

Validation hydrologique d'un modèle hydro-microclimatique urbain (TEB-Hydro) : analyse de sensibilité sur le bassin versant de Rezé (Nantes, France)

Xenia STAVROPULOS-LAFFAILLE¹, Katia CHANCIBAUT¹, Hervé ANDRIEU¹,
Aude LEMONSU², Valéry MASSON²

¹ LUNAM, IFSTTAR, GERS, LEE, route de Bouaye CS4, 44344 Bouguenais, France – e-mail : xenia.laffaille@ifsttar.fr

² CNRM, GMM/TURBAU, 42, Avenue G. Coriolis, 31057 Toulouse Cedex 1, France

RÉSUMÉ. – Les villes subiront aujourd'hui, parallèlement à la pression démographique, les effets du changement climatique. La qualité de vie, le confort et les dépenses énergétiques des villes seront influencés. Face à ces changements, la compréhension des processus hydrologiques et énergétiques en ville est devenue indispensable aux futures stratégies d'aménagement. Or, les études dédiées au milieu urbain représentent généralement les processus de façon incomplète, négligeant souvent le couplage entre le bilan hydrique et le bilan énergétique à travers le processus d'évapotranspiration. Le modèle hydro-microclimatique TEB-Hydro le prend en compte de façon explicite. Toutefois des études antérieures ont démontré quelques défauts de la composante hydrologique de ce modèle. Dans ce contexte, une étude de sensibilité a été menée sur le bassin versant urbain de Rezé (Nantes, France) sur une période de 6 ans. Ce site est entièrement résidentiel et dispose d'un jeu de données hydrologiques en continu entre la période 1993 et 1998. Le but de cette communication est de mieux comprendre et évaluer les liens entre les processus hydriques du sous-sol urbain pour ensuite améliorer sa composante hydrologique. Les premiers résultats montrent une sensibilité du modèle aux paramètres hydrologiques, décrivant i) l'infiltration de l'eau de surface à travers la voirie, ii) le taux de surfaces imperméables connectées aux réseaux, iii) l'état d'étanchéité du réseau d'assainissement, iv) le contenu en eau seuil pour déclencher le drainage de l'eau du sol par les réseaux et v) la texture du sol.

Mots-clés : Analyse de sensibilité ; Bassin versant urbain de Rezé ; Bilans hydrique et énergétique ; Hydrologie urbaine ; Modélisation

Hydrological validation of an urban hydro-microclimate model (TEB-Hydro): Sensitivity analysis on the catchment of Rezé (Nantes, France)

ABSTRACT. – Cities are confronted to demographic pressure and climate change issues, influencing the life quality, comfort and energy costs. Facing these changes, the understanding of hydrological and energy processes in cities has become essential to future management strategies. However, studies dedicated to urban environment generally represent these processes incompletely, often neglecting the coupling between the water and the energy balance through the process of evapotranspiration. The hydro-microclimate model TEB-Hydro takes this into account explicitly. However, previous studies have shown some defects in the hydrological component of the model. In this context, a sensitivity analysis was conducted on the urban watershed of Rezé (Nantes, France) over a period of 6 years. This site is entirely residential and disposes of a continuous hydrological dataset between 1993 and 1998. Hence, the purpose of this communication is to better understand and to evaluate the connections between different hydrological processes in the urban subsoil in order to improve the hydrological component of the model. First results show a sensitivity of the model to hydrological parameters, describing i) the infiltration rate of surface water through the road structure, ii) the fraction of impermeable surfaces connected to the stormwater sewer, iii) the water-tightness of the sewer pipe iv) the threshold water content to trigger the drainage of soil water by the stormwater sewer, and v) the soil texture.

Key-words: Hydrologic and energetic budget, modeling, Rezé catchment, Sensitivity analysis, Urban hydrology

I. INTRODUCTION

L'urbanisation est une évolution générale du monde actuel. Les villes sont consommatrices d'espace et d'énergie, génèrent pollutions et nuisances, sont vulnérables à des aléas, naturels ou anthropiques, tels que les crues, les îlots de chaleur urbains que le changement climatique est susceptible d'aggraver [EEA, 2012]. Les préoccupations environnementales, la gestion de l'eau et des risques en ville impliquent d'améliorer la connaissance des composantes du

bilan hydrologique et énergétique en milieu urbain : ruissellement, processus à l'interface sol-atmosphère (évapotranspiration, infiltration), écoulement de l'eau dans le sol et sous-sol.

L'adaptation des villes au changement global (changement climatique et urbanisation) constitue un enjeu majeur dans la politique d'aménagement. Les gestions alternatives des eaux pluviales et le rôle du végétal dans le développement durable de la ville sont ainsi favorisés. La compréhension

des impacts de ces techniques alternatives sur les processus hydrologiques et énergétiques en ville sont devenus indispensables aux futures stratégies d'adaptation.

De récents articles effectuent la synthèse des progrès de l'hydrologie urbaine au cours de la période récente et confirment l'intérêt que suscite actuellement ce thème dans la communauté scientifique : Fletcher *et al.* [2013] pour un état de l'art en hydrologie urbaine, Hamel *et al.* [2013] sur la gestion des eaux à la source, Salvadore *et al.* [2015] sur la modélisation hydrologique des bassins versants urbanisés, Bach *et al.* [2014] sur la modélisation intégrée des eaux urbaines, Shirmer *et al.* [2013] sur l'hydrogéologie urbaine. Ces travaux n'abordent pas ou peu le couplage entre le bilan hydrique et le bilan énergétique à travers le processus d'évapotranspiration. L'évapotranspiration, ou flux de chaleur latente, représente pourtant une part importante du bilan hydrologique en milieu urbain. La prise en compte de ce couplage est nécessaire pour étudier l'incidence du changement climatique sur l'hydrologie urbaine à l'échelle de la ville. Plusieurs recherches et projets (AVuPUR, VegDuD, TrafiPollu) ont ainsi contribué au développement d'un modèle hydro-microclimatique TEB-Hydro, prenant en compte un couplage détaillé entre les deux bilans.

