
Un système multi-agent pour la modélisation des écoulements de surface sur un petit bassin versant viticole du Layon

Mahefa Mamy Rakotoarisoa¹, Cyril Fleurant¹, Audrey Amiot¹, Aziz Ballouche¹, Pierre-Yves Communal¹, Alain Jadas-Hécart¹, Isabelle La Jeunesse^{1,2}, David Landry¹, Théodore Razakamanana³

1. UMR 6554 CNRS LETG – Angers LEESA, UFR Sciences, Université d'Angers
2 bd Lavoisier, 49045 Angers cedex 01, France

2. UMR 7324 CNRS CITERES, Université de Tours, France

3. Université de Toliara, Madagascar

RÉSUMÉ. L'analyse de la réponse d'un bassin versant à un évènement pluvieux et de la dynamique de ses flux constitue une question centrale dans la modélisation des milieux naturels. Classiquement la reconstitution d'un hydrogramme résultant d'une pluie donnée se fait, entre autres, à l'aide d'une fonction de production et d'une fonction de transfert. Cette étude propose une autre alternative en utilisant un système multi-agent couplé à une fonction de production de type SCS-Curve Number. L'approche consiste à utiliser des agents et des cellules qui agissent selon des règles spécifiques afin de décrire les processus d'infiltration et de ruissellement. Les résultats montrent que le modèle produit des simulations réalistes de l'écoulement au niveau d'un petit bassin versant expérimental de 2,2 ha avec un minimum de paramétrage. L'intérêt d'une telle méthode est la considération du phénomène au niveau local ainsi que la prise en compte du rôle spécifique des différentes entités naturelles intervenant de façon déterministe dans le cycle de l'eau. Une telle approche pourrait permettre d'aboutir à des modèles explicatifs et facilement transposables.

ABSTRACT. The analysis of the response of a catchment to rainfall event and its flow dynamics is a key issue in environmental modeling. Usually, hydrogram results from both a production function and a transfer function for a given rainfall event. The aim of this paper is to explore an alternative method by coupling a multi-agent system coupled and a production function based on the SCS- Curve Number. Agents and cells were used to act according to specific rules to describe infiltration and runoff processes. The results present realistic simulations of the model which need few parameters setting onto a small experimental catchment – 2.2 ha. The interest of such a method is to take into account local processes as well as the specific role of the different entities involved in the water cycle. Such an approach could lead to explanatory and versatile models.

MOTS-CLÉS : bassin versant, modélisation hydrologique, système multi-agent, automate cellulaire.

KEYWORDS: catchment, hydrological modeling, agent based modeling, cellular automata.

DOI:10.3166/RIG.24.307-333 © 2014 Lavoisier

1. Introduction

Ces dernières décennies, beaucoup de modèles ont été développés pour représenter et prédire l'écoulement de l'eau dans les rivières ou sur les versants. Certains modèles sont de simples descriptions empiriques des écoulements (Edijatno et Michel, 1989), d'autres essaient de décrire au maximum la complexité des phénomènes (Neitsch *et al.*, 2005). L'analyse du fonctionnement de ces écoulements peut être abordée de différentes manières.

La première approche est une représentation mathématique des processus. Il s'agit de représenter les écoulements par des équations mathématiques. Par exemple, l'écoulement à surface libre observé dans les rivières est régi par le système d'équations différentielles non linéaires de Barré de Saint Venant, comprenant une équation de conservation et une équation dynamique (Cunge, 1969). Modéliser ces écoulements revient à résoudre ces équations. Pour cela, les hydrologues cherchent souvent à les simplifier. Ce sont en général ces modèles plus ou moins simplifiés qui sont mis en œuvre dans les schémas de « routage » des modèles hydrologiques (Wang *et al.*, 2006 ; O'sullivan *et al.*, 2012). Avec la montée en puissance de l'informatique et de ses ressources calculatoires, les méthodes pour résoudre numériquement ces équations ne cessent de s'accroître (Chang *et al.*, 2011 ; Hernandez *et al.*, 2012). La seconde approche peut être appelée « analyse du modèle boîte noire ». Ces modèles ne cherchent pas à identifier ou à comprendre les processus hydrologiques. Des paramètres sont alors utilisés pour calibrer le modèle et dans la plupart des cas ces paramètres n'ont pas de signification physique (Jain et Srivasulu, 2006 ; Makropoulos *et al.*, 2008).

Concernant la prise en compte des bassins versants, les modèles hydrologiques cherchent à connaître leur fonctionnement pour en prévoir les réponses. Ils essaient donc de reconstituer et d'anticiper les comportements du bassin en modélisant les composantes du cycle de l'eau. Classiquement ces modèles sont composés de deux fonctions principales : une fonction de production et une fonction de transfert. La fonction de production partage la composante de la pluie brute en une partie qui ruisselle et en une partie qui s'infiltré. La fonction de transfert transforme le ruissellement de surface en débit à l'exutoire, elle distribue donc l'eau de surface dans l'espace et dans le temps. Il existe des fonctions de productions classiques comme les méthodes de Green-Ampt et Horton qui calculent l'infiltration (Beven, 2004 ; Van den Putte *et al.*, 2013) ou la méthode du SCC-Curve Number (SCS, 1972) qui calcule directement le ruissellement. De même, on trouve des fonctions de transfert simples comme la méthode de l'hydrogramme unitaire (Sherman, 1932) ou plus élaborées puisque basées sur des variables hydro-géomorphologiques (Rodriguez-Iturbe et Valdès, 1979 ; Cudennec *et al.*, 2004 ; Fleurant *et al.*, 2006) qui sont des fonctions de transfert géomorphologiques.

L'échelle spatiale utilisée par les modèles hydrologiques permet de les classer en deux catégories : les modèles globaux et les modèles distribués. On parle de modèles globaux quand il n'y a pas de considérations concernant la variabilité de l'espace. Le

bassin réagit dans sa globalité aux forçages climatiques. La prise en compte de la fonction « organisation » se fait d'une manière simplifiée puisque aucune répartition spatiale n'est prise en compte. On dispose ainsi d'une unité homogène réagissant d'une manière globale par rapport aux autres composantes. Ainsi la variabilité spatiale des systèmes qui participent aux phénomènes hydrologiques et à l'hétérogénéité du cadre géographique sont réduites à des considérations globales, c'est le cas de GR4J ou CEQUEAU qui considèrent une seule unité de production (Edijatno et Michel, 1989 ; Perrin *et al.*, 2003). Pour les modèles distribués, on parle de discrétisation de l'espace, car le bassin est divisé en surfaces élémentaires sur lesquelles on peut simuler son comportement de façon homogène. On peut faire cette discrétisation de plusieurs manières. La plus utilisée est le découpage par mailles carrées emboîtées comme pour le modèle hydrologique maillé (MHM ; Batarady, 1984 ; Randriamaherisoa, 1993). Elles peuvent également être regroupées en classe dont le fonctionnement hydrologique est considéré comme identique. Par exemple pour le Soil and Water Assessment Tools (SWAT ; Arnold, 1994), on parle d'unité de réponse hydrologique (URH) qui sont des unités homogènes en termes de végétation et de pédologie (Neitsch *et al.*, 2005). Actuellement, la plupart des modèles hydrologiques distribués sont couplés avec un SIG (système d'information géographique) pour permettre d'analyser la variabilité spatiale des processus (Chen *et al.*, 2009 ; Paiva *et al.*, 2011).

Plus récemment, les méthodes dérivées de l'intelligence artificielle distribuée offrent une autre alternative de modélisation du transfert des flux dans un bassin versant. Avec l'augmentation de la capacité mémoire des ordinateurs et le développement croissant des outils d'analyses spatiales comme le SIG, ces approches offrent de grandes possibilités à l'égard de la modélisation hydrologique. Au lieu d'intégrer numériquement la solution d'une équation globale (comme le font les différences finies par exemple), ces systèmes décrivent et calculent les processus à une échelle locale. Le comportement global émerge alors de ces processus locaux (Nicholas, 2005). Les formulations traditionnelles pour les résolutions des équations ne sont donc pas intégrées dans le modèle.

L'une des approches les plus utilisées pour simuler l'écoulement des flux dans un bassin versant est l'automate cellulaire (Van de Wiel *et al.*, 2007 ; Langlois, 2010). L'utilisation de l'automate cellulaire est un champ assez récent de la modélisation en géographie et plus encore en hydrologie. L'un des premiers modèles à base d'automates cellulaires appliqués à la simulation des écoulements a été développé par Murray et Paola (1994). Il comprenait à la fois une représentation de la géomorphologie et une application de l'hydrologie, mais le pas de temps réel n'était pas explicitement inclus dans le modèle. Les principes de base de la modélisation par automates cellulaires sont basés sur la représentation de l'espace par un réseau de cellules qui interagissent – par exemple pour simuler l'acheminement de l'eau et des sédiments – en utilisant des règles simples, souvent basées sur des lois physiques. Les travaux de Murray et Paola (1994) ont été suivis par l'application de nombreux modèles d'automates cellulaires dans une grande

variété d'environnements fluviaux y compris les cours d'eau de montagne ou les méandres de rivières (Coulthard *et al.*, 2000, 2002, 2005 ; Thomas et Nicolas, 2002 ; Thomas *et al.*, 2002 ; Murray et Paola, 1997, 2003). Parsons et Fonstad (2007) ont combiné l'équation de Manning et la conservation de masse pour permettre une interaction suffisamment complexe pour représenter le mouvement de l'eau dans une rivière. L'équation de Manning permet de calculer le temps nécessaire à chaque cellule pour permettre au volume d'eau local de se déplacer vers une cellule voisine, ce qui représente la règle de transition temporelle de l'automate. On trouve une approche similaire dans le modèle LISREL (De Roo *et al.*, 2000) qui est utilisé pour la modélisation des bassins versants de plaines inondables. Les auteurs utilisent néanmoins une approximation de l'onde cinématique pour les écoulements dans les canaux. Cette approche est aussi similaire à celle de Favis-Mortlock (1998) et Favis-Mortlock *et al.* (2000) mais cette fois-ci pour la simulation de l'évolution de l'érosion. Toutefois ce modèle d'érosion ne prend pas en compte l'infiltration et l'effet « splash ». Crave et Davy (2001) ont présenté une technique numérique pour modéliser la dynamique de l'érosion et de la sédimentation sur des échelles de temps géologiques. Thomas et Nicolas (2002) ont développé une extension au modèle de Murray et Paola (1994), pour une simulation plus réaliste de la dynamique de l'écoulement de l'eau dans les systèmes fluviaux. RuiCells (Langlois et Delahaye, 2002) a été développé pour la simulation des phénomènes de ruissellement érosif au sein de petits bassins versants et pour des phénomènes de crues turbides intenses. RuiCells associe un maillage triangulaire, plus précis pour la simulation des écoulements. Ting *et al.* (2009) a appliqué son modèle à base d'automates cellulaires sur le ruissellement des versants et l'érosion causée par des événements pluvieux en insistant sur l'importance de la taille des cellules et du pas de temps.

