

Le secteur atelier pluridisciplinaire (SAP), un observatoire de l'environnement urbain – présentation des premiers résultats du suivi hydrologique et microclimatique du bassin du Pin Sec (Nantes)

Véronique RUBAN*, Fabrice RODRIGUEZ,
Katerine LAMPREA-MALDONADO,
Marie-Laure MOSINI, Laurent LEBOUC,
Pascal PICHON, Laetitia LETELLIER,
Jean-Marc ROUAUD, Lionel MARTINET,
Gilles DORMAL, Valérie PANHALLEUX,
Dominique DEMARE, Hervé ANDRIEU
Laboratoire central des Ponts et Chaussées,
Bouguenais, France

Jean-Michel ROSANT, Insaf BAGGA,
Thibault PIQUET, Patrice MESTAYER
Ecole centrale de Nantes- LMF,
UMR CNRS 6598, BP 92101,
44321 Nantes cedex 3, France
IRSTV-FR CNRS 2488,
ENSA Nantes, Nantes, France

RÉSUMÉ

Un suivi à long terme d'un petit bassin versant séparatif urbain a démarré en janvier 2006 à Nantes (France) dans le cadre d'un réseau fédératif de recherche regroupant plusieurs laboratoires (IRSTV). L'objectif de cette étude est d'établir un bilan des flux d'eau, de polluants et d'énergie de ce bassin versant sur plusieurs années, pour contribuer à l'évaluation de modèles hydrométéorologiques intégrés en milieu urbain, intégrant les compartiments sol et atmosphère. Les différents dispositifs expérimentaux mis en place sont présentés, ils incluent un suivi en continu du débit et de la qualité à l'exutoire des deux réseaux d'assainissement, un suivi détaillé de paramètres météorologiques, ainsi qu'un suivi de la nappe. Les premiers résultats montrent que l'établissement du bilan hydrologique du bassin versant du Pin Sec nécessite de faire un certain nombre d'hypothèses, qui génèrent des incertitudes non négligeables. Des expérimentations futures permettront d'affiner ce bilan. Concernant le suivi de la qualité, il apparaît que les principaux polluants véhiculés par les eaux de ruissellement sont les matières en suspension, le zinc, le cuivre, le plomb et le glyphosate ; un traitement de ces eaux avant rejet au milieu naturel pourrait s'avérer nécessaire. L'analyse des flux turbulents intervenant dans les bilans énergétique et hydrique reste délicate à cause de l'hétérogénéité du site ; ces flux résultent de surfaces sources, variables en localisation et en taille selon la hauteur du capteur et les conditions météorologiques. Une documentation détaillée de l'occupation des sols est nécessaire pour bien évaluer la contribution de ces sources locales.

Interdisciplinary Experimental Observatory dedicated to the urban environment: Presentation of initial hydrological and microclimatic monitoring results from the Pin Sec catchment (Nantes)

ABSTRACT

The long-term monitoring of a small separate urban catchment began during January 2006 in Nantes (France) within the framework of a joint research network comprising several laboratories (IRSTV). The objective of such a study is to quantify the flows of water, pollutants and energy from this catchment over several years, so as to help evaluate a set of integrated hydro-meteorological models covering the urban environment and composed of both soil and atmosphere compartments. The various experimental instruments installed at monitoring sites are presented; they ensure: continuous monitoring of flow rate and quality at the outfall of sewer/drainage networks, a detailed tracking of meteorological parameters, and close observation of the water table. Initial results indicate that drawing up a hydrological assessment for the Pin Sec catchment requires adopting a number of hypotheses, which in turn generate significant uncertainties. Future experimental work will refine this assessment. As for the quality monitoring component, it appears that the primary pollutants conveyed by runoff water are suspended solids, zinc, copper, lead and glyphosate; special treatment of this runoff water prior to discharge into the natural environment may prove necessary. The turbulent flow analysis included in energy and moisture readings is quite challenging due to site heterogeneity; these flows stem from surface sources, which remain variable in terms of location and size depending on sensor height and meteorological conditions. Detailed land use documents are needed in order to accurately evaluate the contribution of these local sources.

