



**HAL**  
open science

# Mesurer l'impact des entités linéaires paysagères sur les dynamiques spatiales du ruissellement : une approche par simulation multi-agents

Romain Reulier, Daniel Delahaye, Sébastien Caillault, Vincent Viel, Johnny Douvinet, Abdelkrim Bensaïd

## ► To cite this version:

Romain Reulier, Daniel Delahaye, Sébastien Caillault, Vincent Viel, Johnny Douvinet, et al.. Mesurer l'impact des entités linéaires paysagères sur les dynamiques spatiales du ruissellement : une approche par simulation multi-agents. *Cybergeo: Revue européenne de géographie / European journal of geography*, 2016, 788, 10.4000/cybergeo.27768 . hal-01380864

**HAL Id: hal-01380864**

**<https://hal.science/hal-01380864>**

Submitted on 30 May 2022

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



---

## Mesurer l'impact des entités linéaires paysagères sur les dynamiques spatiales du ruissellement : une approche par simulation multi-agents

Romain Reulier, Daniel Delahaye, Sebastien Caillault, Vincent Viel, Johnny Douvinet et Abdelkrim Bensaid

---



### Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/cybergeo/27768>

DOI : 10.4000/cybergeo.27768

ISSN : 1278-3366

### Éditeur

UMR 8504 Géographie-cités

Ce document vous est offert par Université de Rouen – Bibliothèque Universitaire



### Référence électronique

Romain Reulier, Daniel Delahaye, Sebastien Caillault, Vincent Viel, Johnny Douvinet et Abdelkrim Bensaid, « Mesurer l'impact des entités linéaires paysagères sur les dynamiques spatiales du ruissellement : une approche par simulation multi-agents », *Cybergeo: European Journal of Geography* [En ligne], Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 788, mis en ligne le 07 septembre 2016, consulté le 30 mai 2022. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/27768> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/cybergeo.27768>

---

Ce document a été généré automatiquement le 29 septembre 2020.



La revue *Cybergeo* est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution 4.0 International.

---

# Mesurer l'impact des entités linéaires paysagères sur les dynamiques spatiales du ruissellement : une approche par simulation multi-agents

Romain Reulier, Daniel Delahaye, Sébastien Caillault, Vincent Viel, Johnny Douvinet et Abdelkrim Bensaïd

---

## Introduction

- 1 Une attention grandissante est portée aux écoulements hydro-sédimentaires de versant dans les hydrosystèmes du Nord-Ouest de la France en raison de leurs conséquences négatives : pertes en terre, pollution, diminution de la fertilité des sols, inondations, crues turbides, etc. Cependant, quantifier l'impact d'une haie et/ou d'un fossé sur le parcours de ces écoulements est bien délicat, sauf si l'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 caractériser le 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 linéaire sur la réponse hydrologique globale d'un bassin devient alors impossible (Baudry et Jouin, 2003). Si 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), 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 ; Gascuel-Odoux *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 ; 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 Marsilly (2004) et Moussa (2002) ont appréhendé les réseaux de fossés comme des vecteurs additionnels d'écoulement, tout comme Duke *et al.* (2003) l'ont fait pour les réseaux routiers. Le Gouée et Delahaye (2008), puis Viel *et al.* (2014), proposent une typologie des espaces 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.

- 2 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 écoulement de surface vers un écoulement de réseau. Ainsi, pour comprendre l'ensemble de ces dynamiques hydro-sédimentaires depuis les parcelles jusqu'au cours d'eau, il faut donc intégrer l'ensemble des entités composant la structure paysagère (Viel *et al.*, 2014). Au-delà des connaissances empiriques acquises, les gestionnaires et/ou les chercheurs ont aujourd'hui besoin d'outils capables de reproduire l'ensemble de ces dynamiques hydro-sédimentaires et de mesurer le rôle de la structure paysagère (actuelle, passée ou même future) sur les transferts de versant (Baudry et Jouin, 2003 ; Gascuel-Oudoux *et al.*, 2009 ; Wohlfahrt *et al.*, 2010). Plusieurs modèles intégrant les réseaux linéaires d'origine anthropique ont été développés ces dernières années : ANTHROPOG (Carluer et De Marsilly, 2004), STREAM (Souchère, 1998, Cerdan *et al.*, 2001) ; RIDEM (Duke, 2003), SACADEAU (Gascuel *et al.*, 2009) ; MHYDAS (Moussa, 2002). 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 ; Doray, 2008 ; Charlier, 2007 ; Levavasseur, 2012). Si ces modèles intègrent le rôle hydrologique des réseaux linéaires et proposent des simulations proches de la réalité (débits de matières à l'exutoire par exemple), ils restent peu adaptés pour mettre en évidence la dynamique des processus d'écoulement à travers les échelles spatiales (depuis les parcelles jusqu'au cours d'eau : groupes de parcelles, tête de bassin, etc.). Or c'est précisément cette dynamique spatiale, souvent fortement influencée par les réseaux linéaires, que l'on cherche à appréhender.
- 3 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 type de modélisation a été choisi pour sa capacité à appréhender un système complexe par l'implémentation de règles d'interactions simples et faciles à comprendre (Langlois, 2002 ; Caillault, 2011). 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 sur l'origine des dynamiques spatiales des écoulements et sur leur variabilité temporelle (Servat, 2000 ; Reaney, 2008, Rakotoarisoa,

2014). L'approche "agent" permet, en effet, d'obtenir des informations détaillées sur les dynamiques hydrologiques à travers le paysage au cours d'un épisode pluvieux : trajectoires d'écoulements, interaction infiltration/écoulement, destin de chaque particule d'eau ou encore, origine de l'eau alimentant l'hydrogramme à l'exutoire (Reaney, 2008). Elle permet également de mettre en place, assez facilement, des scénarios d'aménagements et d'évaluer leurs conséquences sur les écoulements. Dans ce domaine, seuls trois travaux peuvent être cités :

1. les travaux de David Servat et plus globalement du projet Rivage sur le développement d'une approche multi-agents pour simuler les interactions entre les acteurs hétérogènes de l'infiltration et du ruissellement d'eau sur une surface de sol ;
  2. ceux de Sim Reaney sur le couplage d'un modèle physique avec des agents représentant des gouttes d'eau ;
  3. ceux de Mahefa Rakotoarisoa sur le développement d'un système multi-agent couplé à une fonction de production de type SCS\_Curve Number.
- 4 Dans une approche similaire, Delahaye *et al.* (2001) ont montré la pertinence des automates cellulaires (AC) pour mettre en évidence le poids de l'organisation spatiale de l'occupation du sol et de la morphologie des bassins versants sur les processus de ruissellement érosif. Néanmoins, l'automate cellulaire (*RuiCells*) qu'ils proposent, n'intègre pas les entités paysagères linéaires telles que les haies ou les routes (Langlois et Delahaye, 2002 ; Delahaye 2002, 2010 ; Douvinet, 2013). Ainsi, si les approches par SMA ou par AC ont montré toutes leur pertinence pour la modélisation des écoulements de surface, leur capacité à mettre en évidence le poids de la structure paysagère sur les dynamiques d'écoulement n'a jamais été exploitée. En prenant en compte l'organisation des objets linéaires dans l'espace, le modèle présenté ici vise à obtenir des indices permettant de quantifier l'impact de la structure paysagère sur les transferts hydro-sédimentaires<sup>1</sup>. Il s'agit ainsi de dépasser les indices classiques de densité de linéaires et d'occupation du sol qui demeurent couramment utilisés dans la caractérisation de la sensibilité des bassins versants aux processus de transferts hydro-sédimentaires.

## Développements méthodologiques

- 5 Le modèle a été créé sous *Netlogo* (Wilensky, 1999, 2004), version 5.0.3. La présentation du modèle suit ici le protocole ODD (*Overview, Design Concept and Details*) mis en place afin de standardiser la description des modèles individus-centrés et multi-agents (Grimm *et al.*, 2006, 2010).

### Vue d'ensemble (Overview)

#### Objectif

- 6 L'objectif du modèle est de mettre en évidence le rôle des entités linéaires sur les écoulements de surface dans les bassins versants agricoles fortement anthropisés. En plus de l'intérêt scientifique que présente le développement de ce système (pertinence des SMA pour mieux comprendre les dynamiques spatiales du ruissellement de surface), l'objectif est également d'ordre opérationnel avec la possibilité d'identifier les points stratégiques dans un bassin (haies limitant le ruissellement, fossés qui connectent au

cours d'eau, espaces connectés au cours d'eau...) tout en suivant en tout point de l'espace la dynamique, tant spatiale que temporelle, des processus de ruissellement de surface.

- 7 Pour cela, le modèle s'appuie sur une reproduction des écoulements de surface par une approche agent, c'est-à-dire par une 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. 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". D'autres simplifications ont été opérées pour avoir un modèle le plus simple possible (pas de prise en compte de l'occupation du sol, de la pédologie, de la géologie ou des flux sédimentaires par exemple).

