



# Hydrologie et anthropisation

## 4

La croissance démographique mondiale s'accompagne d'une augmentation de la part de la population vivant dans des zones urbaines. En France, cette part était de 50 % en 1945 et a atteint 80 % en 2016. Cette urbanisation induit des modifications des paysages, initialement naturels, agricoles ou forestiers et impacte fortement le cycle naturel de l'eau dans les bassins versants.

Les travaux de l'OTHU, illustrés dans les questions suivantes, ont largement contribué à étudier et quantifier ces impacts via le suivi de long terme de plusieurs bassins versants urbains ou périurbains. Les travaux ont apporté des contributions originales sur la caractérisation de l'artificialisation des surfaces et l'identification des chemins de l'eau dans les bassins périurbains. Plusieurs outils et méthodes alliant collecte de données sur le long terme et modélisation ont permis de quantifier l'impact de l'artificialisation sur le cycle hydrologique dans les bassins versants. Des travaux se sont aussi plus particulièrement focalisés sur les modifications apportées à la ressource en eau souterraine et aux inondations urbaines.

# Qu'est-ce que l'artificialisation des sols ?

Isabelle Braud et Flora Branger, INRAE Lyon

**L'urbanisation modifie les paysages initialement forestiers, agricoles ou naturels, conduisant à ce qu'on appelle l'artificialisation des sols. Cette notion d'artificialisation est souvent considérée à tort comme synonyme d'imperméabilisation, alors qu'elle renvoie à des transformations bien plus profondes, qui ne se limitent pas à ce qui est visible en surface.**

## Les différentes composantes de l'artificialisation des sols

### Notre définition: un sol artificialisé est un sol soumis à urbanisation

Dans l'expertise collective menée sur les déterminants et les impacts de l'artificialisation des sols, Béchet et al. (2017) définissent les « sols artificialisés » comme ceux qui ne sont ni naturels, ni forestiers, ni agricoles. Même si les pratiques agricoles et sylvicoles modifient les paysages et le fonctionnement des sols, une surface de culture n'est donc pas considérée comme « artificialisée » : dans cet ouvrage, un sol artificialisé est donc un sol soumis à urbanisation.

Le mot urbanisation est souvent considéré comme synonyme d'imperméabilisation des surfaces, accompagnant la construction de bâtiments ou de routes. Cependant, cette vision est très réductrice car les transformations apportées par l'urbanisation sont plus profondes et affectent les paysages ainsi que la structure, la chimie et la biologie des sols.

### Le compartiment souterrain peut également être artificialisé

Outre les bâtiments, les zones artificialisées comprennent les parcs et jardins, les équipements sportifs, récréatifs et de loisirs, les zones industrielles et commerciales, ainsi que tous les réseaux de communications (voiries, chemins, routes, réseaux de transport en commun) qui en permettent l'accès. Une autre composante, souvent invisible, concerne les modifications de la structure des sols via les réseaux souterrains : réseaux d'adduction d'eau potable, d'assainissement, de gestion des eaux pluviales, avec la création de tranchées où le sol naturel est remplacé par des matériaux souvent plus grossiers. Les nouvelles techniques de gestion des eaux pluviales introduisent aussi de nouveaux éléments dans les paysages urbains comme les noues, les tranchées infiltrantes, les jardins de pluie ou les toitures végétalisées. On peut aussi mentionner les pompes mises en place pour assurer l'étanchéité des bâtiments. L'ensemble de ces aménagements modifie la surface et le compartiment souterrain et impactent les écoulements dans les cours d'eau et les nappes souterraines.

**Photo 1** : Les paysages périurbains : une mosaïque de zones bâties, de voiries, de zones rurales ou de parcs et jardins (source : Pixabay).



## La cartographie pour quantifier l'artificialisation des sols

Pour caractériser l'artificialisation des sols, on s'appuie en général sur des cartographies de la couverture des sols (land cover) ou de leur usage (land use). L'imagerie aérienne et satellite est de plus en plus utilisée à cette fin, notamment avec l'avènement d'images à très haute résolution spatiale (de l'ordre de 50 cm à un mètre) qui permettent d'identifier différents types de surface selon leurs propriétés spectrales ou d'identifier des objets selon leurs caractéristiques morphologiques. La télédétection satellitaire fournit des informations sur l'occupation des sols depuis les années 1980 environ, mais les progrès des capteurs ont conduit à une amélioration de la résolution spatiale. Des corrections sont donc nécessaires pour comparer des cartes produites à des dates différentes.

Par ailleurs, artificialisation et imperméabilisation ne sont pas systématiquement synonymes. Les parcs et jardins sont perméables, alors que des surfaces naturelles comme des zones rocheuses sont plutôt imperméables. La cartographie de

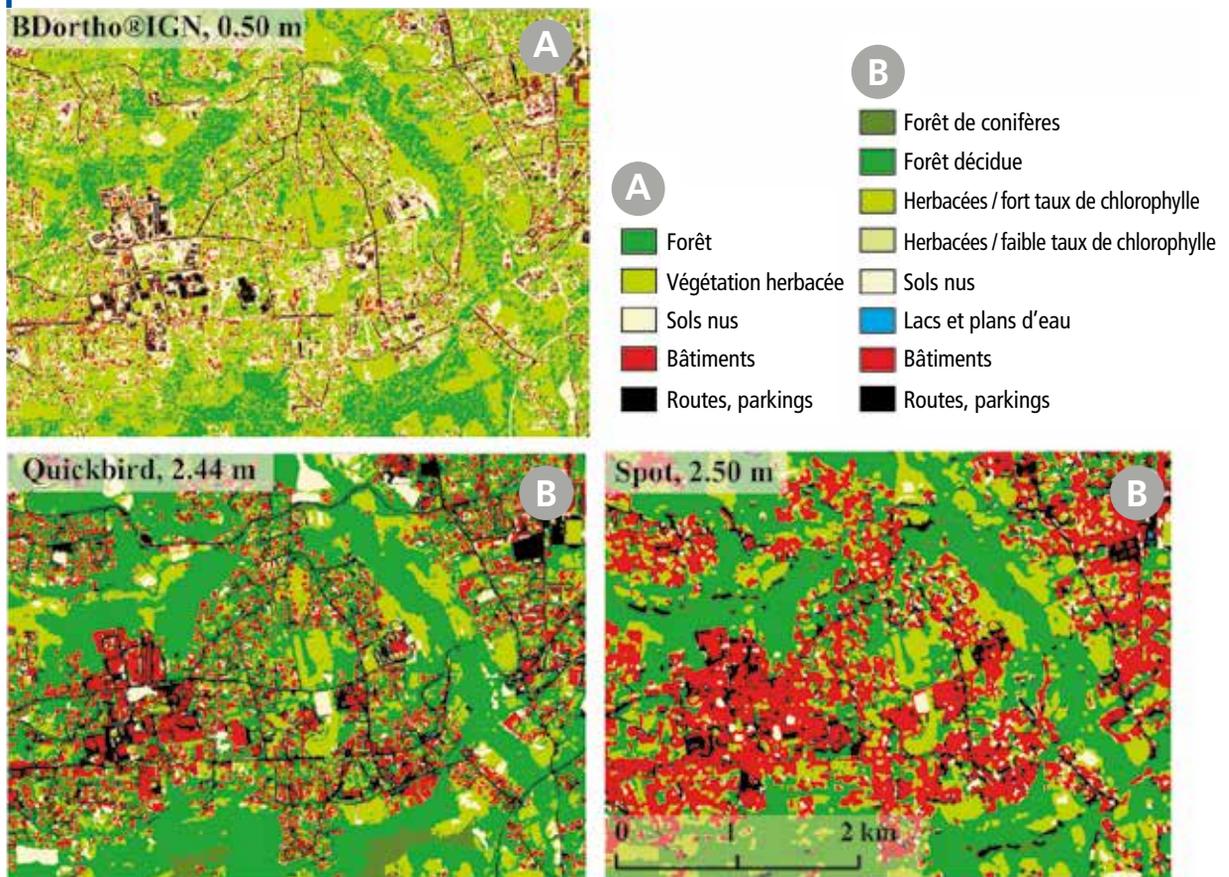
la couverture du sol (land cover) donne des informations sur les propriétés physiques des surfaces et donc sur le caractère perméable ou imperméable des surfaces, alors que l'usage des sols (land use) informe plutôt sur l'usage des parcelles (agricole, résidentiel, zones de loisirs, etc.).

La partie souterraine de l'artificialisation, invisible pour l'imagerie aérienne et satellite, est plus difficile à quantifier. Il faut s'appuyer sur des cartographies spécifiques, lorsqu'elles existent (cartes des réseaux d'assainissement gérés par les collectivités et organismes gestionnaires). En leur absence, on peut travailler par association avec des données de surface, par exemple en faisant l'hypothèse que les réseaux d'assainissement suivent les routes principales.

## La quantification de l'imperméabilisation dépend de la source d'information utilisée

Dans le cadre du projet de recherche ANR AVuPUR, l'artificialisation des sols a été caractérisée sur le bassin périurbain de l'Yzeron, l'un des sites de l'OTHU. Pour cela, des

**Figure 1 :** Cartographie de l'occupation du sol à l'aide d'images aériennes (BR Ortho® IGN à 50 cm de résolution) et par analyse d'images Quickbird à 2,44 m et Spot à 2,5 m sur un secteur du bassin de l'Yzeron (adapté de Jacqueminet *et al.*, 2013).