Cependant, les premières études d'évaluation de ce modèle sur des bassins versants urbains nantais de différente taille [Chancibault *et al.*, 2014 ; Allard, 2015 ; Chancibault *et al.*, 2015] s'interrogent sur la représentation des processus hydrologiques du sous-sol urbain. Deux défauts ont été observés : i) l'évolution du profil d'humidité du sol a une amplitude peu marquée, limitant le drainage de l'eau du sol par le réseau ; ii) l'alimentation du débit de base par le drainage profond de l'eau du sol est mal reproduite.

Cette étude s'inscrit dans le développement d'une modélisation hydro-microclimatique adaptée à l'échelle de la ville pour évaluer les stratégies d'adaptation au changement global. Afin de répondre aux problématiques identifiées auparavant, il est d'abord nécessaire de se concentrer sur la composante hydrologique du modèle TEB-Hydro. Ceci implique d'améliorer les processus hydrologiques décrivant les écoulements de l'eau dans le sol urbain (drainage par les réseaux, écoulements verticaux et latéraux). Le but de cette étude est ainsi de mieux comprendre les liens entre les processus hydrologiques présents dans le milieu urbain et de vérifier la capacité du modèle à les reproduire.

Cette communication présente tout d'abord le modèle hydro-microclimatique TEB-Hydro. L'étude de cas sur laquelle sera évalué ce modèle et une étude de sensibilité du modèle aux différents paramètres introduits, font l'objet du chapitre « Méthodologie ». Les premiers résultats sont ensuite discutés.

II. LE MODÈLE HYDRO-MICROCLIMATIQUE TEB-HYDRO

La plateforme de modélisation SURFEX, développée par Météo-France, intègre le modèle TEB [Masson, 2000] dédié au bilan énergétique des surfaces urbanisées. Il représente la ville de manière simplifiée en se basant sur l'approche de la rue canyon d'Oke [1987]. L'introduction de la végétation s'est concrétisée par le modèle TEB-Veg qui prend en compte : i) la végétation à l'intérieur de la rue et des espaces verts urbains [Lemonsu *et al.*, 2012] avec le modèle ISBA [Boone *et al.*, 1999], ii) les toitures végétalisées dans l'aménagement urbain [De Munck *et al.*, 2013], iii) la végétation haute à l'intérieur de la rue [Redon *et al.*, 2017].

Le modèle TEB-Hydro fait l'objet d'une collaboration entre le Laboratoire Eau et Environnement de l'IFSTTAR et le CNRM (Météo-France). Il réunit deux schémas de surface, TEB et ISBA qui décrivent les échanges énergétiques et hydriques entre le sous-sol, la surface et l'atmosphère. TEB-Hydro est ainsi capable de représenter les interactions entre le bilan en eau (1) et le bilan en énergie (2). Les flux de chaleur latente (Q_E) sont reliés au terme de l'évapotranspiration (E) par le biais de la chaleur latente de vaporisation (L_v) (3).

$$\text{Bilan en eau : } P + I = E + R + D + \Delta W \left[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \right] \quad (1)$$

Avec P la précipitation totale, I l'apport en eau anthropique (irrigation), E l'évapotranspiration, R le ruissellement total, D le drainage profond et ΔW la variation du stockage de l'eau en surface et en sous-sol pendant la période d'étude.

$$\text{Bilan en énergie : } Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \left[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \right] \quad (2)$$

Avec Q^* le rayonnement net incident, Q_F le flux anthropique, Q_H le flux de chaleur sensible, Q_E le flux de chaleur latente, ΔQ_S le stockage du flux de chaleur et ΔQ_A le flux de chaleur d'advection.

$$Q_E = \frac{E}{L_v} \left[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \right] \quad (3)$$

Les principales caractéristiques du schéma TEB-Hydro sont présentées dans De Munck *et al.* [2012] et Chancibault *et al.* [2014]. Comme dans le modèle TEB-VEG, la rue canyon à l'intérieur de la ville est composée de trois compartiments « bâti, voirie et jardin » (Figure 1a). Les processus hydrologiques et thermiques sont traités dans TEB couplé avec le modèle ISBA-DF [Boone, 2000] (Figure 1b). La voirie est représentée en introduisant un sol artificiel dans les premières couches de la partie « voirie » (Figure 1a), à travers laquelle une faible infiltration est

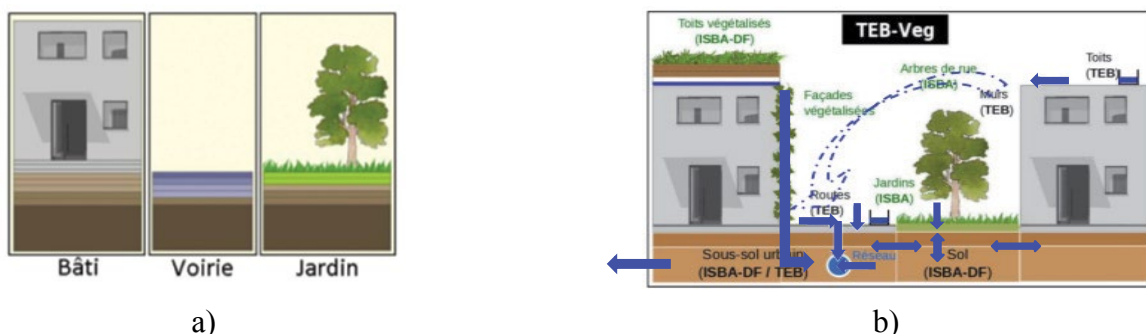


Figure 1 : a) Représentation schématique de la rue canyon avec les trois compartiments « bâti, voirie et jardin ». b) Processus hydrologiques traités dans TEB-Hydro [De Munck *et al.*, 2012].