### Entités

- 8 Deux types d'agents sont utilisés dans le modèle. Des agents mobiles, appelés "agentgouttes" et des agents spatialisés qui représentent chacun une portion de l'espace d'étude, les patches (nom donné aux cellules dans NetLogo)<sup>2</sup>.
- 9 Agentgoutte : Ce sont des entités individuelles qui se déplacent dans l'environnement de la simulation. Chaque "agentgoutte" contient un volume d'eau discret : autrement dit, les écoulements sont discrétisés en agents. Ces agents sont comparables aux "boules d'eau" (ou paquet d'eau) de Servat (2000) dans le sens où, à la différence des gouttes de pluie, leur existence se poursuit au-delà même du contact avec le sol. Les "agentgouttes" se déplacent dans un environnement qui est constitué de patches et avec lesquels ils interagissent. Le déplacement est conditionné par la variable "altitude" des patches (issue d'un modèle numérique de terrain). Les agents se déplacent itérativement de proche en proche en suivant la plus grande pente sauf s'ils se situent sur un patch identifié comme "fossé" ; dans ce cas, ils devront suivre la pente imposée par l'élément linéaire. Une fois arrivé à l'exutoire du linéaire l'"agentgoutte" se déplace sur le patch voisin de plus petite altitude. Si ce patch correspond à un fossé, alors l'agent reste dans un écoulement de réseau ; si ce n'est pas le cas, l'agent reprend un écoulement topographique. Chaque "agentgoutte" dispose de variables spécifiques mais qui peuvent ensuite évoluer au cours de la simulation :

#### Variables propres à chaque agent

*start\_patch* : nom du patch de départ ;  
*stock\_en\_eau* : quantité d'eau discrète (en mètre précipité, équivalent d'une lame d'eau précipitée) ;  
*distance\_parcourue* : distance totale parcourue au cours d'une simulation (en mètre) ;  
*distance\_jusqu'à\_un\_lineaire* : distance parcourue avant de rencontrer un patch de type linéaire (en mètre) ;  
*distance\_parcourue\_sur\_lineaire* : distance parcourue sur un linéaire (en mètre).

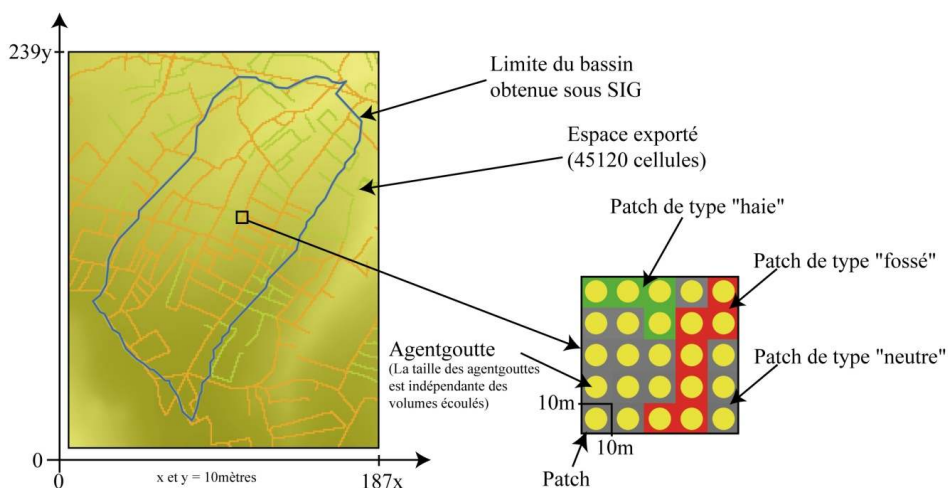
- 10 Patches : entités spatialisées (de forme carrée<sup>3</sup>) composant l'environnement de simulation (Figure 1). Dans cette première version du modèle, trois types de patches sont retenus<sup>4</sup> :
1. Les patches "haies" (couleur verte) : ils ont une valeur d'altitude systématiquement supérieure à celles de leurs voisins de types différents (fossé ou neutre) qui leur confère un

- rôle d'obstacle à l'écoulement (un "agentgoutte" ne se déplaçant que sur un patch voisin d'altitude inférieure) ;
2. Les patches "fossés" (couleur rouge) : ils ont toujours une altitude inférieure (environ 50 cm<sup>3</sup>) à celles de leurs voisins de types différents (haie ou neutre). Cette diminution de l'altitude des patches fossés favorise ainsi leur capacité à concentrer les "agentgouttes". Cette catégorie intègre également le réseau routier qui est considéré ici comme étant encaissé dans le versant ;
  3. Les autres patches sont dits "neutres" (aucune occupation du sol spécifique ne leur est attribuée). Majoritaires dans l'environnement de simulation, ces entités peuvent correspondre à toutes les autres entités composant la structure paysagère d'un bassin versant agricole : parcelles agricoles, mares, entrées de champs, zones urbanisées, cours d'eau, etc. Leur intégration future dans le modèle est envisagée.
- 11 Les patches possèdent, eux aussi, des variables qui leur sont propres. Certaines sont issues du travail préparatoire sous SIG (l'altitude par exemple) mais d'autres sont attribuées en début de simulation. Le terme de "patch linéaire" sera utilisé par la suite pour désigner les patches représentant une portion de réseau linéaire.

#### Variables propres à chaque patch

- *altitude* : valeur d'altitude issue d'un MNT (obtenue sous SIG)
  - *cible* : nom du patch voisin de plus petite altitude (obtenue sous SIG, valeur égale à *direction*)
  - *linear* : neutre (valeur numérique : 0), haie (10), fossé (20)
  - *flux* : nombre d'"agentgouttes" passés sur le patch au cours de la simulation
  - *exutoire* : vrai si le patch est identifié comme l'exutoire du bassin versant étudié
  - *proximite\_d'un\_lineaire* : vrai si l'un des voisins est de type linéaire
- + autres variables envoyées par l'"agentgoutte" en fin de simulation (distance parcourue...)

Figure 1: Capture d'écran de l'environnement de simulation sous Net Logo



## Echelles spatiales et temporelles

### L'espace

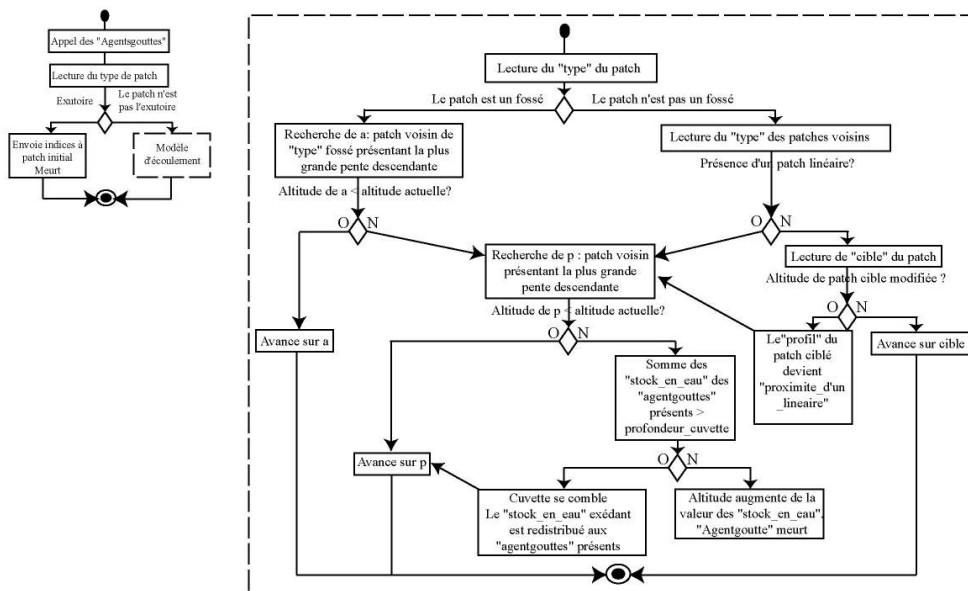
- 12 L'environnement de simulation est discrétisé en patches de 10x10 mètres. La discrétisation de l'espace, effectuée sous SIG se base sur les mailles carrées régulières d'un modèle numérique de terrain obtenu auprès de l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN). Les données composant l'espace d'étude sont présentées dans la partie *données en entrées*. La taille de l'environnement de simulation doit être plus grande que celle du bassin étudié (afin d'éviter tout problème lié aux effets de bordure) et de taille rectangulaire de façon à intégrer l'ensemble du bassin versant (Figure 1). Tous ces prétraitements (définition d'un environnement de travail et exportation des données) sont réalisés sous un système d'information géographique (SIG). La taille des cellules est fixée à 10 mètres, ce qui est un bon compromis entre précision et réalité du terrain (cette résolution présente aussi l'avantage de ne pas trop altérer la qualité des données d'entrée sans engendrer un trop grand nombre de cellules).

### Le temps

- 13 Les simulations se fondent sur les itérations de la plateforme *NetLogo*. Dans cette première version, le modèle est de type événementiel. Aucune fonction de transfert intégrant les vitesses de déplacement n'a été intégrée : à chaque itération, les "agentgouttes" se déplacent d'un patch à un autre situé dans un voisinage de Moore.

## Diagramme d'activité

Figure 2: Diagramme d'activité





## Éléments de conception (*Design concept*)

- 14 Les grands concepts du modèle sont présentés ci-dessous selon l'ordre établi par Grimm *et al.* (2006).