* AUTEUR À CONTACTER :

Véronique RUBAN
veronique.ruban@lcpo.fr

INTRODUCTION

Plus de 50 % de la population mondiale vit dans une agglomération urbaine, pourcentage qui approche 80 % dans les pays développés. Il existe une forte demande sociale en faveur d'une amélioration du cadre de vie en ville : bruit, pollution de l'air, restauration des sols urbains, qualité des eaux, aménagement des cours d'eau urbains. En interaction avec leur environnement proche ou lointain, les villes sont vulnérables aux aléas naturels tels que tempêtes, inondations, canicules... et elles sont directement concernées par l'évolution climatique. Sur le plan scientifique, l'intégration du fait urbain par les sciences de l'environnement est récente. L'environnement urbain est donc un champ d'investigation en pleine évolution abordé par différentes communautés : environnement, ingénierie, sciences humaines et sociales, et dans lequel recherches disciplinaires et interdisciplinaires se complètent afin de progresser scientifiquement sans négliger la réponse à des besoins plus opérationnels et aux demandes sociétales. Dans ce contexte, la mise en place de systèmes d'observation consacrés à l'environnement urbain est une nécessité pour (i) développer les échanges et les collaborations entre ces communautés différentes, (ii) produire les séries temporelles destinées à la validation des modèles qui permettent de représenter le fonctionnement de la ville, (iii) mieux comprendre et modéliser la complexité des phénomènes en interaction.

L'Institut de recherche en sciences et techniques de la ville (IRSTV) a été mis en place à Nantes en 2006. Cette fédération de recherche CNRS (FR CNRS 2488) rassemble une quinzaine d'équipes interdisciplinaires (laboratoires et établissements) de la région Pays-de-la-Loire, mais aussi de Poitou-Charentes, autour d'un objectif commun : le développement de connaissances interdisciplinaires alliant les sciences et techniques aux sciences humaines et sociales, le développement de la formation et la valorisation des résultats. L'environnement urbain est au centre des préoccupations de l'IRSTV. Le Secteur Atelier Pluridisciplinaire (SAP), domaine d'observation consacré à l'environnement urbain est l'un des six projets fédératifs de l'IRSTV. Le SAP a pour objectif d'établir, à partir de mesures sur le long terme, des bilans des flux d'eaux, de polluants et d'énergie pour des bassins versants et quartiers urbains. Les données obtenues permettront de valider des modèles intégrant les différents compartiments du milieu urbain : atmosphère, surfaces, sols, et pourront à terme être mis à disposition d'autres équipes de recherche.

Enfin, il faut noter qu'il existe au niveau national trois systèmes d'observation sur l'environnement urbain : OPUR en région Île-de-France, l'OTHU à Lyon, et le SAP/IRSTV à Nantes. Ces trois systèmes d'observation ont engagé un rapprochement dans le cadre de l'Inter-Observatoire HURRBIS

Cet article présente l'instrumentation mise en place sur le SAP ainsi que les premiers résultats concernant 1) le bilan hydrologique du bassin versant, 2) la caractérisation des eaux pluviales, 3) la micro-météorologie. Bien que le SAP regroupe plusieurs bassins versants, l'accent est mis ici sur le quartier du Pin Sec.