## Une cartographie de l'occupation des sols en ligne

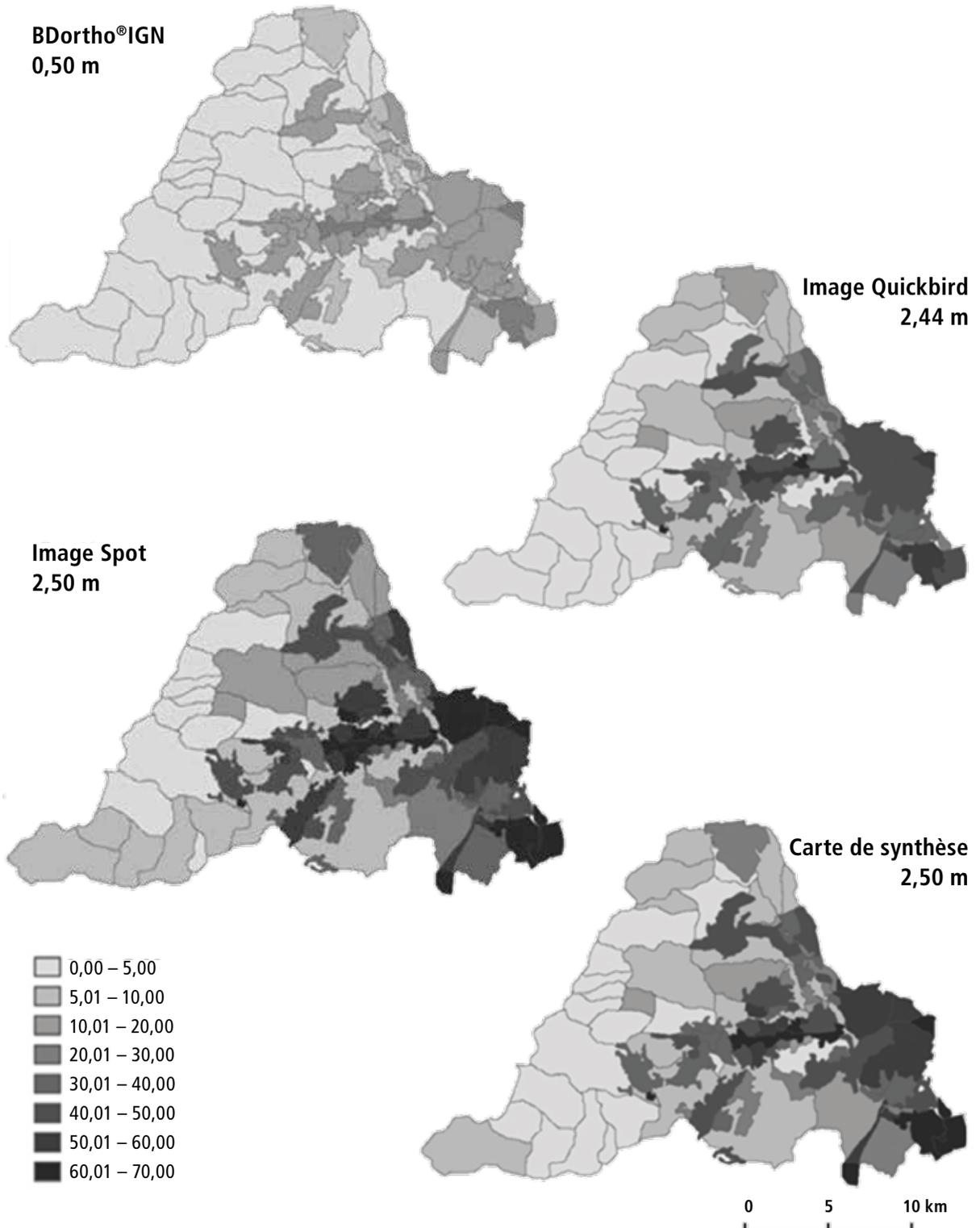
Le portail Theia<sup>1</sup> propose maintenant de manière systématique une cartographie de l'occupation du sol annuelle à l'aide d'images Spot 5 et 7 qui peuvent être utilisées pour suivre l'évolution de l'artificialisation d'une agglomération et voir l'efficacité des politiques d'aménagement urbain, en complément des données disponibles dans certaines collectivités.

<sup>1</sup> [ic.cx/theia](http://ic.cx/theia)

informations sur la topographie, la géologie et la pédologie ont été collectées. Des contacts avec les gestionnaires ont en outre permis de documenter les différents réseaux (pluvial, assainissement). L'occupation du sol a été cartographiée, afin de caractériser le taux d'imperméabilisation des sols, notamment pour un usage dans les modèles hydrologiques

qui ont été développés (voir Question 4.2: Quelles sont les conséquences de l'artificialisation des sols sur le cycle de l'eau?). L'usage du sol a aussi été cartographié de manière rétrospective, afin de paramétrer un modèle d'évolution de l'usage du sol et définir des scénarii prospectifs en 2030 (Dodane *et al.*, 2014).

**Figure 2 :** Pourcentages d'imperméabilisation calculés par sous-bassins versants de l'Yzeron à l'aide de cartographies de l'occupation du sol réalisées à partir de la BD Ortho® IGN à 50 cm de résolution, et par analyse d'images Quickbird à 2,44 m et Spot à 2,5 m (adapté de Jacqueminet *et al.*, 2013).



Pour cartographier l'occupation du sol, plusieurs sources d'informations ont été comparées : la BDOrtho® de l'IGN avec une résolution de 50 cm ; une image spot à 2,50 m et une image Quickbird à 2,44 m. Plusieurs classes d'occupation des sols, permettant de discriminer le caractère perméable ou non perméable des surfaces, ont été définies (figure 1). Les différentes images apportent des informations complémentaires. Ainsi la BD Ortho® IGN permet de bien caractériser les réseaux linéaires (chemins, routes, voiries). La figure 2 illustre le fait que la quantification du degré

d'imperméabilisation dépend fortement de la source d'information utilisée. Les simulations montrent que le débit total du cours d'eau change assez peu selon la carte utilisée. Par contre, les composantes du débit (surface, subsurface, souterrain) sont plus fortement modifiées. Ceci implique que, comme l'origine de l'eau est différente, le transport de contaminants sera différent selon la source de données utilisée. Les cartes ont alors été combinées pour générer une carte dite de « synthèse » qui exploite au mieux les points forts des différentes images.



## POUR ALLER PLUS LOIN

- ▶ **Béchet B., Le Bissonnais Y., Ruas A.** (pilotes), **Aguilera A., Andrieu H., Barbe Billet P., Cavailhès J., Cohen M., Cornu S., Dablanc L., Delolme C., Géniaux G., Hedde M., Mering C., Musy M., Polèse M., Weber C., Frémont A., Le Perchec S., Schmitt B., Savini I., Desrousseaux M.**, (2017). Sols artificialisés et processus d'artificialisation des sols : déterminants, impacts et leviers d'action. Synthèse du rapport d'expertise scientifique collective, Ifsttar-Inra (France), 127 p. – [lc.cx/bechet2017](https://lc.cx/bechet2017)
- ▶ **Jacqueminet C., Kermadi S., Michel K., Béal D., Gagnage M., Branger F., Jankowfsky S., Braud I.**, (2013). Land cover mapping using aerial and VHR satellite images for distributed hydrological modelling of periurban catchments: Application to the Yzeron catchment (Lyon, France), *Journal of Hydrology*, Volume 485, 2013, pages 68-83, ISSN 0022-1694 – [lc.cx/jacqueminet2013](https://lc.cx/jacqueminet2013)

# Quelles sont les conséquences de l'artificialisation des sols sur le cycle de l'eau ?

Isabelle Braud et Flora Branger, INRAE Lyon

**L'artificialisation des sols modifie la manière dont la pluie se répartit entre infiltration, ruissellement, évapotranspiration ou recharge des aquifères. Mais comment quantifier et modéliser la manière dont elle impacte les composantes du cycle hydrologique des bassins urbains ou périurbains ? Aujourd'hui, les modalités d'artificialisation évoluent et l'évaluation de leurs conséquences n'en sont que plus complexes : au-delà de l'imperméabilisation et de l'évacuation directe des eaux pluviales par le « tout-tuyau », on introduit aujourd'hui de plus en plus de solutions fondées sur la nature, pour une gestion des eaux pluviales à la source. Il importe ainsi d'évaluer l'impact de ces nouveaux modes de gestion au niveau d'un bassin versant.**

## L'artificialisation impacte l'ensemble des composantes du cycle hydrologique

Le premier impact de l'artificialisation est l'imperméabilisation des sols, de par la construction des bâtiments ou des routes et la pluie va ruisseler dessus.

Au-delà des surfaces imperméables, le compactage des sols et leur appauvrissement diminuent leur perméabilité.

Les surfaces étant imperméables, il est alors nécessaire de collecter les eaux, généralement dans des canalisations ; on augmente ainsi les vitesses de ruissellement et la concentration des flux vers les points bas.

Enfin, la raréfaction de la végétation réduit la capacité de stockage, de ralentissement du ruissellement et d'évapotranspiration de l'eau.

Toutes ces actions réduisent l'infiltration des eaux de pluie dans le sol. Elle conduit à une augmentation des volumes d'eau ruisselés et des vitesses de ruissellement. Elle peut aussi modifier les composantes du débit des cours d'eau, c'est-à-dire en augmentant la part issue du ruissellement de surface direct, et en réduisant les écoulements de subsurface (dans le sol de surface) et le débit de base (eau provenant de la vidange des réservoirs profonds du sol).

Lorsque cette eau rejoint le milieu récepteur (cours d'eau) elle provoque une réduction du temps de montée de la crue et une augmentation du débit de crue (générant des hydrogrammes<sup>1</sup> plus pointus cf. figures 2 et 3). Il est aussi couramment admis que l'artificialisation des sols conduit à une réduction de la recharge des nappes souterraines.

Cependant, l'artificialisation peut avoir des effets autres sur la recharge de nappes et les débits de base des cours d'eau. Ainsi, les résultats des études sont contrastés et certains auteurs rapportent une augmentation de la recharge des nappes à cause des fuites des réseaux d'eau potable, de la généralisation de fosses septiques ou de l'irrigation excessive des parcs et jardins privés (dans la région de Santiago au Chili), ou encore la réduction. À contrario, à cause de défauts d'étanchéité, les réseaux d'assainissement peuvent avoir un rôle de drainage des eaux du sous-sol, conduisant à une diminution des débits de base dans les cours d'eau.

## Le recours à la modélisation est nécessaire pour évaluer plus précisément les impacts de l'artificialisation

La mesure de la pluie et des débits dans des points caractéristiques est souvent insuffisante pour quantifier les composantes du bilan hydrologique. Des modèles distribués peuvent être utilisés pour estimer les débits en différents points des cours d'eau et réaliser des bilans hydrologiques sur différents sous-bassins versants. De même, quantifier l'évapotranspiration, surtout en milieu complexe, reste difficile expérimentalement et fait souvent appel à la modélisation. Pour évaluer et comparer différentes stratégies de gestion des eaux pluviales à la source, il faut avoir recours à des modèles distribués<sup>2</sup>, qui représentent explicitement les objets du paysage. Ces modèles doivent néanmoins encore

### Les impacts de l'artificialisation ne se limitent pas au cycle de l'eau

Les impacts de l'artificialisation des sols se manifestent également sur les flux de polluants, sur la biodiversité souterraine et aérienne ou encore sur la création d'îlots de chaleur, la pollution de l'air et le bruit. Ces impacts ainsi que les leviers d'action sont détaillés dans la synthèse de l'expertise scientifique collective INRA-IFSTTAR 2017 ([lc.cx/beckhet2017](http://lc.cx/beckhet2017)).

<sup>1</sup> Voir l'article Wikhydro : [lc.cx/hydrogramm](http://lc.cx/hydrogramm)

<sup>2</sup> Voir l'article Wikhydro : [lc.cx/modeledistrib](http://lc.cx/modeledistrib)

**Photo 1** : Visualisation de l'impact de l'artificialisation lors d'un fort orage en juillet 2017 à Villeurbanne (69) – (19 mm).



être enrichis pour prendre en compte tous les modes de gestion à la source.

## Les apports de l'OTHU: le cas du bassin de l'Yzeron

Dans le cadre de l'OTHU, le bassin de l'Yzeron a été étudié avec de nombreuses mesures de débits en différents points du bassin ainsi que dans le réseau unitaire (figure 2) Une analyse des données collectées a permis de mettre en évidence les éléments suivants (Braud *et al.*, 2013).

1 – Le soutien d'étiage: les cours d'eau sont intermittents, mais la présence de déversoirs d'orage conduit à une diminution de la fréquence de débits nuls, les Dos étant les seuls contributeurs au débit durant les périodes sèches; les rejets des stations d'épuration assurent aussi parfois un débit minimal dans les cours d'eau dans d'autres sous-bassins.