### Principes

- 15 En comparant les simulations avec et sans l'intégration des réseaux, on cherche à mesurer l'impact des réseaux linéaires sur le déplacement des agents. Les premières simulations sont dites "topographiques" (*i.e* sans les réseaux) : les "agentgouttes" se déplacent uniquement en fonction des valeurs "altitude" du MNT à partir du sous-modèle *Ecoule\_Ciblé*. Les contraintes à l'écoulement sont ensuite intégrées aux simulations (*i.e* avec les réseaux) et prises en compte par les "agentgouttes" dans leur déplacement (sous-modèles *Ecoule\_Topo* et *Ecoule\_Réseau*). On part donc du principe que les interactions entre les agents se limitent à deux fonctions : combler les cuvettes topographiques présentes dans l'environnement de simulation et adapter leur déplacement selon les contraintes linéaires. Chaque règle décisionnelle est appliquée aux "agentgouttes" c'est-à-dire à un niveau micro (ou local). De l'ensemble de ces interactions émerge la dynamique globale d'écoulement, et il est alors possible d'évaluer le poids des contraintes paysagères sur cette dynamique à l'aide de différents indices de sensibilité (détaillés ci-après).

### Emergence

- 16 Les simulations mettent en évidence les axes préférentiels d'écoulement, les changements induits par les réseaux, les espaces où les "agentgouttes" interagissent pour combler les cuvettes et les endroits où les agents quittent leur circulation de réseau pour un écoulement "topographique". Dans cette première approche, l'émergence produite au cours des simulations reste limitée. Mais l'intégration prochaine aux patches d'attributs "occupation des sols" et d'autres liés à des données "physiques" (pédologie, épaisseur de sol, antécédents hydro-climatiques, etc.) renforcera les interactions "agentgouttes" / patches, desquelles émergeront davantage de phénomènes non prévisibles (zones de ruissellement réel, prairies traversées par un écoulement, fossés saturés, etc.).

### Adaptation

- 17 Lorsqu'un "agentgoutte" se trouve sur un patch qui n'a pas d'exutoire (comme par exemple sur une cuvette topographique), il a la possibilité d'augmenter la valeur d'altitude d'un patch sur lequel il se situe grâce à la quantité d'eau qu'il transporte (variable *stock\_en\_eau*). Cette fonctionnalité, déjà utilisé par Darboux *et al.* (2002), permet de s'affranchir des problèmes des cuvettes fréquemment soulignés dans la littérature. Pour limiter le nombre de cuvettes présentes dans le MNT après l'intégration des réseaux de haies et de fossés, un traitement raster (fillsink) (Rakotoarisoa *et al.*, 2014) est initié en début de simulation et permet de combler artificiellement les cuvettes.

### Objectifs

- 18 Les "agentgouttes" ont pour seul objectif de se déplacer en fonction de la plus grande pente. Tant qu'un "agentgoutte" a la possibilité de se déplacer, il le fait. Seuls les agents

situés sur le patch exutoire ne peuvent pas se déplacer puisqu'il s'agit du patch ayant la plus basse altitude.

### Apprentissage

- 19 Au cours de la simulation, les "agentgouttes" enregistrent un certain nombre de données qui seront utilisées à la fin de chaque simulation pour obtenir différents indices spatiaux (par exemple, la distance parcourue). L'enregistrement de certaines données, comme l'identification du premier patch linéaire rencontré, ne peut se faire que sous certaines conditions dépendantes de l'expérience de l'agent au cours de la simulation. Par exemple, pour qu'un agent obtienne le nom du premier patch linéaire rencontré, deux conditions, dépendantes de son expérience, doivent être réunies : 1/ que celui-ci n'ait jamais rencontré de patch linéaire préalablement, 2/ que le patch sur lequel se trouve l'agent est bien identifié comme étant un patch linéaire.

### Perception

- 20 Les agents n'ont aucune connaissance de l'environnement global de simulation mais une vision limitée aux huit patches voisins (voisinage de Moore) et aux "agentgouttes" qui pourraient se trouver dessus.

### Interaction

- 21 Les "agentgouttes" interagissent avec les patches au cours de la simulation. Lorsque l'un d'eux se situe sur un patch "fossé", il se déplace préférentiellement sur un patch fossé voisin (d'altitude inférieure), si aucun patch fossé voisin n'a une altitude inférieure alors l'agent quitte le fossé et reprend un écoulement "topographique". Lorsque plusieurs "agentgouttes" se trouvent sur une cuvette ils interagissent entre eux pour la combler (cf adaptation).

### Stochasticité

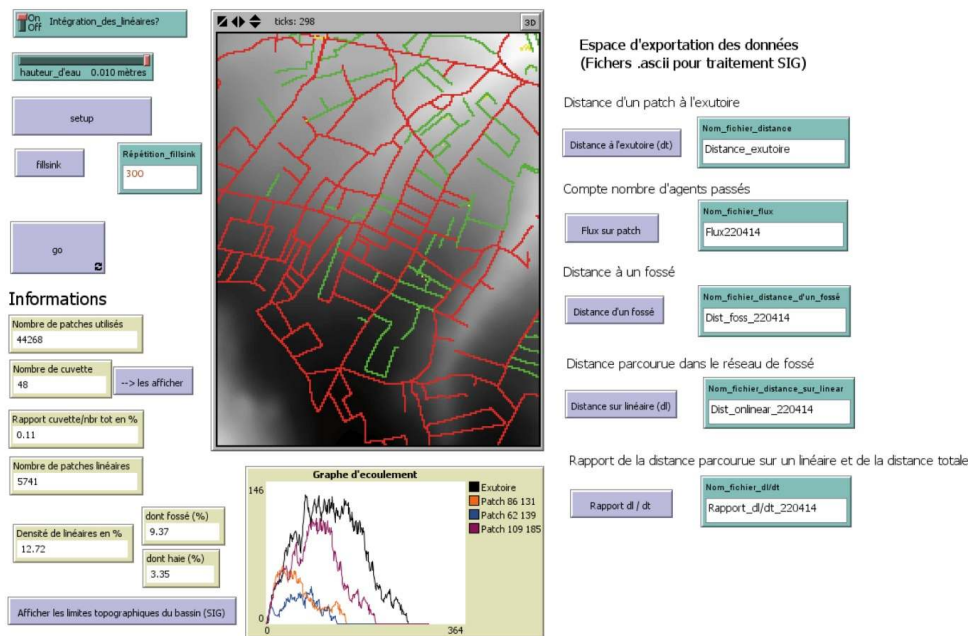
- 22 La stochasticité est rare dans ce modèle car les règles sont principalement déterministes. Seule exception : dans les sous modèles *Ecoule\_Topo* et *Ecoule\_Réseau*, si deux patches voisins ont la même altitude, c'est par un choix aléatoire que l'"agentgoutte" se déplace sur l'un d'eux.

## Détails (Details)

### Initialisation

- 23 A l'initialisation, il est possible d'intégrer ou non les contraintes linéaires. Chaque patch est ensuite affecté d'un "agentgoutte" : le nombre d'"agentgouttes" est donc identique à celui des patches. La densité d'"agentgouttes" n'est pas modifiable dans cette version. L'utilisateur a cependant la possibilité d'agir sur le *stock\_en\_eau* transporté par les agents. Bien que peu réaliste (puisque l'on peut générer de "très grosses gouttes"), cette option présente l'avantage d'éviter de générer un grand nombre d'agents et donc de diminuer la durée des simulations.

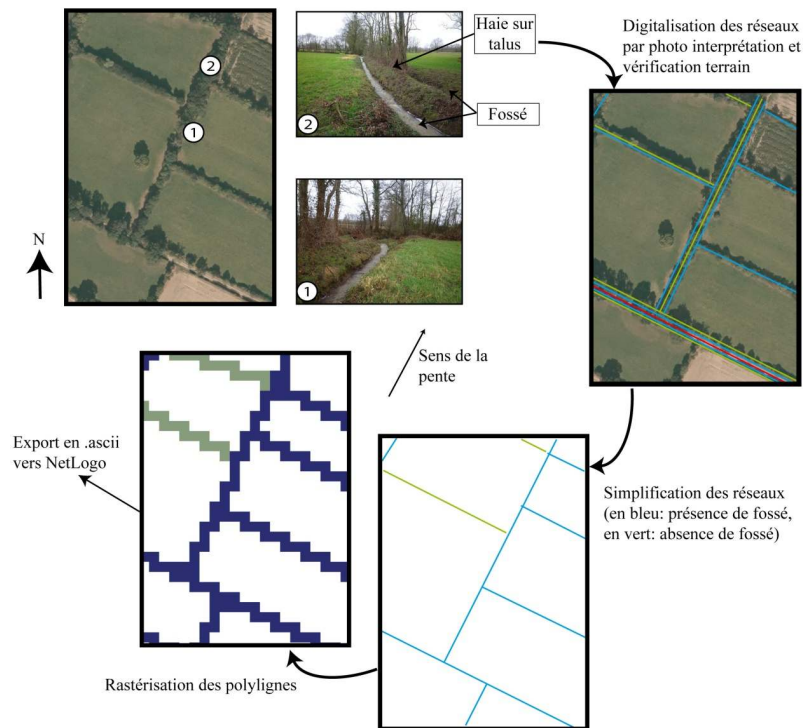
Figure 3: Capture d'écran de l'interface du modèle



