



HAL
open science

Les apports de l'IAD à la caractérisation morphométrique des bassins versants sensibles aux crues rapides hyper-concentrées (Bassin Parisien, Nord de la France)

Johnny Douvinet, Daniel Delahaye, Patrice Langlois

► To cite this version:

Johnny Douvinet, Daniel Delahaye, Patrice Langlois. Les apports de l'IAD à la caractérisation morphométrique des bassins versants sensibles aux crues rapides hyper-concentrées (Bassin Parisien, Nord de la France). *Interactions Nature-Sociétés - Analyse et modèles*, May 2006, La Baule, France. 6p. halshs-00068710

HAL Id: halshs-00068710

<https://shs.hal.science/halshs-00068710>

Submitted on 12 May 2006

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

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

Les apports de l'IAD à la caractérisation morphométrique des bassins versants sensibles aux crues rapides hyper-concentrées (Bassin Parisien, Nord de la France)

JOHNNY DOUVINET*, DANIEL DELAHAYE*, PATRICE LANGLOIS**

*GEOPHEN – LETG UMR 6554 CNRS, Université de Caen, BP 5132, 14032 CAEN Cedex

**MTG – IDEES FRE 2795 CNRS, Université de Rouen, 76821 Mont St Aignan Cedex

RÉSUMÉ

Les outils morphométriques classiques ont été les toutes premières mesures quantitatives utilisées en géomorphologie pour pouvoir mesurer la morphologie des bassins versants. Toutes ces méthodes se retrouvent aujourd'hui en préambule de nombreuses études hydrologiques. Bien que de nombreux indices permettent la mesure de la forme, des pentes ou de l'organisation du réseau hydrographique, beaucoup d'auteurs en soulignent toutefois les limites, notamment pour prédire la réponse hydrologique. Afin de mieux évaluer le rôle de la morphologie d'un bassin versant sur sa dynamique, il est apparu intéressant de se tourner vers des méthodes d'analyse spatiale dérivées de l'IAD, et notamment vers les automates cellulaires. Une telle démarche permet d'intégrer la totalité des composantes morphologiques (forme, réseau et pente) puis de simuler des écoulements sur la structure en 3D du bassin construite par l'automate cellulaire. Les résultats des simulations soulignent toute l'importance de la réactivité de certaines configurations morphologiques, en particulier pour des bassins versants qui sont sensibles aux ruissellements concentrés et où des crues rapides hyper-concentrées sont récemment apparues.

MOTS CLÉS : risque hydrologique, crues rapides, morphologie des bassins versants, automate cellulaire.

ABSTRACT

Classical morphometric methods have been the first quantitative methods created by geomorphologists to measure the catchment morphology. Many hydrological studies still use these methods. Though the catchment shape, the slopes and the drainage network organisation can be characterized by many quantitative indicators, several authors show lacks and limits of such tools. For example, the indices can not translate the hydrological response of a catchment. Nonetheless, in order to better analyze the incidence of the catchment structure on its hydrological dynamic, it appears that recent DAI tools are relevant. The assumed approach permits implementing both three morphological variables (shape, slope and drainage pattern) within a generalized cellular automaton model. It is possible moreover to simulate surface flows discharge using uniquely the 3D catchment structure. Results highlight the efficiency of some morphological systems and their influence on the hyper-concentrated stream flows observed recently on several catchments.

KEY WORDS: inundation risk, flash floods, catchment morphology, cellular automata.

1. Introduction

Des phénomènes de crues rapides apparaissent maintenant fréquemment dans les régions de grande culture du Nord de la France. L'ampleur de ces phénomènes semble avoir augmenté durant la dernière décennie, en particulier en Seine-Maritime (Delahaye, 2002). Classiquement désignées par les termes "*coulées boueuses*", "*torrents de boue*" ou "*crues turbides*" en raison de leur forte concentration solide, le terme de "*crues rapides hyper-concentrées*"¹ semble plus approprié pour désigner de tels phénomènes hydrologiques si on se réfère à la définition de Pierson and Costa (1987). Ces crues rapides se caractérisent par des écoulements apparaissant très violemment, avec une montée des eaux et une propagation de l'onde de crue très rapides (<20mn). Les débits spécifiques sont aussi très importants au regard de la

