

## Les paysages bocagers et le ruissellement appréhendés par la modélisation multi-agents

**Les mutations paysagères du bocage au cours des soixante-dix dernières années (agrandissement des parcelles, suppression des haies et des talus, etc.) tendent à amplifier les transferts d'eau et de sédiments issus du ruissellement sur les parcelles agricoles. Ces transferts peuvent alors générer de multiples aléas : inondation, pollution de l'eau, érosion des sols... En permettant une analyse des interactions qui lient les objets géographiques de différentes natures (haies, parcelles cultivées, mares, chemins, etc.) à l'échelle d'un territoire, l'analyse spatiale et ses outils de modélisation facilitent la mise en place de plans de gestion adaptés du bocage.**

### Érosion, ruissellement et transferts hydrosédimentaires dans les espaces bocagers

Un paysage bocager est composé de parcelles agricoles protéiformes, majoritairement cultivées ou sous couvert herbager, de tailles variables mais souvent modestes. Le bocage c'est surtout le paysage de l'enclos lié à la présence d'importants réseaux de haies en bordure de parcelles ou en ceinture de fonds de vallées. Les densités peuvent ainsi atteindre plusieurs dizaines de kilomètres par hectare.. La présence de surfaces boisées, de bosquets, de petites zones humides, d'étroits réseaux de chemins et un habitat dispersé complètent ce paysage hérité d'un long processus d'anthropisation par les sociétés rurales, principalement agricoles. Si le bocage possède certains atouts environnementaux, le rendant vertueux au regard d'autres espaces produits par certains systèmes agricoles, celui-ci n'est pour autant exempt de toutes formes d'altérations. L'érosion hydrique des sols agricoles en est une. De nombreuses études scientifiques, basées notamment sur la quantification des sédiments et des nutriments ont, en effet, montré l'importance des flux de matières qui circulent entre les parcelles agricoles et les cours d'eau en période de ruissellement. L'importance de ces flux n'est pas corrélée avec la densité des bocages (km/ha) mais plutôt avec l'organisation et la structuration des objets qui les composent, c'est-à-dire

des haies, des prairies, des mares, mais également des fossés, des entrées de champs ou encore des routes, etc. Dans de nombreux cas, un mauvais agencement spatial des entités paysagères crée des conditions favorables à l'exportation des sédiments vers le cours d'eau, pouvant se chiffrer en tonnes par km<sup>2</sup>. L'exemple de l'entrée de champs au milieu d'une haie permettant aux eaux de ruissellement de rejoindre un chemin agricole lui-même orienté vers un petit ruisseau est fréquemment rencontré dans les espaces bocagers. Les interactions spatiales entre les objets qui construisent les paysages sont fondamentales pour expliquer la circulation du ruissellement. Les conséquences de ces transferts sont nombreuses : perte en terre, diminution de la fertilité des sols, pollution diffuse, altération physico-chimique de l'eau, colmatage des frayères, inondation, etc. Cette situation n'a fait que se dégrader sous l'effet de l'évolution des systèmes agricoles et des aménagements fonciers : agrandissement du parcellaire agricole, dégradation voire suppression de linéaires de haies, assèchement des mares et zones humides, comblement de chemin agricole, etc.

Évidemment, ces évolutions des paysages agricoles et leurs effets hydrologiques collatéraux sont des variables centrales de l'évolution du système érosif. Il faut les connaître, être capable de les mesurer et de les modéliser pour construire une politique d'aménagement cohérente.