Tous les modèles cités précédemment utilisent l'intelligence artificielle distribuée et sont dit à automates cellulaires. Par définition, un automate cellulaire consiste en une grille régulière de « cellules » contenant chacune un « état » choisi parmi un ensemble fini et qui peut évoluer au cours du temps. Ils utilisent un système de composants localisés. Ces composants, appelés cellules, sont spatialement juxtaposés, remplissant ainsi l'espace et sont donc immobiles. Afin d'avoir une autre vision des dynamiques temporelle et spatiale de l'écoulement dans un bassin versant, on présente dans cette étude un modèle exploitant une autre entité : l'agent. Contrairement à la cellule, l'agent est mobile et son environnement va changer au cours de ses déplacements. Sa structure de voisinage peut varier dans le temps et lui permettre d'avoir une grande souplesse comportementale. Sur un automate cellulaire, le voisinage d'une cellule est une structure invariante du système, en revanche, cette structure devient une dynamique du système dans un modèle à base d'agents. Un automate cellulaire (AC) peut donc être considéré comme un cas particulier d'un système multi-agent (SMA). L'agent peut être un élément d'un composant donné à l'instant t_1 et passer dans un autre composant à l'instant t_2 . Il doit être capable de recalculer à tout instant ses composants internes, le composant hôte sur lequel il se situe et les composants de ses voisins. Il doit également pouvoir adapter ses fonctions comportementales en conséquence. Si un

agent change d'environnement, il doit être également capable de modifier de comportement selon le milieu avec lequel il interagit. Un système composé d'agents est donc plus générique qu'un système cellulaire (Langlois, 2010). On trouve essentiellement ce concept basé sur les agents, dans les modèles de gestion des ressources ou dans les simulations de comportements sociaux (Yang, 2009). Les modèles multi-agents ont surtout été développés pour les sciences humaines et sociales, on ne trouve pas beaucoup de ces modèles pour simuler les écoulements des flux d'eau et de sédiments. Toutefois, Reaney (2008) a utilisé les techniques de modélisation à base d'agents en hydrologie. Il a pu ainsi déterminer les répartitions spatiale et temporelle de l'origine des flux dans les bassins versants semi-arides. Des « agents hydrologiques » représentant les flux d'eau ont alors pu être utilisés pour retracer le chemin parcouru par l'eau sur le bassin versant. Avec les informations sur leur environnement local, ces agents peuvent rester dans la cellule courante, s'infiltrer dans le sol ou encore s'écouler vers une cellule voisine.

Dans cet article, nous présentons un modèle utilisant ces agents hydrologiques dans un environnement qui évolue selon une approche d'automate cellulaire.

2. Matériels et méthodes

2.1. Implémentation et construction du modèle

Ce modèle hydrologique à base d'agents et d'automates cellulaires a été développé avec le logiciel Netlogo (Wilensky, 1999) qui utilise le langage de programmation informatique multi-paradigme Logo. NetLogo est un logiciel libre et *open source*, sous licence GPL, très utilisé pour modéliser les systèmes complexes. Il est écrit en Scala et Java et fonctionne sur la machine virtuelle Java. Et tout comme le Java, la nature de la programmation utilisée dans Netlogo est orientée objet. Le langage d'instructions possède une syntaxe très adaptée pour définir le comportement des agents simulés et est particulièrement facile à prendre en main. De plus, NetLogo offre un affichage en deux ou trois dimensions permettant de mieux distinguer les agents mobiles des cellules du maillage spatial sur lesquelles ils se déplacent et interagissent.

D'autres langages de programmation peuvent fournir de meilleures performances et des simulations plus rapides surtout pour les calculs intensifs au niveau de chaque cellule et de chaque agent. L'ajout de nouvelles fonctions et l'utilisation du modèle sur des bassins versants plus grands nécessiteraient un langage plus puissant mais dans cette première phase de développement, Netlogo s'est avéré parfaitement adapté.

2.2. Introduction de la plate forme de modélisation

Le modèle hydrologique multi-agent nécessite des données minimales pour simuler l'écoulement des eaux de surface de la zone d'étude. Ces données sont introduites principalement sous forme de couches raster. Le site de notre étude est un petit bassin versant viticole expérimental de 2,2 ha (figure 1) installé pour suivre les transferts de pesticides lors du ruissellement (La Jeunesse *et al.*, 2010a). Un modèle numérique de terrain (MNT La Jeunesse *et al.*, 2010b) d'une résolution de 10 m² permet de déterminer les limites du bassin versant ainsi que le calcul des pentes (figure 2). Le calcul des pentes est essentiel pour définir le mouvement des agents, c'est-à-dire les directions d'écoulement. Une autre couche raster est aussi implémentée, il s'agit de la grille des paramètres Curve Number (CN) qui est utilisée pour calculer le volume ruisselé et le volume infiltré au niveau de chaque cellule et à chaque pas de temps. Une valeur de la rugosité moyenne est définie pour l'ensemble du bassin versant et est utilisée dans la formule de Manning pour calculer la vitesse de déplacement des flux. Il est tout à fait possible d'établir une grille distribuant spatialement cette rugosité afin qu'elle soit différente pour chaque type d'occupation de l'espace. Des données de précipitations – intensité des pluies à chaque pas de temps – sont communiquées au modèle pour décrire les événements pluvieux. Ces données proviennent d'une station de mesures munie d'un pluviomètre à augets basculeurs situé sur le bassin versant et dont les données sont stockées dans un data logger type logosens et sauvegardée tous les 15 jours par l'équipe. Le MNT constitue le principal support du modèle hydrologique et une résolution très fine de 0,5 m a pu être obtenue par la réalisation de la mesure de 2083 points au théodolite électronique (La Jeunesse *et al.*, 2010a). L'interpolation des points a été réalisée par la méthode de la pondération par l'inverse de la distance (Inverse Distance Weighting – IDW) sous le logiciel ArcGIS. Les puits ont également été comblés sous ArcGIS. Si le MNT corrigé englobe l'ensemble du bassin versant, les simulations des précipitations ne se font que sur les cellules appartenant au bassin versant. Cette méthode minimise le nombre de cellules utilisé et permet de réduire le temps de calcul. Ainsi on identifie les cellules qui se retrouvent au milieu d'autres cellules et qui ont toutes une valeur d'altitude plus grande qu'elles. Afin de permettre aux gouttes d'eau de ne pas être piégées dans ces trous, on les supprime en augmentant la valeur d'élévation de manière à permettre à l'eau de s'écouler dans la bonne direction.

Pour les simulations, des événements spécifiques et caractéristiques du bassin versant ont été choisis afin de pouvoir les comparer avec les flux réels. Les données de débits observés proviennent d'une station de mesures, située à l'exutoire du bassin versant. Cette station contient un canal jaugeur de type venturi suivi d'un canal d'approche qui sert à tranquilliser le débit en amont du dispositif de mesure et à faire passer le régime de torrentiel à fluvial, condition indispensable à la mesure du débit à l'aide d'un canal jaugeur. La mesure des hauteurs d'eau est réalisée par un limnimètre à pression encore appelé « bulle à bulle ». La mesure des variations de

pression causées par les changements de niveau d'eau permet d'en déduire la hauteur d'eau. Ces hauteurs sont exprimées en mètre.

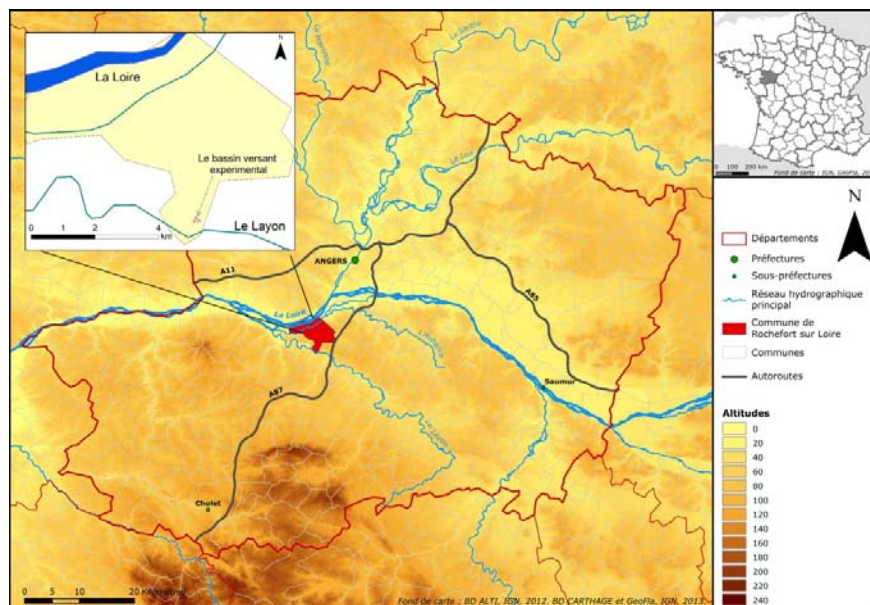


Figure 1. Localisation du site d'étude

Pour la pluviométrie, le bassin expérimental dispose d'un pluviomètre à augets basculeurs, les précipitations ne s'écoulent pas directement dans un récipient collecteur mais passent d'abord dans un auget qui permet l'enregistrement automatique du volume de précipitations qui peut aussi être exprimé en lame d'eau puisque l'on connaît la section de réception. Chaque basculement des augets équivaut à une hauteur d'eau précipitée de 0,2 mm. La précision est donc de 0,2 mm. Chaque fois qu'un auget se remplit cela provoque une impulsion électrique dirigée vers la station d'acquisition. La somme des impulsions donne la hauteur d'eau précipitée en fonction d'une durée. Le système d'acquisition et de transmission de données (Le Logosens) permet de récupérer les données. A partir d'un logiciel nommé HYDRAS et grâce aux différents capteurs, on peut obtenir les données pluviométriques et hydrométriques à différents pas de temps (30 secondes à 15 minutes). En ce qui concerne nos simulations on a adopté le pas de temps le plus précis possible c'est-à-dire 30 secondes.