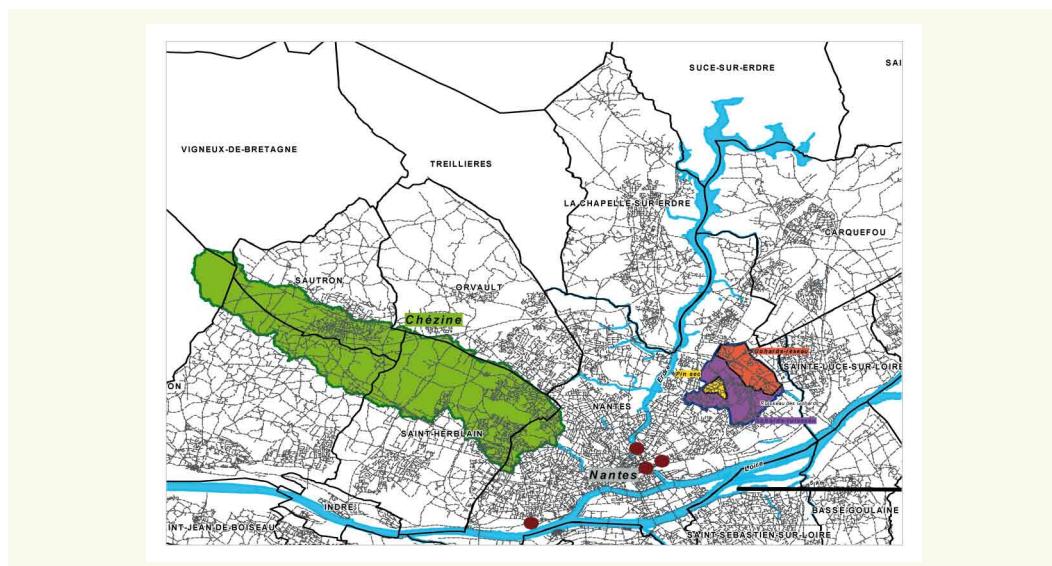
LE SITE EXPERIMENTAL

■ Caractéristiques générales du bassin versant

Le SAP est le secteur est de l'agglomération nantaise, entre l'Erdre et la Loire ([figure 1](#)). Cette zone intègre une partie du centre dense de l'agglomération, des ensembles d'habitation collectifs, des zones d'activité, des zones en cours d'urbanisation dont certaines font l'objet d'aménagement (Doulon-Bottière, Grand projet de ville Malakoff). L'instrumentation s'est développée autour de 3 bassins imbriqués de surface croissante : le bassin du Pin Sec (30 ha), le bassin Gohards réseau (180 ha), et le bassin du ruisseau des Gohards (450 ha), auxquels s'ajoute le bassin versant de la Chézine (cours d'eau périurbain), d'une superficie de 3000 ha.

Le bassin versant du Pin Sec fait l'objet d'un suivi particulier présenté ici.

figure 1
Localisation du Secteur
Atelier Pluridisciplinaire
(SAP).



■ Bassin versant du Pin Sec

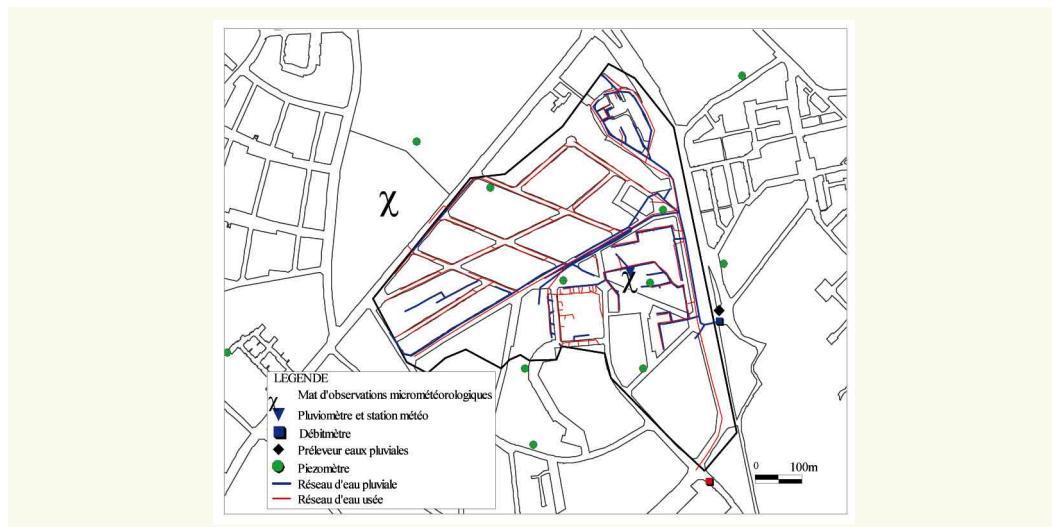
L'habitat dans le quartier du Pin Sec est constitué de maisons individuelles et de petits immeubles (3-4 étages). Le taux d'imperméabilisation estimé à partir du cadastre est de 45 %, la pente moyenne de 1 %. Le bassin est équipé d'un réseau d'assainissement séparatif ; la longueur du réseau d'assainissement est de 7,3 km pour l'eau usée et de 4 km pour l'eau pluviale qui se jette dans une canalisation enterrée reprenant le cours de l'ancien ruisseau des Gohards. Ce ruisseau retrouve l'air libre 1,2 km plus en aval du bassin versant. Les eaux usées rejoignent le collecteur unitaire qui transporte les effluents vers la station d'épuration de Tougas située 10 km plus à l'ouest le long de la Loire.