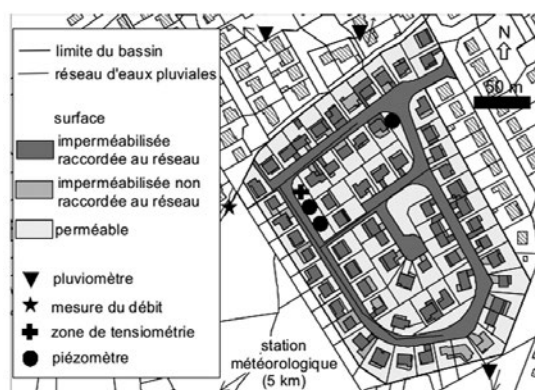
possible. L'eau ruisselée des surfaces imperméables est collectée par les réseaux, sauf la part non connectée au réseau d'assainissement, qui rejoint le compartiment « jardin ». Les réseaux d'assainissement sont pris en compte à travers le drainage de l'eau du sol par les réseaux.

La discrétisation verticale du sol ainsi que les transferts hydriques verticaux dans les trois compartiments « jardin », « bâti » et « voirie » sont appliqués selon les mêmes schémas (Figure 1a). Seules les entrées (respectivement la pluie après interception par la végétation infiltrée dans le sol, aucune entrée ou l'eau infiltrée depuis la voirie) et les sorties (drainage par les réseaux pour le compartiment voirie) diffèrent. Cette approche facilite ainsi une homogénéisation des contenus en eau du sol entre les différents compartiments.

III. MÉTHODOLOGIE

III.1. Etude de cas – Site expérimental de Rezé

Le site expérimental de Rezé et sa base de données ont fait l'objet de plusieurs travaux de recherche antérieurs [Dupont, 2001 ; Rodriguez *et al.*, 2003 ; Berthier *et al.*, 2004 ; Lemonsu *et al.*, 2007 ; Rodriguez *et al.*, 2008]. Il est situé au sud de la ville de Nantes, à environ 40 km de la côte atlantique. Le bassin de 4.7 ha est entièrement résidentiel comprenant des maisons individuelles avec jardin. Le réseau d'assainissement est séparatif avec une longueur de 803m pour le réseau d'eaux usées et de 480m pour le réseau d'eaux pluviales. Ce dernier se trouve à une profondeur variant entre 1.2 et 1.5 m. Le bassin versant se divise en trois types d'occupation du sol : 55 % de jardin, 17 % de bâtiment et 28 % de voirie. 84 % des surfaces imperméables sont connectées au réseau d'eau pluviale. Le coefficient d'imperméabilisation du bassin (rapport entre la surface imperméable raccordée au réseau et la surface totale du bassin) est de 0.37. Une description détaillée du site figure dans Berthier *et al.* [1999]. Le site de Rezé a été instrumenté (mesure de la pluie, du débit à la sortie du réseau d'eau pluviale et du niveau de saturation de l'eau du sol) par le LCPC et dispose d'une base de données alimentée de manière continue sur la période 1993-1998 (Figure 2a). Des informations sur la vitesse et la direction du vent, de la température, de l'humidité de l'air et de la pression atmosphérique sont disponibles à la station météorologique de Météo-France à 5km du site.



a)

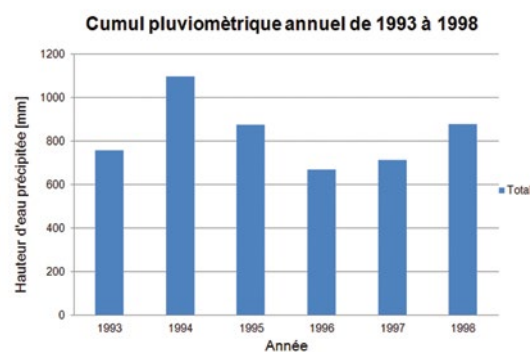
Le climat est océanique, caractérisé par des pluies fréquentes mais de faible intensité. La pluie annuelle moyenne sur la période d'étude est de 830mm (Figure 2b). D'après Berthier [1999], le coefficient d'écoulement a été déterminé pour 291 événements pluvieux entre le 1^{er} janvier 1991 et le 31 décembre 1997. Le coefficient d'écoulement moyen sur cette période est de 0.26. Une analyse des débits, calculés à partir des hauteurs d'eau mesurées dans le réseau d'eaux usées, indique des débits de pointe autour de 18m³/h pour les mois d'hiver 1993/1994 et 1994/1995. Cependant cette analyse concerne un bassin versant plus grand que celui de cette étude avec une longueur du réseau d'eaux usées de 2300 m.

III.2. Analyse de Sensibilité

Le but de l'analyse de sensibilité est de mieux comprendre les processus et le rôle des paramètres de la composante hydrologique du modèle. Il en existe deux types : l'analyse locale et l'analyse globale [Saltelli *et al.*, 2004 ; Tang *et al.*, 2006]. L'étude choisie est une analyse locale se basant sur la méthode OAT (One Factor at a Time). Cette approche mesure l'influence d'un paramètre par l'importance de la variation de la réponse du modèle autour de la valeur nominale de ce paramètre [Labbas, 2014].

Le modèle TEB-Hydro est appliqué sur une seule maille (1D) sur le site de Rezé, utilisant le jeu de données de 6 ans entre 1993 et 1998. Il opère en mode « off-line », forcé par les observations météorologiques au pas de temps d'une heure. Le pas de temps numérique du modèle est de 5 min. Les données morphologiques du site, les propriétés radiatives et thermiques des matériaux (TEB) et les propriétés du sol et de la végétation (ISBA) se basent sur les simulations de Lemonsu *et al.* [2007].

