

SIMULATION DE LA DYNAMIQUE SPATIALE DE PROCESSUS HYDROLOGIQUES – L'EXEMPLE DES CRUES RAPIDES DU NORD DE LA FRANCE (BASSIN PARISIEN)

Johnny Douvinet

Doctorant au Laboratoire GEOPHEN (Géographie Physique en Environnement) – LETG UMR 6554 CNRS
Université de Caen Basse-Normandie, Esplanade de la Paix BP 5186, 14032 CAEN Cedex 2

Résumé du sujet de thèse

Titre de thèse : Les apports de l'analyse spatiale à la connaissance et la modélisation des risques hydrologiques – les bassins versants sensibles aux crues rapides (Nord du Bassin Parisien, France).

Directeur de la thèse : Daniel Delahaye (Université de Caen BN).

Financement : Bourse doctorale incluse dans le programme ACI « *Systèmes Complexes en SHS* » (2004-2007) intitulé « *Analyse de la structure et de la dynamique de systèmes spatiaux complexes : les bassins sensibles aux crues rapides du Nord de la France* » (responsable scientifique : Daniel Delahaye).

Résumé : Les régions de grandes cultures du Nord de la France sont largement touchées par les processus de ruissellement, d'érosion et d'inondation. Les catastrophes liées à l'eau ont atteint une ampleur jusqu'à ce jour inconnue. Les coulées de boues qui affectent les vallons secs des plateaux limoneux constituent aujourd'hui la forme la plus dangereuse des inondations en raison de leur caractère torrentiel. Les travaux récents ont montré toute l'importance de l'organisation morphologique des bassins versants dans le fonctionnement de ce type de phénomènes. La vitesse de concentration de l'écoulement rapide est principalement liée à la combinaison entre le système de pente, l'organisation des réseaux de thalwegs et la forme du bassin versant. Cette combinaison forme l'unité physique « bassin versant » qui est un système spatial complexe. Actuellement il n'existe pas de méthode de mesure synthétique de l'organisation spatiale de ces combinaisons et de son incidence sur le fonctionnement hydrologique des bassins. Toutes les approches quantitatives conventionnelles se limitent en effet à des mesures séparées des composantes du système (indices de compacité, rapport de confluence d'Horton, profil en long, courbe hypsométrique). Le travail de thèse se propose donc, en s'appuyant sur la théorie des systèmes complexes, de développer des méthodes permettant de quantifier la structuration en trois dimensions du système bassin versant. Les objectifs sont de fournir de nouveaux moyens d'analyse du fonctionnement des phénomènes d'inondations rapides, mais également d'améliorer la qualité des entrées morphologiques des modèles hydrologiques. (www.unicaen/geographie/ufi/geophen/doctorant/douvinet.html).

Résumé de la communication

Les crues rapides apparaissent fréquemment sur les vallons secs des régions de grande culture. Ces phénomènes se caractérisent par des écoulements violents donnant lieu à une montée des eaux et une propagation de l'onde de crue extrêmement rapides (<1h). L'intensité de la pluie constitue le facteur principal d'explication de ces crues (>50mm en quelques heures). Toutefois, comme l'attestent de nombreux événements, l'organisation morphologique des bassins versants (<40km²) est prépondérante sur le fonctionnement et la dynamique spatiale des processus hydrologiques de surface induits. Actuellement, il n'existe aucun outil pour modéliser les effets de la morphologie. En s'appuyant sur la théorie des systèmes complexes et notamment les automates cellulaires, ce travail se propose de développer des méthodes permettant de quantifier de manière globale et dynamique l'influence de la structure spatiale du bassin versant. Les objectifs sont : i) de fournir de nouveaux moyens d'analyse de l'incidence de ce système morphologique, perçu ici comme la résultante des interactions entre les éléments constituant la structure du bassin (forme, pentes et réseaux hydrographiques); ii) de mieux comprendre son rôle dans la dynamique des phénomènes d'inondations rapides; iii) d'apporter des outils d'aide à la connaissance et la gestion du risque inondation, en localisant notamment les "zones morphologiques fonctionnelles" propices à déclencher des écoulements concentrés rapides et violents.