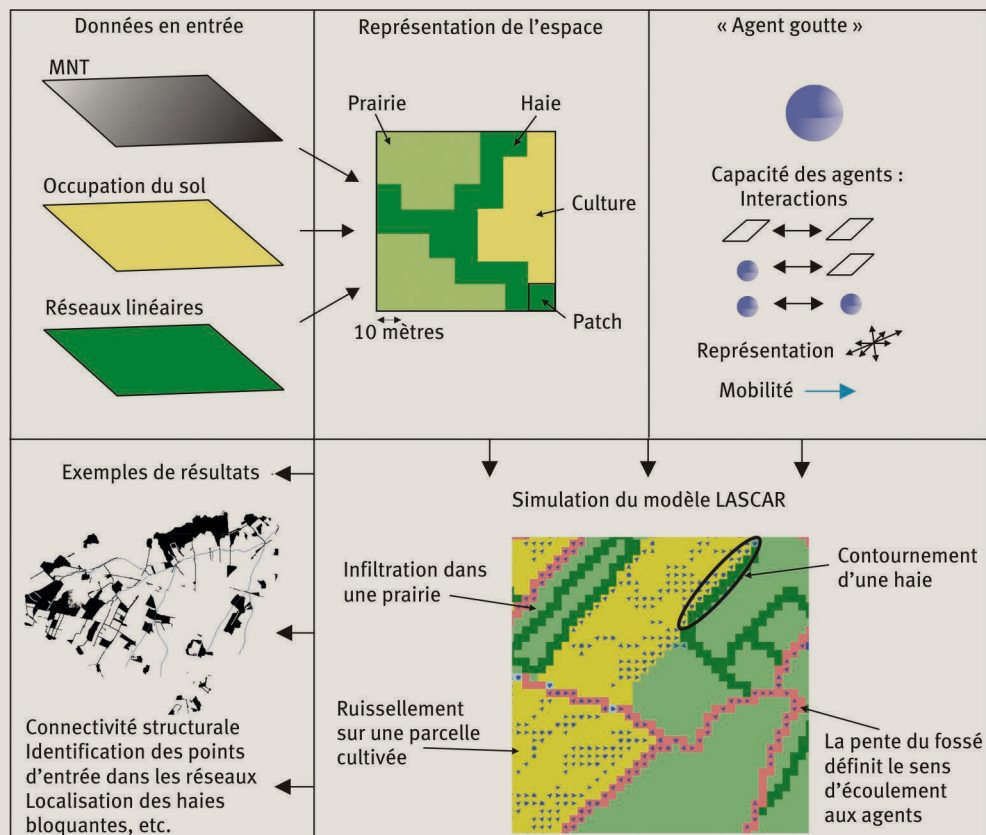
## Comprendre la relation entre le paysage et les processus hydrologiques

Pour évaluer la capacité du ruissellement à circuler au sein d'un paysage pour rejoindre le cours d'eau, il est nécessaire de s'interroger sur l'organisation et la structuration des entités paysagères qui composent le paysage. Comme évoqué précédemment, ces dernières engendrent des interactions spatiales à l'origine d'une complexité plus ou moins marquée des dynamiques du ruissellement à l'échelle d'un territoire. Les approches basées uniquement sur l'observation de terrain sont coûteuses en moyens humains et matériels, et ne mettent pas en évidence les effets locaux (blocage par une haie, prise en charge par un fossé, ruissellement sur une parcelle cultivée, etc.) sur le fonctionnement hydrologique global d'un territoire. Pour pallier cela, le recours aux outils de l'analyse spatiale, et notamment à la simulation spatiale, afin d'appréhender le fonctionnement global d'un territoire semble être le plus pertinent. Ces approches permettent d'abord de formaliser les interactions qui lient les objets géographiques de différentes natures (haies, parcelles cultivées, mares, chemins, etc.) avec le processus physique d'écoulement de l'eau, puis d'en déduire un schéma d'organisation à l'échelle du territoire.

## Le modèle de simulation multi-agents LASCAR

La modélisation par systèmes multi-agents constitue un bon moyen de décomposer et de comprendre un système complexe en mettant en œuvre des règles locales d'interactions simples et faciles à comprendre. Dans l'étude des processus physiques des écoulements de surface, l'approche multi-agents est encore récente, mais elle trouve son intérêt dans sa capacité à fournir des informations sur l'origine des écoulements, sa dynamique spatiale et sa variabilité temporelle. Nous présentons ici le modèle multi-agents LASCAR (*Landscape Structure And Runoff*), développé spécifiquement pour comprendre les relations les paysages et les processus hydrologiques en vue d'extraire des indices d'analyses spatiales pertinents pour une gestion raisonnée des espaces agricoles. LASCAR est un modèle distribué représentant un environnement sous la forme d'un maillage carré, calqué sur la résolution des modèles numériques de terrain fourni par l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière). Chaque cellule contient des informations relatives à l'utilisation des sols et à l'altitude (figure 1). Afin de reproduire l'écoulement de surface, le modèle LASCAR utilise une approche dite « agent » reposant sur une discrétisation

1 Présentation simplifiée du modèle LASCAR  
(la bibliographie fournit les références nécessaires à la bonne compréhension du modèle).



particulière des écoulements. Ainsi, chaque agent transportant un volume d'eau se déplace de cellule en cellule en fonction de la pente (effet gravité) et des contraintes paysagères jusqu'à ce qu'il atteigne la sortie de l'environnement de simulation (exutoire du bassin versant). Pour illustrer l'intérêt du modèle LASCAR sur un territoire, nous prenons ci-dessous l'exemple d'un petit bassin versant agricole bocager (17,6 km<sup>2</sup>) que nous suivons dans le cadre de nos activités de recherche : le bassin versant du Lingèvres situé dans le Calvados, en Normandie. Celui-ci est équipé d'une station de mesure des débits d'eau et de matières en suspension, d'une station météorologique et a fait l'objet de plusieurs suivis en période de ruissellement depuis une dizaine d'années.