L'étude de sensibilité englobe plusieurs paramètres prenant en compte une fourchette de valeurs réalistes (minimale, nominale, maximale) par paramètre (Tableau 1). Ces valeurs ont été identifiées selon la littérature ou des mesures in-situ [Berthier, 1999 ; Dupont, 2001 ; Lemonsu, 2003 ; Morena, 2004 ; Furusho, 2011 ; Allard, 2015]. Une simulation de référence (REF) est définie en se basant sur les valeurs nominales de chaque paramètre. Ensuite des simulations MIN et MAX sont effectuées où à la fois la valeur d'un seul paramètre est modifiée autour de la valeur nominale (valeur minimale et maximale) de façon conséquente ; et les autres paramètres restent fixés à leurs valeurs de référence.



b)

Figure 2 : a) Le bassin versant expérimental du site de Rezé [Dupont, 2001] ; b) L'évolution du cumul pluviométrique annuel de 1993 à 1998.

Tableau 1 : Description des différents paramètres du modèle TEB-Hydro, ainsi que les valeurs minimales (MIN), maximales (MAX) et nominales (REF) pour l'analyse de sensibilité. W_{wp} est la teneur en eau au point de flétrissement et W_{fc} est la teneur en eau à la capacité au champ.

PARAMETRE	DESCRIPTION	UNITE	VALEURS		
			MIN	REF	MAX
SROAD	la capacité maximale du réservoir de surface de la route	mm	0.5	3.0	6.0
SROOF	la capacité maximale du réservoir de surface du toit	mm	0.25	0.5	3.0
IP	un paramètre pour la description de l'état d'étanchéité du réseau	-	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹
WGTH	le contenu en eau seuil pour déclencher le drainage de l'eau du sol par les réseaux	m ³ /m ³	W_{wp}	W_{fc}	1.5* W_{fc}
IROAD	le taux d'infiltration à travers la voirie	mm/s	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻³
CONN	le taux de surfaces imperméables effectivement connectées aux réseaux	-	0.7	0.84	0.9
Z0TOWN	la longueur de rugosité dynamique au-dessus la ville	m	0.03	0.3	0.6
SOILCLAY	la fraction de l'argile dans le sol	-	0.04	0.2	0.4
SOILSAND	la fraction du sable dans le sol	-	0.04	0.38	0.7

Le critère statistique de Kling-Gupta (KGE) (4) est calculé à partir des résultats des simulations MIN ou MAX $D_{sim}(t)$ et de référence $D_{ref}(t)$. Le coefficient d'efficacité de Kling-Gupta (KGE) est un critère synthétique de plusieurs critères variant entre 1 et $-\infty$ [Gupta *et al.*, 2009] :

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (4)$$

Avec :

- le coefficient de corrélation linéaire (r) entre les variables simulées et de référence (5) :

$$r = \frac{\sum ((D_{sim}(t) - \overline{D_{sim}}) * (D_{ref}(t) - \overline{D_{ref}}))}{\sqrt{\sum (D_{sim}(t) - \overline{D_{sim}})^2} * \sqrt{\sum (D_{ref}(t) - \overline{D_{ref}})^2}} \quad (5)$$

- la variabilité relative (α) représentée par le quotient des écarts-types sur les variables simulées et de référence (6) :

$$\alpha = \frac{\sqrt{\sum (D_{sim}(t) - \overline{D_{sim}})^2}}{\sqrt{\sum (D_{ref}(t) - \overline{D_{ref}})^2}} \quad (6)$$

- le biais (β) (7) :

$$\beta = \frac{\overline{D_{sim}}}{\overline{D_{ref}}} \quad (7)$$

IV. RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'analyse de sensibilité est appliquée afin de mieux comprendre les impacts des paramètres sur les processus hydrologiques. Considérant que la composante hydrologique du modèle doit être améliorée, ces résultats ne sont pas définitifs.

Les valeurs du critère Kling-Gupta KGE sont présentées pour chaque simulation MIN et MAX. Les variables de sortie choisies pour l'analyse dépendent de l'influence du paramètre sur les processus hydriques présents dans le sol des trois compartiments « bâti », « voirie » et « jardin » (Tableau 2) :

- le ruissellement de l'ensemble des surfaces imperméables et le drainage de l'eau du sol par le réseau (RUNOFF_TOWN),

le ruissellement des surfaces provenant uniquement des toitures (RUNOFF_ROOF) ou des voiries (RUNOFF_ROAD),
 • le drainage de l'eau du sol par le réseau d'assainissement (RUNOFF_SW),
 • la teneur en eau (WG) dans les différentes couches du sol urbain par compartiment « bâti », « voirie » et « jardin ».

IV.1. Sensibilité aux paramètres SROOF, SROAD, IROAD, CONN, ZOTOWN

Le modèle est peu sensible aux variations des paramètres SROAD et SROOF (Figure 3a et b). Ceci est également conforté par les coefficients KGE qui montrent peu de différences entre les valeurs calculées des simulations MIN et MAX (Tableau 2). Il semble, que la surface des routes (28 % de la surface totale) et des toits (17 %) y contribue peu et uniquement pour des petits événements de pluie. Cependant, compte tenu de la fraction plus importante des routes, l'influence du paramètre SROAD est plus grande sur le ruissellement total que celle de SROOF.

Tableau 2 : Le coefficient d'efficacité de Kling-Gupta (KGE) calculé entre les simulations MIN et MAX de chaque paramètre et la simulation de référence (REF) en fonction des variables de sortie du modèle.