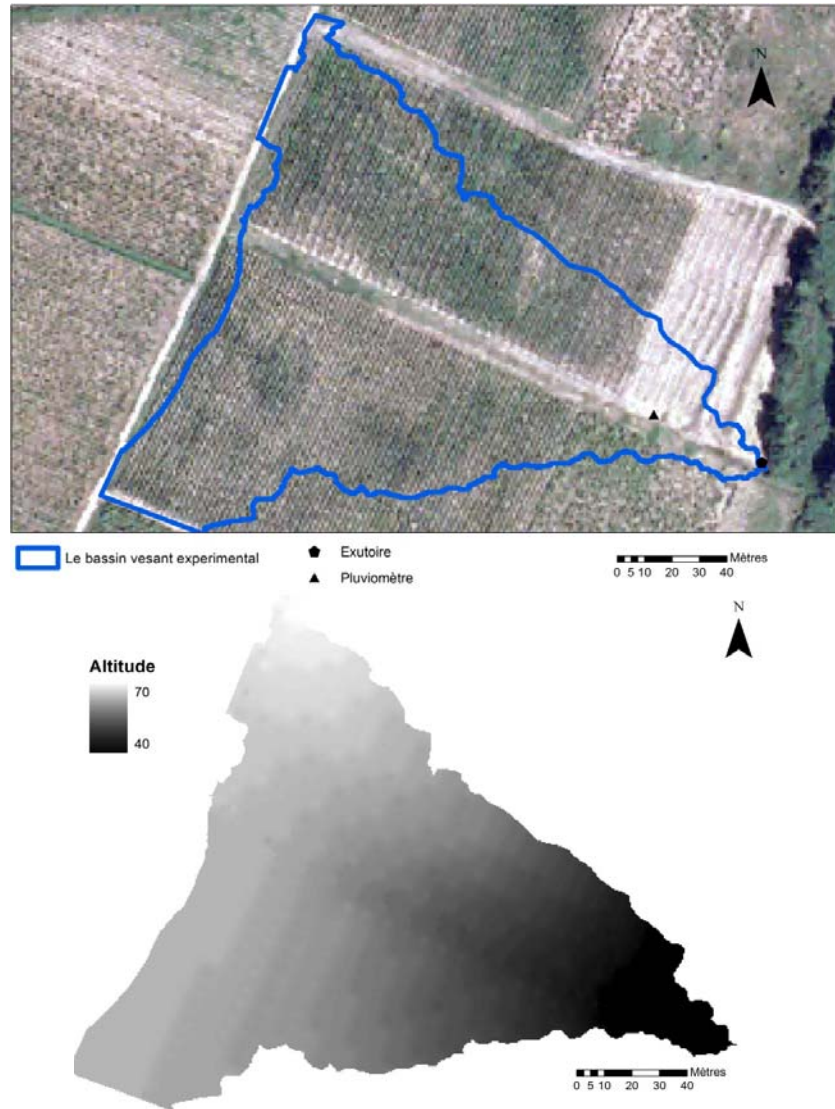


Figure 2. Présentation du bassin versant et des parcelles expérimentales sur la BD Ortho 2008 (en haut) et représentation du modèle numérique de terrain (en bas)

2.3. Construction du modèle multi-agent : règles de transition

Les modèles à base d'automates cellulaires sont classiquement construits à partir des composantes suivantes : un réseau de cellules, le choix de la définition de la zone de « voisinage locale », des « règles de transition », c'est-à-dire les règles qui

déterminent les changements des propriétés des cellules et des agents, ainsi que les conditions aux limites de la zone. Chacun de ces éléments influence l'état d'une entité (cellule ou agent) individuelle et à son tour le comportement global du système. Dans notre modèle, la prise en compte d'agents nous impose d'ajouter d'autres composants plus spécifiques comme des règles simples de déplacement. En effet, la localisation spatiale d'un agent n'est pas la même à chaque instant, non seulement ses coordonnées spatiales changent, mais également son environnement local et son voisinage. Il faut aussi prendre en compte les interactions cellule-agent et la notion d'appartenance d'un agent à une cellule. Notons que la cellule utilisée dans le modèle est une entité surfacique de forme carrée, elle est donc localisée par les coordonnées spatiales entières de son centre, contrairement à l'agent qui est une entité ponctuelle possédant des coordonnées réelles propres. Un agent peut donc se trouver sur une cellule sans forcément être sur son centre et n'a donc pas les mêmes coordonnées que sa cellule d'appartenance. Ceci permet de donner à l'agent plus de liberté de mouvement. L'agent se déplace de façon indépendante quel que soit le pas de temps choisi.

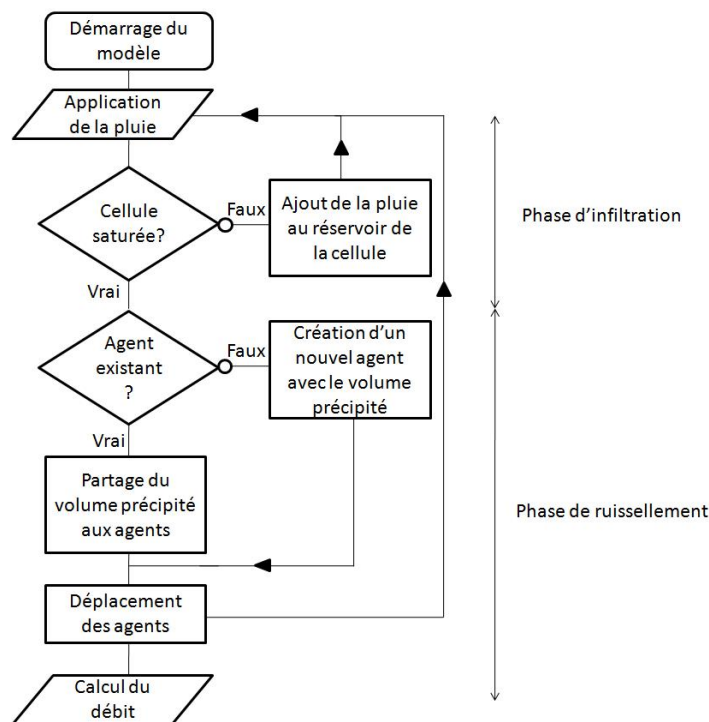


Figure 3. Représentation simplifiée des différentes phases lors d'une simulation

De manière générale les simulations effectuées par le modèle se distinguent en deux phases (figure 3) : une phase d'infiltration utilisant surtout des règles appliquées à la cellule et une phase de ruissellement mettant en scène les agents hydrologiques. Si on veut parler de classe d'entités utilisées dans chaque phase, il y aura les agents hydrologiques et les cellules représentant le bassin qu'on nommera « cellule terrain ». Nous distinguons quand même la cellule exutoire qui aura un comportement différent des autres cellules (figure 4).

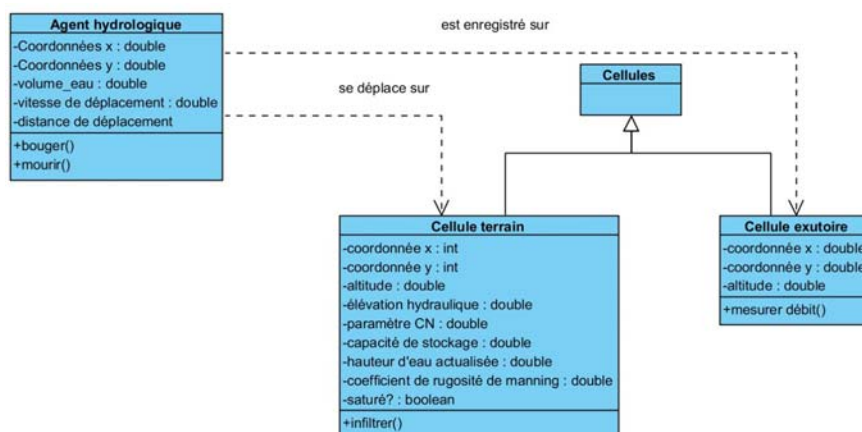


Figure 4. Diagramme des classes d'entités intervenant dans le modèle

2.3.1. Propriétés et rôles des composants du réseau cellulaire

Le modèle numérique de terrain permet de créer un réseau de cellules carrées à deux dimensions qui englobe l'ensemble du bassin. On parle toujours de système à deux dimensions même si on possède l'information de l'élévation pour chaque cellule. En effet, chaque cellule appartenant au réseau sera localisée à partir de ses deux coordonnées spatiales. La structure maillée est créée à partir d'une résolution spatiale de 0,5 m. Chaque cellule possède donc deux coordonnées spatiales, une valeur d'élévation du terrain, un coefficient de rugosité, une valeur de la hauteur d'eau actualisée au niveau de la cellule et un paramètre qui calcule le taux de ruissellement et le taux d'infiltration. Ces valeurs peuvent varier dans l'espace et le temps.