2 – Dans les réseaux unitaires: une méthode d'évaluation de la part d'eau claire infiltrée dans les réseaux d'assainissement montre que, sur le réseau unitaire du bassin de la Chaudanne, 30% du volume annuel correspond à de l'infiltration dans le réseau, 40% à du ruissellement pluvial, et le reste aux eaux usées (soit seulement 30%).

3 – L'aggravation des pointes de débit: la figure 3 illustre que les hydrogrammes des bassins les plus urbanisés (voir figure 2) sont aussi les plus pointus, avec donc une montée de crue et une décrue plus rapides.

Des outils de modélisation ont été développés, à différentes échelles, afin de prendre en compte la complexité des paysages périurbains: mosaïque de parcelles rurales et urbaines, réseaux hydrographiques naturels, réseaux unitaires

**Figure 2** : Part de zones agricoles, de forêt et de bâtiments et routes pour les différentes stations de mesure du débit sur l'Yzeron (d'après des données de Labbas, 2015).

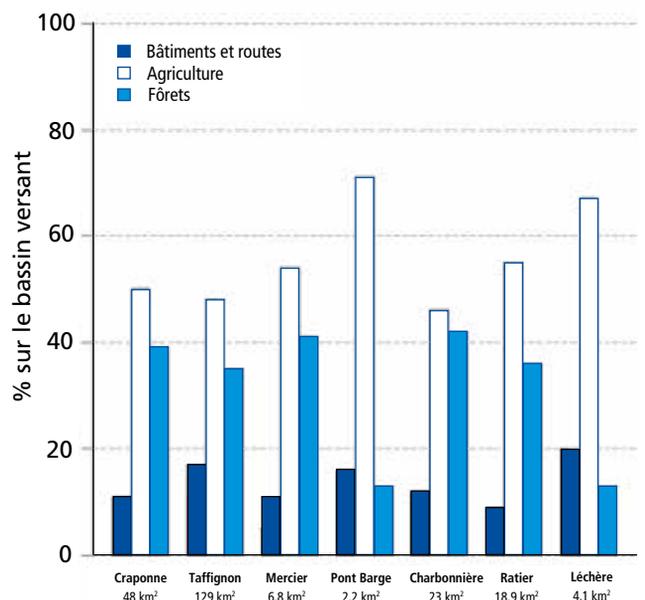
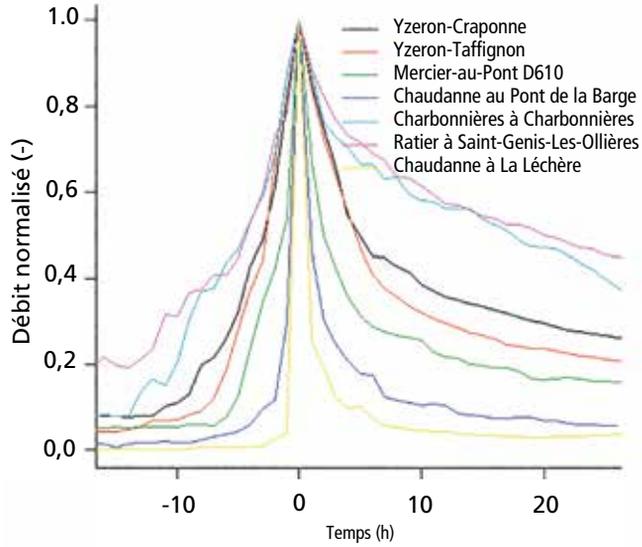


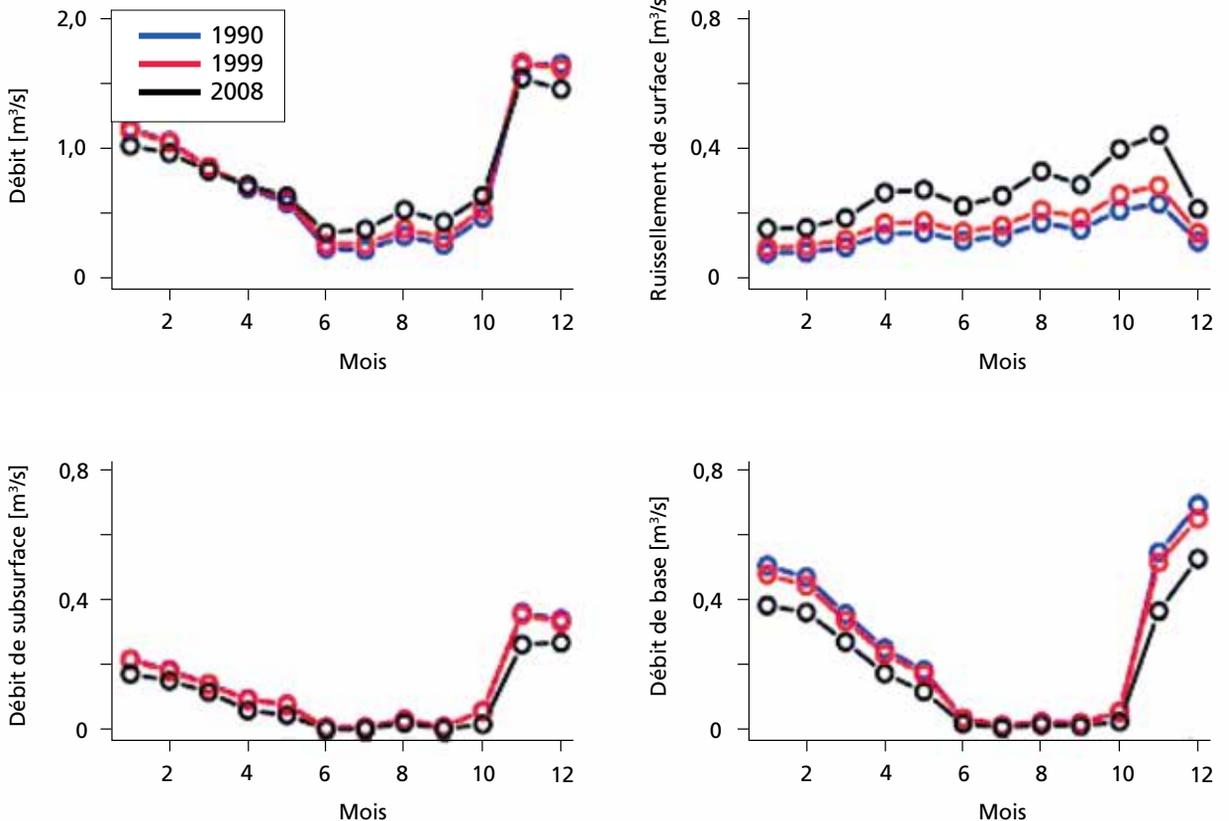
Figure 3 : Hydrogrammes normés caractéristiques de crues pour les différentes stations hydrométriques de l'Yzeron.



et réseaux d'eaux pluviales, déversoirs d'orage, bassins de rétention, etc. La figure 4 est le résultat de simulations sur le bassin de l'Yzeron par le modèle J2000 (Branger *et al.*, 2012) de l'impact de l'évolution de l'urbanisation entre 1990 et 2008 sur le débit total et ses composantes : ruissellement

de surface, de subsurface et débit de base. Si le débit total est peu impacté, on voit que l'artificialisation favorise le ruissellement de surface au détriment des débits de base et de subsurface.

Figure 4 : Impact de l'évolution de l'urbanisation entre 1990 et 2008 sur le débit mensuel interannuel de l'Yzeron à Taffignon (129 km<sup>2</sup>) et de ses composantes : ruissellement de surface, de subsurface et débit de base.



Le modèle J2000P (Labbas *et al.*, 2015) intègre les réseaux d'assainissement et les DOs dans un modèle de caractérisation du fonctionnement d'unités de réponse hydrologique. Il a été utilisé pour évaluer l'impact de différents scénarios d'évolution future de l'urbanisation (Dodane *et al.*, 2014) ou de gestion des eaux pluviales, sur les composantes du cycle hydrologique.

Des premiers tests à l'échelle d'un bassin comme l'Yzeron suggèrent que l'impact des modes de gestion de l'eau (en

particulier la déconnexion des eaux pluviales du réseau d'assainissement) sur le régime hydrologique est plus important que la seule évolution de l'imperméabilisation des surfaces (Labbas, 2015). Ceci invite à approfondir comment une généralisation de la gestion à la source ou une déconnexion des eaux pluviales sur ce bassin, pourrait limiter les impacts de l'urbanisation sur le cycle hydrologique.



## POUR ALLER PLUS LOIN

- ▶ **Branger F., Kermadi S., Krause P., Labbas M., Jacqueminet C., Michel K., Braud I., Kralisch S.** (2012). Yzeron peri-urban catchment, France, International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2012. Managing Resources of a Limited Planet, Sixth Biennial Meeting, Leipzig, Germany, R. Seppelt, A. A. Voinov, S. Lange, D. Bankamp (Eds.), 8 pp – [ic.cx/branger2012](https://ic.cx/branger2012)
- ▶ **Braud I., Breil P., Thollet F., Lagouy M., Branger F., Jacqueminet C., Kermadi S., Michel K.** (2013). Evidence of the impact of urbanization on the hydrological regime of a medium-sized periurban catchment in France, *Journal of Hydrology* – 485, 5-23. - DOI : 10.1016/j.jhydrol.2012.04.049 – [ic.cx/braud2013](https://ic.cx/braud2013)
- ▶ **Labbas M.** (2015). Modélisation hydrologique de bassins versants périurbains et influence de l'occupation du sol et de la gestion des eaux pluviales. Application au bassin de l'Yzeron (130 km<sup>2</sup>), Thèse de l'Université de Grenoble - 388 pp. – [ic.cx/labbas2015](https://ic.cx/labbas2015)

# Les aménagements en sous-sol des villes impactent-ils la ressource en eau ?

Guillaume Attard, CEREMA - Thierry Winiarski, ENTPE

**Le milieu souterrain est encore aujourd'hui mal connu. Pourtant, il est de plus en plus sollicité par la ville pour la réalisation d'aménagements, pour les fondations des bâtiments et en tant que ressource en matériaux et énergie. Et lorsqu'on sait que ce milieu constitue également une ressource en eau potable pour les habitants, la question des impacts de ces infrastructures et usages sur les eaux souterraines prend tout son sens.**