Introduction : Le contexte de recherche

Les crues rapides liées à de violents orages sont devenues en l'espace de quelques années les processus hydrologiques les plus dangereux affectant les régions de plateaux du Bassin Parisien. Ces crues se caractérisent par des écoulements apparaissant très violemment, avec une montée des eaux et une diffusion des écoulements très rapides (<1h). Les débits spécifiques sont très importants au sein de bassins versants dont la plupart ont une taille inférieure à 40km² (Delahaye, 2002). Ces régions de grande culture du Nord de la France subissent régulièrement les assauts de ces crues, que ce soit sur les plateaux du Pays de Caux en Seine-Maritime (9 juin 1993, 16 juin 1997 ; 13 mai 1998 ; 9 mai 2000), sur les collines de l'Artois dans le Pas de Calais (6 juin 1998 ; 28 août 2002), sur les plateaux crayeux de l'Aisne (18 mai 1993, 7 juillet 2001) ou de l'Eure (5 août 1997), voire même dans la partie orientale du Calvados (1^{er} juin 2003). L'évolution de l'occupation du sol a longtemps été la première variable incriminée. Son rôle est plus qu'évident, en particulier à cause de l'érosion des sols qui fournit la majorité des sédiments alimentant la turbidité des écoulements. La plupart des recherches abordant cette thématique considèrent ainsi qu'il s'agit avant tout d'une manifestation exacerbée du ruissellement érosif (Ludwig, 1995 ; Auzet et al., 1995 ; Cerdan et al., 2002). Des travaux récents (Delahaye, 2002 ; Douvinet et al., 2006-b) ont toutefois montré à quel point la morphologie des bassins versants est la composante principale dans la genèse de ces crues particulièrement rapides, d'autant plus que les cultures ne prédominent pas toujours. En effet, on répertorie seulement 22 % de terres cultivées pour le bassin de Saint Martin de Boscheville (crue du 16 juin 1997), 60 % de prairies et bois dans les bassins en amont de Trouville-Deauville (crue du 1^{er} juin 2003), ou encore 19 % de terres cultivées dans le bassin de Petit Appeville (crue du 28 juin 2005). L'occupation des sols ne joueraient donc qu'un second rôle en aggravant les apports en matériaux solides et en accentuant le pouvoir érosif des écoulements.

Problématique géographique

Bien que les relations entre la morphologie des bassins et leur réponse hydrologique aient été soulignées depuis longtemps (Gravelius, 1914 ; Horton, 1945 ; Beven et Woods, 1982), et même si les progrès de la science au XX^{ème} siècle ont fourni de nombreuses méthodes avec des applications nombreuses et variées, ces outils d'analyse ne sont pas adéquats pour notre étude. Le poids de la morphologie n'a en effet jamais été approché à travers un indicateur qui soit à la fois synthétique et dynamique (Delahaye, 2002). Le bilan établi sur plus de 57 indices tirés des ouvrages hydrologiques de référence s'avère particulièrement négatif : il n'existe aucune méthode de mesure de l'organisation et de la dynamique potentielle d'un bassin versant. La cinématique des crues y reste aussi méconnue car elles apparaissent au sein de petits « vallons secs » présentant l'originalité de ne pas avoir de cours d'eau permanent (Auzet et al., 1995). Ce manque de données hydrologiques nous oblige à recourir à des outils de modélisation. Le but de cette étude n'est pas de retrouver les débits réels (=modélisation), mais plutôt de comprendre la genèse et la dynamique des processus induits par la morphologie (=simulation). L'idée est de mieux saisir l'incidence de la topographie sur les écoulements de surface des bassins où une crue rapide a été observée. Nous nous sommes également tournés vers des outils d'analyse spatiale s'inscrivant dans le champ des systèmes complexes car le jeu des interactions locales entre la structure du bassin et les processus hydrologiques semble être à l'origine de l'émergence de la réponse hydrologique (phénomène dynamique à grande échelle) et pourrait expliquer en partie la complexité du comportement des bassins versants.

Développements méthodologiques

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 sur le ruissellement (Langlois et Delahaye, 2002). La principale difficulté était de lier les variables topographiques - altitude et ses dérivées - aux variables hydrauliques - la direction des écoulements sur les cellules par exemple. Le concept classique d'Automate Cellulaire [AC] (tel que défini par Wolfram, 1983, 2002) a dû être généralisé pour pouvoir modéliser à la fois la structure variable des éléments de terrain 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 structurant la

surface. La démarche s'appuie ainsi sur un automate cellulaire dont les cellules sont de formes et de dimensions variables (point, ligne, surface) et dont les liens traduisent la structure morphologique de la surface (Delahaye et al., 2001). L'automate *Ruicells* a donc une structure combinant le traditionnel formalisme d'un AC, dans lequel les règles de transition dictent la manière dont évoluent les différentes cellules en fonction des états des cellules voisines, et les nombreuses transformations requises pour la simulation de processus hydrologiques (Depraetere et Moniod, 1991 ; Tarboton et al., 1997). L'automate ayant été modifié pour répondre à une problématique géographique, il est possible de l'intégrer dans la catégorie des « Automates Cellulaires Géographiques » (ACGs) conformément à la récente définition donnée par Ménard et Marceau (2006).

