humaines sur le parcours des écoulements de surface dans un bassin versant bocager : essai de modélisation*. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 2, 337 p.
- Boiffin J. (1984)** – *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. Thèse, Sciences Agronomiques, INA-PG, 320 p. + annexes.
- Boiffin J., Papy F., Eimberck M. (1988)** – Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. I) Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agronomie*. Vol. 8, n°8, pp. 663-673.
- Caillault S. (2011)** – *Le feu, la brousse et la savane. Modélisation spatiale des dynamiques de paysages soudaniens (Burkina Faso)*. Thèse de doctorat de l'Université de Caen Basse-Normandie. 378 p.
- Caillault S., Mialhe F., Vannier C., Delmotte S., Kédovidé C., Amblard F., Etienne M., Bécu N., Gautreau P., Houet T. (2013)** – Influence of incentive networks on landscape changes: A simple agent-based simulation approach. *Environmental Modelling & Software*, 45, pp. 64-73.
- Carluer N., Marsily G. (2004)** – Assessment and modelling of the influence of man-made networks on the hydrology of a small watershed: implications for fast flow components, water quality and landscape management. *Journal of Hydrology*, 285, pp. 76-95.
- Cossart E., Viel V., Lissak C., Reulier R., Fressard M., Delahaye D. (2002)** – How might sediment connectivity change in space and time? *Land Degradation and Development*, Wiley, 2018, 29 (8), pp. 2595-2613.
- Crave A. et Davy P. (2001)** – A stochastic 'precipiton' model for simulating erosion/sedimentation dynamics. *Computer & Science* 27, pp. 815-827.
- Darboux F., Davy P., Gascuel-Oudou C. (2002)** – Effect of depression storage capacity on overland-flow generation for rough horizontal surfaces: water transfer distance and scaling. *Earth Surface Processes and Landforms* 27, pp. 177-191.
- Delahaye D. (1992)** – *Approches spatialisées et analyses expérimentales des phénomènes de ruissellement et d'érosion des sols. Application aux systèmes de production agricole du Calvados*. Thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie, 427 p.
- Delahaye D., Guermond Y., Langlois P. (2001)** – « Spatial interaction runoff process », **Cybergeog : European Journal of Geography** [En ligne], Dossiers, 12^e Colloque Européen de Géographie Théorique et Quantitative, St-Valéry-en-Caux, France, 7-11 septembre 2001, document 213, mis en ligne le 10 mai 2002, consulté le 05 novembre 2014. URL : <http://cybergeog.revues.org/3795> ; DOI : 10.4000/cybergeog.3795