### Le recours à l'analyse spatiale dans les diagnostics territoriaux

Le modèle LASCAR apparaît comme un bon outil de diagnostic pour mettre en évidence les entités d'un bassin versant qui interagissent avec les écoulements, entre les zones de production de surplus hydrologique (parcelles cultivées) et le cours d'eau. Les simulations permettent, en effet, d'identifier (figure 2) :

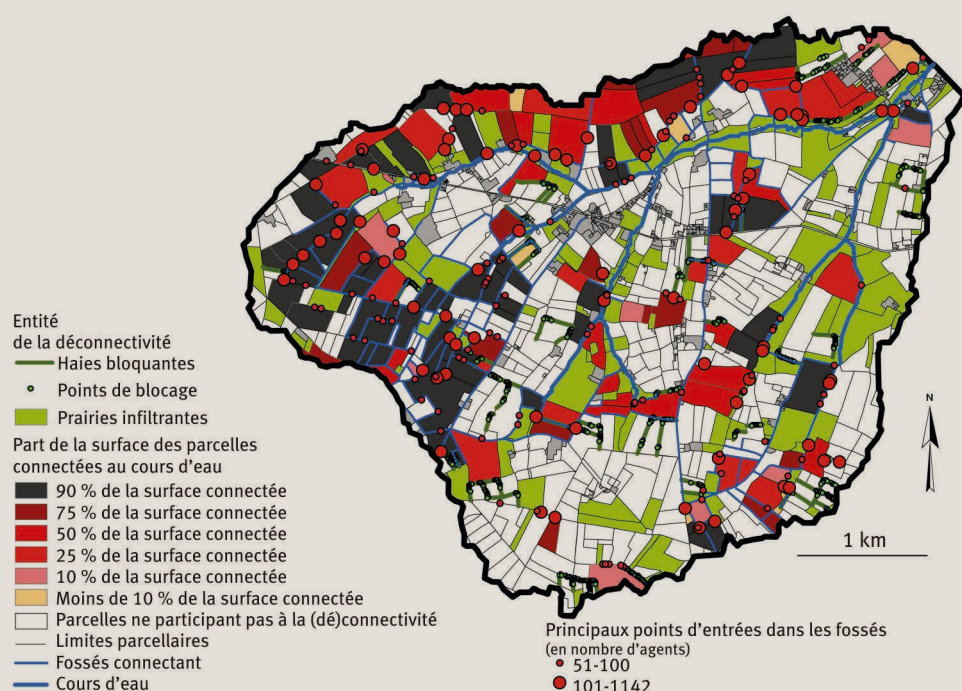
- les haies bloquantes,
- les prairies infiltrantes de ruissellement venu de surfaces situées en amont,
- les parcelles cultivées dont le ruissellement potentiellement produit rejoint le réseau hydrographique,

- les réseaux de fossés qui participent à la connectivité hydrologique,
- les points de passage entre un ruissellement de parcelle et un écoulement de réseau.

La gradation de couleur des parcelles potentiellement ruisselantes souligne le degré de connectivité. Les couleurs, du rose au rouge foncé illustrent les « niveaux de contraintes » affectant chacune de ces parcelles. Ainsi, la connectivité au cours d'eau de certaines parcelles est difficile car conditionnée par un nombre important de seuils de rétention à abaisser (prairies à franchir, par exemple), traduisant ainsi la capacité d'un paysage à résorber le ruissellement produit par certaines de ses entités. D'autres parcelles sont à l'inverse facilement connectées au cours d'eau. Il s'agit par exemple de parcelles drainées par des réseaux de fossés, qui prennent en charge les écoulements de surface pour les acheminer jusqu'au cours d'eau.