Variable de sortie	Simulation	Critère KGE	
		MIN	MAX
Ruissellement d'ensemble des surfaces imperméables et drainage de l'eau du sol par le réseau (RUNOFF_TOWN)	SROOF	0,92	0,94
	SROAD	0,99	0,94
	IROAD	0,94	0,39
	CONN	0,84	0,93
	ZOTOWN	0,97	0,98
Drainage de l'eau du sol par le réseau (RUNOFF_SW)	IP	-0,28	-2,40
	WGTH	-0,27	NA
Teneur en eau dans le « jardin », 10 ^{ème} couche (GD_WG10)	SOILCLAY	0,72	0,84
	SOILSAND	0,59	0,60

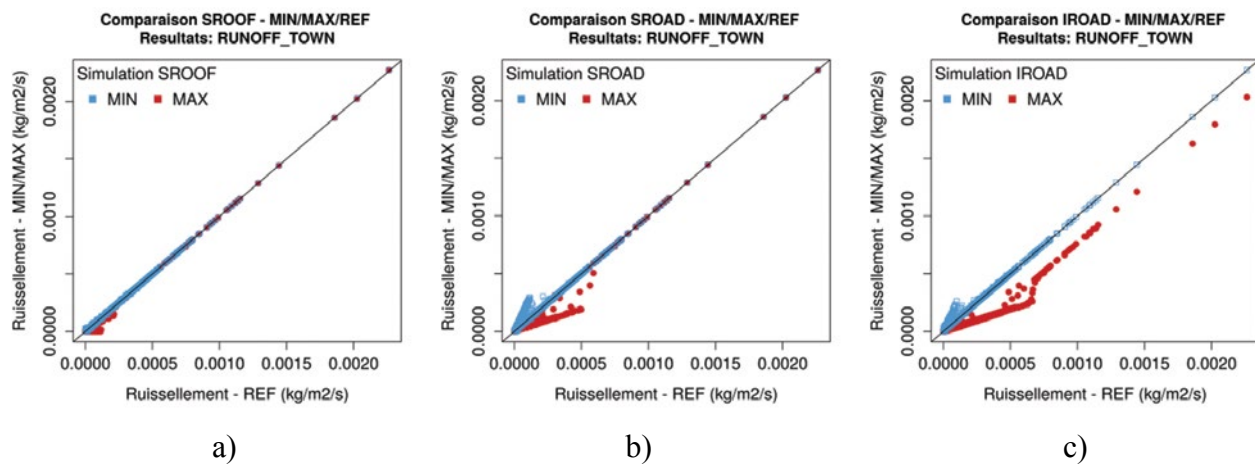


Figure 3 : Comparaison des ruissellements totaux (RUNOFF_TOWN) simulés par la simulation de référence et les simulations MIN (bleu) et MAX (rouge) pour les paramètres a) SROOF, b) SROAD et c) IROAD

Le modèle montre une sensibilité non négligeable au paramètre IROAD (Figure 3c), dont les effets de ce dernier sont probablement corrélés à ceux de SROAD. En effet, le taux d'infiltration à travers la voirie influence la quantité d'eau ruisselée en surface des voiries et la capacité de rétention de la voirie influence la quantité d'eau pouvant s'infiltrer dans le sol. Si le taux d'infiltration de la voirie augmente, le ruissellement de surface total diminue. Contre toute attente, l'humidité dans les différentes couches du sol en-dessous de la voirie diminue également avec un taux d'infiltration plus important. Ceci pourrait être lié au transfert latéral entre les trois compartiments. Quand le taux d'infiltration à travers la voirie augmente, la quantité d'eau non connectée au réseau qui rejoint les jardins puis s'infiltrer diminue, baissant la teneur en eau du sol associée. Grâce au processus d'écoulement latéral infra-maille, l'humidité de la colonne du sol de la « voirie » est ainsi modifiée.

Le modèle est sensible au taux de connexion effective des surfaces imperméables (CONN) (Figure 4a et b). Le ruissellement des surfaces non connectées aux réseaux d'assainissement alimente l'infiltration dans le compartiment « jardin ». La quantité d'eau infiltrée change ainsi en

fonction du taux de connexion effective, influençant le profil d'humidité du sol associé. En effet, les teneurs en eau dans les couches du sol varient en fonction des valeurs min/max. Elles sont plus élevées quand le taux de connexion est faible et inversement plus faibles avec un taux élevé (Figure 4a). La variation de ce paramètre a également une influence sur le ruissellement total des surfaces artificielles. Un faible taux de connexion amène donc à un ruissellement total plus faible et une augmentation de ce paramètre augmente la quantité d'eau ruisselée (Figure 4b).

La longueur de rugosité dynamique est influencée par la forte hétérogénéité de l'environnement urbain, décrivant l'intensité des échanges turbulents au-dessus de la surface. Considérant le ruissellement total des surfaces artificielles, le modèle n'est pas sensible à ce paramètre. En revanche, on peut constater une influence sur les variations d'humidité dans la première couche du compartiment « jardin » (Figure 4c). Cette couche est le lieu d'échanges en eau, à travers le terme d'évaporation, entre la surface et l'atmosphère. Une valeur élevée de ce paramètre a pour résultat une teneur en eau plus faible dans la première couche du compartiment « jardin ».