- Delahaye D. (2002)** – Apport de l'analyse spatiale en géomorphologie. Modélisation et approche multiscale des risques, *Mémoire HDR*, Vol. 1, Université de Rouen, 259 p.
- Doray T. (2008)** – Mise en œuvre d'un modèle de spatialisation du ruissellement dans un objectif d'évaluation des transferts de matières en suspension. Mémoire de master 2, 96 p.
- Douvinet J., Delahaye D., Langlois P. (2013)** – Measuring surface flow concentrations using a cellular automaton metric: a new way of detecting potential impacts of flash floods in sedimentary context. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, n°1, pp. 27-46.
- Duke G.D., Kienzle S.W., Johnson D.L., Byrne J.M. (2003)** – Improving overland flow routing by incorporating ancillary road data into Digital Elevation Models. *Journal of Spatial Hydrology*, Vol 3, n° 2.
- Gascuel-Odoux C., Arousseau P., Cordier M-O., Durand P., Garcia F., Masson V., Salmon-Monviola J., Tortrat F., Trepos R. (2009)** – A decision-oriented model to evaluate the effect of land use and agricultural management on herbicide contamination in stream water. *Environmental Modelling & Software* 24, pp. 1433-1446.
- Heppenstall AJ (2011)** Crooks. A.T., See, L.M., Batty, M.: Agent-based models of geographical systems. Springer Science & Business Media
- Jones J.A., Swanson F.J., Wemple B.B, Snyder K.U. (2000)** – Effects of Roads on Hydrology, Geomorphology, and Disturbance Patches in Stream Networks. *Conservation Biology*. Vol. 14, n° 1, pp. 76-85.
- Langlois P. et Delahaye D. (2002)** – RuiCells, Automate cellulaire pour la simulation du ruissellement de surface. *Revue Internationale de Géomatique*. Vol. 12, n°4, pp. 461-487.
- Le Bissonnais Y., Torette J., Bardet C., Daroussin J. (2002)** – *L'érosion hydrique des sols en France*, Rapport INRA – IFEN, 109 p. (disponible sur <http://erosion.orleans.inra.fr/rapport2002/>).
- Lendemain V. (2016)** – *Erosion des sols et transferts sédimentaires sur les bassins versants de l'Ouest du Bassin de Paris : analyse, quantification et modélisation à l'échelle pluriannuelle*. Thèse de doctorat. Normandie Université, 2016.
- Levavasseur F. (2012)** – *Structure du paysage et fonctionnement hydrologique : application aux réseaux de fossés en zone viticole méditerranéenne*. Thèse de doctorat du Centre international d'études supérieures en sciences agronomiques Montpellier SupAgro. 188 p.
- Mérot Ph., Gascuel-Odoux C., Walter C., Zhang X., Molenat J. (1998)** – Influence du réseau de haies des paysages bocagers sur le cheminement de l'eau de surface. *Revue des sciences de l'eau*. 12/1, pp. 23-44.
- Moussa R., Voltz M., Andrieux P. (2002)** – Effect of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events. *Hydrological Processes*. 16, pp. 393-412.
- Ouvry J.F., Richet J.B., Bricard O., Lhérieau M., Bouzid M., Saunier M. (2012)** – Fascines & haies pour réduire les effets du ruissellement érosif. Caractérisation de l'efficacité et conditions d'utilisation. *Document de l'AREAS*. 68 p.
- Rakotoarisoa M., Fleurant C., Amiot A., Ballouche A., Communal P-Y., Jadas-Hécart A., La Jeunesse I., Landry D., Razakamanana T. (2014)** – Système multi-agent pour la modélisation des écoulements de surface sur un petit bassin versant viticole du Layon. *Revue Internationale de Géographie*. 24/3, pp. 307-333.
- Reaney S.M. (2008)** – The use of agent based modeling techniques in hydrology: determining the spatial and temporal origin of channel flow in semi-arid catchments. *Earth Surface Processes and Landforms* 33, pp. 317-327.
- Rebaudo F., Crespo-Pérez V., Silvain J-F., Dangles O. (2011)** – Agent-Based Modeling of Human-Induced Spread of Invasive Species in Agricultural Landscapes: Insights from the Potato Moth in Ecuador. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 14 (3), 7.
- Reulier R. (2015)** – *Structure paysagère et dynamiques spatiales des transferts hydro-sédimentaires. Approche par simulation multi-agents*. PhD diss., University of Caen Normandy, France. 350 p.
- Reulier R, Delahaye D, Caillault S, Viel V, Douvinet J, Bensaid A. (2016)** – Mesurer l'impact des entités linéaires paysagères sur les dynamiques spatiales du ruissellement : une approche par simulation multi-agents. *Cybergeog: European Journal of Geography*. 26 p., DOI: 10.4000/cybergeog.27768

- Reulier R, Delahaye D, Viel V, Davidson R. (2017)** – Connectivité hydrosédimentaire dans un petit bassin versant agricole du nord-ouest de la France. De l'expertise de terrain à la modélisation par Système Multi-Agents. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*. 15 p., DOI:10.4000/geomorphologie.11857
- Reulier R., Delahaye D., Viel V. (2019)** – Agricultural landscape evolution and structural connectivity to the river for matter flux, a multi-agents simulation approach. *CATENA*, Elsevier, 174, pp. 524-535.
- Souchère V., King D., Daroussin J., Papy F., Capillon A. (1998)** – Effects of tillage on runoff directions: consequences on runoff contributing area within agricultural catchments. *Journal of Hydrology*, 206, pp. 256-267.
- Schwarz N., Kahlenberg D., Haase D., Seppelt R. (2012)** – ABMLand- a Tool for Agent-Based Model Development on Urban Land Use Change. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 15(2), 8.
- Taillandier, P, and Gaudou B, Grignard A, Huynh, Q, Marilleau, N, Caillou, P, Philippon, D, Drogoul, A, (2018)** Building, composing and experimenting complex spatial models with the GAMA platform. *Geoinformatica*. 1-24. ISSN 1384-6175
- Tortrat F. (2005)** – *Modélisation orientée décision des processus de transfert par ruissellement et subsurface des herbicides dans les bassins versants agricoles*. Thèse de doctorat de l'Agrocampus Rennes. 174 p + annexes.
- Treuil J.P., Mullon C., Perrier E., Piron M. (2001)** – Simulations multi-agents de dynamiques spatialisées. Dans *Modèles en analyse spatiale sous la direction de Lena Sanders*. pp. 105-125.
- Servat D. (2000)** – *Modélisation de dynamiques de flux par agents. Application aux processus de ruissellement, infiltration et érosion*. Thèse de doctorat de l'Université de Paris 6, 186 p.
- Vannier C. (2011)** – *Observation et modélisation spatiale de pratiques agricoles territorialisées à partir de données de télédétection. Application au paysage bocager*. Thèse de doctorat de l'Université de Rennes 2 Haute-Bretagne, 307 p.
- 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 trois petits bassins versants bas-normands. *Géomorphologie*, 13 p.
- Wilensky U. (1999)** – Netlogo. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. Northwestern University, Evanston. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>.
- Wohlfahrt J., Colin F., Assaghir Z., Bockstalle C. (2010)** – Assessing the impact of the spatial arrangement of agricultural practices on pesticide runoff in small catchments: Combining hydrological modeling and supervised learning. *Ecological Indicators* 10, pp. 826-839.