Les différents dispositifs expérimentaux incluent un suivi en continu de la pluie et du débit, de la qualité à l'exutoire des deux réseaux d'assainissement, un suivi détaillé de paramètres météorologiques, ainsi qu'un suivi de la nappe (figure 2).

➤ Pluviométrie

Les hauteurs d'eau précipitées sur le bassin versant du Pin Sec sont mesurées par un pluviomètre à augets situé au centre du bassin versant urbain sur un toit terrasse (rue Dunant). Celui-ci est couplé à

figure 2
Instrumentation du bassin
versant du Pin Sec.



un bidon qui réceptionne l'ensemble de la pluie collectée dans un cône afin de pouvoir, par la suite, valider la mesure pluviométrique. L'intensité de la pluie est enregistrée en continu au pas de temps de la minute, avec un contrôle et un recueil des données effectués toutes les deux à trois semaines. Deux pluviomètres situés à environ 1 km sur le bassin versant des Gohards permettent de vérifier et de compléter les données de pluie.

➤ Débitmétrie

Un dispositif de mesure débitmétrique est installé à l'exutoire de chaque réseau (eau usée et eau pluviale). Cette instrumentation est soumise à un certain nombre de contraintes car elle a pour objectifs (i) de collecter non seulement les débits de temps de pluie, mais aussi de mesurer les débits de base par temps sec ; (ii) d'assurer un niveau d'eau suffisant pour permettre des prélèvements d'eau ou introduire des capteurs tels que des turbidimètres ou des conductimètres. Elle a fait l'objet de nombreux essais avant de parvenir à une configuration de mesure satisfaisante.

– Le débitmètre ISCO 2150 utilisé à l'exutoire du réseau d'assainissement des eaux pluviales (réseau circulaire d'un diamètre de 1200 mm) recueille les données mesurées par une sonde débitmétrique hauteur/vitesse. Etant donnée la très faible hauteur d'eau durant les périodes de temps sec et afin d'avoir une mesure en continu au pas de temps de 5 minutes, la pose d'un seuil de type triangulaire d'une hauteur de 20 cm a été nécessaire. Ce seuil permet d'élever le niveau d'eau à une hauteur minimale de 9 cm au niveau du point de mesure, situé à quelques mètres en amont du seuil. Les relevés de terrain hebdomadaires permettent de vérifier la bonne acquisition des données, d'assurer l'entretien et le nettoyage des sondes, ou des autres capteurs en place, puis d'enlever tout élément pouvant sédimentier en amont du seuil ou l'obstruer.

– Le débitmètre installé à l'exutoire du réseau d'eaux usées est également un ISCO 2150. Il recueille les données d'une sonde débitmétrique située à l'amont d'une bouée pare-battage d'un diamètre de 32 cm servant de seuil et stabilisant une hauteur d'eau d'environ 10 cm en temps sec. Cette hauteur d'eau minimale dans le réseau permet également d'effectuer une mesure en continu au pas de temps de 5 min. Les données acquises sont relevées toutes les semaines lors de l'entretien des différents capteurs posés dans le réseau.

➤ Piézométrie et hydrodynamique du sol

La caractérisation des écoulements souterrains est menée sur le bassin versant hydrologique (100 ha) délimité à partir de la topographie, et qui englobe le bassin versant urbain du Pin Sec. Le suivi en continu du niveau de saturation de la nappe phréatique a démarré en juin 2006, lors de l'installation de onze piézomètres répartis sur le bassin versant, excepté dans la partie amont du bassin versant hydrologique où aucun piézomètre n'est disponible. Parmi ces onze piézomètres, seuls deux existaient au préalable. Les neuf autres piézomètres ont été mis en place par le LCPC lors d'une campagne de forages.