1. Ces crues sont communément appelées "flash floods", "muddy flows", "mudslides" ou "turbid floods" dans la littérature anglo-saxonne, mais le terme "hyper-concentrated stream flows" est plus adapté pour ces régions.

taille de la plupart des bassins versants dont la taille est très souvent inférieure à 40km². Fait original, ces crues prennent naissance au sein de petits vallons secs ne présentant pas d'écoulement pérenne, notamment en Seine-Maritime (Pays de Caux), dans l'Aisne (Laonnois, Soissonais), le Pas de Calais (Artois) ou encore l'Oise (Pays de Thelle, Vexin). Le relief est ainsi très souvent incisé par des vallons secs hérités des périodes périglaciaires dont le réseau fossile fonctionne de nouveau lors des longues périodes pluvieuses hivernales ou sous l'effet des orages de printemps (Auzet *et al.*, 1995 ; Hauchard et Delahaye, 1995; Delahaye, 2002).

La filiation avec les pratiques agricoles et l'occupation du sol a longtemps été la première incriminée, en particulier à cause de l'érosion des sols qui fournit la majorité des sédiments alimentant la turbidité de ces écoulements. La plupart des recherches abordant le thème des crues turbides considèrent qu'il s'agit avant tout d'une manifestation exacerbée du ruissellement érosif. Bon nombre de travaux sont cités dans le rapport de l'IFEN-INRA (Le Bissonnais *et al.*, 2002). La morphologie des bassins versants est pourtant la composante principale dans la genèse de ces crues particulièrement rapides, d'autant plus que les cultures ne prédominent pas toujours : seulement 22 % de terres cultivées dans le bassin de Saint-Martin-de-Boscheville (crue de juin 1997), 60 % de prairies et bois dans les bassins en amont de Trouville-Deauville (crue de juin 2003), ou encore 19 % de terres cultivées dans le bassin de Petit-Appesville (crue de juin 2005). Par conséquent, la morphologie semble être un paramètre explicatif important et ce travail se propose de poursuivre les efforts en matière de connaissance de l'influence de ce facteur sur la dynamique de ces crues particulièrement violentes. L'un des objectifs est notamment de mieux déceler la relation intrinsèque entre les caractéristiques morphométriques des bassins et leur réponse hydrologique.

2. Etat des connaissances et problématique

Les relations entre la morphologie des bassins et leur réponse hydrologique ont été auparavant soulignées par de nombreux travaux. Les progrès de la science au XIX^{ème} siècle et au XX^{ème} siècle ont fourni une pléthore de méthodes avec des applications diverses et nombreuses, notamment dans le domaine de l'hydrologie et de la géomorphologie. Les apports de ces outils sont considérables. La tendance à la concentration naturelle des écoulements, démontrée par les travaux d'Horton (1945), est l'une des observations des plus marquantes dans l'histoire de l'hydrologie. L'agencement du réseau devient tout aussi fondamental pour considérer le chemin et le temps de transit depuis les zones sources vers l'exutoire. La fonction-largeur (*width function*) de Shreve (1966), également désignée « fonction aire-distance » par Rodriguez-Iturbide et Valdés (1997), reste ainsi un des outils les plus pertinents pour relier la forme d'un bassin, son réseau hydrographique et la réponse hydrologique qui découle de cette organisation.

Créant à chaque fois leurs propres méthodes et outils d'analyse, les hydrologues et les géomorphologues ont laissé derrière eux une quantité importante d'indices morphométriques. Plus de 50 indicateurs peuvent ainsi être recensés dans les études et/ou ouvrages hydrologiques de référence. Malgré cela, ces outils d'analyse ne sont pas adéquats pour traduire la dynamique des bassins car ils cloisonnent les différents paramètres morphométriques et restent statiques. Plusieurs solutions sont alors proposées pour pallier à une approche séparée des composantes morphologiques. Certains auteurs vont croiser quelques indices pour en créer de nouveaux. On peut désormais comparer la surface avec le réseau hydrographique, la forme avec les pentes ou la longueur d'un réseau avec les pentes (Douvinet *et al.*, 2005). Cependant, les indices présentent toujours des lacunes, comme par exemple la densité de drainage qui quantifie un réseau mais ne caractérise pas son organisation. A chaque fois, seuls deux paramètres ont été confrontés alors que la totalité du système morphologique n'a jamais été approchée par un indicateur synthétique.