Le voisinage des modèles à base d'automates cellulaires définit la zone qui influence le comportement d'une cellule. L'état de chaque cellule au cours du temps $t+1$ est déterminé, en partie, par l'état d'une cellule voisine au temps t . Le voisinage est donc le groupe de cellules autour d'une cellule centrale qui affectent les propriétés de cette dernière. Le voisinage élémentaire de Von Neumann, par exemple, est un groupe de quatre cellules dans les quatre directions cardinales de la cellule centrale tandis que le voisinage de Moore comprend en plus les voisins

diagonaux. Des voisinages comprenant un rayon plus vaste peuvent également être utilisés, on parle de voisinages prolongés de Von Neumann et de Moore (Langlois, 2010). Dans le modèle développé ici, le voisinage de Moore a été considéré adapté et a été adopté. Chaque cellule est différenciée par deux états selon qu'elle est saturée en eau ou pas. Ainsi chacune possède un réservoir qui représente le degré de saturation du sol. Lors de la simulation de la pluie, quand la cellule n'est pas encore pleine, le volume d'eau précipité est ajouté à ce réservoir. Une fois la cellule saturée, le modèle passe à l'étape suivante : la création d'agents hydrologiques pour simuler la phase de ruissellement de surface.

Le taux d'infiltration est connu en calculant la lame d'eau qui ruisselle suivant une fonction de production. La lame d'eau précipitée est la somme de la lame d'eau ruisselée et de la lame qui s'infiltré. La lame d'eau infiltrée s'obtient donc en faisant la différence entre la lame d'eau précipitée et la lame d'eau ruisselée. La méthode utilisée pour calculer le ruissellement est celle du SCS-Curve-Number. Elle a été choisie pour sa simplicité et puisqu'elle permet de différencier le taux de ruissellement selon le type d'occupation du sol. En ce qui concerne le bassin versant expérimental, on peut notamment différencier les rangs de vignes enherbés et non-enherbés. Le SCS-Curve-Number est un modèle conceptuel qui repose sur une caractérisation empirique de la relation pluie-débit (Ponce et Hawkins, 1996). Elle permet de calculer directement le ruissellement de surface. Ce modèle admet que le rapport entre la rétention réelle du sol après le début de l'écoulement et la capacité de rétention (c'est-à-dire le potentiel maximum de rétention ou capacité au champ) est égal au rapport entre le ruissellement direct et la précipitation disponible (Tyagi *et al.*, 2008 ; Xiao *et al.*, 2011). Les précipitations disponibles résultent de la part des pluies qui ne sont pas interceptées par les végétaux.

Cette hypothèse se traduit par l'équation (1) :

$$\frac{Q}{P-Ia} = \frac{F}{S} \quad (1)$$

Q représente le ruissellement (mm) ; P les précipitations (mm) ; Ia l'interception initiale (mm), F l'infiltration cumulative (mm) et S le potentiel maximal de rétention (mm).

En sachant que les précipitations sont la somme de l'infiltration, du ruissellement et de l'interception par les végétaux (équation (2)) :

$$P = Ia + F + Q \quad (2)$$

Selon la formulation standard de la méthode, la valeur du rapport entre l'interception initiale et le potentiel maximal de rétention est prise égale à 0,2 (SCS, 1972). Des travaux ont montré que la valeur de ce paramètre varie toujours autour de 0,2 (Xiao *et al.*, 2011 ; Shi *et al.*, 2009). Pour le développement du modèle, c'est cette valeur qui est adoptée. Avec $Ia = 0,2S$, La combinaison des équations (1) et (2) conduit à l'équation de base de la méthode (équation (3)) :

$$Q = \frac{(P-0,2S)^2}{(P+0,8S)} \quad (3)$$

La rétention maximale S et les caractéristiques du bassin versant sont liées par un paramètre connu sous le nom de « Curve Number » (CN) dont la formulation empirique est la suivante (équation (4)) :

$$S = \frac{25400-254 \text{ CN}}{\text{CN}} \quad (4)$$

Le CN varie de 0 à 100 et est déterminé par le croisement des types d'occupations du sol et de ses caractéristiques pédologiques. Les sols sont classés selon des catégories décrites par le service de conservation du sol américain (« Soil Conservation Service ») en fonction de leur infiltrabilité. Plus le CN est élevé, plus le ruissellement est important. Des abaques (United States Department of Agriculture, 1985 ; Nietzsche *et al.*, 2005) détaillent les valeurs de ce paramètre. Une grille de ce paramètre CN a été construite à l'aide d'un levé GPS sur le terrain. Ainsi, la lame d'eau infiltrée est calculée pour chaque cellule en faisant la différence entre la lame d'eau totale et la lame d'eau ruisselée. Cette lame d'eau permet de calculer le volume d'eau qui va s'infiltrer dans chaque cellule. Ce volume est différent pour chaque cellule, selon la valeur du paramètre CN. Cette approche permet donc de différencier l'infiltration selon les types d'occupation du sol sur le bassin versant. Ainsi, l'infiltration est plus importante pour les rangs enherbés par exemple.

2.3.2. Règle de comportement des agents hydrologiques

2.3.2.1. Comportement général de l'agent

A chaque pas de temps, la procédure inspecte si la cellule est déjà saturée en eau. Si elle ne l'est pas, la valeur de la pluie vient s'ajouter à la valeur de l'infiltration. Sinon, on passe à la simulation du ruissellement par les agents hydrologiques. Ces agents agissent individuellement et possèdent des propriétés propres. A chaque agent sont associés ses coordonnées spatiales, une valeur de volume d'eau, une vitesse d'écoulement et une valeur de distance – qui est la distance parcourue par l'agent pendant le pas de temps, cette distance étant variable en fonction de la vitesse.

Lors de la simulation des précipitations, le volume d'eau provenant de la pluie et apporté à chaque cellule est obtenu en multipliant la hauteur de pluie par la surface de la cellule. S'il existe déjà des agents hydrologiques sur la cellule, ce volume est ensuite distribué à tous ses agents. S'il n'y a pas d'autres agents sur la cellule, le modèle va en créer un nouveau ayant comme valeur de volume d'eau, celui apporté par la pluie. Notons qu'un agent ne peut appartenir qu'à une seule cellule mais qu'une cellule peut posséder plusieurs agents.

La vitesse de l'agent est déterminée à l'aide de l'équation de Manning (équation 5). Suivant cette équation, la vitesse dépend de la hauteur d'eau dans la cellule. Cette hauteur est la somme des volumes d'eau de tous les agents appartenant à la cellule

divisée par la surface de la cellule. Cette hauteur d'eau est une mesure approximative du rayon hydraulique normalement utilisé dans les écoulements en rivières par l'équation de Manning. La vitesse dépend aussi de la pente du terrain, ou de la pente de la lame d'eau. Cette pente de lame d'eau ou pente hydraulique est calculée selon la méthode de Zevenbergen et Thorne (1987). Cette approche calcule d'abord la hauteur d'eau puis la pente hydraulique de chaque cellule à partir de la nouvelle hauteur d'eau et de l'altitude de la cellule. Elle permet aux valeurs de hauteur d'eau, de la pente et de la vitesse de changer dynamiquement avec des conditions différentes d'écoulement.

$$v = \frac{h^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}}{n} \quad (5)$$

Avec v , la vitesse d'écoulement (m/s), h la hauteur d'eau dans la cellule d'appartenance de l'agent (mm), I la pente de la lame d'eau ou la pente du terrain selon la méthode choisie et n le coefficient de Manning.

Cette vitesse permet à l'agent de déterminer la distance à parcourir pendant le pas de temps donné (équation (6)).

$$d = v \times dt \quad (6)$$

Avec d la distance à parcourir (m) et dt le pas de temps choisi (s).

Un agent réagit à son environnement selon un ensemble de règles. Dans cette mise en œuvre, le mode de déplacement des agents hydrologiques peut être déterminé selon plusieurs méthodes. Ces règles sont en quelque sorte la version multi-agents de l'algorithme D8 de Jenson et Domingue (1998) présente dans la plupart des modèles hydrologiques distribués. Cet algorithme considère les directions d'écoulement suivant un flux unidirectionnel en huit connexités, en prenant en compte les huit cellules voisines de la cellule considérée. Ainsi l'agent va prendre en compte les huit cellules voisines de sa cellule d'appartenance. Il se dirige vers celle qui a la plus petite altitude.

Une autre alternative développée dans le modèle est la détermination de la direction en utilisant la théorie des probabilités. Le cheminement suit alors la règle décrite précédemment mais la différence se fait sur le choix de la cellule vers laquelle l'agent va se déplacer. Le routage de flux est basé sur l'algorithme Rh8 (Fairfield et Leymarie, 1991), où la direction d'écoulement est choisie selon une probabilité pondérée par la pente. Ainsi un agent ne se déplace pas forcément vers la plus grande pente. La majorité du flux suit les voies de l'écoulement préférentiel mais d'autres flux prennent des chemins différents. L'utilisation de l'algorithme Rho8 est adapté pour les écoulements sur les versants car il permet l'utilisation de directions d'écoulement multiples avec une population d'individus, ce qui n'est pas forcément intéressant pour les écoulements en rivières. Il est aussi pertinent pour les grands bassins versants où il n'est pas possible de créer un nombre d'agents

nécessaire pour englober en entier le bassin versant. Ainsi un nombre réduit d'agents peut être exploité en utilisant cette méthode.

Ainsi, il existe dans le modèle deux modes de déplacement au choix : un mode utilisant l'algorithme D8 pour choisir la direction d'écoulement selon la plus grande pente et un mode utilisant l'algorithme Rh8 qui choisit la direction d'écoulement selon une probabilité pondérée à la pente.