Les règles de transition et la structure du maillage sont plus largement détaillées dans Langlois et Delahaye (2002). Fait original, 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 le cadre de cette étude, la surface sera la principale variable étudiée et d'autres variables seront ensuite implémentées (pluies, occupation du sol, coefficients de ruissellement,...etc). Une cartographie dynamique permet dans un premier temps de suivre la quantité de surface transitant à chaque itération de cellule en cellule. Les résultats montrent toute l'importance de la place et de l'organisation spatiale des cellules au sein de bassins versants présentant des configurations spatiales différentes. La dernière carte présente le cumul des surfaces rapporté en gamme de couleurs par rapport à la surface totale du bassin à la fin de la simulation (Fig. 1). Elle permet de bien identifier les zones de concentration et les axes d'écoulement par où transitent les surfaces.

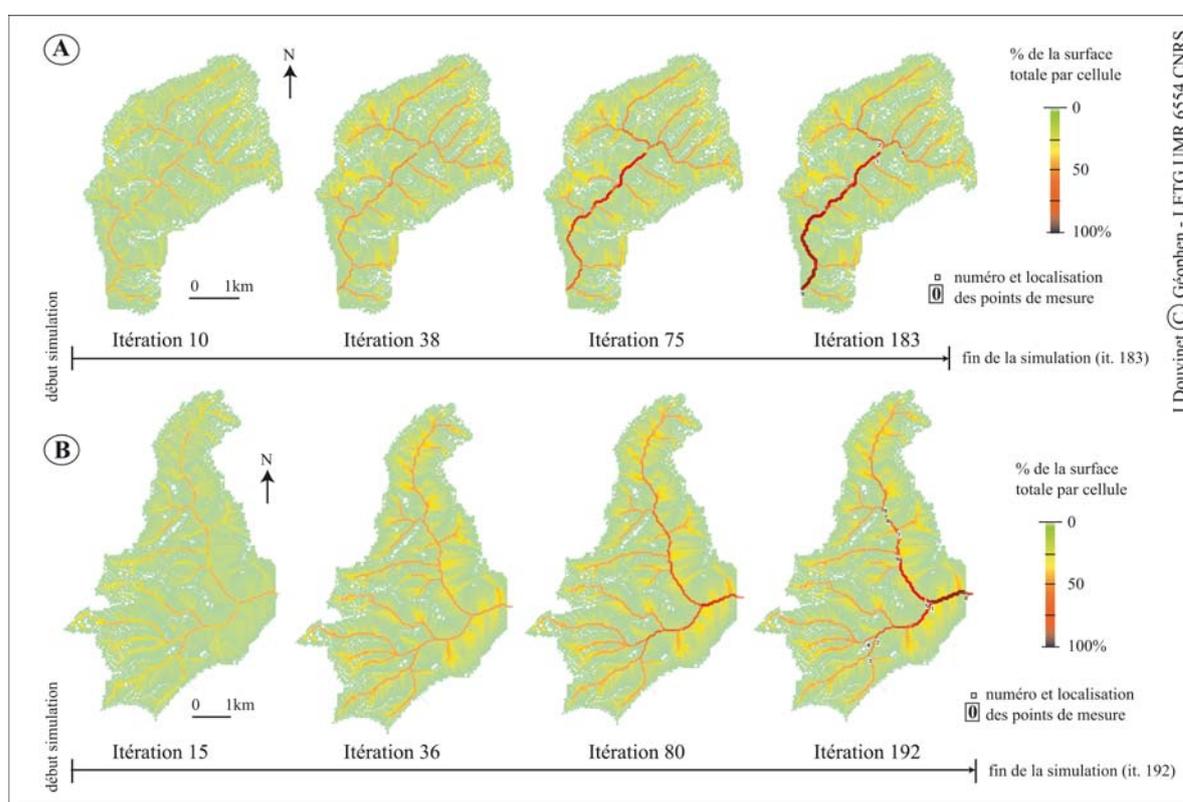
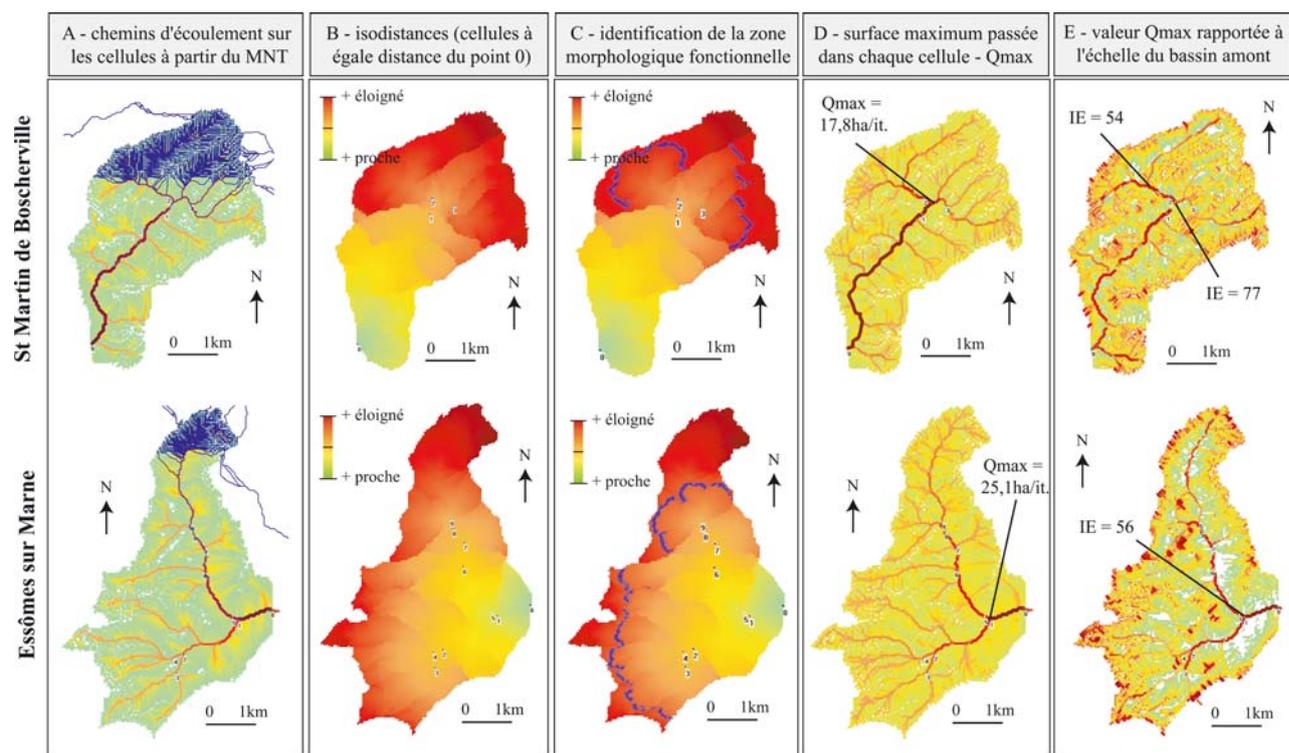