## Une pression croissante de la ville sur le milieu souterrain

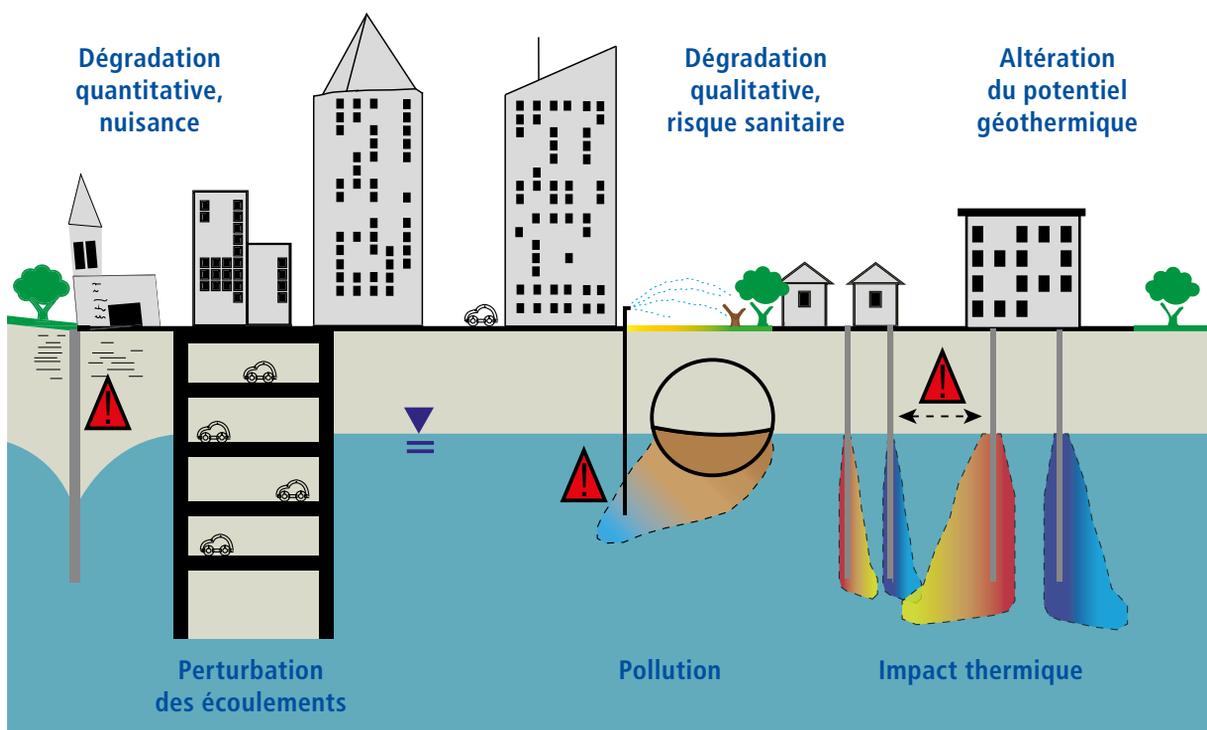
Le développement des villes ainsi que l'économie du foncier exercent une pression de plus en plus importante sur la dimension verticale de la ville. En effet, les nouveaux bâtiments qui se construisent ont tendance à s'élever de plus en plus haut. Mais qu'en est-il de l'espace souterrain ? Ce milieu, mal connu et difficilement observable, est de plus en plus sollicité. Il est le lieu privilégié des fondations des

bâtiments, des réseaux de communication et de transport. C'est aussi un espace d'aménagement qui permet de garer nos voitures et d'installer les systèmes de sécurité. Depuis que les villes existent, l'espace souterrain est également une ressource en matériaux de construction et plus récemment en granulat, ingrédient indispensable pour les bétons. Ces eaux souterraines sont également devenues une ressource géothermique sans cesse en développement. Enfin, l'espace souterrain urbain est, depuis plusieurs décennies, le milieu privilégié dans lequel l'eau potable est prélevée : en Europe, plus de 40 % de l'eau distribuée dans les réseaux d'eau potable provient des aquifères urbains (Eiswirth et al., 2004).

## La ville perturbe les écoulements et la qualité physico-chimique de l'eau souterraine

Du point de vue qualitatif, les matériaux de construction des ouvrages souterrains peuvent altérer les caractéristiques physico-chimiques de l'eau souterraine urbaine (Chae et al., 2008). D'autre part, d'un point de vue quantitatif, le

**Figure 1** : Représentation des nuisances et risques inhérents à l'interaction entre les ouvrages souterrains et les nappes urbaines - les injections d'eau chaude sont en orange et les injections d'eau froide sont en bleu (d'après Attard, 2017).



maintien de la stabilité des ouvrages impose la mise en place de systèmes de drainage dont les débits peuvent représenter plusieurs millions de mètres cubes annuels (Vázquez-Suñé *et al.*, 2005). Ces perturbations des écoulements peuvent favoriser le tassement des terrains, et éventuellement participer à l'accroissement du risque d'inondation par remontée de nappe. Dans les quartiers en renouvellement comme le quartier de Gerland à Lyon, la construction d'immeubles avec les phases temporaires de rabattement de nappe (baisse de niveau) a également un impact non négligeable.

Par ailleurs, depuis que l'Europe s'est engagée à réduire de 20% les émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2020, l'énergie géothermique est considérée comme une ressource incontournable. En particulier, les systèmes de pompes à chaleur sur nappe sont un moyen efficace d'exploiter cette énergie (Lund *et al.*, 2011). La multiplication de ces systèmes d'extraction a tendance à générer des interférences entre installations (Herbert *et al.*, 2013). En effet, lorsque la distance qui sépare deux installations n'est pas suffisante, les zones d'influences thermiques peuvent se couper, s'intersecter, et altérer la performance des systèmes avec par exemple la formation d'îlots de chaleur souterrains (Menberg, 2013).

L'ensemble des pressions exercées par la ville sur la ressource, à savoir la perturbation du cycle de l'eau, des écoulements et de la physico-chimie de l'eau (figure 1), montre l'intérêt de revoir la gouvernance en matière de gestion de l'eau souterraine urbaine. Pourtant, selon les travaux de Maire (2011), il n'existe toujours pas de stratégie aboutie de planification du sous-sol urbain. Le manque d'expertise et de compréhension dans les interactions entre les infrastructures souterraines et la ressource en eau est en partie responsable de cette lacune.

## La modélisation pour comprendre les impacts des aménagements urbains

Les travaux de thèse (Attard, 2017) entrepris dans le cadre d'une collaboration scientifique entre l'ENTPE et le Cerema visaient à mieux comprendre les impacts des aménagements souterrains sur la ressource en eau souterraine urbaine. Les questions suivantes ont été abordées: quels sont les différents types d'ouvrages souterrains rencontrés en milieu urbain et quels sont leurs comportements hydrodynamiques? Quels types d'impacts génèrent-ils sur les écoulements et quelle est leur influence sur la qualité de la ressource en eau?

**Figure 2 :** Les impacts cumulés des ouvrages souterrains sur la position initiale de la surface libre de la nappe de Lyon. On observe un abaissement de son niveau de plus d'un mètre globalement et de plus de 2 m dans la zone la plus impactée. Modifié d'après Attard *et al.*, 2016.

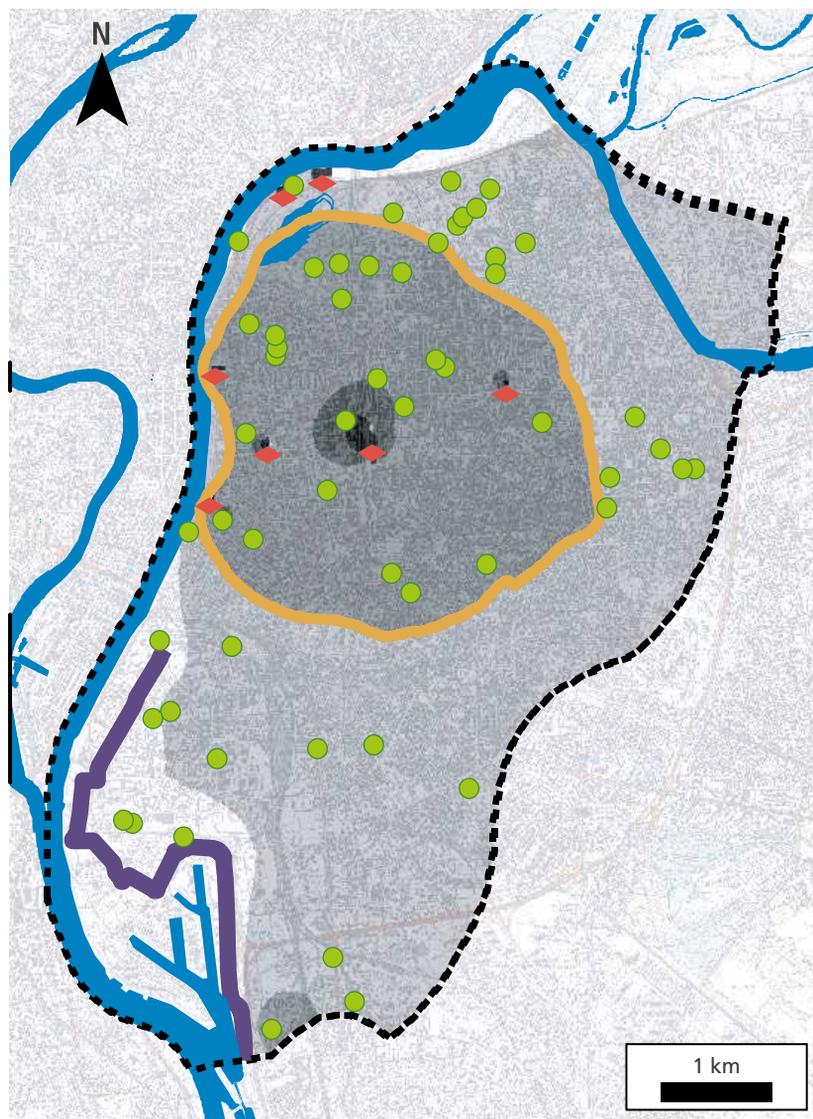
### Ouvrages souterrains

-  Ouvrage équipé de radier drainant
-  Puits de pompage
-  Drain

### Rabattement [R]

-   $R > 3$  m
-   $2 \text{ m} < R < 3$  m
-   $1 \text{ m} < R < 2$  m
-   $0,5 \text{ m} < R < 1$  m
-   $R < 0,5$  m
-  Zone la plus impactée