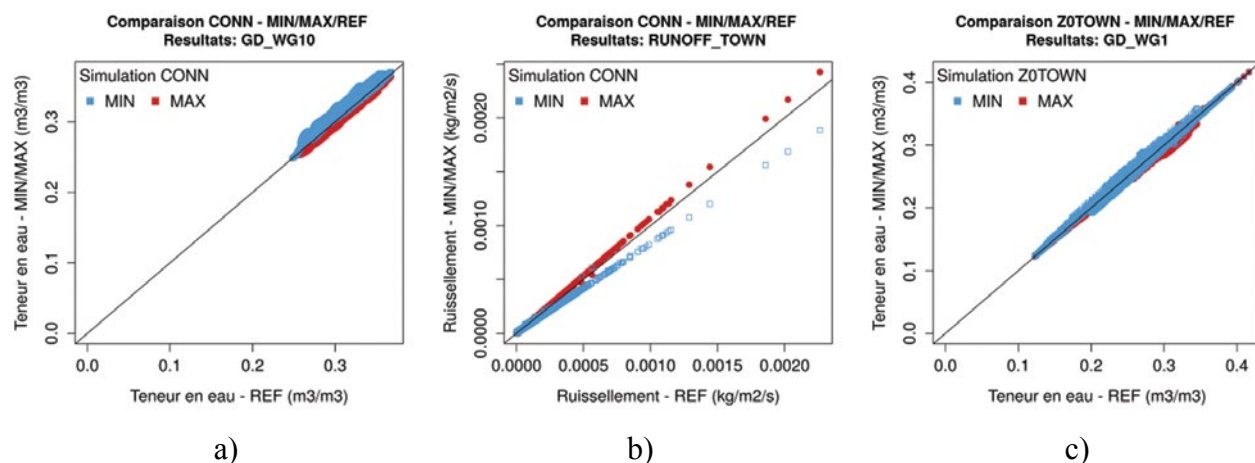


Figure 4 : Comparaison des simulations MIN (bleu), MAX (rouge) et REF à l'aide des variables a) de teneurs en eau de la 10^{me} couche du sol du compartiment « jardin » (GD_WG10) en faisant varier le paramètre CONN, b) des ruissellements totaux (RUNOFF_TOWN) en faisant varier le paramètre CONN, c) des teneurs en eau de la 1^{re} couche du sol du compartiment « jardin » (GD_WG1) en faisant varier le paramètre de rugosité Z0TOWN.

IV.2. Sensibilité aux paramètres IP, WGTH

Les valeurs statistiques de KGE, même négatives, sont assez éloignées entre les simulations MIN et MAX pour le paramètre IP, décrivant l'état d'étanchéité du réseau d'assainissement (Tableau 2). Le modèle lui est très sensible. Une augmentation de ce paramètre contribue à des pics d'infiltration plus importants dans le réseau (Figure 5a). Néanmoins, il ne contribue pas à un débit de base continu, influencé par les variations pluviométriques au cours de l'année. En réalité, le drainage des eaux souterraines par les réseaux est d'autant plus important que l'état du réseau est dégradé (fissures, pénétration des racines, etc.) et que l'état hydrique du sol, où se trouve le réseau, est proche de la saturation.

Ainsi, il sera influencé par la valeur seuil permettant ces infiltrations. La valeur de référence REF du paramètre WGTH est la capacité au champ, à partir de laquelle l'eau est par définition mobilisable sous force gravitaire. Reprenant les résultats de la simulation de référence, les infiltrations ont lieu pendant les mois humide d'hiver (Figure 5c), quand les teneurs en eau atteignent la capacité au champ. Une hausse de 50 % de ce paramètre a pour conséquence aucune infiltration dans le réseau d'assainissement (Figure 5b et Tableau 2). En revanche, avec une modification de ce paramètre à la valeur minimale (point de flétrissement), on peut

observer un débit saisonnier quasiment permanent dans le réseau d'eau pluviale sur la période de 6 ans (Figure 5c). Cela s'explique par le fait que l'eau du sol est également drainée pendant les mois secs d'été, asséchant le sol environnant. Il en résulte une teneur en eau du sol moindre qu'avec la simulation REF au début de la période hivernale.

IV.3. Sensibilité aux paramètres SOILCLAY, SOILSAND

La texture du sol, définie en fonction de la fraction d'argile (SOILCLAY) et la fraction de sable (SOILSAND), joue un rôle important dans la modélisation (Tableau 2). Le modèle est très sensible à ces deux paramètres du fait qu'ils interviennent dans la résolution des échanges hydriques verticaux entre les couches de sol et la surface et latéraux entre les compartiments dans une même maille, par le biais, entre autres, de paramètres tels que la conductivité à saturation. La variation de ces deux paramètres influence ainsi les teneurs en eau du sol des trois compartiments (Figure 6a et b). De même, ils influencent le processus de drainage de l'eau du sol par les réseaux à travers la conductivité hydraulique. Si la fraction du sable est élevée, la conductivité hydraulique l'est aussi. Le résultat est alors une infiltration plus importante dans le réseau d'assainissement (Figure 6c).

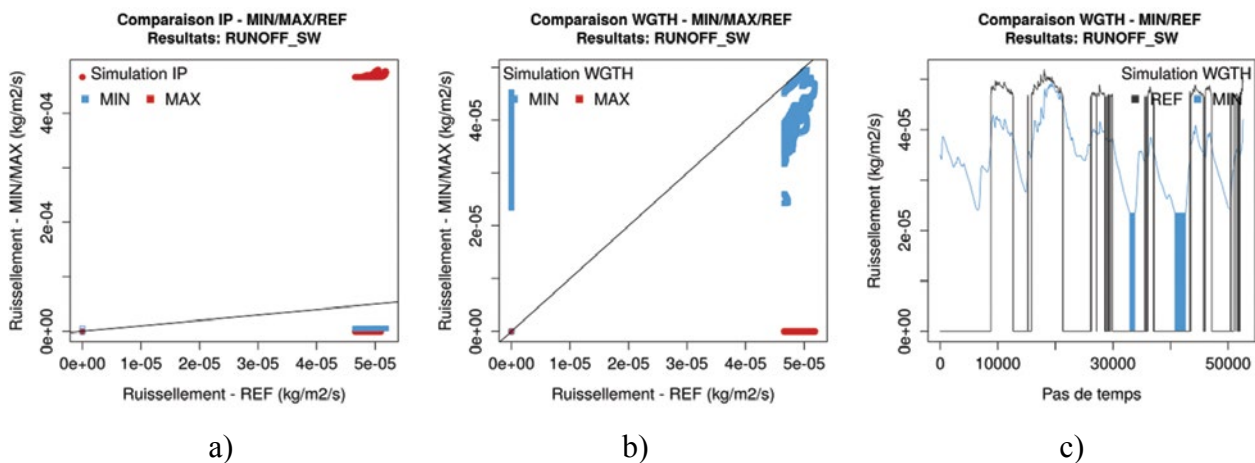


Figure 5 : Comparaison des ruissellements dans le réseau d'assainissement (RUNOFF_SW) simulés par la simulation de référence et les simulations MIN (bleu) et MAX (rouge) pour les paramètres a) IP et b) et c) WGTH