Les dix piézomètres du bassin versant sont équipés de capteurs de pression qui, par différence avec la pression atmosphérique, mesurent le niveau de saturation du milieu et donnent ainsi la profondeur de la nappe. Le niveau piézométrique est enregistré toutes les vingt minutes et la bonne acquisition des valeurs est vérifiée tous les quinze jours lors des relevés de terrain, afin d'assurer le changement des batteries et l'entretien des sites d'acquisition.

Un site de mesures hydrodynamiques a également été installé sur un espace vert à proximité d'un piézomètre, et comporte 2 profils verticaux de tensiomètres et un profil vertical de teneur en eau ; ce dispositif a pour objectif d'étudier les mouvements verticaux et horizontaux d'eau dans la zone non saturée, à proximité de la tranchée de pose du réseau d'assainissement qui est située sous cet espace vert. Les tensiomètres sont installés à 3 profondeurs (0,5 m, 1 m et 1,5 m), à 2 m et 5 m de l'axe de la tranchée ; les sondes TDR sont situées aux mêmes profondeurs, à 3 m de l'axe de la tranchée. Deux piézomètres complémentaires ont été installés dans cet espace vert, pour constituer un transect perpendiculaire à l'axe de la tranchée, afin d'étudier le rabattement éventuel de la nappe à proximité des réseaux d'assainissement en période de nappe haute.

➤ Micrométéorologie

Les mesures micro-météorologiques du SAP sont collectées sur 2 sites (**figure 2**). Une station météorologique, installée sur le toit d'un immeuble R+4 situé au cœur du Pin Sec, fournit les paramètres locaux : vitesse et direction du vent (15 m au-dessus du sol), température et humidité de l'air, pression atmosphérique, rayonnements incidents, direct et diffus, et infrarouge. Toutes ces données sont enregistrées et stockées au pas de temps d'une minute. Ce site est opérationnel depuis février 2006. En périphérie du Pin Sec, un mât télescopique de 30 m est instrumenté pour mesurer les flux turbulents de chaleur sensible et de chaleur latente. Il est équipé à la hauteur de 26 m d'un anémomètre sonique (Metek, USA-1) et d'un analyseur de gaz (LICOR Li-7500, de type *open-path*) mesurant les concentrations de vapeur d'eau et de CO₂. À des niveaux inférieurs sont montés un autre anémomètre sonique (Metek, USA-1 à 21 m) et un moniteur de vent (anémomètre/girouette Young 05103 à 16 m). Le long du mât 5 capteurs de température/humidité sont aussi répartis pour déterminer les profils verticaux. Les mesures des flux turbulents sont effectuées à une fréquence de 20 Hz, pour les autres mesures le taux d'acquisition est de 10 valeurs par minute et toutes les données sont traitées par échantillons de 15 minutes. Les flux turbulents sont évalués par la méthode d'Eddy Correlation (EC). Ce site est opérationnel en continu depuis avril 2008.

➤ Mesures des flux turbulents sur Pin Sec

La méthode d'Eddy Correlation, (EC) est une technique micro-météorologique directe pour estimer les flux turbulents à l'interface entre l'atmosphère et la canopée urbaine à partir de capteurs montés sur un mât de mesure. Le flux vertical moyen de X (sur une période de 15 minutes) correspond à la moyenne du produit des fluctuations de la vitesse verticale du vent, w' , et de l'entité X. Soit, pour le flux turbulent de chaleur sensible :

$$Hs = \rho \overline{Cp w' T'} \quad (3)$$

avec ρ la masse volumique de l'air, Cp sa capacité calorifique à pression constante et T' la fluctuation de température fournie par l'anémomètre sonique.

Et pour le flux turbulent de vapeur d'eau :

$$LE = L \overline{\rho w' q'} \quad (4)$$

avec L la chaleur latente de vaporisation de l'eau et q' la fluctuation d'humidité spécifique.

La méthode EC nécessite l'usage de capteurs disposant d'une fréquence d'acquisition au moins égale à 10 Hz. Elle n'est valable en toute rigueur que pour des sites homogènes et des conditions stationnaires [1], mais elle est aussi appliquée dans des situations plus complexes et des sites urbains [2-3]. Des traitements spécifiques, relativement standard, sont pratiqués sur les données brutes pour aboutir à des valeurs corrigées des flux [4-5].