### Rabattement de la nappe causé par les ouvrages



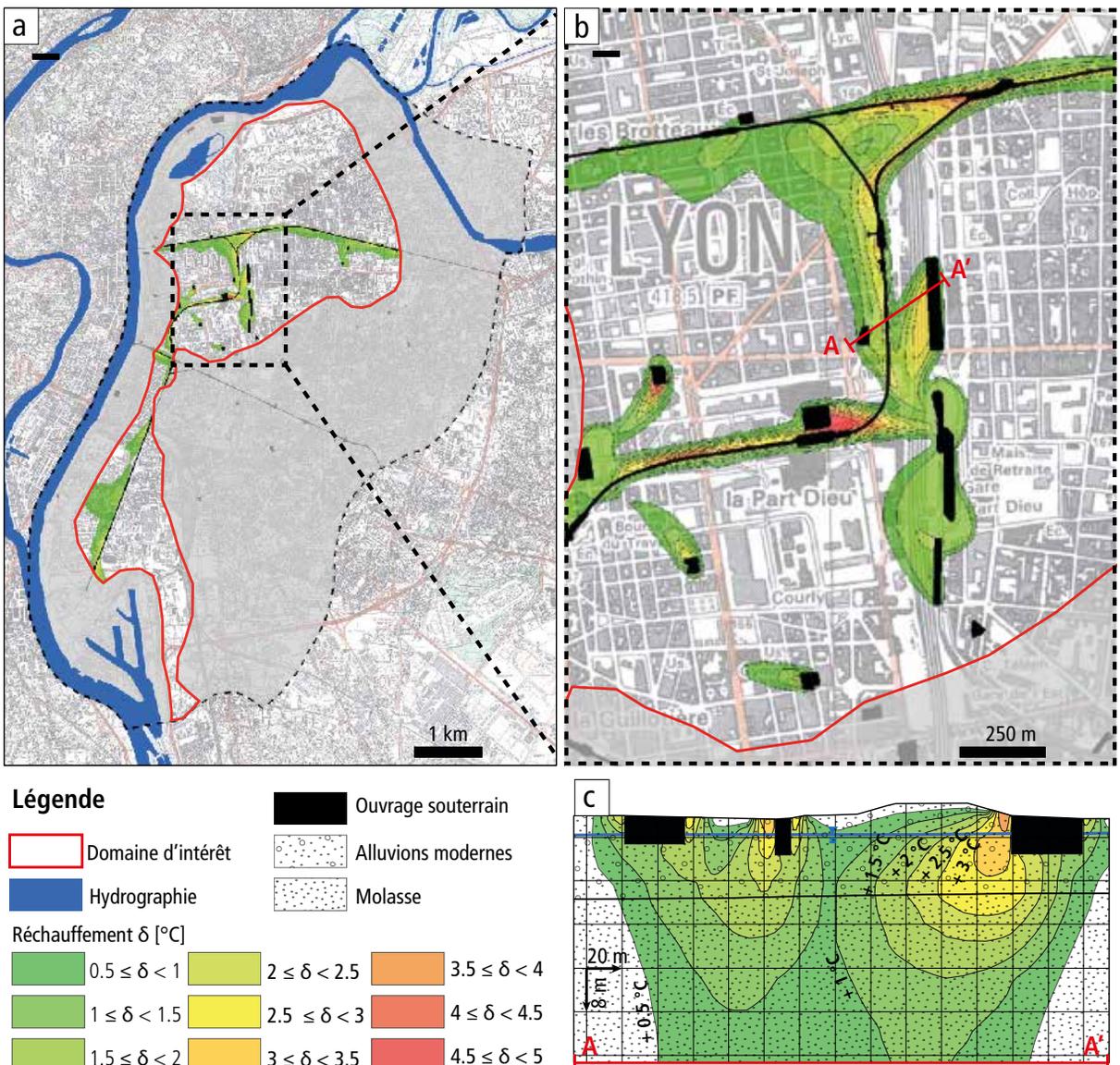
## Modéliser les impacts des infiltrations à la parcelle

Un travail de thèse (W. Pophillat 2018-2021) vise à proposer une modélisation intégrée des conséquences d'une systématisation des pratiques d'infiltration à la parcelle des pluies courantes à l'échelle de petits bassins versants, avec un focus sur le compartiment souterrain et la végétation. La modélisation permettra de prendre en compte les interactions entre les ouvrages, les structures souterraines, les compartiments de surface et souterrains.

À quelle échelle ces impacts doivent-ils être appréhendés et existe-t-il des effets cumulatifs lorsque le sous-sol urbain est densément aménagé ?

Afin de répondre à ces questions, une approche par modélisation hydrogéologique déterministe 3D a été conduite en s'appuyant sur les données de terrain de l'agglomération lyonnaise. Les résultats de ces travaux ont montré que les ouvrages faisant intervenir des systèmes de drainage sont responsables d'une fragmentation importante des systèmes d'écoulement souterrains, susceptible de modifier le régime d'alimentation de l'aquifère. Ils révèlent aussi un effet cumulé marqué des ouvrages sur le rabattement de la nappe (R), de l'ordre de 0,5 m à plus de 3 m (figure 2). Le modèle a également mis en évidence un effet au droit des infrastructures souterraines qui favorise la mise en communication d'eau à différentes profondeurs, accroissant la vulnérabilité des réservoirs profonds (Attard *et al.*, 2016c).

**Figure 3 :** (a) Vue en plan de l'impact thermique généré par les ouvrages souterrains à Lyon. (b) Vue en plan de l'impact cumulé dans le secteur de la Part-Dieu où le modèle montre par endroit un réchauffement de plusieurs degrés de la nappe. (c) La vue en coupe autour de trois ouvrages souterrains montre que ce réchauffement affecte la nappe sur plusieurs dizaines de mètres. Modifié d'après Attard *et al.* (2016b).



Enfin, les impacts individuels et cumulés des infrastructures souterraines sur la température des nappes ont été évalués. Cette analyse a montré que ces infrastructures pouvaient, du fait de leur zone d'influence thermique, affecter le potentiel

géothermique des nappes urbaines (figure 3). Ces zones d'influence thermique pourraient être intégrées dans la réflexion de l'exploitation géothermique des nappes urbaines afin de limiter les conflits d'usage.



## POUR ALLER PLUS LOIN

- ▶ **Attard G.** (2017). Impacts des ouvrages souterrains sur l'eau souterraine urbaine - Application à l'agglomération lyonnaise. Thèse de doctorat de l'École Nationale des Travaux Publics de l'État, École doctorale Chimie de Lyon, Spécialité : Sciences de l'Environnement Industriel et Urbain, 154 p. – <https://hal.archives-ouvertes.fr/ENTPE/tel-01496786>

# Quels sont les impacts de l'artificialisation des sols sur l'écoulement de l'eau ?

Isabelle Braud et Flora Branger, INRAE Lyon

**L'artificialisation des surfaces induit des modifications profondes de la structure des sols et des paysages. Ces modifications influencent les directions d'écoulement des eaux pluviales, et donc, par voie de conséquence, le transport des polluants et le risque d'inondation. Il est donc nécessaire de décrire les liens entre artificialisation et directions d'écoulement afin de mieux gérer les eaux pluviales.**

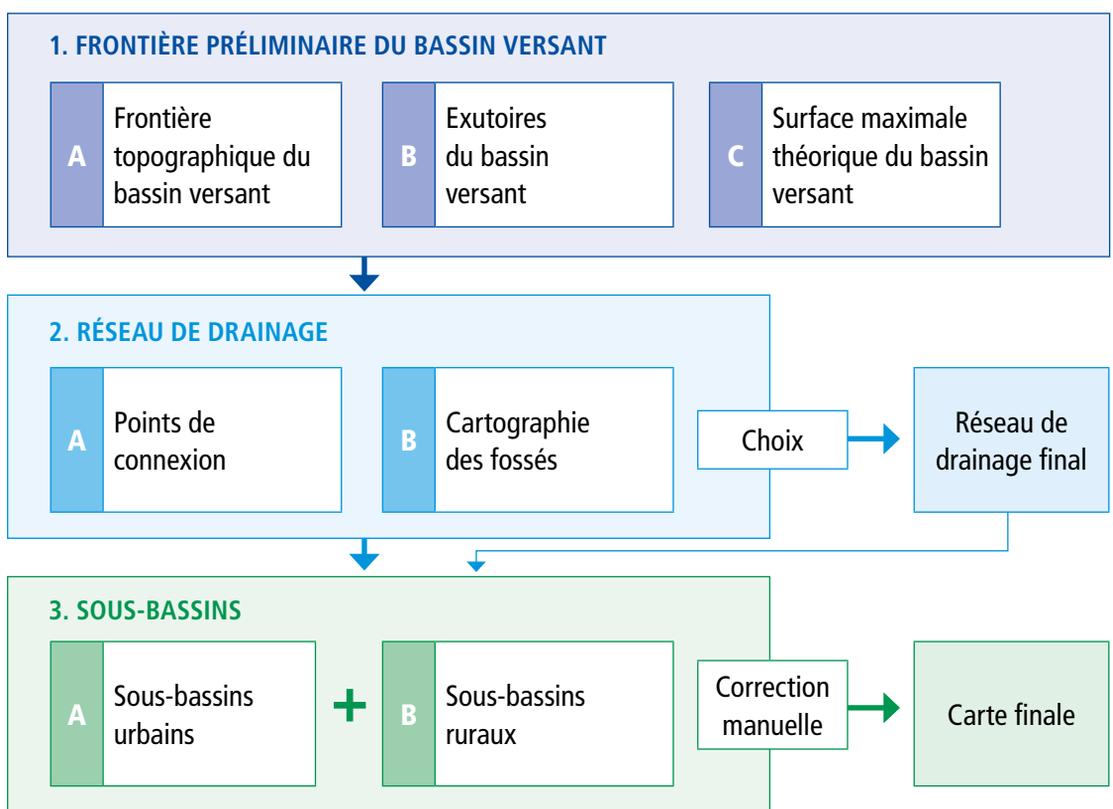
## L'artificialisation des sols modifie les directions d'écoulement et les frontières des bassins versants

Dans les milieux naturels non anthropisés, l'eau s'écoule du haut vers le bas en suivant la topographie jusqu'à rejoindre un cours d'eau. Pour définir les frontières d'un bassin versant en un point appelé exutoire (un point choisi sur le