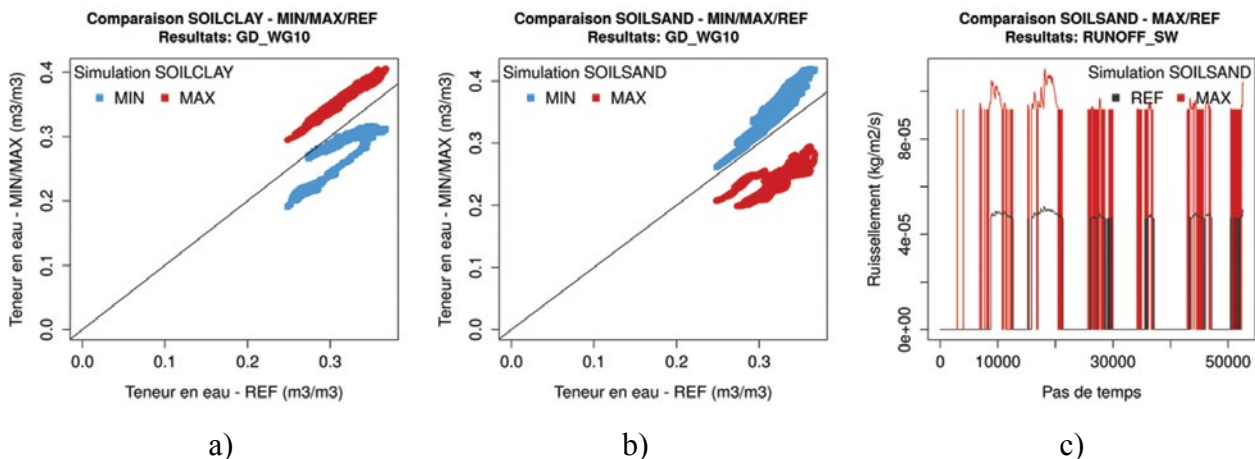


Figure 6 : Comparaison des teneurs en eau de la 10^{ème} couche du sol du compartiment « jardin » (GD_WG10) simulées par la simulation de référence et les simulations MIN (bleu) et MAX (rouge) pour les paramètres a) SOILCLAY et b) SOILSAND. c) Comparaison des infiltrations de l'eau du sol dans les réseaux simulées par les simulations REF (noir) et MAX (rouge).

V. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le modèle TEB-Hydro a été appliqué antérieurement sur différents bassins versants urbains et péri-urbains de Nantes (France). Quelques défauts concernant le bilan en eau ont pu être observés. L'objectif de cette étude est de vérifier la capacité du modèle à reproduire les processus hydrologiques présents dans le milieu urbain. Dans ce but, une étude de sensibilité du modèle est réalisée. Cela permet de mieux comprendre les processus hydrologiques du sol urbain et d'identifier les paramètres auxquels le modèle est sensible.

Suite aux premiers résultats, le modèle a été identifié sensible vis-à-vis des paramètres suivants :

- IROAD : le taux d'infiltration à travers la voirie
- CONN : le taux de surfaces imperméables connectées aux réseaux
- IP : la description de l'état d'étanchéité du réseau
- WGTH : le contenu en eau seuil pour déclencher le drainage de l'eau du sol par les réseaux
- SOILCLAY, SOILSAND : la texture du sol en fraction d'argile et de sable

Il semble que les paramètres IP, WGTH et la texture du sol (SOILCLAY, SOILSAND) sont liés entre eux. Ces paramètres peuvent ne pas influencer les sorties individuellement mais avoir une influence lorsqu'ils interagissent entre eux.

Cependant, cette analyse, basée sur la méthode OAT, ne tient pas compte des interactions possibles entre les paramètres. De ce fait, il est envisagé d'appliquer une autre méthode d'analyse plus élaborée qui se base sur une approche multidimensionnelle afin de montrer les interactions des différents paramètres entre eux.

Après avoir pris en compte les améliorations de la composante hydrologique, la nouvelle méthode d'analyse de sensibilité sera appliquée, permettant un meilleur calage des paramètres clés du modèle. Le calage sera fait de manière « croisée », employé indépendamment sur deux périodes de simulation différentes. Puis chaque calage sera validé sur l'autre période. La comparaison des variables simulées aux données observées à l'aide du critère de Kling-Gupta (KGE) permettra ensuite d'évaluer la composante hydrologique du modèle.

Dans un premier temps, la validation se fera à l'aide des données observées (débit) du bassin versant urbain de Rezé. L'application du modèle sur ce site permettra ainsi de valider le modèle sur les écoulements dans les réseaux d'assainissement. Dans un deuxième temps, il est prévu d'appliquer le modèle sur un autre bassin versant urbain, le Pin Sec [Percot, 2012, Rodriguez *et al.*, 2013], qui permettra une validation sur les écoulements dans le sol grâce aux mesures d'humidité dans le sol.

Dans un deuxième temps, il est envisagé d'appliquer le modèle sur un bassin versant nantais plus grand en intégrant le transfert (2D) [Allard, 2015] et de le valider d'un point de vue hydrologique et énergétique à travers les flux de chaleur latente et le terme d'évapotranspiration. En même temps le modèle TEB-Hydro sera appliqué sur Paris et sa petite couronne dans le cadre du programme PIREN-Seine. L'éventuelle difficulté pour appliquer le modèle sur d'autres bassins versants réside dans la disponibilité des données, en particulier concernant la description des réseaux d'assainissement.