2.3.2.2. Algorithme de déplacement de l'agent

Les deux modes décrits précédemment (D8 et Rh8) concernent le choix de la cellule vers laquelle l'agent va se déplacer. La façon dont il se déplace utilise un algorithme assez compliqué (algorithme 1). Nous présentons donc le code brut d'un fragment d'algorithme (tel qu'il est écrit dans Netlogo) suivi d'une traduction.

Algorithme 1. Déplacement d'un agent hydrologique

Code brut

```

1:   Déplacement_agent_hydrologique ()
2:   let p min-one-of neighbors [alt]
3:   let distance_a_cellule distance p
4:   set slope (alt - [alt] of p) / distance_a_cellule
5:   set v depth ^ (2 / 3) * slope ^ 0.5 / nm
6:   let distance_a_parcourir (vitesse * dt) / (surface ^ (1
/ 2))
7:   ifelse distance_a_parcourir < distance_a_cellule
8:   [ face p forward distance_a_parcourir ]
   [
9:     while [distance_a_parcourir > distance_a_cellule ]
   [
10:    set distance_a_cellule distance p
11:    face p forward distance_a_cellule
12:    set distance_a_parcourir distance_a_parcourir -
distance_a_cellule
13 :    set p min-one-of neighbors [alt]
   ]
14 :    face p forward distance_a_parcourir
   ]

```

Traduction

```

1:   Déplacement_agent_hydrologique ()
2:   c'est le choix de la cellule vers laquelle l'agent va se déplacer
3:   on calcule la distance entre l'agent et la cellule
4:   on calcule la pente entre l'agent et la cellule (cette pente est différente de la pente entre
les cellules)
5:   on calcule la vitesse de manning
6:   on calcule la distance que l'agent aura à parcourir pendant le pas de temps

```

- 7: Si la distance à parcourir est inférieure à la distance entre l'agent et la cellule
 8: [alors l'agent va se déplacer de cette distance en direction de la cellule] (elle n'atteint donc pas le centre de la cellule, ce qui est différent d'un déplacement de cellule en cellule)
 [
 9: si ce n'est pas le cas une boucle va être faite tant que la distance à parcourir est supérieure à la distance à la cellule
 [
 10: on recalcule la distance de l'agent à la cellule
 11: l'agent avance jusqu'au centre de la cellule
 12: on réactualise la distance à parcourir en lui ôtant la distance déjà
 13: l'agent recherche la prochaine cellule vers laquelle il va se déplacer
]
 14: à la sortie de la boucle, l'agent se déplace une dernière fois avec la distance qui reste à parcourir (il n'atteint donc pas le centre la dernière cellule mais parcourt la vraie distance)
]

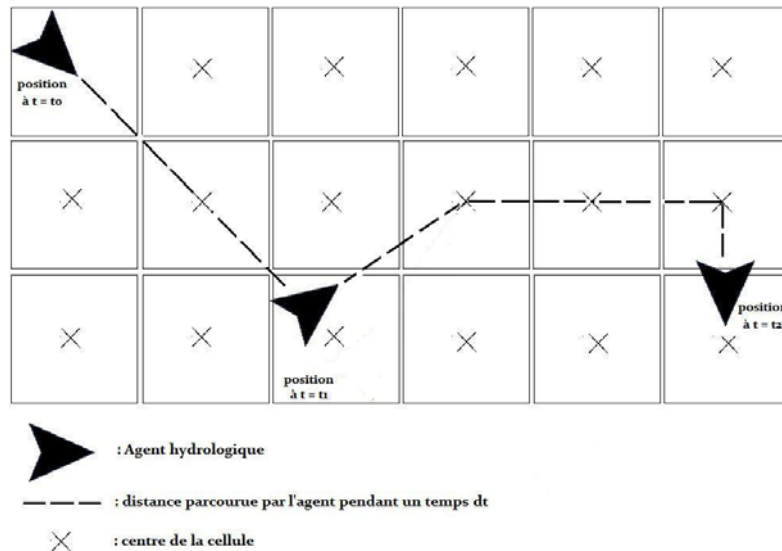


Figure 5. Représentation d'un déplacement de l'agent hydrologique lors des itérations

Une fois la cellule vers laquelle l'agent va se déplacer choisie, la pente et la distance par rapport au centre de cette cellule sont calculées. Connaissant déjà la distance d qu'il doit parcourir pendant ce pas de temps (équation (6)), on compare la distance entre l'agent et la cellule voisine à cette distance d . Si la distance est inférieure à d , l'agent se déplace vers le centre de la cellule voisine et est donc maintenant considéré comme appartenant à cette cellule. Encore un fois, l'agent inspecte les cellules alentours et se déplace vers celle avec la plus petite altitude, et ainsi de suite. Une fois la distance totale parcourue, l'agent se déplace dans la

direction de la prochaine cellule avec une distance égale à la distance qui reste à parcourir. Il n'atteint donc pas complètement le centre de celle-ci. Cela permet de faire en sorte que le parcours de l'agent soit égal à la distance totale à parcourir d (figure 5). De cette manière on se libère de la contrainte de déplacement dans les modèles à base d'automates cellulaires qui obligent les lames d'eau à se déplacer exclusivement de cellule en cellule. On arrive alors à avoir la distance exacte de déplacement tout en gardant les directions d'écoulement. De plus, le fait de diminuer ou d'augmenter le pas de temps ne change pas la direction de l'agent ni les cellules parcourues par celui-ci. On arrive alors à avoir le même comportement de l'agent quel que soit le pas de temps choisi.

2.3.3. Conditions aux limites

Un autre élément du modèle qu'il ne faut pas négliger est les conditions aux limites du réseau de cellules. Ces conditions déterminent ce qui se passe au niveau des cellules extérieures ou tout au bord du réseau. Ces cellules sont différentes des autres car elles ne peuvent pas avoir un système de voisinage complet. Il faut donc leur définir des règles particulières. Ne pas spécifier le comportement de ces cellules provoque des erreurs lors de la compilation du modèle ou lors des simulations. Les modèles à base d'automates cellulaires peuvent intégrer plusieurs types de limites bien connues, telles que des limites qui absorbent (l'eau qui coule au-delà des limites disparaît), des limites périodiques (l'eau par delà le bord réapparaît dans la grille sur le côté opposé) et des limites qui agissent comme un mur virtuel autour de la zone modélisée. Dans notre modèle, une très grande valeur d'altitude est imposée aux cellules n'appartenant pas au bassin versant (initialement, ces cellules n'avaient aucune valeur d'altitude). De cette manière, les agents ne peuvent pas se déplacer vers ces cellules qui se trouvent en dehors du bassin versant. Cette condition est acceptable car la définition même du bassin versant oblige les flux d'eau à converger vers l'exutoire.

2.3.4. Évaluation du débit à l'exutoire

Une fois la plate-forme de modélisation mise en place, toutes les règles de déplacement des agents et de comportement des cellules sont établies. La mesure du débit d'écoulement se fait au niveau de l'exutoire pendant la simulation. Par définition l'exutoire est le point le plus bas du bassin versant. Dans notre modèle c'est donc aussi une cellule. La différence avec les autres cellules vient du fait que tous les agents convergent vers elle. Puisque la valeur de volume d'eau de chaque cellule est égale à la somme des volumes d'eau apportés par chaque agent, cette valeur de volume d'eau devient rapidement croissante au cours du temps. Afin de calculer le débit, une zone est alors définie autour de la cellule exutoire comme étant la zone de « finalité » des agents. En d'autres termes, une fois arrivés dans cette zone, les agents peuvent communiquer leurs données (volume d'eau apporté, instant d'arrivée dans la zone) et ensuite être détruits. Cette zone est un cercle de rayon défini ayant comme centre, le milieu de la cellule exutoire. Les diverses simulations

montrent que le rayon de ce cercle importe peu et influence peu les valeurs du débit à l'exutoire. Pour déterminer le débit, on divise tout simplement la somme des volumes d'eau apportés par tous les agents dans la zone par le pas de temps de simulation. Notons qu'avec cette méthode, on peut calculer les débits pour tous les points du bassin versant si on le souhaite.

3. Ajustement du modèle et résultats

Tout comme pour les modèles distribués, le paramétrage correct du modèle pour pouvoir faire des simulations est une étape à la fois importante et difficile. Les formulations utilisées dans les modèles de type automate cellulaire ou à base de système multi-agent simplifient cette procédure en remplaçant les représentations hydrodynamiques par des règles appliquées localement. Le nombre très réduit de paramètres utilisés dans le modèle a libéré de longues et fastidieuses procédures de calage souvent observées dans les modèles classiques. L'algorithme de déplacement utilisé lors des simulations est celui utilisant la direction d'écoulement selon la plus grande pente.

Le premier paramètre est le Curve Number (CN) qui intervient dans le calcul de la lame d'eau ruisselée et de la lame d'eau infiltrée. Afin de trouver les valeurs de ce paramètre pour chaque cellule, une couche d'occupation de sol a été créée. Des relevés GPS (*Global Positioning System*) ont été effectués sur le terrain afin de localiser chaque rang de vignes. On a ensuite vérifié leur nombre, leur disposition et leur écartement afin de créer la carte d'occupation de sol. Les rangs sont espacés d'environ 1,4 m, sachant qu'entre chaque rang se trouve une bande enherbée d'environ 60 cm (figure 6). Si on trouve cette configuration sur l'une des parcelles, sur l'autre l'enherbement se fait un rang sur deux. Avec la taille réduite du bassin versant, on considère sa pédologie comme étant homogène sur l'ensemble du site. On est en présence d'un sol brun de faible épaisseur et de texture argilo-limoneuse. Selon la classification de l'USDA, le sol se situe entre les classes B et C (tableau 1). Pour les classes de sol, le groupe B comprend les sols sablo-limoneux de texture moyennement grossière à moyennement fine, à vitesse d'infiltration de base modérée. Le groupe C comprend les sols sablo-limoneux superficiels ainsi que les limons argileux de texture moyennement fine dont la vitesse d'infiltration de base est relativement faible. Le sol du bassin versant se situe entre les deux. La correspondance avec l'occupation du sol donne une valeur de CN variant de 64,5 à 78,5. En se référant aux abaques (Neitsch *et al.*, 2005), les correspondances entre l'occupation du sol et les types de sol ont donné une grille de paramètres CN spatialement distribuée sur le bassin versant (figure 5). Cette grille a été créée par l'outil « generate CNgrid » d'Archydro 9.1 en combinant les deux couches vecteurs (sols et occupation de sols) pour donner une couche raster de CN. Ce paramètre varie de 64,5 à 78,5 et différencie surtout les interrangs enherbés et les interrangs non enherbés.