Table des figures

Figure 1 : Présentation du bassin versant du Lingèvres	11
Figure 2 : Récapitulatif des procédures liées aux Agentgouttes dans le modèle initial	13
Figure 3 : Récapitulatif du déroulement du modèle simplifié utilisé dans les tests comparatifs de plateforme.....	28
Figure 4 : temps d'exécution (en ms) par itération dans une simulation sous NetLogo avec ou sans fusion, exemple du bassin de la Bourderie.....	29
Figure 5 : Nombre d'Agentgouttes présents dans une simulation sous NetLogo avec ou sans fusion, exemple du bassin de la Bourderie.....	29
Figure 6 : <i>Comparaison des temps d'exécution sur les trois plateformes (exemple sur la Bourderie (à gauche) et sur le Lingèvres (à droite)).</i>	30
Figure 7 : Décomposition des temps d'exécution sous NetLogo (exemple du bassin de La Bourderie)...	31
Figure 8 : Décomposition des temps d'exécution sous GAMA (exemple du bassin de La Bourderie).....	32
Figure 9 : Décomposition des temps d'exécution sous Repast Symphony (exemple du bassin de La Bourderie).....	33
Figure 10 : Comparaison entre Netlogo et Repast Symphony sans rendu visuel pour la Bourderie (à gauche) et le Lingèvres (à droite)	33
Figure 11 : Evolution de l'occupation du sol dans le bassin versant du Guer entre 1830 et 2018. Réalisation : M.Guillemois, 2020.	34
Figure 12 : Evolution des connectivités hydrologiques dans le bassin versant du Guer entre 1830 et 2018. Réalisation : M.Guillemois, 2020.	36
Figure 13 : Evolution de l'occupation du sol dans le bassin versant du Tortillon entre 1830 et 2020. Réalisation : M.Guillemois, 2022.	37
Figure 14 : Evolution des connectivités hydrologiques dans le bassin versant du Tortillon entre 1830 et 2020. Réalisation : M.Guillemois, 2022.	38
Figure 15 : Les connectivités hydrologiques dans le bassin versant du Tortillon en 2020. Réalisation : M.Guillemois, 2022.....	39
Figure 16 : Carte d'occupation du sol de la Siennes amont. Réalisation : Solène Lecrosnier	40
Figure 17 : Evolution des principaux modes d'occupation du sol entre 1955, 1992 et 2021	41
Figure 18 : Connectivité hydrologique en 1955 et 2021 d'après le modèle LASCAR.....	42
Figure 19 : Evolution des chemins d'écoulement en fonction des contraintes linéaires	44
Figure 20 : Mise en évidence des entités de la (dé)connectivité.....	45
Figure 21 : Document pédagogique élaboré par Laurine Ansart	46
Figure 22 : Cartographie de l'occupation du sol. Réalisation : Romain Quigneaux.....	47
Figure 23 : Carte de la connectivité des parcelles au cours d'eau pour le bassin versant de la Flèche. Réalisation : Romain Quigneaux.....	49
Figure 24 : Connectivité hydrologique dans le BV8. Réalisation : Solène Lecrosnier	51
Figure 25 : Représentation statistique de la connectivité sur le BV8	52
Figure 26 : Type d'occupation connecté ou déconnecté	52
Figure 27 : Représentation statistique de la connectivité sur le BV13/14	53
Figure 28 : Connectivité hydrologique dans le BV13/14. Réalisation : Solène Lecrosnier	54
Figure 29 : Occupation du sol du bassin versant amont de l'Asseline (Fougeray Elsa).....	55
Figure 30 : Connectivité hydrologique dans le bassin amont de l'Asseline. Réalisation : Elsa Fougeray	56
Figure 31 : Proposition d'aménagement au regard des résultats du modèle LASCAR	56
Figure 32 : Présentation du bassin versant de la Chippe. Réalisation : Elsa Fougeray	58
Figure 33 : Entités de la (dé)connectivité. Réalisation : Elsa Fougeray	58
Figure 34 : Interface du modèle LASCAR simplifié	59