### Données d'entrée

- 24 Différentes données sont utilisées en entrée du modèle (altitude, direction de la pente et position géographique d'entités spatiales (les réseaux de haies et de fossés)). Les données d'altitude et de direction de pente sont issues du modèle numérique de terrain (pas de 25 mètres ré-échantillonné à 10 mètres). Le fichier direction de pente indique pour chaque cellule le voisin de plus grande pente descendante (variable "cible"<sup>6</sup>) (Greenlee, 1987 ; Jenson et Domingue, 1988).
- 25 Les réseaux linéaires (Figure 4) ont été obtenus par un travail de terrain et par photo-interprétation des orthoimages de l'IGN. S'il est possible d'obtenir facilement les réseaux de haies (données "végétation" de la BDtopo de l'IGN ou par photo-interprétation), il n'existe pas de référentiel sur les réseaux de fossés car ces entités linéaires sont construites à la seule initiative des agriculteurs et donc référencées dans aucun registre (Carlier et De Marsily, 2004). Dans un premier temps, l'ensemble des réseaux est relevé dans toute sa complexité : routes, fossés, route et fossés associés, haies et fossés associés, talus et fossé associé, haie, haies sur talus, routes associées à haies sur talus etc. De cette diversité, une classification simple est opérée. L'échelle de sortie étant le pixel à 10 mètres, un seul élément est considéré. La présence ou l'absence d'un fossé est le seul facteur discriminant. Ainsi seules deux classes sont utilisées en sortie : haie et fossé. La classe haie rassemble tous les réseaux linéaires non associés à un réseau de fossé. La classe fossé correspond, au contraire, au réseau associé à au moins un fossé (Figure 4). Cette typologie permet ensuite de modifier sous Netlogo les valeurs « altitudes » des entités concernées et d'affecter des règles d'interactions spécifiques.

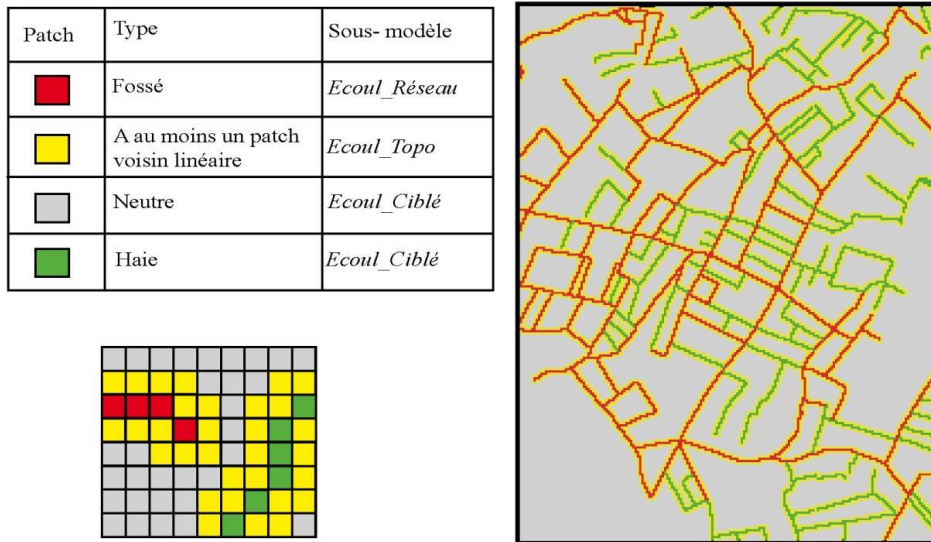
Figure 4: Procédure de rastérisation des données sous SIG



### Les sous-modèles

- 26 Trois sous-modèles ont été conçus pour paramétrer le déplacement des "agentgouttes". Le déplacement des agents, synchrone, varie suivant la nature du patch sur lequel se trouve l'agent (Figure 5). Le premier déplacement, appelé *Ecoule\_Ciblé* est strictement topographique<sup>7</sup>. Ce sous-modèle fait appel à la variable cible des patches : à chaque itération, l'"agentgoutte" prend connaissance de la valeur de la cible (*i.e.* nom du patch sur lequel il doit se déplacer), lui fait face puis va dessus. Les agents avancent ainsi à chaque itération jusqu'à atteindre l'exutoire du bassin.

Figure 5: Zone d'application des sous-modèles

Tableau 1: Code du sous-modèle *Ecoule\_Ciblé*

Code	Traduction
To <i>Ecoule_Ciblé</i>	Procédure <i>Ecoule_Ciblé</i>
face cible	L'"agentgoutte" fait face à sa cible
move-to cible	L'"agentgoutte" va sur sa cible
end	Fin de la procédure

- 27 Si le modèle *Ecoule\_Ciblé* offre l'avantage d'être rapide dans son exécution, les valeurs cibles utilisées ne peuvent pas être directement modifiées sous *NetLogo* lors de l'intégration des réseaux linéaires. En effet, l'intégration des réseaux linéaires modifie les valeurs cibles des patches situés à proximité (puisque les altitudes des patches linéaires sont modifiées). Aussi, pour conserver rapidité (d'exécution) et cohérence (hydrologique), le modèle *Ecoule\_Ciblé* a été couplé à *Ecoule\_Topo*, pour intégrer les valeurs d'altitude dans son algorithme de calcul. *Ecoule\_Topo* s'applique à tous les "agentgouttes" situés sur des patches possédant au moins un patch voisin linéaire (en jaune sur la figure 5), tandis que le modèle *Ecoule\_Ciblé* est utilisé par les agents sur les patches non linéaires.

Tableau 2: Code du sous-modèle *Ecoule\_Topo*

Code	Traduction

<pre>To <i>Ecoule_Topo</i> [let <i>p</i> one-of neighbors with-min [altitude] with-min [distance myself]   ifelse [altitude] of <i>p</i> &lt; altitude  [ face <i>p</i>   move-to <i>p</i> ] [ let <i>profondeur_cuvette</i> [altitude] of <i>p</i> - altitude  let <i>eau_disponible</i> sum [stock_en_eau] of turtles-here  ifelse <i>profondeur_cuvette</i> &gt;= <i>eau_disponible</i>  [set altitude altitude + stock_en_eau ]  [let <i>R</i> <i>eau_disponible</i> - <i>profondeur_cuvette</i> let <i>distribution_R</i> <i>R</i> / count turtles-here set altitude altitude + ( <i>profondeur_cuvette</i> + 0.00001) set stock_en_eau stock_en_eau - (stock_en_eau -<i>distribution_R</i> )] end</pre>	<p>Procédure <i>Ecoule_Topo</i></p> <p>Soit <i>p</i> un patch voisin dont les valeurs altitude et distance sont les plus petites des 8 patches voisins</p> <p>Si l'altitude de <i>p</i> est inférieure à l'altitude de l'"agentgoutte" alors</p> <p>Faire face à <i>p</i></p> <p>Avancer sur <i>p</i>...</p> <p>Sinon</p> <p>Soit <i>profondeur_cuvette</i> : la profondeur de la cuvette en mètre</p> <p>Soit <i>eau_disponible</i> : quantité totale d'eau transportée par les agents présents sur la cuvette</p> <p>Si la profondeur de la cuvette est supérieure à la quantité d'eau disponible alors</p> <p>L'altitude augmente de la somme des stocks d'eau des agents présents</p> <p>Sinon</p> <p>Soit <i>R</i> : quantité d'eau restant après comblement cuvette</p> <p>Soit <i>distribution_R</i> : <i>R</i> divisé par nombre d'agent présents</p> <p>L'altitude augmente de la valeur de la profondeur de la cuvette et de 0.00001</p> <p>Le stock d'eau de chaque agent diminue de <i>distribution_R</i></p> <p>Fin de la procédure</p>
---	--

- 28 Un troisième sous-modèle (*Ecoule\_Réseau*) permet de gérer le déplacement des "agentgouttes" dans les réseaux fossés en les forçant à se déplacer en fonction de la pente du fossé.

Tableau 3: Code du sous-modèle *Ecoule\_Réseau*

Code	Traduction
------	------------

<pre> To <i>Ecoule_Réseau</i> [let <i>a</i> one-of neighbors with [linear = 20] with-min [altitude] with-min [distance myself]   ifelse altitude &gt; [altitude] of <i>a</i>  [face <i>a</i> move-to <i>a</i>] [ let <i>a1</i> one-of neighbors with-min [altitude] with-min [distance myself]   ifelse [altitude] of <i>a1</i> &lt;= altitude  [face <i>a1</i> move-to <i>a1</i>] [let <i>profondeur_cuvette</i> [altitude] of <i>a1</i> - altitude  let <i>eau_disponible</i> sum [stock_en_eau] of turtles-here    ifelse      <i>profondeur_cuvette</i>      &gt;= <i>eau_disponible</i>  [ set altitude altitude + stock_en_eau ]  [ let <i>R</i> <i>eau_disponible</i> - <i>profondeur_cuvette</i>    let <i>distribution_R</i> <i>R</i> / count turtles-here  set altitude altitude + (<i>profondeur_cuvette</i> + 0.00001) set      <i>stock_en_eau</i>      <i>stock_en_eau</i> - <i>distribution_R</i> <i>Ecoule_Topo</i> ]]]  End </pre>	<p>Procédure <i>Ecoule_Réseau</i></p> <p>Soit <i>a</i> un patch voisin fossé dont les valeurs altitude et distance sont les plus petites des 8 patches voisins</p> <p>Si la valeur d'altitude du patch sur lequel est l'"agentgoutte" est supérieure à l'altitude de <i>a</i></p> <p>L'"agentgoutte" fait face à <i>a</i></p> <p>L'"agentgoutte" va sur <i>a</i></p> <p>Soit <i>a1</i> un patch voisin dont les valeurs altitude et distance sont les plus petites des 8 patches voisins</p> <p>Si l'altitude de <i>a1</i> est inférieure à l'altitude de l'"agentgoutte" alors</p> <p>L'"agentgoutte" fait face à <i>a1</i></p> <p>L'"agentgoutte" va sur <i>a1</i></p> <p>Soit <i>profondeur_cuvette</i> : la profondeur de la cuvette en mètre</p> <p>Soit <i>eau_disponible</i> : quantité totale d'eau transportée par les agents présents sur la cuvette</p> <p>Si la profondeur de la cuvette est supérieure à la quantité d'eau disponible alors</p> <p>L'altitude augmente de la somme des stocks d'eau des agents présents</p> <p>Sinon</p> <p>Soit <i>R</i> : quantité d'eau restant après comblement cuvette</p> <p>Soit <i>distribution_R</i> : <i>R</i> divisé par nombre d'agent présents</p> <p>L'altitude augmente de la valeur de la profondeur de la cuvette et de 0.00001</p> <p>Le stock d'eau de chaque agent diminue de <i>distribution_R</i> (retour comblement cuvette ?)</p> <p>Sous-modèle <i>Ecoule_Topo</i></p> <p>Fin de la procédure</p>
---	---