Fig. 1 – Simulation du transit de la « surface » pour deux bassins présentant des configurations spatiales très différentes à différentes itérations : **A** – St Martin de Boscherville (13,4km²) ; **B** – Essômes sur Marne (21,4km²).

Des réponses différentes vont apparaître suivant l'organisation spatiale interne des bassins. De manière générale, les bassins sont très réactifs lorsque les surfaces sont fortement connectées entre elles au sein d'une forme arrondie et compacte. En revanche, la réponse surfacique devient moins importante et le temps de la simulation s'allonge quand les cellules sont connectées au sein d'une forme allongée. La connectivité et la structuration hiérarchique entre les surfaces jouent un rôle prépondérant ; les réponses mesurées à l'exutoire sont ainsi révélatrices de l'efficacité hydrologique avant tout déterminée par l'organisation des cellules plus que par la surface des bassins versants (Douvinet et al., 2006-a). Des mesures hydrologiques simples viennent compléter

ces observations. La distance que vont parcourir les surfaces, T_c , soit le « temps de concentration », ou le débit maximum de surface ($=Q_{max}$), soit l'équivalent de la « pointe de débit » souvent utilisée en hydrologie, sont calculées sur chacune des cellules. Des cartes en isodistances identifient les cellules situées à égale distance de l'exutoire (par le calcul du chemin le plus court – Fig. 2A). Elles fournissent des informations sur la topologie du réseau au sein d'un bassin (Fig. 2B). La zone morphologique fonctionnelle à l'origine du Q_{max} mesuré à l'exutoire peut également être localisée (Fig. 2C). D'un autre côté, les valeurs de Q_{max} sont cartographiées. Sur le bassin d'Essômes, c'est à la confluence finale que la valeur Q_{max} est atteinte (Fig. 2D). En revanche, sur St Martin de Boscherville, la valeur était déjà atteinte dans la partie amont, ce qui montre à quel point cette partie est très efficace puisqu'elle explique à elle seule la valeur obtenue à l'exutoire. Les valeurs de Q_{max} étant fortement dépendantes de la taille des bassins, nous proposons de créer un indice d'efficacité (IE) rapportant la valeur Q_{max} par la surface amont [$IE = Q_{max}(i) / \sqrt{A}(i)$]. Les fortes valeurs permettent de comparer l'efficacité spatiale sans considérer l'effet de taille (Fig. 2E).



J.Douvinet © Géophen - LETG UMR 6554 CNRS

Fig. 2 – Evaluer l'influence de l'organisation spatiale sur la dynamique des processus hydrologiques à travers différentes cartes dynamiques : calcul du chemin le plus court, cartes des isodistances, calcul du Q_{max} sur chaque cellule et indice IE pour les deux bassins versants de St Martin de Boscherville et Essômes sur Marne.

Conclusion : La place des simulations dynamiques en géomorphologie

Les simulations démontrent dans le cadre de cette étude que les entités composant la structure interne d'un bassin versant contribuent à son fonctionnement global. La réponse hydrologique forme dans ce cas un tout cohérent dont la dynamique est intimement liée à la dynamique des entités existant à une échelle inférieure et qui jusqu'alors ne pouvait être expliquée par la seule analyse de la dynamique se déroulant à l'échelle globale du système. La notion de « bassin versant » est ainsi remise en cause. Bien souvent, comme dans le cas de St Martin, la valeur Q_{max} est déjà atteinte dans les parties amont (Fig. 2D). Les résultats confirment la forte relation entre les composantes morphologiques (la forme du bassin, les pentes et la structure du réseau hydrographique) et les processus hydrologiques, mais apportent surtout des informations quant à l'efficacité de certaines configurations spatiales. Les « zones morphologiques fonctionnelles » étant facilement identifiées par les différentes simulations dynamiques, il devient possible de comparer le potentiel surfacique de ces bassins avec la localisation des dommages observés lors du passage des crues rapides (Douvinet et al. 2006-b).

Des approches similaires se retrouvent aujourd'hui dans de nombreux travaux s'inscrivant dans le champ théorique des systèmes complexes. De telles applications restent toutefois encore peu développées en géographie physique. En effet, bien que la structure des ACs existe depuis longtemps, à l'origine développée par Von Neumann en 1951 (Gardner, 1970) puis popularisée par le *Jeu de la Vie* de John Conway (1970), son utilisation en géomorphologie connaît un essor depuis quelques années seulement (Coulthard et al. 2005 ; Fonstad, 2006). Les premières applications se sont attachées à spatialiser la diffusion des dunes, des feux de forêts ou des mouvements de terrain. Plus récemment, des automates ont été complètement modifiés pour simuler la dynamique de processus hydrologiques et sédimentaires (Crave et Davy, 2001 ; Jimenez-Hornero et al., 2004 ; Dmitriev et al., 2006), de chenaux à tresse, de coulées de boue voire de laves torrentielles (Crisci et al., 2003). Les efforts doivent se poursuivre afin de développer des automates utilisant un langage commun propre à tous les ACs, et ce quelque soit les modifications apportées à la structure ou aux règles de voisinage. Malgré la diversité des phénomènes étudiés, la variété des outils d'analyse, les changements d'échelles des niveaux d'observations, et la multitude des interactions spatiales, ces outils s'inscrivent en effet dans un cadre interdisciplinaire très large impliquant une réflexion dont les intérêts sont avant tout d'ordre méthodologique.