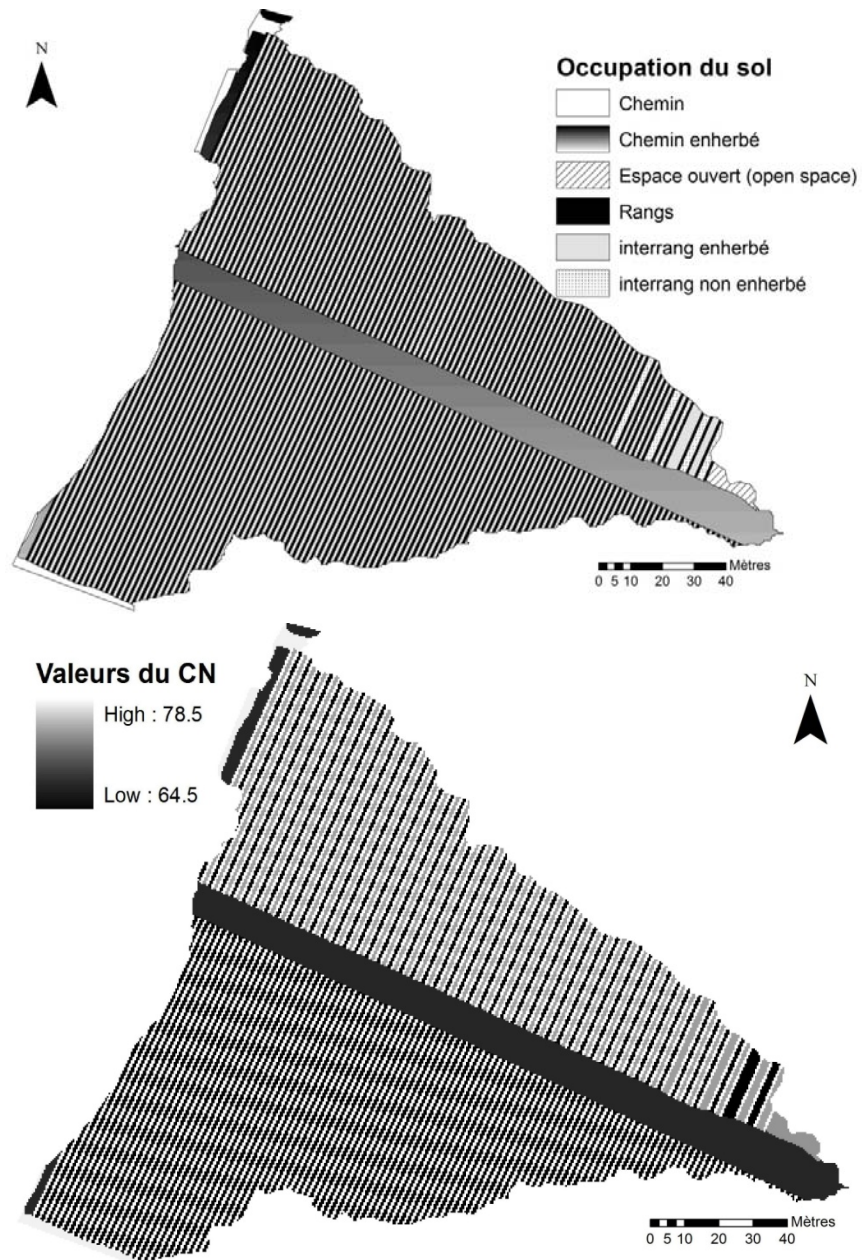


Figure 6. Représentation de la couche d'occupation du sol (en haut) et de la répartition spatiale du paramètre CN dans une grille de 0,5m de résolution (en bas)

Tableau 1. Valeurs du paramètre CN selon les types de sol et d'occupation du sol

Type d'occupations de sol/Classe de sols	B	C	Sol du bassin
Interrang enherbé	58	71	64,5
Interrang non enherbé	68	81	74,5
Rangs de vignes	75	82	78,5
Chemin	74	82	78
Espace ouvert	69	79	74
Chemin enherbé	61	74	67,5

Le second paramètre est le coefficient de Manning n , qui intervient dans le déplacement de l'agent et permet de calculer sa vitesse en tenant compte de la rugosité du terrain. Une valeur globale de $n = 0,07$ a été prise pour l'ensemble du bassin suite à des simulations qui ont été faites pour trouver sa valeur optimale.

Les résultats de chaque simulation ont été ensuite comparés aux débits observés et enregistrés par la station de mesure située à l'exutoire du bassin versant. Pour pouvoir mieux interpréter les sorties du modèle, les épisodes les plus simples ont été choisis c'est-à-dire ceux qui ne possèdent qu'un seul pic (une montée de l'hydrogramme et une descente).

La première simulation (figure 7) a été effectuée pour la pluie du 13 octobre 2012. L'hydrogramme résultant de cette pluie donne un pic de débit de l'ordre de 1,10 l/s. Cette valeur est correctement simulée par le modèle car le pic de débit lors de la simulation est de 1,19 l/s. Le temps d'écart entre le pic simulé et le pic réel est de 8 minutes. L'allure de l'hydrogramme simulé par le modèle est très similaire à l'hydrogramme provenant de la station de mesure. On remarque toutefois que la courbe simulée émerge 23 minutes plus tôt que l'hydrogramme réel. La réponse du bassin versant est donc plus rapide lors de la simulation. En termes de volume ruisselé ayant atteint l'exutoire, le modèle estime ce volume à 3,56 m³ contre 3,48 m³ en réalité. Pour évaluer l'efficacité du modèle on a utilisé un critère très utilisé en hydrologie, le critère de Nash-Sutcliffe (équation (7)) qui varie de $-\infty$ pour un ajustement très mauvais à 1 (Nash et Sutcliffe, 1970). Le critère de Nash-Sutcliffe lors de cette simulation est de 0,68.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \bar{Q}_0)^2} \quad (7)$$

Avec Q_0^t le débit observé au temps t (l/s), Q_m^t le débit modélisé au temps t (l/s) et \bar{Q}_0 le débit observé moyenne sur toute la période T .

La deuxième simulation (figure 8) concerne la pluie du 9 octobre 2012. Le pic de débit réel est de l'ordre de 2,17 l/s. Il est très correctement prédit par le modèle,

puisque le pic de débit simulé est égal à 2,14 l/s. De plus il est quasiment simulé au bon moment car il n'y a aucun écart entre les deux pics. Le volume ruisselé est de 2,23 m³ et le modèle estime ce volume à 2,98 m³. Le modèle simule le début de la montée du débit 15 minutes plus tôt que dans la réalité tout en gardant une bonne restitution de l'allure générale de l'hydrogramme. Pour cette simulation le critère de Nash-Stucliffé est de 0,58.

Trois autres évènements ont été simulés, leurs caractéristiques sont synthétisées dans la figure 9. Les évènements sont classés selon leur coefficient de ruissellement croissant (lame d'eau ruisselée/lame d'eau précipitée). Pour chaque simulation l'erreur relative (équation (8)) est calculée sur la valeur et le temps du pic de crue.

$$Er.Re. = \frac{|Valeur_{modélisée} - Valeur_{réelle}|}{Valeur_{réelle}} \times 100 \quad (8)$$

La figure 8 montre que les erreurs relatives ont tendance à augmenter avec le coefficient de ruissellement. Cette augmentation des erreurs se voit également sur la diminution du critère de Nash-Sutcliffe. Pour tous ces évènements, le critère de Nash-Sutcliffe reste malgré tout très acceptable bien que certaines erreurs relatives dépassent elles les 30 %.