- 29 Il existe donc trois sous-modèles, les "agentgouttes" utilisent l'un des trois en fonction du patch sur lequel ils se situent (Figure 5).

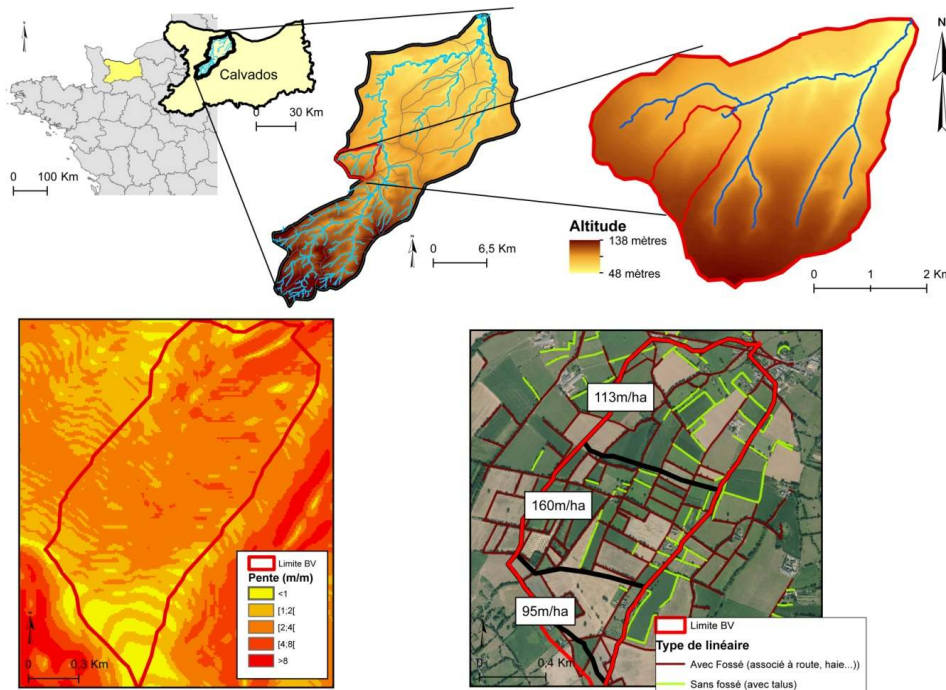
## Application du modèle et premiers résultats

### Présentation du bassin de la Bouderie, support des simulations

- 30 Le modèle a été testé sur un petit bassin versant bas-normand (< 200 hectares) dont les altitudes sont comprises entre 129 et 82 mètres. Ce bassin (La Bouderie) d'ordre 1, dans la classification de Strahler, s'inscrit dans le bassin versant de Lingèvres (17,6 km<sup>2</sup>), lui-même affluent de La Seulles<sup>8</sup>. La longueur du réseau d'écoulement permanent n'excède

pas 300 mètres mais l'extension des drains, via les réseaux de fossés, peut être importante en période de hautes eaux (jusqu'à 7 km). Le ruisseau de La Bouderie alimente celui du Pont Saint-Esprit qui draine le bassin de Lingèvres. Le bassin est principalement composé par des formations calcaires à gryphées et à bélemnites du Lias (Secondaire), qui sont recouvertes par des formations d'argiles à silex sur lesquelles s'est développé un sol peu épais (< 30cm), ce qui rend le bassin très sensible à d'importants surplus hydrologiques (réserves utiles inférieures à 65 mm, Le Gouée et Delahaye, 2008 ; Viel, 2012).

Figure 6: Localisation du bassin versant étudié, nature des pentes et des réseaux de haies / fossés



- 31 Les linéaires (tous confondus) sont nombreux dans ce bassin (127 mètres linéaires par hectares). Néanmoins, cet indice global, peu pertinent, masque une forte variabilité entre les extrémités du bassin et la partie intermédiaire : la densité varie entre 95 et 113 mètres linéaires par hectares dans les parties amont et aval, tandis qu'elle atteint plus de 160 mètres linéaires par hectare dans la partie centrale (Figure 6). L'occupation du sol, principalement agricole, explique ce contraste : les parties aval et amont présentent de grandes parcelles cultivées alors que dans la partie centrale, le maintien d'herbages permanents sur de petites parcelles favorise la forte densité de linéaires. Par ailleurs, la grande majorité de ces réseaux est constituée de haies sur talus associées à un fossé. La présence quasi systématique de fossés s'explique notamment par la présence de formations argileuses.

## Résultats

- 32 Dans une première simulation, les contraintes à l'écoulement ne sont pas intégrées : les agents suivent un écoulement uniquement topographique via le sous-modèle *Ecoule\_Ciblé*. Dans un second temps, les réseaux linéaires sont intégrés dans les simulations, les altitudes des patches identifiés comme fossés sont alors diminuées de 50 cm et celles des haies augmentées<sup>9</sup>.



### Résultats des simulations sans linéaire (sous modèle *Ecoul\_Ciblé*)

- 33 En interagissant avec la valeur "cible" des patches, les "agentgouttes" se déplacent de patch en patch jusqu'à atteindre l'exutoire. Une telle simulation est proche de ce que proposent des modèles de simulation d'écoulements tels que *STREAM* (Cerdan *et al.*, 2001) ou *RUICELLS* (Delahaye, 2002 ; Douvinet, 2008), à savoir la mise en évidence des axes d'écoulement. Les patches situés à l'amont de l'exutoire sont ainsi identifiés tout comme il est possible de connaître le nombre d'"agentgouttes" ayant circulé sur chacun des patches (Figure 7). Cette première approche est satisfaisante puisque : 1) les agents interagissent avec les valeurs "cible" des patches pour se déplacer et atteindre l'exutoire du bassin et 2) une superficie de bassin de 162 hectares est obtenue, ce qui correspond à la superficie calculée avec d'autres outils SIG.

### Résultats des simulations intégrant les linéaires

- 34 L'intégration des linéaires modifie ensuite fortement le parcours des agents. De nouveaux axes d'écoulement apparaissent et il est possible de délimiter l'aire d'alimentation du point exutoire, c'est-à-dire les espaces qui alimentent l'exutoire étudié et qui ne sont pas pris en compte par les outils classiques des SIG (Figure 7). Ainsi, la superficie alimentant l'exutoire par écoulement de surface est en réalité de 182 hectares (prise en compte des espaces dont les écoulements produits sont connectés grâce à la prise en charge par des réseaux). Les axes d'écoulement sont par ailleurs correctement reconstruits au cours des simulations (Figure 8 en bas) (photo 1 à 6) malgré la présence de quelques artefacts (cercles A, B et C). Au point C, par exemple, on observe une zone d'initiation d'un écoulement alors que la présence d'une mare à cet endroit permet, en réalité, le stockage des écoulements de surface empêchant ainsi la formation de ruissellement. En comparant avec les écoulements observés sur le terrain, ce sont 89 % des axes d'écoulements de surface qui sont cependant correctement retrouvés par les simulations. Cette bonne reproductibilité des processus par le modèle a été vérifiée au cours d'une dizaine d'épisodes ruisselants aux intensités différentes<sup>10</sup>. Majoritairement issus de processus hivernaux, certains de ces épisodes ont été particulièrement érosifs (par exemple, 54 tonnes de sédiments ont été exportés du bassin au cours de l'épisode du 8 mars 2013).