L'émergence des indices croisés a permis d'avancer dans la recherche d'outils plus synthétiques. Le bilan (même s'il ne prétend pas à l'exhaustivité) sur une grande quantité d'indices morphométriques s'avère toutefois négatif : il n'existe pas de méthodes de mesure synthétique de l'organisation spatiale de ces combinaisons et de leur dynamique potentielle. En s'appuyant sur la théorie des systèmes complexes et notamment les automates cellulaires, le travail présenté se propose de développer des méthodes permettant de quantifier de manière globale et dynamique la structuration en trois dimensions du système complexe nommé « *bassin versant* ».

3. Orientation méthodologique : la migration vers des méthodes d'analyse dérivées de l'IAD

Profitant de l'augmentation des capacités des ordinateurs, du développement des SIG et de l'explosion des données numériques de terrain, certains auteurs ont récemment orienté leurs recherches sur la relation entre les paramètres morphométriques et la dynamique du ruissellement de surface. Parmi les travaux les plus récents, on peut citer les modèles basés sur la fonction de transfert hydrologique et l'hydrogramme unitaire (Nasri *et al.*, 2001), les modèles conceptuels physiographiques distribués (Najani, 2003), les modèles physiques distribués (Nunes *et al.*, 2005), ou les

modèles basés sur les réseaux neuronaux artificiels (Moradkhani *et al.*, 2005) venant compléter les nombreux modèles spatialisés. Sans remettre en cause les avantages de ces méthodes, l'idée est venue de proposer une solution alternative plus pertinente et plus simple dans la construction. Les méthodes dérivées de l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) offrent à cet égard une formidable possibilité. Au lieu de considérer les variables une par une, les différents outils (Simulation Multi-Agents, Automate Cellulaire) permettent d'intégrer les interrelations entre les variables et voir la dynamique induite par ces relations. Ces outils sont ainsi utiles lorsque l'on cherche à établir l'effet du jeu des interactions locales sur l'évolution des structures spatiales à un niveau d'organisation supérieur (Sanders, 2001).

Dans le cadre d'un premier travail, un automate cellulaire avait été utilisé pour modéliser le poids de l'organisation spatiale des composantes morphologiques des bassins versants. Pour cela, il a tout d'abord fallu généraliser le concept classique d'automate cellulaire pour pouvoir modéliser à la fois la structure variable des éléments de terrain, à travers des cellules surfaciques (éléments de versants), linéaires (talwegs) et ponctuelles (minima locaux ou cuvettes), et la connectique entre les cellules. Les liens d'écoulements ne sont plus guidés uniformément par la topologie de voisinage du réseau cellulaire, mais par les liens morphologiques structurant la surface (liens d'écoulement entre les éléments, lien de déversement entre les sous bassins). La démarche s'appuie donc sur un automate cellulaire généralisé, dont les cellules sont de formes et de dimensions variables (point, ligne, surface) et dont les liens traduisent la structure morphologique de la surface et pas seulement la topologie. L'automate offre la possibilité de faire transiter de cellule en cellule, via les axes d'écoulement définis par le graphe, n'importe quel type de données quantitatives. Dans cette première approche, la surface, première information contenue par une cellule, sera principalement utilisée (Figure 1).

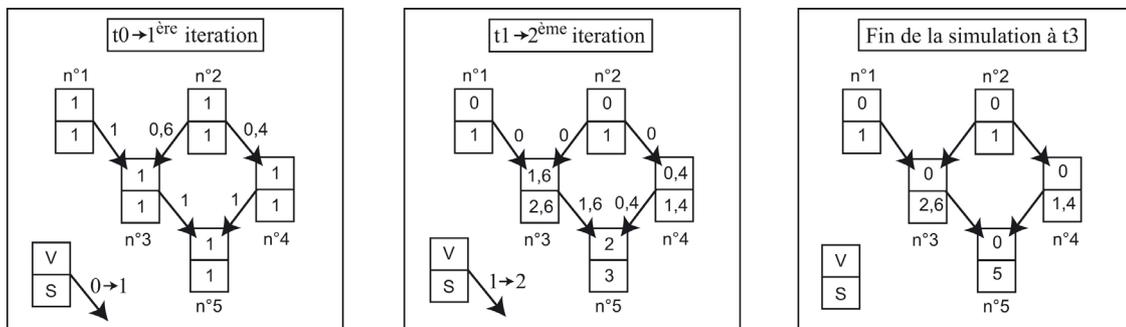


Figure 1. Structure schématique de la logique de fonctionnement de Ruicells appliquée à 5 cellules.