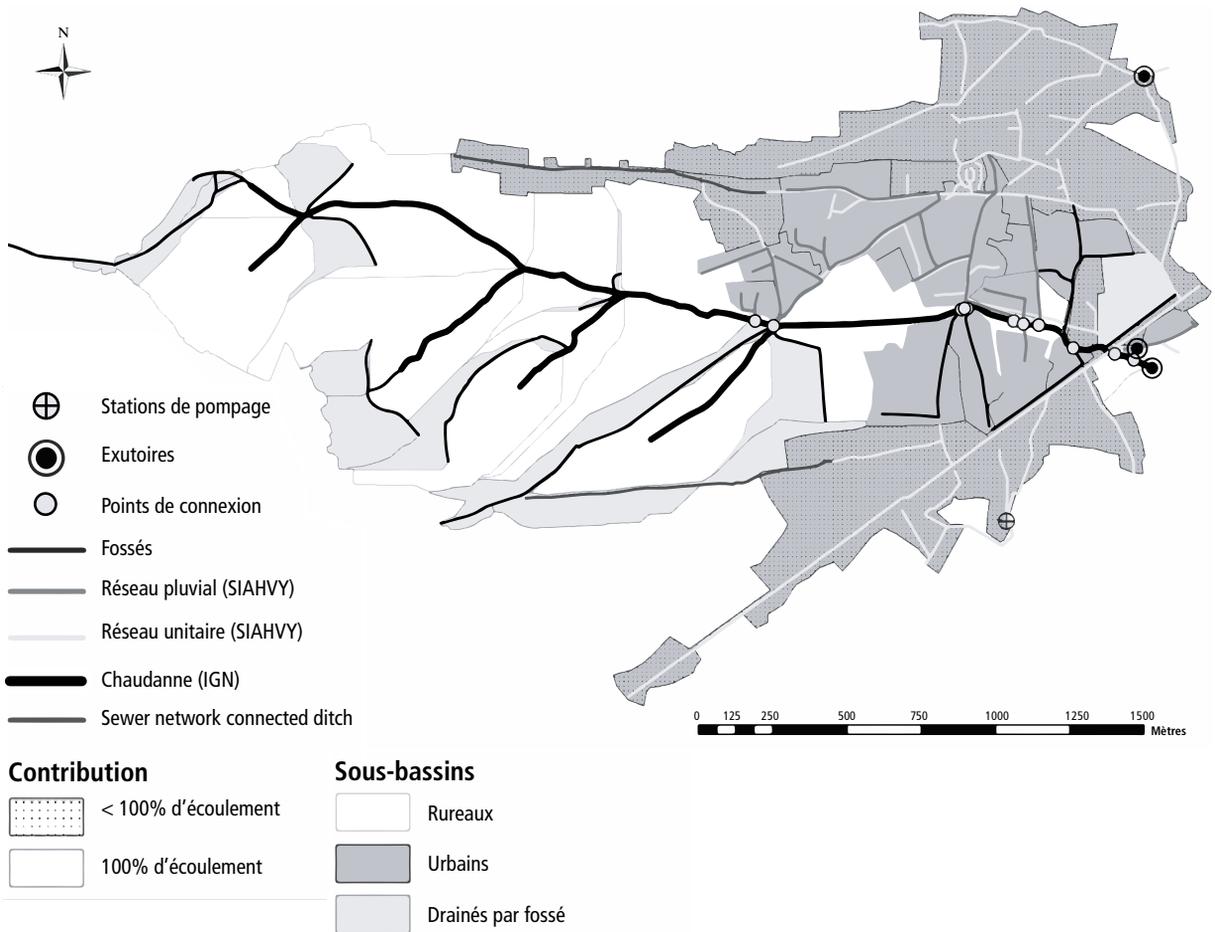
cours d'eau), on doit identifier la surface où l'eau s'écoule en ce point en suivant la topographie (ligne de plus grande pente). Mais, dans un bassin urbain ou périurbain, divers éléments modifient les directions d'écoulement et donc les frontières des bassins versants, qui ont le plus souvent plusieurs exutoires. Les réseaux d'assainissement unitaires qui, en temps normal, transportent les eaux usées et pluviales jusqu'à la station d'épuration, vont, lorsque le réseau est en surcharge, déverser leurs eaux dans les cours d'eau naturels via des déversoirs d'orage.

Lorsque le réseau est séparatif, le réseau qui collecte les eaux pluviales se déverse le plus souvent dans les cours d'eau naturels et peut également modifier les directions d'écoulement. De plus, les réseaux routiers, surtout dans les milieux périurbains, sont souvent longés par des fossés qui collectent les eaux pluviales et modifient la topographie et donc les directions d'écoulement. Enfin, en interaction avec les réseaux hydrographiques naturels, il faut prendre en compte les lacs naturels ou artificiels (bassins de rétention), mais aussi tous les éléments du paysage qui sont mis en place pour la gestion des eaux pluviales à la source (noues, tranchées infiltrantes, etc.).

Figure 1 : Les étapes de la méthode de délimitation d'un bassin périurbain, de son réseau de drainage et des sous-bassins contributifs (adapté de Jankowsky *et al.*, 2013).



**Figure 2 :** Carte finale des sous-bassins et des limites du bassin versant de la Chaudanne en conditions humides. Les sous-bassins urbains sont en gris foncé, les sous-bassins ruraux en blanc, et les sous-bassins drainés par des fossés en gris clair. Les sous-bassins en pointillé sont uniquement connectés via les déversoirs d'orage à la rivière. La soustraction des zones en pointillé à la surface du bassin en conditions humides donne la surface du bassin par temps sec (adapté de Jankowfsky *et al.*, 2013).



## Une méthode pour délimiter des bassins versants périurbains et leurs sous-bassins

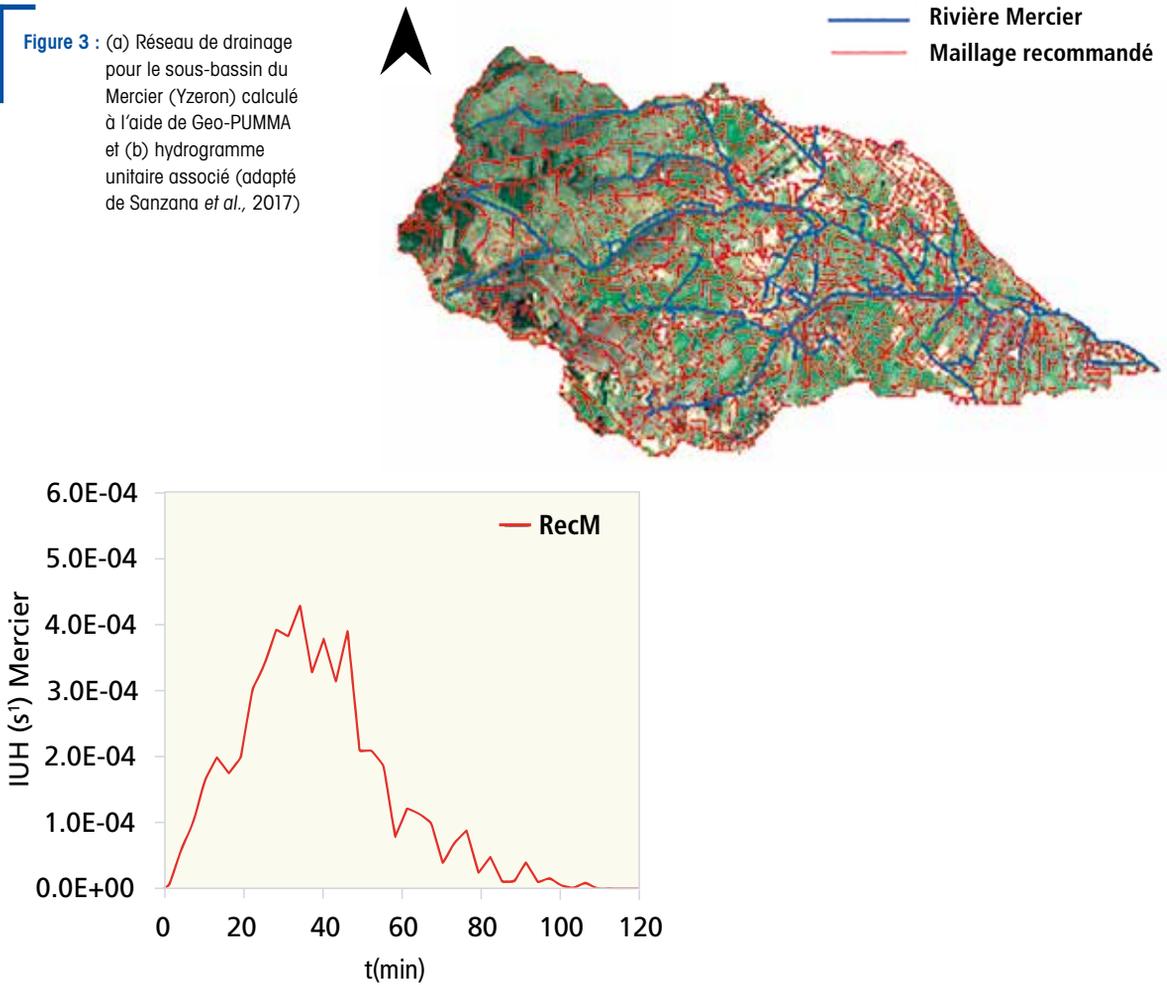
Dans le cadre des travaux de l'OTHU, une méthode semi-automatique a été proposée pour la délimitation des frontières d'un bassin périurbain et des sous-bassins ruraux, urbains ou mixtes qui le composent (Jankowfsky *et al.*, 2013, figure 1). Une première étape consiste à délimiter la frontière topographique, les exutoires et la frontière maximale du bassin (qui prend en compte les fossés et réseaux d'assainissement). Pour le bassin topographique, les méthodes classiques d'extraction de bassin versant à l'aide d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) peuvent être utilisées. On identifie tous les points de connexion au réseau hydrographique naturel. Les fossés en zone rurale peuvent être ajoutés à ce réseau naturel. Les zones du bassin drainées par un réseau unitaire ont au moins deux exutoires : le premier vers la station d'épuration (la majorité du temps), le second vers le réseau hydrographique via les déversoirs d'orage (DO) (lors de forts épisodes pluvieux). Ces surfaces sont ajoutées à la surface maximale du bassin. La surface du bassin versant dépend des conditions d'écoulement avec une surface minimale en conditions sèches, et une surface maximale en conditions humides.

Pour affiner la délimitation des zones qui font effectivement partie du bassin versant, des reconnaissances de terrain sont nécessaires pour déterminer le sens des écoulements dans les réseaux séparatifs afin d'éliminer les zones drainant hors du bassin versant. Pour les zones urbaines, on utilise une approche de type objet pour relier chaque parcelle cadastrale au réseau pluvial le plus proche et le plus bas, en suivant le réseau de voirie. La figure 2 illustre le résultat final pour le bassin de la Chaudanne à Grézieu la Varenne. On voit que les contours finaux du bassin versant sont irréguliers et différents du contour topographique du bassin.

## Geo-PUMMA un outil SIG pour la détermination des directions des écoulements en milieu urbain et périurbain

Pour caractériser les directions d'écoulement dans un milieu urbain et périurbain complexe, la boîte à outil Geo-PUMMA (Sanzana *et al.*, 2017) utilise une approche objet qui s'appuie sur une cartographie de l'usage des sols à l'échelle parcellaire, prenant en compte les éléments urbains et naturels des paysages : parcelles cadastrales ou agricoles, zones récréatives, places, parkings, alignements d'arbres, haies, bassins, réseaux, ainsi qu'une délimitation des bâtiments et

**Figure 3 :** (a) Réseau de drainage pour le sous-bassin du Mercier (Yzeron) calculé à l'aide de Geo-PUMMA et (b) hydrogramme unitaire associé (adapté de Sanzana *et al.*, 2017)



zones végétalisées. Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) à haute résolution est nécessaire (résolution 2 m maximum) mais ces MNTs sont maintenant disponibles grâce à des levés Lidar (Light Detection and Ranging). Le maillage du bassin est obtenu par superposition des couches d'informations géographiques initiales. Il est ensuite amélioré pour éliminer les parcelles non convexes ou trop longues qui peuvent perturber les algorithmes de détermination des directions d'écoulement. Une fois le réseau de drainage connu, on peut calculer un Hydrogramme Unitaire qui renseigne sur les temps de transfert de l'eau à l'exutoire (figure 3). On peut aussi déterminer la part des écoulements de surface qui transite via des zones urbaines ou rurales, information utile pour déterminer l'origine de possibles contaminations. Ces outils restent néanmoins encore du domaine de la recherche.