VI. RÉFÉRENCES

- ALLARD A. (2015) – *Contribution à la modélisation hydrologique à l'échelle de la ville : Application sur la ville de Nantes*. Doctorat, ED Sciences Pour l'Ingénieur Géoscience Architecture. Ecole Centrale de Nantes.
- BACH P. M., RAUCH W., MIKKELSEN P. S., MCCARTHY D. T., & DELETIC A. (2014) – A critical review of integrated urban water modelling – Urban drainage and beyond. *Environmental Modelling & Software*, **54**, 88-107.
- BERTHIER E. (1999) – *Contribution à une modélisation hydrologique à base physique en milieu urbain : Elaboration du modèle et première évaluation*. Doctorat de l'Université Joseph Fourier. Institut National Polytechnique de Grenoble.
- BERTHIER E., ANDRIEU H., & CREUTIN J. (2004) – The role of soil in the generation of urban runoff: development and evaluation of a 2D model. *Journal of Hydrology*, **299**(3-4), 252-266.
- BERTHIER E., ANDRIEU H., & RODRIGUEZ F. (1999) – The Rezé urban catchments database. *Water Resources Research*, **35**(6), 1915-1919.
- BOONE A. (2000) – *Modélisation des processus hydrologiques dans le schéma de surface ISBA : Inclusion d'un réservoir hydrologique, du gel et modélisation de la neige*. Doctorat de l'Université Toulouse III.
- CHANCIBAUT K., BRUN J.-M., ALLARD A., ANDRIEU H., LEMONSU A., DE MUNCK C., & MASSON V. (2015) – Improving the water budget in the urban surface scheme TEB for a better evaluation of greening strategies for adaptation purposes. *ICUC9 20-24 July 2015, Toulouse, France*.
- CHANCIBAUT K., LEMONSU A., BRUN J., DE MUNCK C., ALLARD A., LONG N., ANDRIEU H. (2014) – Hydrological evaluation of urban greening scenarios: application to the City of Nantes, in France. *13th ICUD, Sarawak, Malaysia*.
- DE MUNCK C., BRUN J.-M., LEMONSU A., & CHANCIBAUT K. (2012) – Un modèle climatique urbain pour l'évaluation de politiques de végétalisation à grande échelle. *Livrable 4.7 du projet VegDUD (ANR-09-VILL-0007)*.
- DE MUNCK C., LEMONSU A., BOUZOUIDJA R., MASSON V., & CLAVERIE R. (2013) – The GREENROOF module (v7.3) for modelling green roof hydrological and energetic performances within TEB. *Geoscientific Model Development*, **6**, 1941-1960.
- DUPONT S. (2001) – *Modélisation dynamique et thermodynamique de la canopée urbaine : réalisation du modèle de sols urbains pour SUBMESO*. Doctorat de l'ED Mécanique, Thermique et Génie civil. Université de Nantes.
- EEA. (2012) – Urban adaptation to climate change in Europe: Challenges and opportunities for cities together with supportive national and European policies. *European Environment Agency, EEA Copenhagen*.
- FLETCHER T., ANDRIEU H., & HAMEL P. (2013) – Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in Water Resources*, **51**, 261-279.
- FURUSHO C. Y. (2011) – *Modélisation hydrologique des bassins versants périurbains*. Doctorat de l'ED Sciences Pour l'Ingénieur Géoscience Architecture. Ecole centrale de Nantes.
- GUPTA H. V., KLING H., YILMAZ K. K., & MARTINEZ G. F. (2009) – Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, **377**, 80-91.
- HAMEL P., DALY E., & FLETCHER T. D. (2013) – Source-control stormwater management for mitigating the impacts of urbanisation on baseflow: A review. *Journal of Hydrology*, **485**, 201-211.
- LABBAS M. (2014) – *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 (130km²)*. Doctorat de l'ED Terre, Univers, Environnement. Université de Grenoble.

- LEMONSU A. (2003) – *Modélisation des processus de surface et de la couche limite en milieu urbain. Doctorat de l'ED Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace. Université de Toulouse III.*
- LEMONSU A., MASSON V., & BERTHIER E. (2007) – Improvement of the hydrological component of an urban soil-vegetation-atmosphere-transfer model. *Hydrological Processes*, **21**(16), 2100-2111.
- LEMONSU A., MASSON V., SHASHUA-BAR L., ERELL E., & PEARLMUTTER D. (2012) – Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance Model for modeling urban green areas. *Geoscientific Model Development*, **5**, 1377-1393.
- MASSON V. (2000) – A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models. *Boundary-Layer Meteorology*, **94**(3), 357-397.
- MORENA F. (2004) – *Modélisation hydrologique distribuée en milieu urbanisé : Représentation des processus de production et développement du modèle URBS. Doctorat de l'ED Terre, Univers, Environnement. Institut National Polytechnique de Grenoble.*
- OKE T. (1987) – *Boundary Layer Climate. Routledge, Éd*, **8**, 262-303.
- PERCOT S. (2012) – *Contribution des retombées atmosphériques aux flux de polluants issus d'un petit bassin versant urbain : Cas du Pin Sec à Nantes. Doctorat de l'ED Sciences Pour l'Ingénieur Géoscience Architecture. Ecole Centrale de Nantes.*
- REDON E. C.; LEMONSU A.; MASSON V.; MORILLE B. & MUSY M. (2017) – Implementation of street trees within the solar radiative exchange parameterization of TEB in SURFEX v8.0. *Geoscientific Model Development*, **10**, 385-411.
- RODRIGUEZ F., ANDRIEU H., & CREUTIN J.-D. (2003) – Surface runoff in urban catchments: morphological identification of unit hydrographs from urban databanks. *Journal of Hydrology*, **283**(1-4), 146-168.
- RODRIGUEZ F., ANDRIEU H., & MORENA F. (2008) – A distributed hydrological model for urbanized areas – Model development and application to case studies. *Journal of Hydrology*, **351**(3-4), 268-287.
- TANG T., REED P., WAGENER T. & VAN WERKHOVEN K. (2006) – Comparing sensitivity analysis methods to advance lumped watershed model identification and evaluation. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, **6** (3), 3333-3395.
- SALTELLI A., TARANTOLA S., CAMPOLONGO F. & RATTO M. (2004) – *Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models. John Wiley & Sons, Ltd.*
- SALVADORE E., BRONDERS J., & BATELAAN O. (2015) – Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. *Journal of Hydrology*, **529**(1), 62-81.
- SCHIRMER M., LESCHIK S., & MUSOLFF A. (2013) – Current research in urban hydrogeology – A review. *Advances in Water Resources*, **51**, 280-291.