Le modèle LASCAR permet donc de hiérarchiser les niveaux de connectivité au sein d'un territoire et d'aller au-delà des cartographies qu'il est possible d'établir *in situ*, même au cours d'un épisode de ruissellement, puisque la connectivité des parcelles au cours d'eau est pondérée par la difficulté à être effectivement connectées (en fonction de la difficulté à « franchir » les entités présentes à l'aval). La cartographie traduit ainsi une certaine rugosité de l'espace à l'égard des parcelles connectées au cours d'eau. Les parcelles situées au nord du bassin versant de Lingèvres identifiables par

2 Cartographie des entités de la (dé)connectivité sur le bassin versant de Lingèvres (2014) – Reulier *et al.*, 2017.





leur grande superficie, l'absence de réseaux de haies et leur mise en culture affichent pourtant des taux de connectivité plus faibles que les parcelles situées dans la partie la plus « bocagère » du bassin (sud-ouest). Cela s'explique par la présence de quelques prairies de bas fond (aisément identifiable sur la cartographie) qui vont favoriser l'infiltration des surplus avant que ceux-ci ne parviennent au cours d'eau. Bien évidemment, cette capacité d'infiltration n'est pas illimitée et certains écoulements parviennent à franchir cet obstacle.

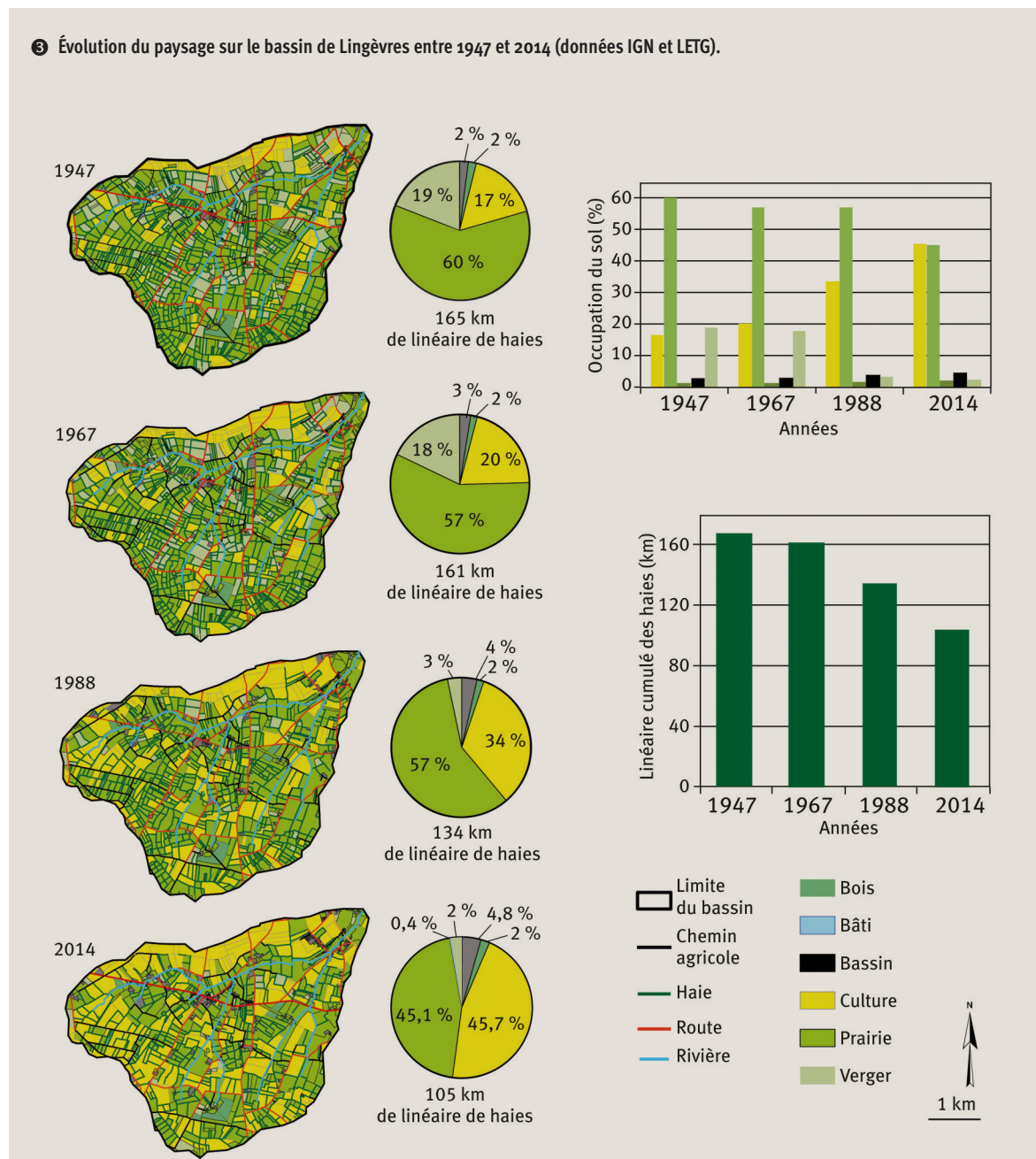
Cette cartographie finale présente ainsi un intérêt majeur pour une gestion intégrée des espaces agricoles en offrant une vision à la fois synthétique et hiérarchisée des entités de la (dé)connectivité et facilite la priorisation des actions à mener au sein du bassin.