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristique du matériel et des logiciels utilisés pour les tests comparatifs	10
Tableau 2 : Récapitulatif des temps d'exécution du modèle LASCAR par plateforme (fonction « fusion » activée)	30
Tableau 3 : Tableau récapitulatif des parcelles connectées à plus de 75 % en 1955, 1992 et 2021. Réalisation : S.Lecrosnier.	41
Tableau 4 : Parts de chaque type de surface pour chaque classe de connectivité	48

Résumé :

L'organisation spatiale des haies (localisation et relation) joue un rôle majeur sur la sensibilité des espaces agricoles vis-à-vis des processus d'écoulement de surface (Mérot et al., 1998). Des travaux d'analyse spatiale ont été menés pour mesurer la qualité des continuités écologiques dans les paysages bocagers et leurs effets sur la biodiversité (mise en œuvre de schéma de trames vertes). L'objectif de la sous-action 2.2 du projet RESP'HAIES est d'étudier le rôle de l'organisation des objets du paysage (haies, talus, fossés, routes...) sur la dynamique des écoulements sur un territoire et les connexions/déconnexions hydrologiques issues de cette organisation. Les outils et concepts développés en géographie, et particulièrement en analyse spatiale, sont adaptés pour mener ce travail. Le modèle LASCAR (Landscape Structure And Runoff) a été spécifiquement conçu pour mettre en évidence les effets du paysage sur la dynamique spatiale des écoulements de surface. Modèle conceptuel, multi-agents, LASCAR s'appuie notamment sur le concept de connectivité pour évaluer la capacité des eaux de ruissellement à rejoindre le cours d'eau. Le modèle permet à la fois de quantifier la connectivité actuelle mais également d'étudier son évolution récente (modélisation rétrospective) pour caractériser l'incidence des trajectoires paysagères sur la sensibilité aux processus érosifs. Le modèle peut également servir à tester des scénarios d'aménagement voire être utilisé comme outil de médiation entre les acteurs locaux. Il a été utilisé dans différentes structures au cours de ce projet.

Pour citer ce rapport :

REULIER, Romain ; DELAHAYE, Daniel ; GUILLEMOIS Mathilde, Le modèle LASCAR, un outil d'aide à la décision pour la régulation des flux hydro-sédimentaires par les haies, Rapport du projet RESP'HAIES, 2023, 71p.

En savoir plus sur Resp'haies :

Le projet de recherche et développement RESP'HAIES (RESilience et Performances des exploitations agricoles liées aux HAIES) s'est déroulé de 2019-2022, avec la participation de onze organismes de la recherche, du développement et de l'enseignement dans l'objectif est de renforcer les connaissances sur la thématique des haies autour de quatre axes :

- **Action 1** - productivité et de cubage des haies et apports de la géographie pour caractériser les haies,
- **Action 2** - services écosystémiques liés aux haies : biodiversité, ruissellement, carbone,
- **Action 3** - performances technico-économiques des exploitations agricoles liées aux haies
- **Action 4** - conceptions et tests de séquences pédagogique sur les haies.

Retrouvez tous les résultats du projet sur <https://afac-agroforesteries.fr/resphaies/>

Projet soutenu par :

Le projet bénéficie également du soutien de :

Avec la contribution financière du compte d'affectation spéciale développement agricole et rural CASDAR



MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA SOUVERAINETÉ ALIMENTAIRE
Liberté
Égalité
Fraternité



Partenaires du projet :