La valeur en haut (V) correspond aux entrées de surface dans chaque cellule à chaque itération ; la valeur (S) totalise la somme des surfaces passées pour chaque cellule à la fin de la simulation. Les valeurs situées en dehors des cellules indiquent les surfaces en train de transiter entre deux cellules entre deux itérations (t_n vers t_{n+1})

Selon le même principe que pour un écoulement d'eau, l'automate provoque l'écoulement des surfaces de cellule en cellule en fonction des axes de circulation et des paramètres prédéfinis. A chaque itération, toutes les cellules se vidangent dans celles qui leur sont connectées en aval et reçoivent les surfaces venant de celles situées en amont. Le processus d'itération s'achève lorsque l'ensemble des surfaces a transité par le point de mesure, concrètement quand l'ensemble du bassin est vidangé de sa surface. En plaçant des points de mesure, il est possible de suivre, durant la simulation, le passage successif des surfaces dans les différentes cellules. Les principes de fonctionnement de l'automate ont déjà été présentés plus en détail auparavant (Langlois et Delahaye, 2002).

4. Quelques résultats : la dynamique du système morphologique

L'étude porte plus spécifiquement sur 4 bassins où une coulée de boue est apparue dans les dix dernières années. Ces bassins, dont les surfaces sont inférieures à 40km², sont tous situés dans le Nord du Bassin Parisien (tableau 1).

Noms des bassins versants	Surface (km ²)	Qmax (ha)	Tc (It.)	Tm (It.)
Essômes sur Marne [ESS]	21,32	25,06	192	97
Lézarde amont [LEZ]	13,41	18,16	152	100
Saint Martin de Boscherville [SMB]	14,30	16,82	182	129
Aizelles [AIZ]	4,11	10,58	88	53

Tableau 1. Présentation des 4 bassins expérimentaux et paramètres issus des simulations

(Qmax : débit maximum de surface (en hectares) lors de la simulation ; Tc : Temps de concentration ou nombre d'itérations (>It.) pour vidanger le bassin ; Tm : Temps de montée ou nombre d'itérations pour atteindre le débit de pointe Qmax).

Les bassins AIZ et LEZ ont des formes compactes tandis que les bassins SMB et ESS sont plus allongés. Les résultats de la simulation mettent en avant l'effet d'échelle dans la réponse hydrologique (figure 2). Le bassin AIZ (4,1km²) est vidangé rapidement de sa surface et le débit de pointe (10,58ha) est rapidement atteint (53 itérations). A l'inverse, le bassin ESS (21,3km²) a un long temps de concentration et une montée relativement progressive du débit de surface vers le pic de crue (25,06ha en 97 itérations). L'analyse souligne également des anomalies. Le pic de débit n'est pas toujours proportionnel à la taille des bassins versants. Cela se vérifie parfaitement pour SMB et LEZ : alors que la taille de SMB est plus grande, le pic de crue est moins important (16,82ha), la durée de vidange plus lente et le temps de concentration plus long (182 itérations). Puisque le logiciel enregistre les valeurs de surfaces cumulées à chaque point de mesure en utilisant la même échelle de temps, i.e. l'itération, un hydrogramme des débits des écoulements de surface peut être construit pour mieux décortiquer la réponse hydrologique des bassins. Les courbes mesurées aux exutoires des bassins AIZ, LEZ et ESS présentent des montées et des décrues rapides et régulières. En revanche, la courbe de SMB indique un comportement chaotique lié à des arrivées désorganisées et à une organisation non hiérarchique du réseau hydrographique. Une telle configuration réduit le pic de crue et allonge le temps de transit au sein du bassin (Figure 3).