### Explorer la trajectoire paysagère d'un espace pour mieux anticiper ses évolutions futures

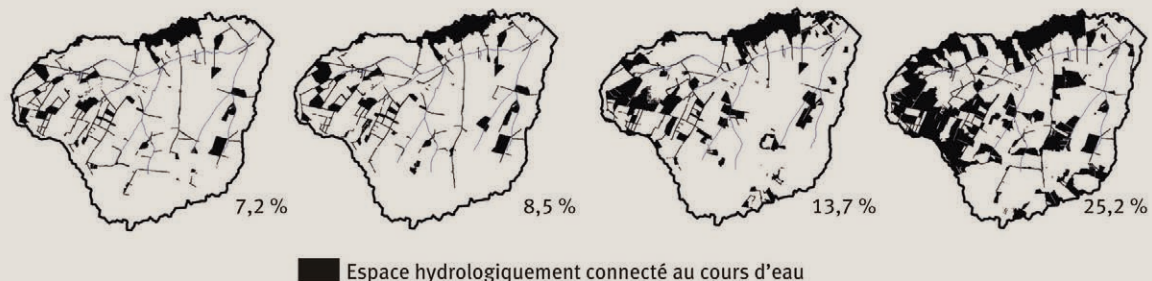
#### Évolution du paysage

En s'adaptant au tournant productiviste du milieu du vingtième siècle, l'activité agricole a profondément bouleversé les paysages ruraux : agrandissement des parcelles, augmentation des surfaces cultivées, diminution du nombre de prairies, arasement de haies, comblement des chemins, création de fossés, etc. Le bassin versant du Lingèvres, comme tant d'autres dans l'Ouest de la France, n'a pas échappé à ces profondes mutations (figure 3). Ainsi, en 1947, 79% de sa superficie était occupé par des prairies ou des vergers, pendant que les surfaces cultivées n'occupaient que 17% du territoire.

3 Évolution du paysage sur le bassin de Lingèvres entre 1947 et 2014 (données IGN et LETG).



#### 4 Évolution de la connectivité structurale au cours d'eau entre 1947 et 2014.



Ces dernières, principalement localisées dans les parties nord du bassin où elles se caractérisaient par des formes laniérées et des superficies faibles (1,4 ha en moyenne), répondaient aux logiques d'une agriculture encore très faiblement mécanisée. En 2014, les parcelles cultivées sont devenues majoritaires sur le bassin (47,7 %) avec des mutations rapides (+ 13,7 % entre 1988 et 2014). La taille moyenne des parcelles atteint désormais 2,9 hectares contre 1,4 hectares en 1947. Enfin, en 2014, la longueur cumulée des réseaux de haies compte 60 km de moins qu'en 1947 (4 km.km<sup>2</sup> contre 10 km.km<sup>2</sup>).

#### Évolution de la connectivité au cours d'eau

En utilisant le modèle LASCAR sur ces différents paysages reconstruits, il est possible d'évaluer les conséquences de cette évolution des paysages agricoles sur la connectivité au cours d'eau (figure 4). Ainsi, la part des surfaces cultivées et hydrologiquement connectées au cours d'eau a plus que triplé entre 1947 et 2014 sur le bassin versant de Lingèvres. En 1947, seulement 7,2 % des surfaces cultivées étaient hydrologiquement connectées au cours d'eau, elles sont 8,5 % en 1967, 13,7 % en 1988 et 25,2 % en 2014.