Figure 7 : Axes des écoulements sans (à gauche) et avec (à droite) réseaux linéaires

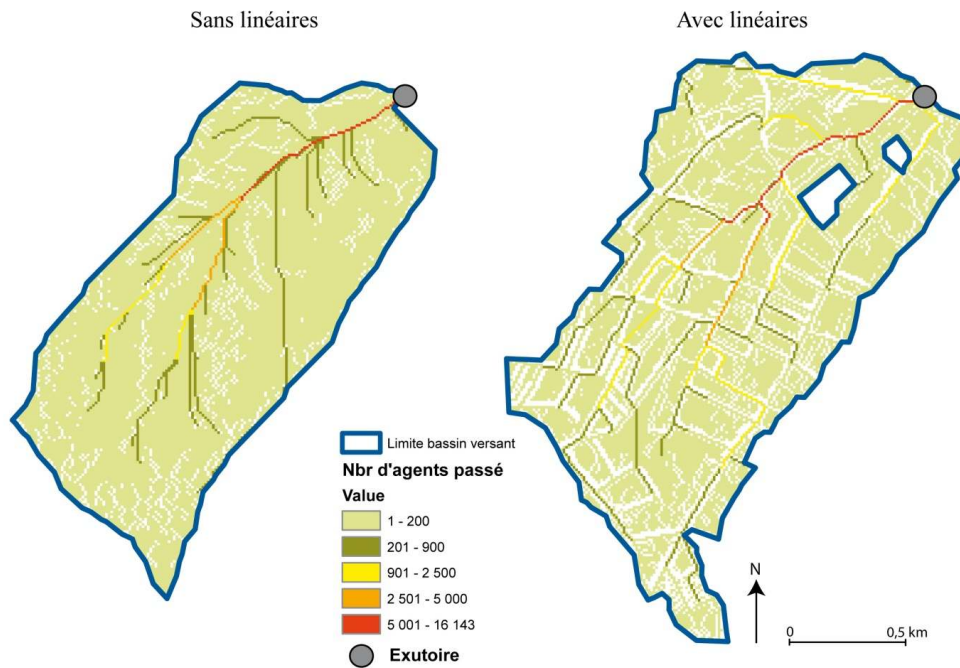
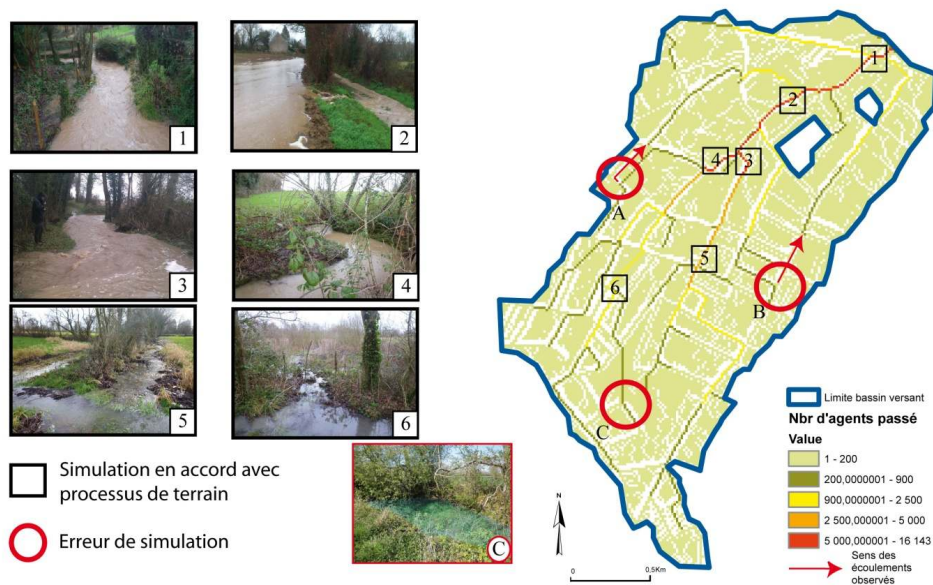


Figure 8: Validation de la simulation par retour terrain

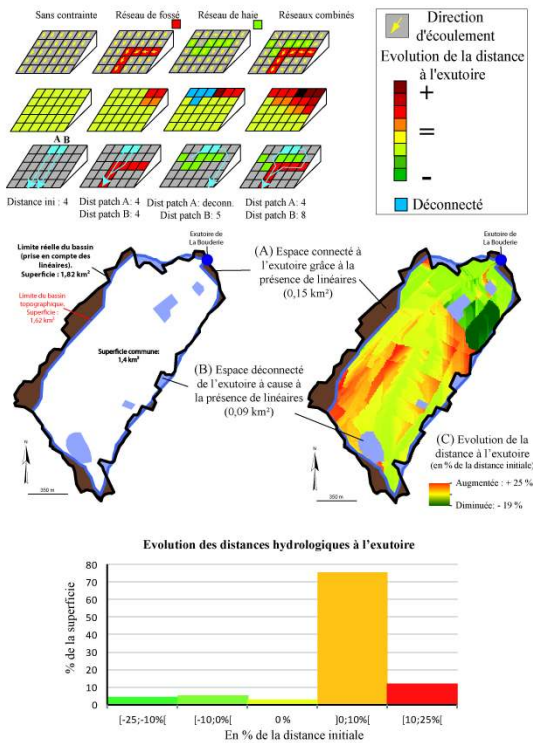


35 L'impact des réseaux anthropiques sur les écoulements de surface est ensuite exploré en analysant l'évolution des distances à l'exutoire de chacun des patches composant le bassin versant. Autrement dit, on cherche à savoir si les réseaux linéaires tendent à faciliter le transfert des écoulements de surface vers le cours d'eau (ce qui pourrait, dans ce cas précis, diminuer le temps de concentration et raccourcir le temps nécessaire à la gestion des crues) ou si, au contraire, ils augmentent la distance hydrologique des écoulements depuis les versants (accentuation des piégeages des écoulements hydriques et solides, diminution du pic de crue et des pertes en terre).

36 La distance à parcourir par un agent qui partirait d'un patch pour rejoindre l'exutoire est fonction de la pente mais aussi des contraintes qu'il rencontrera au cours de son trajet. Ainsi, en calculant l'évolution de la distance parcourue par chaque agent au cours d'une simulation avec et sans linéaire (ratio distance topographique / distance avec linéaires) il est possible de mesurer l'impact des réseaux linéaires sur les distances à l'exutoire de chaque patch et de dresser une typologie des espaces en fonction de l'évolution de ces distances. Trois types d'espaces peuvent ainsi être identifiés (Figure 9) :

- Tout d'abord, certains espaces sont connectés à l'exutoire dès lors que les réseaux linéaires sont intégrés (A). En l'absence de linéaires, les écoulements dont les zones d'émission se situent dans ces espaces ne rejoignent pas l'exutoire identifié mais s'écoulent vers un autre point. Ici, cela concerne 15 hectares qui sont connectés à l'exutoire et dont l'intégration n'est pas prise en compte par les outils classiques de délimitation de bassin versant (ex : outil "délimitation de bassin versant" proposé par les logiciels SIG) ;
- A l'inverse, d'autres espaces (9 hectares) sont déconnectés de l'exutoire (B) lorsque l'on intègre les réseaux linéaires. Cela s'explique par la présence de haies qui bloquent les écoulements ou bien par la présence de réseaux de haies et de fossés qui dévient les écoulements vers des bassins voisins (cas des espaces situés sur les marges du bassin) ;
- Enfin, la grande majorité des espaces du bassin, soit 140 hectares, reste connectée à l'exutoire après intégration des linéaires, mais la distance à parcourir par les agents pour atteindre l'exutoire est modifiée (C). Le gradient de couleur sur la carte (Figure 9) représente l'évolution de ces distances. La couleur rouge met en évidence les espaces dont la distance à l'exutoire a augmenté (la distance à parcourir par un agent est plus grande), en vert, les espaces dont la distance a diminué, enfin en jaune, les espaces dont la distance a peu évolué. Les espaces représentés en rouge ont une distance à l'exutoire qui a augmenté de plus de 10 % (en pourcentage de la distance initiale), avec un maximum de + 25 %. Les espaces en vert ont une distance qui a diminué jusqu'à 19 % de la distance initiale. Globalement, sur le bassin étudié, la majeure partie des patches a une distance à l'exutoire qui augmente du fait de la présence de réseaux linéaires.

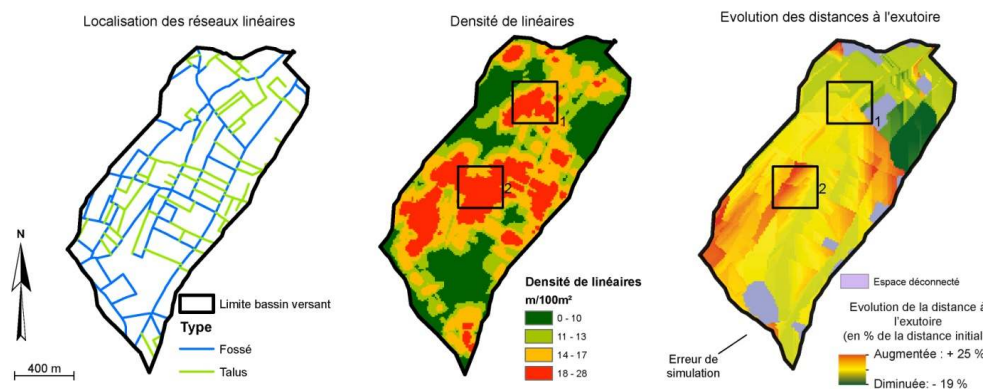
Figure 9: Evolution des distances hydrologiques à l'exutoire