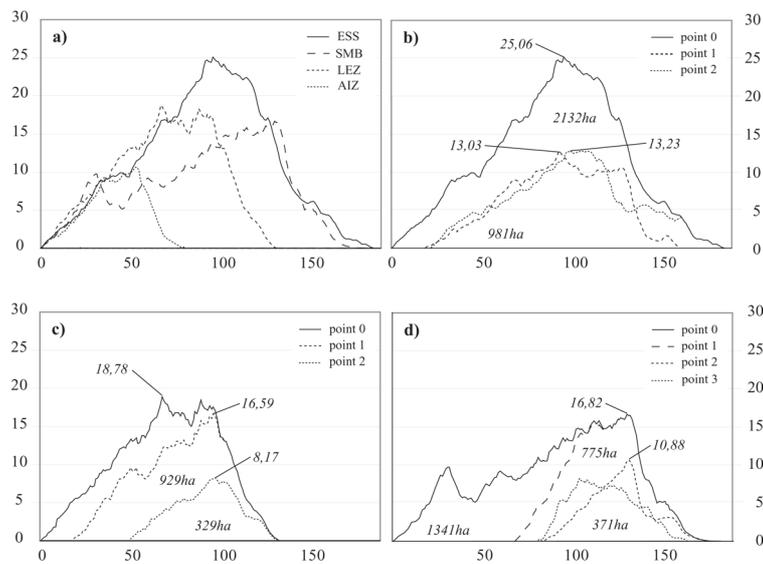


Figure 2. Comparaison des surfaçogrammes simulés : les graphiques des surfaces passées à chaque itération pour les bassins versants choisis (a) et les contributions des sous bassins pour ESS (b), LEZ (c) et SMB (d)

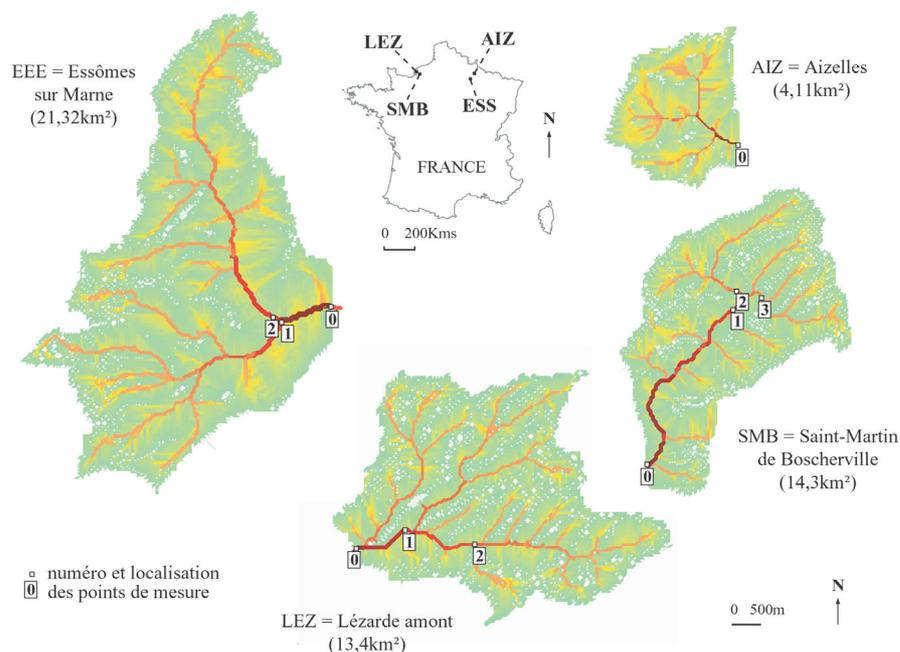


Figure 3. Cartographie des cumuls de surfaces passés en chaque cellule pour les 4 bassins choisis

Ce travail permet également de caractériser la signature morphologique induite par les configurations spécifiques des bassins. Le bassin LEZ présente une organisation très particulière de son réseau hydrographique. L'ensemble de ses drains est orienté vers le même point, l'exutoire, ce qui implique une perte d'énergie minimale pour acheminer les surfaces. Ce réseau présente une homothétie interne qui le rend très efficace (Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997). A l'inverse, le comportement du bassin SMB semble évoluer dans l'espace avec une partie amont très active, mais pénalisée par une partie aval plus « inerte ». Il semble désormais nécessaire de bien dissocier de manière quantitative la contribution des sous bassins afin d'analyser correctement la réponse hydrologique à l'échelle de la totalité du bassin.