L'augmentation de la connectivité est en premier lieu à rapprocher à l'évolution du nombre de surfaces cultivées, celles-ci ayant augmenté de 28,7 %, entre 1947 et 2014. Cependant, la part des surfaces cultivées et hydrologiquement connectées au cours d'eau n'a augmenté que de 18 %. Ainsi, l'augmentation du nombre de parcelles cultivées n'a pas été synonyme d'un accroissement similaire de la connectivité. La localisation dans l'espace des surfaces cultivées et la capacité des réseaux (fossé, route, chemin) à connecter ces surfaces au cours d'eau apparaissent comme d'autres facteurs déterminant de la connectivité. C'est ce que confirme le calcul de la part du réseau de fossés efficaces dans le bassin. Alors que 48,8 % des réseaux de fossés permettaient la connectivité des surfaces cultivées au cours d'eau en 1947, ce sont 65,4 % des réseaux de fossés qui sont fonctionnels en 2014. Cette augmentation de l'efficacité des réseaux de fossés est également à lier avec celle du nombre des points d'entrées des écoulements dans les fossés, mesurés par modélisation. Ce nombre est passé de 1 595 en 1947 à 5 001 en 2014. Cette augmentation du nombre de points d'entrées dans le réseau est particulièrement

importante au nord et à l'ouest du bassin. Cette constatation n'est pas surprenante dans la mesure où c'est dans cet espace que la part des surfaces cultivées a le plus augmenté.

Cet exemple illustre les conséquences directes de l'évolution des pratiques agricoles depuis le milieu du vingtième siècle tant sur la « qualité » d'un paysage bocager, que sur les aspects « quantitatifs » liés aux processus de transferts hydro-sédimentaires de versant. L'approche présentée, reposant sur le concept de l'analyse spatiale et de ses outils apporte une preuve concrète, s'il en fallait une, du rôle des sociétés sur la sensibilité d'un territoire aux processus de transferts de matières. Elle souligne le besoin de mieux comprendre les logiques liées à l'organisation dans l'espace des entités qui composent un paysage. Chacune d'entre elle joue un rôle dont l'importance ne peut être négligeable dans le fonctionnement global d'un territoire. La multifonctionnalité des paysages bocagers est un atout indéniable pour les territoires concernés et les approches prônant une approche intégrée et multi-scalaire doivent être plébiscitées pour une gestion raisonnée des territoires. ■

#### Les auteurs

Romain REULIER et Daniel DELAHAYE

Laboratoire LETG-Caen 6554 CNRS,  
Université de Caen Normandie,  
Esplanade de la Paix,  
F-14032 Caen Cedex, France.

✉ [romain.reulier@unicaen.fr](mailto:romain.reulier@unicaen.fr)

✉ [daniel.delahaye@unicaen.fr](mailto:daniel.delahaye@unicaen.fr)





## EN SAVOIR PLUS...

▣ BRACKEN, L.J., WAINWRIGHT, J., ALI, G.A., TETZLAFF, D., SMITH, M.W., REANEY, S.M., ROY, A.G., 2013, Concepts of hydrological connectivity: research approaches, pathways and future agendas, *Earth-Sci. Rev.*, n° 119, p. 17-34.

▣ GASCUEL-ODOUX, C., AUROUSSEAU, P., DORAY, T., SQUIVIDANT, H., MACARY, F., UNY, D., GRIMALDI, C., 2011, Incorporating landscape features to obtain an object-oriented landscape drainage network representing the connectivity of surface flow pathways over rural catchments, *Hydrological Processes*, n° 25, p. 3625-3626.

▣ MÉROT, PH., GASCUEL-ODOUX, C., WALTER, C., ZHANG, X., MOLENAT, J., 1998, Influence du réseau de haies des paysages bocagers sur le cheminement de l'eau de surface, *Rev. Sci. Eau*, n° 12/1, p. 23-44.

▣ REULIER, R., DELAHAYE, D., VIEL, V., DAVIDSON, R., 2017, Connectivité hydrosédimentaire dans un petit bassin versant agricole du nord ouest de la France : de l'expertise de terrain à la modélisation par Système Multi-Agent, *Geomorphologie*, 15 p.

▣ VIEL, V., DELAHAYE, D., REULIER, R., 2014b, Évaluation of slopes contribution to watershed sediment budget for a low energy water system. A case study from the Lingeves watershed, *Geogr. Ann.*, p. 497-511, disponible sur : <https://doi.org/10.1111/geoa.12071>

▣ WAINWRIGHT, J., TURNBULL, L., IBRAHIM, T.G., LEXARTZ-ARTZA, I., THORNTON, S.F., BRAZIER, R.E., 2011, Linking environmental régimes, space and time: interpretations of structural and functional connectivity, *Geomorphology*, n° 126, p. 387-404.