- 37 La cartographie de l'évolution des distances à l'exutoire permet donc d'appréhender l'impact de la structure paysagère sur les écoulements de surface. Il est ainsi possible de discriminer les espaces d'un bassin versant en fonction de l'impact des réseaux linéaires sur le parcours des écoulements qu'ils émettent. Les résultats offrent l'avantage d'intégrer explicitement l'orientation des réseaux par rapport aux pentes ainsi que leur connectivité les uns par rapport aux autres. La comparaison de cette cartographie avec celle présentant les densités de linéaires est significative (Figure 10). Sur les focus 1 et 2, de densité équivalente avec plus de 18 mètres de linéaires par 100 m<sup>2</sup>, il apparaît très clairement que l'impact sur les distances à l'exutoire n'est pas le même. Dans le focus 1, les réseaux, principalement de fossés et orientés dans le sens de la pente, diminuent les distances hydrologiques à l'exutoire, alors que dans le focus 2, les distances augmentent du fait de la présence de haies perpendiculaires à la pente qui dévient les écoulements. Cette cartographie illustre les propos évoqués par de nombreux auteurs : plus que la densité, c'est l'organisation et la structuration dans l'espace des réseaux qui influence le plus les écoulements de surface (Mérot, 1998 ; Delahaye, 2002 ; Baudry et Jouin, 2003 ; Douvinet, 2008 ; Viel, 2014).
- 38 Cette cartographie permet ainsi de visualiser un premier indice obtenu grâce à la simulation multi-agents. Basé sur peu de données en entrées (MNT + réseaux linéaires) et transposable, cet indice fournit une première estimation du poids des réseaux sur les écoulements de surface au sein d'un petit bassin versant agricole. Ce dernier, en plus de livrer une première appréciation de la rugosité d'un paysage, est construit à partir d'informations spatiales pertinentes à une échelle inférieure. Il ouvre également des perspectives sur la capacité des systèmes multi-agents à proposer, en tant qu'outil d'aide à la décision, des indices simples de caractérisation de l'efficacité des réseaux sur le parcours des écoulements de surfaces : distance des parcelles à un réseau linéaire (permet

d'estimer les temps de concentration dans un réseau), poids de la circulation dans un réseau dans le déplacement des agents, points de passage d'un écoulement de surface à un écoulement de réseau, etc. De plus, les perspectives en matière de recherche sont importantes notamment autour du concept de connectivité. Ce concept, de plus en plus utilisé en hydrologie et géomorphologie, peine encore à être clairement défini et surtout à être caractérisé par des indices simples et transposables. Le modèle présenté ici montre toute son acuité pour être un outil pertinent dans ce sens. Cependant, la version actuelle ne prend pas en compte les vitesses d'écoulement et le type de surface, et ne permet donc pas de pouvoir mesurer finement les effets des réseaux sur les temps de parcours des écoulements. Car si ce premier indice permet d'évaluer l'évolution des distances, d'autres phénomènes ne sont pas pris en compte (accélération des vitesses en fonction de la nature du sol, effet d'étranglement dans les fossés, etc.) alors que leurs effets sur les temps de parcours sont très importants.

Figure 10: Mise en évidence du poids de la structuration des objets dans l'espace



39 Plusieurs difficultés ont été rencontrées durant la phase de développement du modèle. Nous les présentons ici brièvement pour conforter les choix qui ont été faits :

1. Grâce à différents établissements publics tels que l'Institut National Géographique les données nécessaires au modèle sont, en partie, accessibles (MNT, réseau de haies, occupation du sol...). En revanche, il est compliqué de s'affranchir du terrain pour recenser les réseaux de fossés. Par ailleurs, si les orthoimages de l'IGN offrent de bonnes informations sur l'utilisation du sol, un travail de terrain pour connaître les différents types de cultures en place doit être envisagé. Ainsi, tant que la technologie ne permettra pas d'obtenir rapidement et facilement toutes ces données, la méthode présentée restera semi-automatique. Les outils de la télédétection restent une piste ouverte pour automatiser le travail d'acquisition de données ;
2. L'intégration des réseaux linéaires dans la simulation modifie l'altitude des patches concernés, ce qui modifie directement la structure du MNT sous-jacent. Ainsi à l'initialisation, le nombre de cuvettes (patches ayant une altitude inférieure à leurs 8 voisins) est de 950<sup>11</sup>. Pour limiter ce nombre, un algorithme de calcul a été codé directement sous NetLogo (Rakotoarisoa *et al.*, 2014) afin de diminuer le nombre de cuvette à une cinquantaine, soit 0.1% du nombre total de patches. Même en réduisant à une cinquantaine de cuvettes, le MNT reste hydrologiquement incorrect et justifie le développement du sous-modèle *Ecoul\_Topo*, qui permet aux agents de gérer collectivement le problème des cuvettes (cf: adaptation) ;
3. Dans cette première approche, seuls les réseaux linéaires ont été intégrés. Il apparaît désormais indispensable d'intégrer d'autres entités du paysage (buse enterrée, mares, entrés

de champs...) et de l'occupation du sol pour tendre vers des simulations capables de mesurer avec finesse le poids du paysage sur les écoulements de surface.

## Conclusion

- 40 La structure paysagère et plus particulièrement les réseaux linéaires jouent un rôle important sur le parcours des transferts hydro-sédimentaires sur les versants en modifiant les chemins d'écoulements. Pour appréhender le rôle de ces réseaux sur les dynamiques d'écoulement un outil de modélisation sous une plateforme multi-agents (NetLogo) a été développé. En discrétisant les écoulements par un ensemble d'agents, dont on modélise le comportement, il est possible de reconstruire les écoulements de surface et de mesurer l'impact des éléments linéaires. Après s'être assuré du bon fonctionnement du modèle, un premier indice d'analyse spatiale a été présenté, à savoir l'impact des réseaux sur les distances à parcourir par les écoulements pour rejoindre l'exutoire d'un bassin. Les premières simulations montrent toute la pertinence des SMA comme outil d'évaluation du rôle de la structure paysagère sur les écoulements de surface. En analysant le rôle de chaque linéaire sur le parcours des écoulements, le modèle permet de démontrer que plus que la densité de linéaire dans l'espace, c'est leur organisation et leur structuration qui doivent être analysées. Cette hypothèse souvent expliquée de manière empirique trouve ici une réponse et offre surtout une visualisation de ces fines dynamiques spatiales. En cela les SMA sont des outils parfaitement adaptés. L'intégration prochaine des vitesses d'écoulement et de l'occupation du sol devrait permettre d'améliorer les résultats actuels notamment en définissant les zones susceptibles d'émettre du ruissellement et celles pouvant les limiter (prairie, bandes enherbées, etc.). A ce titre, le modèle développé est aussi un véritable outil d'aide à la décision, pouvant permettre de guider les changements opérés sur l'occupation du sol, de visualiser l'incidence de ces changements sur le fonctionnement global du bassin versant, ou même, dans une logique expérimentale, d'évaluer le rôle de l'organisation spatiale des réseaux et des aires productrices de ruissellement sur la réponse hydrologique et sédimentaire du bassin versant.

---

## BIBLIOGRAPHIE

Anselme B., Beck E., Marilleau N., Rousseaux F., Schmitt C., Vannier C., 2014, "Modèle Bestiole", *Fiche pédagogique, collectif MAPS*, 20p. URL : <http://maps.hypotheses.org/production-pedagogique-de-maps/modeles-mapsiens/modele-bestiole>.

Auzet A.V., 1987, "L'érosion des sols cultivés en France sous l'action du ruissellement", *Annales de Géographie*, Vol. 537, 529-556.

Baudry J., Jouin A., 2003, *De la haie aux bocages. Organisation, dynamique et gestion*, Inra Editions.

- 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,.
- Boiffin J., 1984, *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*, Thèse, Sciences Agronomiques, INA-PG.
- 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, 663-673.
- Branger F., 2007, *Utilisation d'une plate-forme de modélisation environnementale pour représenter le rôle d'aménagements hydro-agricoles sur les flux d'eau et de pesticides. Application au bassin versant de la Fontaine du Theil (Ille-et-Vilaine)*, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier.
- Caillault S., 2011, *Le feu, la brousse et la savane. Modélisation spatiale des dynamiques de paysages soudaniens (Burkina Faso)*. Thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie.
- 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, 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*, Vol. 285, 76-95.
- Cerdan O., Souchère V., Lecomte V., Couturier A., Le Bissonnais Y., 2001, "Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model: Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management", *Catena*, Vol. 46, 189-205.
- Charlier J-B., 2007, *Fonctionnement et modélisation hydrologique d'un petit bassin versant cultivé en milieu volcanique tropical*, Thèse de Doctorat, Université de Montpellier.
- 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*, Vol. 27, 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.
- Delahaye D., Guermont Y., Langlois P., 2001, "Spatial interaction runoff process", *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Dossiers, 12ème 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://cybergeo.revues.org/3795> ; DOI : 10.4000/cybergeo.3795
- Delahaye D., 2002, *Apport de l'analyse spatiale en géomorphologie. Modélisation et approche multiscalaire des risques*, Mémoire HDR, Volume 1, Université de Rouen.
- Delahaye D., Douvinet J., Langlois P., 2010, "Le bassin versant: de l'unité spatiale aux sous-unités fonctionnelles" in: Weisbuch et Zwirn, *Qu'appelle-t-on aujourd'hui les sciences de la complexité ? Langages, réseaux, marchés, territoires*. Vuibert Ed. 301-328