Des surfaçogrammes ont été simulés pour différents points de mesure situés au sein des bassins. Les résultats montrent les apports emboîtés des différents sous bassins et leur contribution au pic de crue mesuré au point 0. Les écoulements de surface du bassin ESS transitent le long de deux drains secondaires de même longueur, dont les pics de crues respectifs de 12,9 et 12,1 se cumulent presque en même temps pour former le pic de 25,1ha. Des apports constants expliquent le pic de crue observé à l'exutoire final du bassin LEZ. Efficaces au même moment, les parties amont des deux sous bassins n° 1 et n° 2 induisent un pic de crue important, d'autant plus qu'ils se cumulent aux apports du premier drain. En revanche, les résultats pour le bassin SMB sont nettement différents. Le temps de montée et le pic de crue sont uniquement dépendants de la phase terminale du surfaçogramme, et donc de la partie amont du bassin versant.

5. Conclusion

Les différentes simulations montrent que l'organisation structurelle des bassins, ou plutôt la connexion entre les surfaces et les réseaux ainsi que leur distance à l'exutoire, est plus importante que la superficie des bassins. Longtemps, cette influence de la morphologie sur la réponse hydrologique est restée théorique. L'utilisation de l'automate permet ici de mieux appréhender le système morphologique dans son ensemble, mais également de décomposer la réponse hydrologique en identifiant les arrivées et les apports emboîtés des écoulements selon les sous bassins constituant la totalité du bassin versant. Ces quelques résultats montrent également toute la relativité de la notion de bassin versant comme unité spatiale de référence pour l'étude hydrologique des crues rapides.

3. Bibliographie

- Auzet A.V., Boiffin J., Ludwig B., 1995. Erosion hydrique dans les bassins versants agricoles des régions limoneuses du nord-ouest de la France. *Annales de Géographie*, n° 281/282, p. 187-190.
- Delahaye D., 2002. *Apport de l'analyse spatiale en géomorphologie : modélisation et approche multiscalaire des risques*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, 2 tomes, Université de Rouen, 471 p.
- Douvinet J., Delahaye D., Langlois P., 2005. *Catchment morphology and dynamics of hyper-concentrated stream flows on loamy plateaux (Paris Basin, North-West France)*. Poster à la Sixième Conférence Internationale de Géomorphologie (ICG) "Geomorphology in regions of environmental contrasts" (7-11 Septembre 2005, Zaragoza, Espagne).
- Hauchard E., Delahaye D., 1995. L'inondation de Grainville-la-Teinturière, analyse des processus de ruissellement en pays de Caux à travers quelques épisodes critiques. *La revue d'ici*, vol. 14, p. 12-17.
- Horton, 1945. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America (BGSA)*, vol. 56, p. 275-370.
- Langlois P. et Delahaye D., 2002. Ruicells, automate cellulaire pour la simulation du ruissellement de surface. *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 12, n°4, p. 461-487.
- Le Bissonnais Y., Thorette J., Bardet C., Daroussin J., 2002. L'érosion hydrique des sols en France. *Rapport INRA-IFEN*, 109 p.
- Morakdhani, 2005. Improved streamflow forecasting using self-organizing radial basis function artificial neuronal networks. *Journal of hydrology*, vol. 295, p. 246-262.
- Nasri S., Cudennec C., Albergel J., Berndtsson R., 2004. Use of a geomorphological transfer function to model design floods in small hillside catchments in semiarid Tunisia. *Journal of hydrology*, vol. 287, p. 197-213.
- Najani M.N., 2003. Watershed modeling of rainfall excess transformation into runoff, *Journal of Hydrology*, vol. 270, p. 273-281.
- Nunes, 2003. Evaluating the MEFIDIS model for runoff and soil erosion prediction during rainfall events. *Catena*, 61, p. 210-228.
- Pierson et Costa, 1987. A rheological classification of subaerial water-flows. *Geological society of America, Reviews in Engineering Geology*, vol. 7, p. 1-12
- Rodriguez-Iturbe I., Rinaldo A., 1997. *Fractal river basins. chance and self-organization*. Cambridge University Press, 547 p.
- Sanders, 2001. Les modèles en Analyse Spatiale, collection IGAT, Paris, Hermès-Lavoisier, 329 p.
- Shreve, 1966. Statistical law of stream numbers. *Journal of Geology*, vol. 74, p. 17-37.