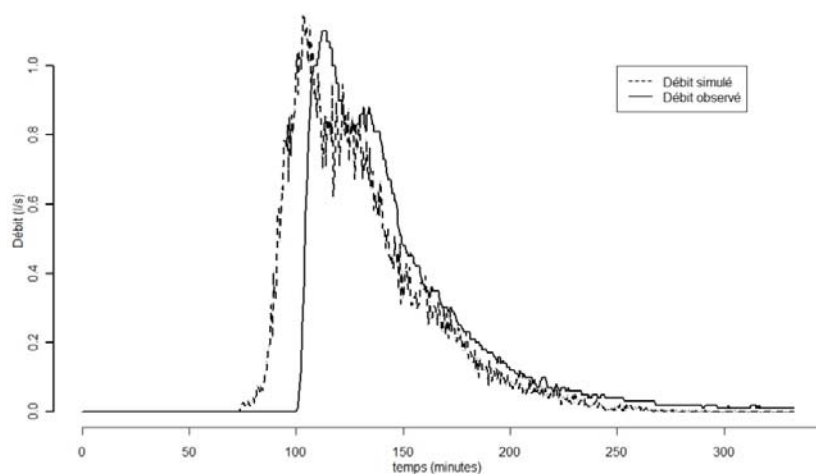


Figure 7. Comparaison du débit simulé et du débit observé lors de l'évènement pluvieux du 13 octobre 2012

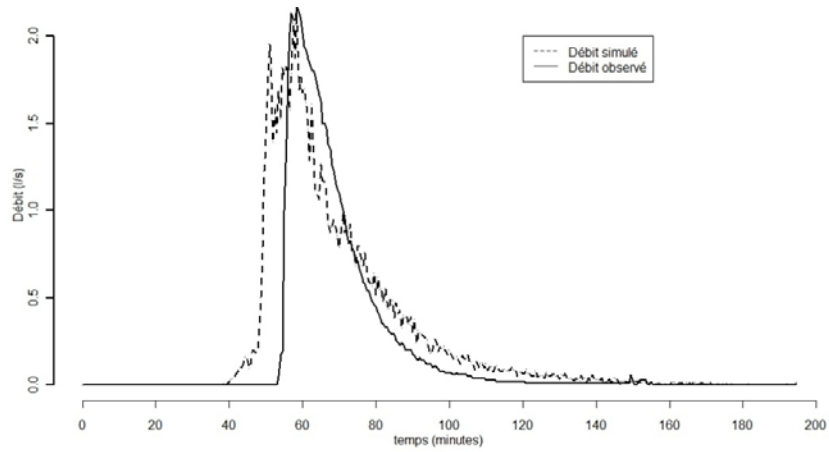


Figure 8. Comparaison du débit simulé et du débit observé lors de l'évènement pluvieux du 9 octobre 2012

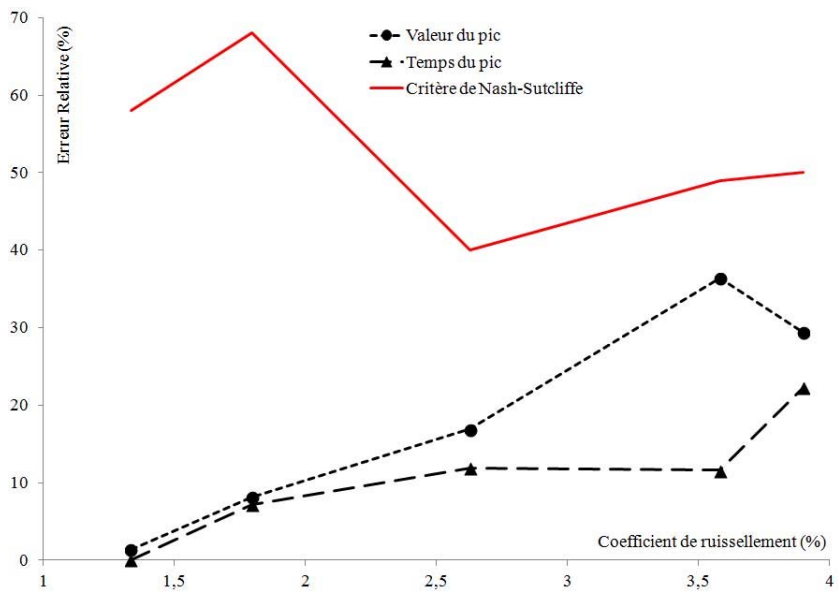


Figure 9. Évolution des erreurs relatives du volume ruisselé, de la valeur du pic et du temps du pic en fonction du coefficient de ruissellement de l'évènement

4. Discussion

Le modèle multi-agents décrit dans cet article est simple dans sa conception et produit des simulations d'écoulements réalistes au niveau du bassin versant expérimental avec seulement un minimum de paramétrage. Ce nombre très réduit de paramètres permet au modèle d'être facilement transposable dans d'autres bassins versants. Les modèles utilisant les fonctions de transfert classiques peuvent s'avérer plus efficaces en termes de restitution fidèle de l'hydrogramme de crue, mais l'approche utilisée ici offre plus de possibilités en termes d'analyse du rôle des composantes spatiale et temporelle sur les écoulements.

Dans la plupart des simulations, le volume d'eau ruisselé réel n'est jamais très différent du volume de ruissellement simulé par le modèle. L'introduction d'une fonction de production dans le modèle a donc permis la prise en compte du rôle des types d'occupation de sol notamment l'enherbement des interrangs de vignes sur l'infiltration. Une des observations fréquentes lors des simulations est le fait que l'hydrogramme simulé arrive toujours quelques minutes plus tôt avant l'hydrogramme réel. Cela peut se traduire par l'effet des rangs de vignes qui pourraient influencer les directions écoulements et retarder l'arrivée du flux à l'exutoire.

L'une des originalités du modèle par rapport aux autres modèles d'automates cellulaires est la règle de déplacement qui offre plus de liberté aux agents. Leur mode de déplacement est alors très précis en termes de distance et de durée. Cette approche s'est avérée intéressante sur le bassin expérimental puisqu'on a disposé d'un MNT précis provenant de relevés sur terrain. Cependant, l'intérêt d'une telle précision est discutable dans d'autres situations où on ne disposerait que de données altimétriques de très basse résolution.

Un point qu'il faut considérer dans les modèles de type automate cellulaire ou à base de systèmes multi-agents est le temps de calcul et les exigences matériels nécessaires pour exécuter les simulations. Pour le bassin versant expérimental de 2,2 ha on dispose de 88 000 cellules. En sachant que sur chaque cellule, on peut trouver plusieurs agents, le nombre de calcul peut donc facilement dépasser les 100 000 par pas de temps. Pour un événement pluvieux de plus de deux ou trois heures, le temps de simulation peut s'avérer très long. En utilisant la méthode classique avec la plus grande pente pour le choix des directions d'écoulement, la durée d'une simulation varie de 10 à 30 minutes.

Avec la méthode Rh8 calculant la direction d'écoulement en fonction d'une probabilité pondérée à la pente, la simulation d'un événement prend plusieurs dizaines d'heures, même avec un ordinateur puissant. Cette dernière méthode reste toutefois intéressante pour les futures simulations car le fait d'aborder une approche probabiliste permet de réduire le nombre d'agents utilisés lors d'un événement (Reaney, 2008). Ce problème est accentué si on veut utiliser le modèle dans des bassins versants plus grands ou sur des périodes plus longues. Pour les futures améliorations et applications, il existe de nombreuses méthodes pour optimiser la

performance globale du modèle dans ces cas là. Ces méthodes comprennent les améliorations algorithmiques et les modifications dans l'architecture du programme qui pourraient nous contraindre à retenir dans d'autres langages de programmation plus puissants (Java ou C++).

En ce qui concerne la forme géométrique de la cellule, certains modèles à base d'automates cellulaires comme RuiCells (Langlois et Delahaye, 2002) utilisent des cellules triangulaires qui sont plus adaptés aux simulations d'écoulements ainsi qu'aux délimitations plus complexes des bassins versants. Toutefois, dans notre cas, le mode de déplacement des agents permet de diminuer l'influence de la forme de la cellule.

Le modèle possède principalement deux composants du point de vue hydrologique, un module qui simule l'infiltration et un autre qui simule le ruissellement de surface. Afin d'améliorer le modèle, on peut penser à ajouter des composants pour le calcul de l'évapotranspiration, de l'écoulement hypodermique, ou encore de l'effet des aménagements. Ces nouveaux composants n'apparaissent pas forcément toutes pertinentes au niveau du bassin versant expérimental mais pourraient l'être pour d'autres problématiques telles que la modélisation des inondations sur de grandes superficies, il serait alors intéressant d'envisager leur développement.

5. Conclusions et perspectives

Les commentaires de Paola (2001) et Murray (2003) ont mis l'accent sur la simplicité des modèles automates cellulaires par rapport aux approches basées sur la solution des équations différentielles. Toutefois, ce point de vue demande à être discuté de façon plus approfondie. Certes, les équations utilisées pour représenter l'eau et son cheminement sur le bassin versant sont souvent simples, cependant, la mise en œuvre de ces équations peut introduire une complexité imprévue dans le comportement global du modèle. La complexité résulte surtout des interactions entre la genèse des eaux de ruissellement, l'écoulement du flux d'eau et l'infiltration (Cerdeira, 1995 ; Reaney *et al.*, 2007).

Dans ce modèle multi-agent, les règles de transition ont été développées pour être simples et faciles à mettre en œuvre. Ce qui fait de ce modèle un outil transposable et utilisable dans divers problématiques telles que la simulation des inondations, de l'érosion ou du transfert de polluant. Nous avons pu montrer dans quelle mesure l'utilisation de règles simples d'interactions entre cellules et agents peuvent amener à une modélisation d'écoulements réalistes et à une reconstitution fidèle de l'hydrogramme de crue.

Les perspectives de ce travail vont nous amener à ajouter d'autres composants aux modèles, comme les effets d'aménagements (*e.g.* haies, routes, drains) sur les directions d'écoulement. L'amélioration de la fonction d'infiltration en une fonction qui agisse par saturation et ajout d'une composante calculant le débit de base serait

intéressante pour son application dans une question à plus petite échelle telle que la simulation des inondations et de l'érosion sur de grands bassins versants.

Remerciements

Cette étude s'inscrit dans un contrat régional bassin versant et un contrat territorial avec un partenariat entre l'Université d'Angers et le SAGE Layon-Aubance, la région Pays-de-la-Loire, l'Institut français de la vigne et du vin, l'Agence de l'eau Loire Bretagne, France AgriMer, la commune de Rochefort-sur-Loire et les viticulteurs du site d'étude.