- 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.
- Douvinet J., 2008, *Les bassins versants sensibles aux « crues rapides » dans le Bassin Parisien – Analyse de la structure et de la dynamique de systèmes spatiaux complexes*. Thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie.
- 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, 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-Oudoux 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*, Vol. 24, 1433-1446.
- Greenlee D.D., 1987, "Raster and Vector Processing for Scanned Linework", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 53 (10), 1383-1387.
- Grimm V., Berger U., Bastiansen F., et al., 2006, "A standard protocol for describing individual-based and agent-based models", *Ecological Modelling*, 198 (1-2), 115-126.
- Grimm V., Berger U., DeAngelis D.L. et al., 2010, "The ODD protocol: a review and first update", *Ecological Modelling*, Vol. 221, 2760-2768.
- Jenson S.K., Domingue J.O., 1988, "Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54 (11), 1593-1600.
- 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, 76-85.
- Langlois P., Delahaye D., 2002, "RuiCells, Automate cellulaire pour la simulation du ruissellement de surface", *Revue Internationale de Géomatique*, Vol. 12, N°4. 461-487.
- Le Bissonnais Y., Torette J., Bardet C., Daroussin J., 2002, *L'érosion hydrique des sols en France*, Rapport INRA – IFEN, URL:<http://erosion.orleans.inra.fr/rapport2002/>.
- Le Gouée P. et Delahaye D., 2008, *Modélisation et cartographie de l'aléa érosion des sols et des espaces de ruissellement dans le Calvados*, Rapport d'étude (non publié).
- Levasseur F., 2012, *Structure du paysage et fonctionnement hydrologique : application aux réseaux de fossés en zone viticole méditerranéenne*, Thèse de doctorat, Centre international d'études supérieures en sciences agronomiques Montpellier SupAgro.
- Mérot Ph., Gascuel-Oudoux 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*, Vol. 12/1, 23-44.
- Moussa R., Voltz M., Andrieux P., 2002, "Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events", *Hydrological Processes*, Vol. 16, 393-412.



- Ouvry J.F., Richet J.B., Bricard O., Lhériteau 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. 68p.
- Rakotoarisoa M M., Fleurant C., Amiot A. et ali, 2014, "Système multi-agent pour la modélisation des écoulements de surface sur un petit bassin versant viticole du Layon", *Revue Internationale de Géographie*. Vol. 24/3/3, 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*, Vol. 33, 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*, Vol. 14 (3)
- 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.
- 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*, Vol. 206, 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*, Vol.15 (2) 8.
- 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.
- Treuil J.P., Drogoul A., Zucker J.D, 2008, *Modélisation et simulation à base d'agents. Exemple commentés, outils informatiques et questions théoriques*. Science Sup, Dunod/ IRD.
- 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.
- Viaud V., 2004, *Organisation spatiale des paysages bocagers et flux d'eau et de nutriments. Approche empirique et modélisations*. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes.
- Viel V., 2012, *Analyse spatiale et temporelle des transferts sédimentaires dans les hydrosystèmes normands. Exemple du bassin versant de la Seulles*. Thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie,
- Viel V., Delahaye D., Reulier R., 2014, "Impact de l'organisation des structures paysagères sur les dynamiques de ruissellement de surface en domaine bocager. Etude comparée de trois petits bassins versants bas-normands", *Géomorphologie*, Vol. 20, N°2, 175-188.
- Wilensky U., 1999, *Netlogo. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling*. Northwestern University, Evanston. URL : <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>.
- Wilensky U., 2004, "NetLogo : A Simple Environment for Modeling Complexity", *International Conference on Complex Systems*, May 16-21 2004. 10p.
- 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*, Vol. 10, 826-839.

## NOTES

1. Dans cette première version les processus sédimentaires ne sont pas intégrés à la modélisation.
2. Par la suite le terme de "patch" sera utilisé (patches au pluriel).
3. Plusieurs raisons justifient le recours à un maillage carré : discrétisation classique utilisé dans les MNT, formes géométrique gérée par NetLogo, simplicité des résultats en sorties. Bien que plus précis, les maillages triangulaires sont aussi plus complexes à utiliser.
4. Les choix effectués seront expliqués dans la rubrique 'données en entrée'.
5. Profondeur moyenne des fossés observées sur le terrain d'étude.
6. Après le premier calcul si l'algorithme ne trouve aucune cellule ou plusieurs il agrandit sa recherche pour n'en trouver qu'un seul.
7. On parle ici de déplacement topographique pour parler d'un déplacement uniquement basé sur les valeurs de la variable altitude des patches en opposition aux simulations intégrant les réseaux linéaires.
8. Bassin atelier suivi par le laboratoire LETG-Caen Géophen depuis 2007.
9. Les haies prennent une valeur d'altitude systématiquement supérieure aux valeurs d'altitude des patches voisins.
10. Episodes suivis les : 28/02/2010 ; 10/06/2010 ; 10/11/2012 ; 14/12/2012 ; 19/12/2012 ; 08/03/2013 ; 10/12/2013 ; 28/01/2014 ; 06/02/2014.
11. Initialement le MNT ne contient aucune cuvette car "nettoyé" sous SIG. En revanche, après intégration des réseaux linéaires, l'altitude des patches étant soit augmentée, soit diminuée, un nombre important de cuvette peut apparaître.

## RÉSUMÉS

De nombreux enjeux socio-économiques et environnementaux sont associés aux transferts hydro-sédimentaires qui s'organisent au sein des hydrosystèmes, depuis les parcelles agricoles jusqu'aux cours d'eau : pollution diffuse, diminution de la fertilité des sols, pertes en sol, crues turbides, etc. Si les conditions d'initiation de ces transferts sont bien connues à l'échelle de la parcelle agricole, les dynamiques d'écoulements qui se produisent sur les versants restent mal connues, et ce particulièrement dans les petits hydrosystèmes bocagers du nord-ouest de la France, où la mosaïque paysagère et notamment la présence plus ou moins importante de réseaux linéaires (haies, routes, fossés...) tend à complexifier leur dynamique spatiale. Connaître les conditions de transfert est pourtant nécessaire en vue d'une gestion intégrée des bassins versants. Aussi, cette étude propose d'utiliser la simulation multi-agents comme outils d'aide à la décision pour mieux appréhender le rôle des réseaux linéaires d'origines anthropiques sur le parcours des écoulements de surface. L'approche menée, dite ascendante, permet d'analyser l'importance des interactions locales qui ont lieu entre chaque entité linéaire pour mieux comprendre le comportement hydrologique global d'un bassin versant. Un premier indice d'analyse spatiale, caractérisant l'impact des réseaux linéaires sur le parcours des écoulements de surface, est proposé ici à partir des simulations numériques. Cet article ouvre également une discussion méthodologique en analysant la pertinence des systèmes multi-agents en tant

qu'outils de diagnostic et d'aide à la gestion des espaces sensibles aux processus de transferts hydro-sédimentaires.

Hydrosedimentary fluxes that run from agricultural plots down to the water streams are currently associated with many social, economic and environmental issues such as diffuse pollution, soil infertility, soil loss, floods, etc. While the genesis of these transfers are well-known at the scale of the agricultural plot, flow dynamics occurring on slopes remain poorly understood. This is especially the case in the small basins located in the north-western part of France, where the landscape mosaic, which includes linear networks (hedges, roads, ditches...), tends to complicate the processes. Analyzing the transfer conditions is important for a further integrated watershed management. Hence, in this paper, we propose to use a multi-agent system as a support decision tool to understand the role of anthropogenic linear networks on runoff pathways. We carried out a so-called bottom-up approach, to measure the effects of the local interactions between each linear element on the global hydrological behavior of the watershed. A first spatial analysis index, characterizing the impact of linear networks in the path of runoff, is constructed here from numerical simulations. The results of this study also tend to demonstrate the relevance of Multi-Agent Systems as diagnostic tools to the hydrosedimentary transfers and processes.

## INDEX

**Mots-clés** : réseaux viaires, bassin-versant, modélisation multi-agents, analyse spatiale, ruissellement

**Keywords** : road network, watershed, agent-based model, spatial analysis, runoff  
**geographyun** 908, 926, 250

## AUTEURS

### ROMAIN REULIER

Université de Caen Basse-Normandie – Laboratoire LETG- Caen-GEOPHEN – Esplanade de la Paix – 14 032 Caen Cedex 5 – France (romain.reulier@unicaen.fr)

### DANIEL DELAHAYE

Université de Caen Basse-Normandie – Laboratoire LETG- Caen-GEOPHEN – Esplanade de la Paix – 14 032 Caen Cedex 5 – France (daniel.delahaye@unicaen.fr)

### SÉBASTIEN CAILLAULT

Agrocampus-Ouest – CFR Angers – ESO Angers UMR CNRS 6590– 2, rue André le Notre-49045 Angers - France (sebastien.caillault@agrocampus-ouest.fr)

### VINCENT VIEL

Université Paris 7-Diderot – UMR CNRS 8586 PRODIG – 5 rue Thomas Mann – 75 013 Paris – France (vincent.viel@univ-paris-diderot.fr)

### JOHNNY DOUVINET

Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse – UMR ESPACE 7300 CNRS - France (johnny.douvinet@univ-avignon.fr)

**ABDELKRIM BENSAID**

Université d'Orléans – Laboratoire CEDETE EA : 1210 LLSH - France (abdelkrim.bensaid@univ-orléans.fr)