Bibliographie

- Anderson R. (1990) – Eolian ripples as examples of self-organization in geomorphological systems. *Earth-Science Reviews*, 29 (1–4), pp. 77–96.
- 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, pp. 187-190.
- Beven K., Woods E.F. (1983) – Catchments geomorphology and the dynamic of runoff contributing areas. *Journal of hydrology*, 39, pp. 139-150.
- Cerdan O., Le Bissonnais Y., Couturier A., Bourennane H., Souchère V. (2002) – Rill erosion on cultivated hillslopes during two extreme rainfall events in Normandy, France. *Soil & Tillage Research*, vol. 67, pp. 99-108.
- Coulthard T.J., Lewin J., Macklin M.G. (2005) – Modelling differential catchment response to environmental change. *Geomorphology*, 69, pp. 222-241.
- Crave, A., Davy, P. (2001) – A stochastic “precipiton” model for simulating erosion/sedimentation dynamics. *Computers & Geosciences*, 27 (7), pp. 815–827.
- Crisci G.M., Di Gregorio S., Rongo R., Scarpelli M., Spataro W., Calvari S., 2003. Revisiting the 1669 Etnean eruptive crisis using a cellular automata model and implications for volcanic hazard in the Catania area. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 123, pp. 211-230.
- Delahaye D., Guermond Y., Langlois P. (2001) – Spatial interaction in the run-off process. *12th European Colloquium on Quantitative and Theoretical Geography*, St-Valery-en-Caux, September 7-11.
- Delahaye D. (2002) – *Apports de l'analyse spatiale en géomorphologie : modélisation et approche multiscalaire des risques*. Mémoire HDR, 2 tomes, Laboratoire Modélisation et Traitements Graphiques, Université de Rouen, 250p.
- Depraetere C., Moniod F. (1991) – Contribution des modèles numériques de terrain à la simulation des écoulements dans un réseau hydrographique : exemple du bassin de Bras-David (Guadeloupe). *Hydrologie continentale*, 6, pp. 29-53.
- Di Gregorio S., Serra R., Villani M. (1998) – Simulation of soil contamination and bioremediation by a cellular automaton model. *Complex Systems*, 11 (1), pp. 31–54.
- Dmitriev A.I., Popov V.L., Psakhie S.G. (2006) – Simulation of surface topography with the method of movable cellular automata. *Tribology International*, 39, pp. 444-449.
- Douvinet J., Delahaye D., Langlois P. (2006-a) – Les apports de l'IAD à la caractérisation morphométrique des bassins versants sensibles aux crues rapides hyper-concentrées (Bassin Parisien, Nord de la France). *Proc. of the International Conference on "Interactions Nature-Sociétés. Analyse et modèles"*, 3-5 mai, La Baule, France, CD-ROM, 6 p.

- Douvinet J., Delahaye D., Langlois P. (2006-b) – Application of cellular automata modelling to analyse the dynamics of hyper-concentrated stream flows on loamy plateaux (Paris Basin, North-western France). *Proc. Of the 7th Int. Conf. on HydroInformatics, "Innovate and share"*, Nice, France, Vol. 2, pp. 1048-1056.
- Fonstad M.A. (2006) – Cellular automata as analysis and synthesis engines at the geomorphology–ecology interface. *Geomorphology* (in press), 17 p.
- Gardner, M. (1970) – The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game of 'life'. *Scientific American*, 223 (4), pp. 120-123.
- Gravelius H. (1914) – Grundriß der gesamten Gewässerkunde, in Band 1 : *Flußkunde (Compendium of Hydrology, vol. 1, Rivers, in German)*, Goschön, Berlin, Germany.
- Horton R.E. (1945) – Erosional development of streams and their drainage basins ; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America (BGSA)*, 56, pp. 275–370.
- Jimenez-Hornero, F.J., Giraldez, J.V., Laguna, A. (2004) – Estimation of the role of obstacles in the downslope soil flow with a simple erosion model: the analytical solution and its approximation with the Boltzmann model. *Catena*, 57, 261-275.
- Langlois P., Delahaye D. (2002) – Ruicells, automate cellulaire pour la simulation du ruissellement de surface. *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 12 (4), pp. 461-487.
- Ludwig B. (1992) – *L'érosion par ruissellement concentré des terres cultivées du Nord du Bassin Parisien. Analyse de la variabilité des symptômes d'érosion à l'échelle du bassin versant élémentaire*. Thèse de Géog., ULP-Strasbourg, 155 p.
- Ménard A., Marceau D.J. (2006) – Simulating the impact of forest management scenarios in an agricultural landscape of southern Quebec, Canada, using a geographic cellular automata. *Landscape and Urban Planning* (in press), 13 p.
- Tarboton D. G. (1997) – A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, vol. 33 (2), pp. 309-319.
- Wolfram S, (1983) – Statistical Mechanics of Cellular Automata. *Rev. Mod. Phys*, 55, pp. 601-644.
- Wolfram, S. (2002) – A New Kind of Science. *Champaign, IL: Wolfram Media*, pp. 646-647.