Bibliographie

- Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S., Williams JR. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment, Part 1: Model Development. *JAWRA*, vol. 34, n° 1, p. 73-90.
- Batardy J. (1984). L'élaboration d'un modèle hydrologique conceptuel maillé pour la prévision des débits en temps réel. Application au bassin versant de la Lesse à Daverdisse. Rapport final. S.A. L.G.R. n.v., Athus.
- Beven K. (2004). Infiltration excess at the Horton Hydrology Laboratory (or not?). *Journal of Hydrology*, vol. 293, n° 1-4, p. 219-234.
- Cerda A. (1995). Spatial distribution of infiltration on the matorral slopes in a Mediterranean environment, Geoves, Spain. *Desertification in an European context: Physical and Socio-Economic Aspects*, Fantechi R., Pete D., Blabani P., Rubio J. (eds). European Commission: Brussels, p. 427-436.
- Chang T.J., Kao H.M., Chang K.H., Hsu M.H. (2011). Numerical simulation of shallow-water dam break flows in open channels using smoothed particle hydrodynamics. *Journal of Hydrology*, vol. 408, n°1-2, p. 78-90.
- Chen J., Hill A., Urbano L. (2009). A GIS-based model for urban flood inundation. *Journal of Hydrology*, vol. 373, n° 1-2, p. 184-192.
- Coulthard T.J., Kirkby M.J., Macklin M.G. (2000). Modelling geomorphic response to environmental change in an upland catchment. *Hydrological Processes*, vol. 14, p. 2031-2045.
- Coulthard T.J., Lewin J., Macklin M.G. (2005). Modelling differential catchment response to environmental change. *Geomorphology*, vol. 67, p. 222-241.
- Coulthard T.J., Macklin M.G., Kirkby M.J. (2002). A cellular model of Holocene upland river basin and alluvial fan formation. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 27, p. 269-288.
- Crave A., Davy P. (2001). A stochastic precipitation model for simulating erosion/sedimentation dynamics. *Computers & Geosciences*, vol. 27, p. 815-827.
- Cudennec C., Fouad Y., Gatot I.S., Duchesne J. (2004). A geomorphological explanation of the unit hydrograph concept. *Hydrological Processes*, vol. 18, p. 603-621.

- Cunge J.A. (1969). On the Subject of a Flood Propagation Computation Method (Muskingum Method), *Journal of Hydraulic Research*, vol. 7, n° 2, p. 205-230.
- De Roo A., Wesseling C., Van Deursen W. (2000). Physically-based river basin modeling within a GIS: the LISFLOOD model. *Hydrological Processes*, vol. 14, n° 11-12, p. 1981-1992.
- Edijatno et Michel C. (1989). Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, vol. 2, p. 113-121
- Fairfield J., Leymarie P. (1991). Drainage networks from grid digital elevation models. *Water Resources Research*, vol. 27, p. 709 -717.
- Favis-Mortlock D.T., Boardman J., Parsons A.J., Lascelles B. (2000). Emergence and erosion: a model for rill initiation and development. *Hydrological Processes*, vol. 14, p. 2173-2205.
- Favis-Mortlock D.T. (1998). A self-organizing dynamic systems approach to the simulation of rill initiation and development on hillslopes. *Computers and Geosciences*, vol. 2, p. 353-372.
- Fleurant C., Kartiwa B., Roland B. (2006). Analytical model for a geomorphological instantaneous unit hydrograph. *Hydrological processes*, vol. 20, p. 3879-3895.
- Hernández JH., Padilla F., Juncosa R., Vellando PR., Fernández A. (2012). A numerical solution to integrated water flows: Application to the flooding of an open pit mine at the Barcés river catchment – La Coruña, Spain. *Journal of Hydrology*, vol. 472-473, p. 328-339.
- Jain A., Srinivasulu S. (2006). Integrated approach to model decomposed flow hydrograph using artificial neural network and conceptual techniques. *Journal of Hydrology*, vol. 317, n° 3-4, p. 291-306.
- Jenson S.K., Domingue J.O. (1998). Extracting topographic structures from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, vol. 54, n° 11, p. 1593-1600.
- La Jeunesse I., Communal P.-Y., Duchesne J., Jadas-Hécart A., Landry D., Sourice S. (2010a). Modélisation des transferts de pesticides dans un petit bassin versant viticole. Contrat Régional Bassin Versant. Rapport d'activités. Région Pays de la Loire.
- La Jeunesse I., Jadas-Hécart A., Communal P.-Y., Duchesne J., Landry D., Sourice S., Moguedet G., Picard F., Ballouche A., Vitrai V. (2010b). Pesticides en viticulture et qualité des eaux. Une réglementation face à une culture à haut risque de transfert. *Revue des œnologues*, vol. 137, p. 1-5.
- Langlois P. (2010). *Concept et formalisation d'un Automate cellulaire. Simulation des systemes complexes en géographie*. Paris, Lavoisier, p. 169-195.
- Langlois P., Delahaye D. (2002). Ruicells, automate cellulaire pour la simulation du ruissellement de surface. *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 12, n° 4, p. 461-487.
- Makropoulos C., Koutsoyiannis D., Stanić M., Djordjević S., Prodanović D., Dašić T., Prohaska S., Maksimović Č., Wheater H. (2008). A multi-model approach to the simulation of large scale karst flows. *Journal of Hydrology*, vol. 348, n° 3-4, p. 412-424.

- Murray AB., Paola C. (1994). A cellular model of braided rivers. *Nature*, vol. 371, n° 6492, p. 54-57.
- Murray A.B., Paola C. (1997). Properties of a cellular braided-stream model. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 22, p. 1001-1025.
- Murray A.B., Paola C. (2003). Modelling the effect of vegetation on channel pattern in bedload rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 28, p. 131-143.
- Murray A.B. (2003). Contrasting the goals, strategies, and predictions associated with simplified numerical models and detailed simulations. *Prediction in Geomorphology*, Iverson R, Wilcock P (eds). Geophysical Monograph 135. American Geophysical Union, p. 151-165.
- Nash J.E., Sutcliffe J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, vol. 10, p. 282-290.
- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Srinivasan R., Williams J.R. (2005). *Soil and Water assessment tool theoretical documentation, version 2005*, Agricultural Research Service / Blackland research center. Temple, Texas, USA.
- Nicholas AP. (2005). Cellular modeling in fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 30, p. 645-649.
- O'Sullivan J.J., Ahilan S., Bruen M. (2012). A modified Muskingum routing approach for floodplain flows: Theory and practice. *Journal of Hydrology*, vol. 470-471, p. 239-254.
- Paiva R., Collischonn W., Tucci C. (2011). Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. *Journal of Hydrology*, vol. 406, n° 3-4, p. 170-181.
- Paola C. (2001). Modelling stream braiding over a range of scales. *Gravel-Bed Rivers V*, Mosley MP (ed.). New Zealand Hydrological Society, p. 11-38.
- Parsons JA, Fonstad MA, (2007). A cellular automata model of surface water flow, hydrological processes, *Hydrological Processes*, vol. 21, p. 2189-2195.
- Perrin C., Michel C., Andréassian V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, vol. 279, n°1-4, p. 275-289.
- Ponce VM. (1979). Simplified Muskingum routing equation. *Journal of Hydraulic Division ASCE*, vol.105, n°HY1, p. 85-91.
- Randriamaherisoa A.J., (1993). MHM-Modèle hydrologique maillé et système d'information géographique. Thèse de Doctorat. Unité de génie rural, Université Catholique de Louvain.
- Reaney S.M., Bracken L.J, Kirkby M.J. (2007). The use of the Connectivity of Runoff Model (CRUM) to investigate the influence of storm characteristics on runoff generation and connectivity in semi-arid areas. *Hydrological Processes*, vol. 21, p. 894 -906.
- Reaney SM. (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, p. 317-327.
- Rodriguez-Iturbe I., Valdès J. (1979). The geomorphologic structure of hydrologic response. *Water Resources Research*, vol. 15, n° 6, p. 1409-1420.

- Sherman L. (1932). Streamflow rainfall by unit-graph method. *Engineering News-Record*, p. 501-505
- Soil Conservation Service (1972). National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology. US 444 Department of Agriculture, US Government Printing Office, Washington, DC.
- Thomas R., Nicholas A.P., Quine T.A. (2002). Development and application of a cellular model to simulate braided river process-form interactions and morphological change. *River Flow* Bousmar D, Zech Y (eds). Swets and Zeitlinger: Lisse, p. 783-791.
- Thomas R., Nicholas A.P. (2002). Simulation of braided river flow using a new cellular routing scheme. *Geomorphology* vol. 43, p. 179-195.
- Ting M.A., Cheng-Hu Z., Qiang-Guo C. (2009). Modeling of hillslope runoff and soil erosion at rainfall events using cellular automata approach. *Pedosphere*, vol. 19, n° 6, p. 711-718,
- Tyagi J.V., Mishra SK., Singh R., Singh VP. (2008). SCS-CN based time-distributed sediment yield model. *Journal of Hydrology*, vol. 352, p. 388-403.
- United States Department of Agriculture - Soil Conservation Service (1986). Urban hydrology for small watersheds. Technical Release 55 (TR-55) (Second Edition ed.). Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division.
- Van den Putte A., Govers G., Leys A., Langhans C., Clymans W., Diels J. (2013). Estimating the parameters of the Green-Ampt infiltration equation from rainfall simulation data: Why simpler is better. *Journal of Hydrology*, vol. 476, p. 332-344.
- Van De Wiel M., Coulthard T., Macklin M., Lewin J. (2007). Embedding reach-scale fluvial dynamics within the CAESAR cellular automaton landscape evolution model. *Geomorphology*, vol. 90, p. 283-301
- Wang G.T., Yao C., Okoren C., Chen S. (2006). C4-Point FDF of Muskingum method based on the complete St Venant equations. *Journal of Hydrology*, vol. 324, n° 1-4, p. 339-349.
- Wilensky U. (1999). NetLogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. Northwestern University, Evanston, IL.
- Xiao B., Wang Q.H, Fan J., Han F.P., Dai Q.H. (2011). Application of the SCS-CN model to runoff estimation in a small watershed with high spatial heterogeneity. *Pedosphere*. vol. 21, n° 6, p. 738-749.
- Yang YE., Cai X., Stipanovic' DM. (2009). A decentralized optimization algorithm for multiagent system-based watershed management. *Water Resources. Research.*, vol. 45, W08430, doi:10.1029/2008WR007634.
- Zevenbergen L.W, Thorne C.R. (1987). Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 12, p. 47-56.