

# Résumé

## Contexte

Les enjeux de l'urbanisation sont à la fois environnementaux, économiques et sociaux, et se situent à une échelle mondiale. Du point de vue de l'hydrologie urbaine, d'importants impacts de l'expansion de l'urbanisation sur les hydrosystèmes sont exercés à travers les changements d'occupation des sols et l'apport d'infrastructures relative à la gestion de l'eau, en surface ou dans le sous-sol. Les défauts des systèmes de drainage centralisé se multiplient: débordements, fuites, mauvais branchements volontaires ou involontaires, infiltration d'eau du sol dans les tuyaux et leurs tranchées de pose, coûts croissants pour la gestion et l'entretien, etc.

Développées depuis les années 1990 dans différents pays, les techniques alternatives (TA) sont conçues pour atténuer les impacts négatifs de l'urbanisation sur les hydrosystèmes et préserver l'hydrologie naturelle (Dietz, 2007). Aujourd'hui, les bénéfices de l'utilisation des TA sont bien connus et acceptés par les scientifiques et praticiens. Néanmoins, les questions se posent souvent liées à l'efficacité et la durabilité de ces systèmes, et au problème de pollution dans les nappes par ces pratiques (Pitt, 1999; Dietz, 2007). Dans la plupart des cas, une TA est basée sur l'infiltration d'eau dans le sol, et sa performance est ainsi conditionnée par la capacité d'infiltration du sol sous-jacent. Néanmoins, les impacts de ces nouvelles pratiques de gestion des eaux pluviales sur les nappes sont rarement étudiés (Göbel et al., 2004).

Le cycle de l'eau urbaine est un système complexe comprenant les compartiments naturels (eau de surface et eau souterraine) et des infrastructures. Comprendre et quantifier les interactions de ces composantes et l'impact résultant sur le bilan hydrologique reste un challenge majeur dans le domaine de l'hydrologie urbaine (Fletcher et al., 2013). L'introduction de pratiques alternatives de gestion des eaux pluviales doit être cohérente avec l'équilibre global du bilan hydrologique. Il est ainsi essentiel de considérer la gestion des eaux pluviales dans des approches intégrées de gestion des eaux urbaines.

L'eau souterraine est à la fois une source vitale d'eau potable et une composante clé du cycle de l'eau urbaine. La gestion quantitative et qualitative des eaux pluviales est un sujet complexe couvrant des échelles spatiales et temporelles variées. La nappe est rechargée principalement par l'infiltration de la pluie dans le sol. Ce processus naturel est altéré par l'imperméabilisation des surfaces. Dans le même temps, l'eau est importée dans le milieu urbain par les réseaux d'eau (potable et assainissement). Ces réseaux enterrés peuvent être le lieu de fuites, ce qui constitue une source supplémentaire pour la recharge de la nappe (Lerner, 2002). Les interactions entre les eaux de surface, les eaux souterraines et les réseaux d'eau sont complexes dans l'espace et dans le temps (Schirmer et al., 2007; Thomas, 2006).

La recherche en hydrologie urbaine poursuit deux objectifs principaux (Andrieu and Chocat, 2004): avancer dans la compréhension des processus hydrologiques en milieux urbanisés et contribuer au développement de méthodes et techniques de gestion pour les eaux urbaines. D'une part, les processus hydrologiques des milieux urbains ne sont pas si différents de ceux des milieux naturels et aucune frontière absolue existe entre la ville et son environnement naturel. D'autre part, l'hydrosystème urbain

a ses particularités liées aux échelles spatiales réduites, aux hétérogénéités en surface et en sous-sol, aux forts impacts anthropiques relatifs à l'évolution permanente de l'occupation des sols, et aux pratiques et stratégies d'utilisation et de gestion... Les modèles hydrologiques sont en général développés en se basant sur la transformation pluie/débit, et dans un objectif de dimensionnement des ouvrages. Les modèles existants décrivent relativement bien les processus en surface, mais rarement les flux dans les sous-sol et leurs interactions avec la surface (Rossman, 2004). La tendance actuelle de modélisation consiste à mettre en œuvre des approches à base physique et distribuées, permettant de représenter les dynamiques spatiales et temporelles des réponses des bassins versant à la pluie.