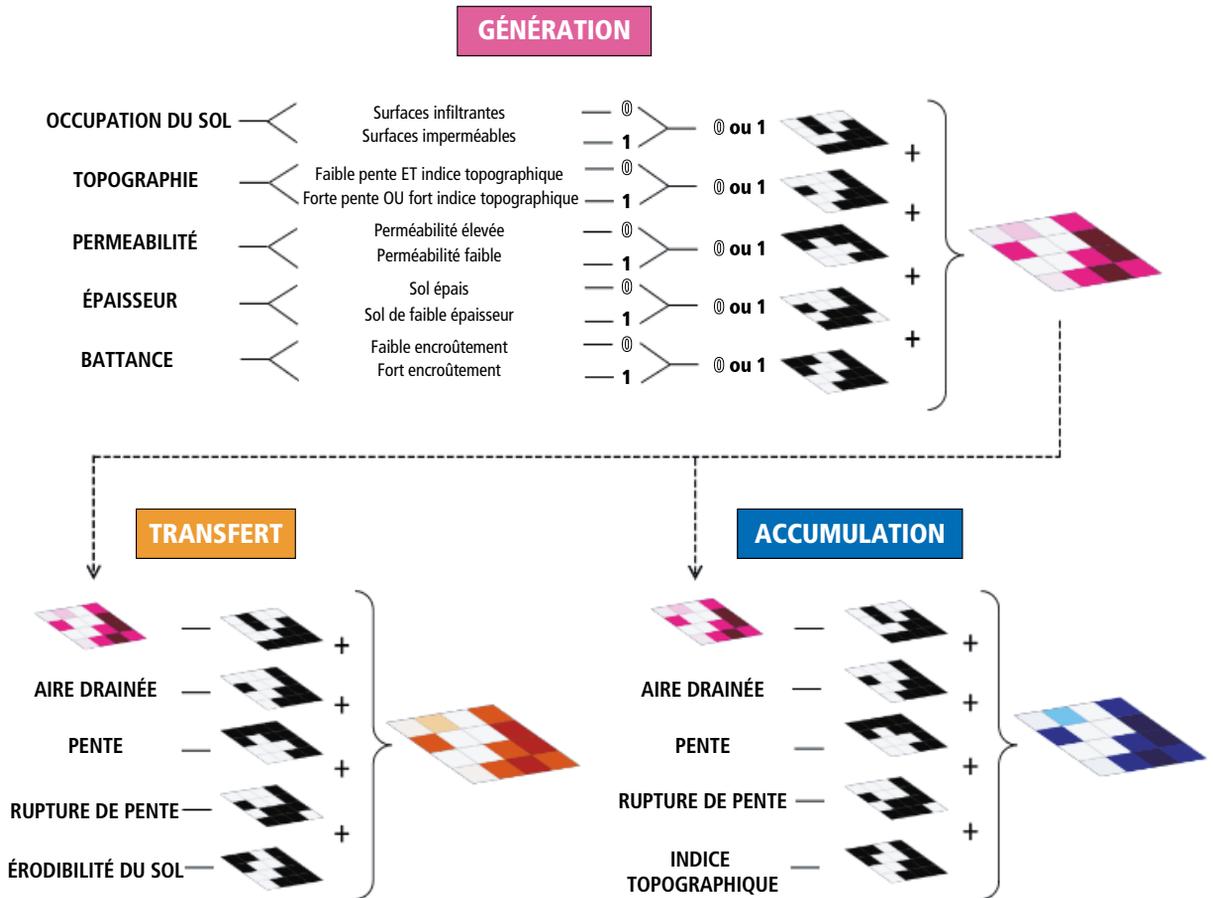
### La méthode IRIP: un outil pour faciliter la mise en place de la Gestion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations (GEMAPI) s

La gestion du ruissellement intense pluvial est du ressort des collectivités. Pour les bassins périurbains notamment, une vision territoriale du ruissellement et donc des chemins d'écoulement se révèle utile. Le modèle IRIP (Indicateur de Ruissellement Intense Pluvial, Dehotin et Breil, 2011) produit des cartes de susceptibilité d'un territoire à produire,

transférer et accumuler du ruissellement. Il s'appuie pour cela sur des informations cartographiques facilement disponibles: la topographie, une cartographie de l'occupation du sol et la pédologie. La résolution des données d'entrée peut être adaptée en fonction de l'échelle à laquelle on cherche des réponses. Pour chaque carte, 5 indicateurs classés en favorable/défavorable au ruissellement sont définis (figure 4) et sont sommés pour obtenir un niveau de susceptibilité (de 0 à 5) à la production, au transfert et à l'accumulation de ruissellement. Le modèle inclut une dépendance amont-aval entre les différents points du bassin.

Le modèle IRIP a permis de révéler plusieurs résultats importants. Tout d'abord, les cas d'étude traités ont montré que les zones présentant une forte susceptibilité au transfert de ruissellement affichaient également un fort potentiel d'érosion et de transport solide. Deuxième enseignement, les zones d'accumulation de ruissellement sont plutôt des zones favorables à l'inondation car les écoulements y sont ralentis. La cartographie fournie par le modèle IRIP permet aussi d'identifier des zones humides, qui peuvent servir à limiter les effets des inondations et des pollutions qui en découlent. Elle met également en lumière les zones sur lesquelles de la rétention à la source ou des aménagements pour limiter le ruissellement et l'érosion peuvent être mis en place. Les zones favorables au transfert peuvent être ciblées pour des ouvrages de rétention, alors qu'il vaut mieux éviter des constructions sensibles dans les zones favorables à l'accumulation. Ces cartes peuvent donc éclairer utilement la mise en œuvre de la GEMAPI.

Figure 4 : Les différents indicateurs et leur combinaison pour déduire les cartes de susceptibilité à la production, au transfert et à l'accumulation de ruissellement (adapté de Braud *et al.*, 2020).



## En Bref...

Les directions d'écoulement des eaux sont impactées par l'artificialisation des sols. En milieu urbain, les cartes des réseaux d'assainissement permettent de déterminer ces directions. L'exercice est plus complexe dans les bassins périurbains, où les outils de description traditionnels des milieux ruraux fondés uniquement sur la topographie ne s'appliquent pas. L'OTHU a donc développé plusieurs outils permettant de délimiter les frontières d'un bassin péri-urbain, de déterminer les directions d'écoulements associées et d'identifier les zones d'un territoire susceptibles de contribuer au ruissellement.

## POUR ALLER PLUS LOIN

- ▶ **Dehotin J., Breil P.,** (2011a). Technical report of the IRIP project: mapping the flooding by runoff (Technical report). IRSTEA Hydrology-Hydraulic Research Unit - <https://hal.inrae.fr/hal-02595951>
- ▶ **Jankowsky S., Branger F., Braud I., Gironas J., Rodriguez F.,** (2013). Comparison of catchment and network delineation approaches in complex suburban environments. Application to the Chaudanne catchment, France. *Hydrological Processes*, 27(25), 3747-3761 - <https://doi.org/10.1002/hyp.9506>

# L'urbanisation aggrave-t-elle les inondations ?

André Paquier, INRAE Lyon – Emmanuel Mignot et Nicolas Rivière, INSA Lyon

**Les inondations sont les risques naturels qui causent le plus de pertes humaines et économiques. Or, le milieu urbain est particulier tant du point de vue de la vulnérabilité (densité de population, infrastructures critiques) que de l'aléa (concentration des écoulements dans le réseau de rues, obstacles nombreux, rues droites et possiblement à très forte pente). Les travaux de l'OTHU se sont concentrés sur la caractérisation de l'aléa, avec comme question centrale l'influence de l'urbanisation sur les chemins de l'eau en ville.**

avaloirs. L'efficacité de ces avaloirs peut cependant souffrir d'obturation, par des déchets ou des feuilles mortes par exemple.

Le site OTHU d'Oullins a montré que des échanges d'eau complexes peuvent avoir lieu entre les rues, le réseau et la rivière urbaine, au cours d'un événement d'inondation avec, par exemple, un fonctionnement propre aux différents avaloirs (SI1, SI2 et SI3 sur la figure 1). Dans de tels cas, une représentation fine des écoulements dans le réseau et de ses échanges de flux avec la surface et la rivière au sein de calculs numériques, complique fortement la simulation des événements mais s'avère nécessaire.

## Le réseau d'assainissement peut aggraver ou atténuer une inondation

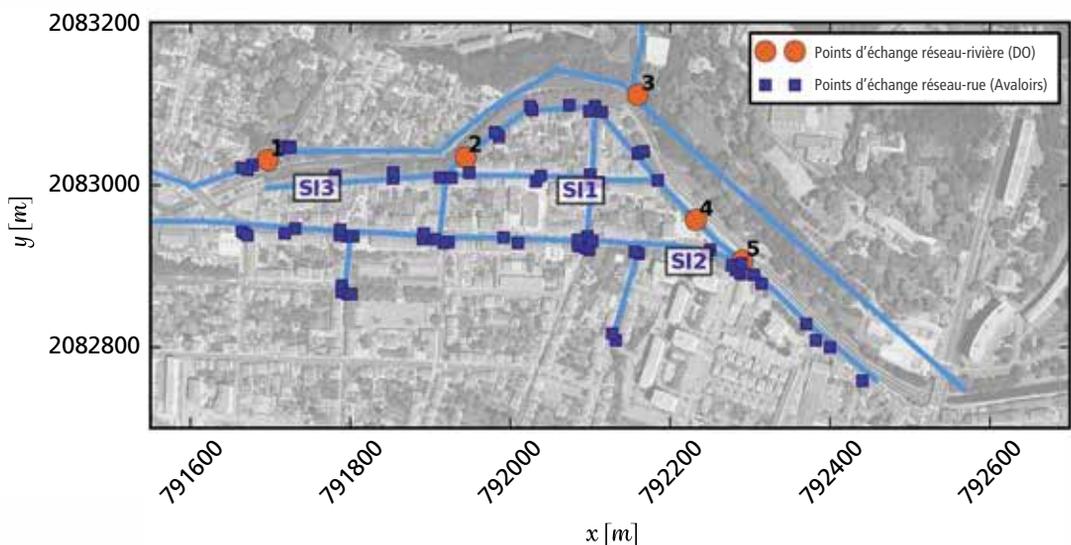
Le rôle joué par le réseau d'assainissement dans la gestion des flux inondants est très variable en fonction du lieu de l'inondation et de l'intensité de la crue. En cas de crue extrême, les flux d'eau transitant dans le réseau peuvent être négligés face aux flux s'écoulant à la surface de la ville (par exemple à Nîmes en octobre 1988).

À l'opposé, en cas d'inondations plus fréquentes, le débordement du réseau peut être la source de l'inondation (notamment dans les cuvettes ou les secteurs construits en contre-bas), ou au contraire s'avérer capable de soustraire un volume d'eau important de la surface à travers ses

## La topographie des rues et des parcelles privées influence l'écoulement

Le rôle de la géométrie de la voirie et du bâti a également été étudié (thèse de P.-H. Bazin, 2013). Nous avons montré que la topographie des sections en travers des rues (hauteur du trottoir, profondeur du caniveau, forme bombée de la rue) a un effet sur l'inondation qui est négligeable en cas de très forte crue (telle à Nîmes en octobre 1988) mais primordial en cas de crue fréquente (typiquement un événement annuel ou biennuel). En effet, pour une crue extrême, l'eau occupe toute la largeur de la rue (d'une façade à celle d'en face) et va inonder l'ensemble du carrefour aval et se déverser dans toutes les rues adjacentes; à l'opposé pour une crue fréquente, la forme bombée de la rue concentre l'eau sur un côté de la rue, seule une partie du carrefour est inondée et l'eau n'envahit les rues qu'à l'aval de ce côté du carrefour.