Dans le cadre du projet national "Grand Paris", le projet du futur campus Paris-Saclay a été lancé en 2010, avec la création de l'Établissement Public Paris-Saclay (EPPS) comme pilote du projet. Le lieu d'accueil du projet est le plateau de Saclay, situé à 20 km au sud-ouest de Paris. Le plateau est délimité au nord par la vallée de la Bièvre et au sud par celle de l'Yvette, toutes les deux étant fortement urbanisées. L'enjeu de la gestion des eaux pluviales du futur campus est ainsi crucial, et s'inscrit dans une démarche globale d'Éco-territoire. La gestion des eaux pluviales sur le plateau suivra une gestion selon différentes échelles: parcelles, quartier, et plateau. L'hydrosystème du plateau est complexe, en raison de la présence d'un réseau de collecteurs et de rigoles datant du 17<sup>ème</sup> siècle, et d'une nappe discontinue proche de la surface, dont le fonctionnement reste méconnu. En coopération avec le CEREMA, l'EPPS s'est engagé dans cette thèse CIFRE dans l'objectif de progresser dans la compréhension du fonctionnement de l'hydrologie du plateau, et d'établir une estimation préalable de l'impact du projet d'aménagement sur l'hydrologie du site.

## Objectifs et méthodologies

La présente thèse suit deux objectifs. D'un point de vue scientifique, le travail souhaite contribuer au développement d'un modèle distribué et à base physique pour de petits bassins versants urbains (jusqu'à quelques centaines d'hectares), le modèle URBS (Rodriguez et al., 2008) développé à l'IFSTTAR. Il est capable d'effectuer des simulations sur des chroniques (plusieurs années) et à des pas de temps fins (minutes) en tenant compte du cycle intégré des eaux pluviales. Si l'objectif à long terme du développement est de construire un outil d'aide à la décision, la présente thèse se concentre sur l'intégration dans URBS du module WTI (Branger, 2007) pour les flux horizontaux de la zone saturée, sa validation et son application. D'un point de vue opérationnel, l'étude souhaite étudier les impacts d'un projet d'urbanisation sur le fonctionnement hydrologique du milieu urbain. Elle se base sur le site d'un des quartiers du futur campus Paris-Saclay, le quartier du Moulon. Une attention particulière est portée à l'impact sur la nappe, et justifie l'utilisation du modèle URBS avec le module spécifique pour la zone saturée URBS-WTI.

Le travail de thèse s'est déroulé en deux étapes. La première étape consistait à l'introduction du module WTI dans URBS. Une "interface" a été définie entre deux éléments unitaires adjacents. Le flux saturé est calculé sur cette interface avec la loi de Darcy. Pour pallier la difficulté dans la définition du niveau du substratum de la nappe, dont l'information est limitée, la formulation de Darcy a été adaptée à une forme intégrale depuis la surface de l'interface jusqu'à l'infinité en profondeur, ce qui était possible grâce à la représentation du sol dans le modèle, contrôlée par une décroissance exponentielle de la conductivité hydraulique à saturation.

Le modèle URBS-WTI ainsi construit a été évalué sur le Pin Sec (Nantes), un des bassins urbains expérimentaux de l'Observatoire Nantais des Environnements Urbains (ONEVU), pour lequel des données hydro-météorologiques et géographiques riches sont disponibles. Partant d'une simulation réalisée avec une première estimation des paramètres physiques du sol (calcul de référence), le modèle a fait l'objet d'une analyse de sensibilité. Cette étape a permis de réaliser une simulation plus performante par un ajustement des paramètres. L'effet de l'homogénéisation des niveaux de nappes simulés, liée à l'introduction du module WTI, a été évalué sur un simple critère: l'écart type des niveaux de nappe simulés entre les éléments unitaires.

La deuxième étape de la thèse a consisté à l'étude hydrologique sur le quartier du Moulon avec le modèle URBS-WTI. L'originalité de ce travail porte sur l'évaluation du modèle avec comme seules observations les données piézométriques. Dans un premier temps, l'analyse du fonctionnement hydrologique actuel du Moulon avant l'aménagement a été réalisée. Une étude de sensibilité du modèle a été réalisée en se basant sur les simulations des niveaux de la nappe afin d'ajuster les paramètres pour ce cas spécifique. Le modèle a été ensuite appliqué sur la période de trois années 2011-2013 en continu et au pas de temps de 6 minutes. Les variations des niveaux piézométriques ont été analysées et comparées aux observations, ainsi que le bilan hydrologique et les débits continus aux exutoires des réseaux d'eaux pluviales, uniquement sur la base des simulations.

Dans un deuxième temps, l'analyse du fonctionnement hydrologique futur du quartier du Moulon aménagé (à l'horizon de 2025) a été faite grâce à une étude de scénarios. Une condition initiale de l'occupation des sols a été établie, avec laquelle une simulation de référence a été menée. À partir de cette simulation de référence, l'étude de scénarios a été conduite à deux échelles : quartier et îlot urbain. À chacune des échelles, deux types de scénarios ont été testés : scénarios de densité d'urbanisation et de techniques alternatives. Pour chaque scénario, trois types de résultats ont été analysés : niveaux piézométriques, bilan hydrologique, et débits aux exutoires. Ces résultats ont été comparés avec les résultats de référence, afin d'évaluer les impacts des aménagements et les effets des techniques alternatives.