**Figure 1** : Géométrie caractéristique d'un avaloir de la Métropole de Lyon (haut) et plan des conduites principales du réseau d'assainissement, avec SI1, SI2 et SI3 trois avaloirs, dans la zone inondable de l'Yzeron à Oullins dans la banlieue de Lyon (bas) – d'après Bazin, 2013).



Par ailleurs, si le réseau de rues est le lieu privilégié d'écoulement du flux inondant, l'écoulement à travers les parcelles privées et les zones ouvertes peut jouer deux rôles principaux :

1 – **stocker une partie de l'eau** durant l'événement, tel un bassin de stockage, notamment si le volume disponible est important ;

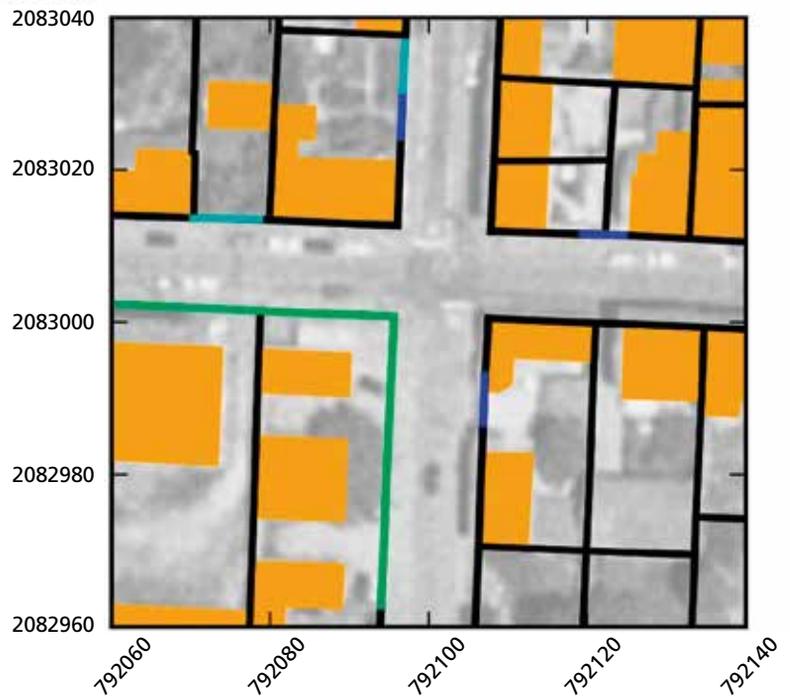
2 – **initier de nouveaux cheminements de l'eau** à travers les parcelles d'une rue à sa parallèle plus en aval, traversant éventuellement des zones sensibles (crèches, hôpitaux, écoles, maisons de retraite).

Pour représenter fidèlement ces intrusions d'eau, il est obligatoire de relever sur le terrain les caractéristiques des bordures des parcelles privées, tel que décrit en figure 2. Nous avons montré qu'en zone péri-urbaine, l'écoulement à travers les jardins ou les haies peut jouer un rôle non négligeable dans la distribution des flux au niveau global.

## La présence d'obstacles fixes tels que des voitures peut augmenter la profondeur de l'eau

Enfin, les rues sont rarement exemptes d'obstacles divers, qu'ils soient fixes (mobilier urbain, signalisation) ou mobiles (véhicules). Ces obstacles peuvent fortement modifier les chemins de l'eau en surface. Leur influence a été étudiée en laboratoire sur un site atelier OTHU « modèle réduit de carrefour » (Paquier, 2009). Les résultats montrent que la présence d'un obstacle fixe peut significativement modifier la répartition des débits au sein des rues. La figure 3 montre l'influence que peuvent avoir des véhicules bloqués, sur la profondeur d'eau dans un carrefour, mesurée lors d'essais au 1/24<sup>e</sup>. La profondeur peut être plus que doublée pendant un temps bref, mais suffisant pour que, par exemple, des

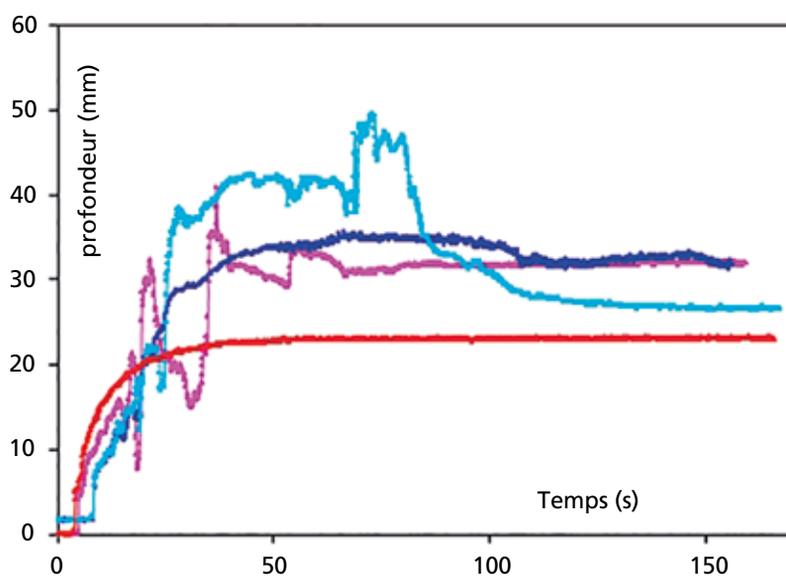
**Figure 2** : Relevé terrain des détails d'un quartier d'Oullins (69) avec :  
perm = haies végétales perméables,  
imp = murs imperméables,  
bar = barrières semi-perméables,  
bas = murets bas franchissables  
(d'après Bazin, 2013).



**Photo 1** : Inondation d'un quartier d'Oullins (69)  
(source INRAE).



**Figure 3 :** Modification de l'onde de crue par des obstacles mobiles : photographie d'un essai en laboratoire (en haut ; échelle 1/24<sup>e</sup>) et évolution de la profondeur d'eau (en bas) dans la rue en l'absence (référence) et en présence de véhicules (source INSA Lyon).



quantités d'eau non négligeables puissent pénétrer dans des bâtiments.

### Quelles sont les modélisations adaptées à la simulation des inondations pluviales ?

La simulation des inondations pluviales requiert plusieurs types de modélisations complémentaires.

Les modèles hydrologiques ont pour but de déterminer les apports sources de l'inondation d'une zone d'étude donnée, c'est à dire les quantités d'eau provenant :

- ▶ du ruissellement amont ;
- ▶ du débordement de la rivière à l'intérieur de la zone ;
- ▶ de la redistribution de la pluie par les toits vers le réseau et les rues du domaine d'étude.

Au sein de la zone inondée, différents modèles peuvent alors être mis en œuvre, apportant des renseignements différents, en fonction des échelles ou des connaissances demandées.

L'aspect linéaire du réseau enterré rend les modèles 1D particulièrement adaptés, à condition de les compléter par des lois reliant profondeur et débit au droit des ouvrages. Pour les écoulements à la surface des rues, les codes les plus répandus sont basés sur les équations de l'écoulement moyennées sur la verticale (équations de Saint-Venant 2D ; Paquier, 2009) : ils sont dits « 2D-h ». Ils bénéficient de données topographiques de plus en plus nombreuses provenant notamment de LIDAR aérien ou terrestre, complétées par des images de plus en plus détaillées et largement accessibles. De plus, les modèles 1D (réseau) et 2D-h (surface) peuvent être couplés (Bazin et al., 2014) pour reproduire la dynamique complète de l'inondation. L'utilisation de modèles 2D-h où le bâti est pris en compte au sein des équations sous forme d'une porosité permet d'agrandir le domaine de simulation en diminuant les temps de calculs, tout en dégradant la description de l'écoulement localement, à l'échelle du riverain ou du bâtiment. À l'inverse, les simulations 3D souffrent de temps de calcul prohibitifs, ce qui les réserve à des études locales (autour d'un ouvrage par exemple).

Pour établir des cartes de risque, les caractéristiques de l'aléa (profondeurs, vitesses d'écoulement) fournies par ces

modèles doivent être croisées avec des cartes de vulnérabilité. L'intervention des sciences de l'humain et de la société est indispensable pour y adjoindre le comportement des riverains (déplacements, utilisation possible ou probable des véhicules, perception du risque, mémoire, acceptabilité) afin de pouvoir proposer des plans d'évacuation, des modifications de voirie, des ouvrages de protection, etc.

Intégrer des données mesurées sur le terrain (« assimilation de données »), qui peuvent être transmises de manière quasi instantanée, est un moyen pour corriger automatiquement les prévisions; cette méthode se heurte cependant à la fiabilité et à la représentativité des données transmises.

Une incertitude correctement estimée est indispensable à la prise de décision.

## Comment utiliser ces modèles pour la gestion de crise ?

Les capacités de calcul ne permettent pas de simuler de manière détaillée un événement d'inondation urbaine en temps réel et ce, d'autant plus que la dynamique de l'inondation est rapide (quelques heures voire quelques minutes dans le cas d'orage localisé sur des pentes fortes). Une solution est d'établir un catalogue de simulations pour des événements synthétiques (correspondants à des conditions hydrologiques différentes). En temps de crise, on choisit l'événement simulé correspondant le mieux à l'événement subi pour décider des actions à mener.

L'incertitude sur les résultats d'une simulation pour un événement donné est liée à la représentativité limitée du modèle (calage insuffisant, représentation insuffisante ou mal adaptée de certains processus). Pour l'utilisation en prévision, on ajoute deux sources d'incertitude: l'estimation des volumes sources de l'inondation par les modèles météorologiques et hydrologiques, et la méthode d'interpolation ou d'extrapolation à partir des scénarios prédéterminés les plus proches de l'événement en cours.

### Un site grandeur nature et un «modèle réduit»

Le site d'Oullins est exceptionnel avec à la fois une forte urbanisation et des apports d'eau venant soit du débordement de la rivière soit des pluies locales. Il présente l'intérêt d'être inclus dans le bassin versant de l'Yzeron, suivi par l'OTHU depuis de nombreuses années, ce qui a permis d'observer un échantillon très représentatif de scénarios d'inondations urbaines. Complément indispensable, le site atelier « Modèle réduit de carrefour de canaux à surface libre » éclaire les chercheurs de l'OTHU sur les mécanismes conduisant à ces scénarios, et fournit des estimations des incertitudes de simulation.



## POUR ALLER PLUS LOIN

- **Paquier A., Mignot E. and Bazin P.-H.,** (2015). From hydraulic modelling to urban flood risk. *Procedia Engineering*, Special issue "Toward integrated modelling of urban systems", 115, 37-44 – [lc.cx/paquier2015](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.001)