Un pré-traitement des données géographiques est nécessaire à la mise en œuvre du modèle, pour les caractéristiques du milieu (occupation des sols) et les réseaux hydrographiques. La mise en place du module WTI introduit un nouveau type de donnée géographique, tel que l'interface entre les éléments unitaires. La construction de ces fichiers de d'entrée a nécessité d'importants pré-traitements géomatiques avec des outils SIG, dont la plupart ont été automatisés.

## Principaux résultats

Le module de flux saturé WTI a été correctement intégré dans URBS, ce qui a permis d'améliorer sensiblement la qualité du modèle. Les niveaux piézométriques simulés s'accordent bien avec les observations, exception faite de piézomètres aux comportements atypiques. Dans le cas du bassin versant du Pin Sec où les mesures de débit sont disponibles, le modèle URBS-WTI a permis d'améliorer légèrement la simulation des débits. Sa capacité à simuler le cycle d'eaux pluviales en tenant compte des interactions entre l'atmosphère, la surface et le sol est confirmé.

Les effets antagonistes des processus hydrologiques ont été mis en évidence, comme par exemple la réduction simultanée d'infiltration et d'évapotranspiration par l'imperméabilisation des surfaces. Les impacts résultants sur la quantité de ruissellement et la variation du niveau de la nappe se sont avérés complexes et parfois surprenants. L'étude a affirmé l'importance du processus de drainage de l'eau du sol par les réseaux d'assainissement. Pour les deux cas d'études, cette composante représente près de 30% de la précipitation annuelle, même si cela n'a pas pu être validé sur le quartier du Moulon.

Le modèle a montré une sensibilité aux paramètres physiques, qui varie d'un cas d'étude à l'autre et selon la variable étudiée. Ceci montre qu'il est important d'effectuer systématiquement des études de sensibilités dans les futures applications du modèle. L'évaluation de sensibilité sur la simulation des niveaux piézométriques s'est avérée complexe car elle est reliée à la variabilité spatiale des propriétés du sol urbain. L'impact de la discrétisation spatiale du modèle a aussi été mis en évidence.

Le bilan hydrologique du quartier du Moulon a été estimé. Le rôle majeur du processus de l'évapotranspiration a été mis en évidence, ainsi que le drainage de l'eau du sol par les réseaux d'assainissement. Les résultats de niveaux piézométriques ont confirmé la grande variabilité spatiale des grandeurs hydrologiques, ce qui confirme aussi l'intérêt des approches distribuées dans la modélisation hydrologique urbaine.

L'impact de l'expansion de l'urbanisation sur l'hydrologie a été estimé par les études de scénarios pour l'état futur du Moulon après aménagement. L'effet de la réduction d'infiltration et d'évapotranspiration des surfaces imperméabilisées a été observé. Néanmoins, en raison des interactions complexes entre les

processus, le bilan hydrologique final n'est pas toujours évident à prévoir. Les différences saisonnières dans les régimes de recharge de la nappe ont été constatées. L'introduction des techniques alternative a mis en exergue leur capacité à réduire les volumes ruisselés et atténuer les débits de pointe. Mais cet effet positif vis à vis du contrôle du risque d'inondation pour l'aval peut être préjudiciable au régime de recharge de la nappe, et peut conduire localement à une saturation locale du sol en surface. Il est ainsi important de prendre en compte l'impact sur la nappe peu profonde des pratiques d'infiltration. Le potentiel du modèle à tester des scénarios d'aménagement ou de gestion des eaux pluviales a été illustré.

## **Conclusion et perspective**

Cette thèse a contribué au développement du modèle hydrologique distribué URBS, en particulier par l'intégration d'un module d'écoulement horizontal dans la zone saturée. Le modèle URBS-WTI a montré la capacité d'améliorer la simulation des niveaux piézométriques. Une évaluation du modèle originale a été réalisée sur le quartier du Moulon, en s'appuyant sur des données observées de piézométrie et sans donnée de débit. Ce travail a montré le potentiel et les limites d'un modèle distribué et à base physique dans le cadre de l'application à des projets réels d'aménagement urbain, en particulier sur l'impact de techniques alternatives de gestion des eaux pluviales. Le modèle URBS-WTI est désormais fonctionnel et est prêt à être appliqué sur d'autres sites. Des interrogations persistent toutefois sur la capacité du modèle à bien prendre en compte la variabilité spatiale des propriétés du sol, dans un cadre urbain où peu d'informations sont disponibles pour qualifier rigoureusement cette variabilité. Ce sujet devrait être approfondi pour améliorer la robustesse du modèle.