➤ Prélèvements et analyses

A l'exutoire du collecteur d'eaux pluviales du bassin versant du Pin Sec, 11 événements pluvieux ont été échantillonnés entre septembre 2007 et octobre 2008. Les échantillons d'eaux de ruissellement ont été collectés proportionnellement au débit écoulé à l'exutoire.

Les paramètres analysés sur les échantillons bruts sont : pH, conductivité, matières en suspension (MES), carbone organique total (COT), pesticides : diuron, glyphosate et sa molécule de dégradation, l'AMPA, et 15 des 16 hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) répertoriés dans la liste de l'Agence pour la protection de l'environnement américaine. Les HAP sont dosés par le laboratoire IDAC « Institut départemental d'analyse et de conseil » à Nantes par chromatographie en phase liquide à haute performance (HPLC) avec détection par fluorescence après extraction liquide-liquide au hexane [6]. Les limites de quantification sont de 2 ng·L⁻¹, à l'exception du naphthalène, du fluorène, du phénanthrène et de l'anthracène pour lesquels la limite de quantification est de 10 ng·L⁻¹.

Pour les pesticides les analyses sont réalisées par le laboratoire Ianesco-Chimie à Poitiers. L'analyse du glyphosate et de l'AMPA est réalisée par HPLC avec détection fluorimétrique.

Les éléments traces métalliques tels que Cd, Cu, Cr, Ni et Pb sont analysés sous forme dissoute et particulière à partir de la filtration de l'eau brute sur une membrane Millipore de 0,45 µm. Le dosage des métaux est réalisé par absorption atomique selon les normes NF EN ISO [7-8] ; les limites de quantification sont 0,1 µg·L⁻¹ pour le cadmium, 1,0 µg·L⁻¹ pour le plomb, 2,0 µg·L⁻¹ pour le cuivre, 0,5 µg·L⁻¹ pour le chrome, 8,0 µg·L⁻¹ pour le zinc et 2,0 µg·L⁻¹ pour le nickel.

■ Bassins versants des Gohards (Gohards-réseau et Gohards-ruisseau)

Le bassin des Gohards-réseau est un secteur d'habitat collectif et individuel, avec des zones commerciales et industrielles ; il est équipé d'un réseau d'assainissement séparatif. La surface du bassin versant est de 180 ha, avec un coefficient d'imperméabilisation de 0,42. Le suivi comprend la mesure de la pluie au pas de temps de la minute par 2 pluviomètres à auget basculant et la mesure du débit à l'exutoire depuis 1998. Ces données ont été utilisées lors de travaux récents portant sur la modélisation hydrologique des zones urbaines [9-11].

Les bassins du Pin Sec et des Gohards-réseau sont des sous bassins du bassin du ruisseau des Gohards (Gohards-ruisseau) qui inclut un éco-quartier de 35 ha ; cette zone est en cours d'aménagement. Un débitmètre a été installé à l'exutoire du bassin versant des Gohards- ruisseau, il est ainsi possible de suivre l'influence de l'urbanisation sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant.

■ Bassin versant de la Chézine

Le bassin versant de la Chézine est partiellement urbanisé dans sa partie aval (Nantes et Saint-Herblain) et intermédiaire (Sautron). Nantes Métropole assure le suivi de la Chézine au moyen d'un capteur débitmétrique situé dans le Parc de Procé et d'un pluviomètre à proximité. Ce dispositif a été complété par un second capteur débitmétrique permettant d'évaluer la contribution au débit de la partie amont et rurale du bassin versant, et par un second pluviomètre localisé au milieu du bassin versant.

Le bassin versant de la Chézine fait l'objet d'études dont l'objectif est de décrire le fonctionnement hydrologique de bassins versants mixtes, dont l'occupation des sols est partiellement urbaine et partiellement rurale.

RÉSULTATS

■ Bilan hydrologique

L'ensemble des données hydrologiques collectées permet d'établir un bilan hydrologique du bassin versant. Ce bilan peut être établi pour une période donnée, d'une part en surface, et d'autre part au sein du sol.

À la surface, le bilan s'écrit :

$$P = ETR + Q_{EP} + I \quad (5)$$

où P représente la pluie précipitée, ETR l'évapotranspiration réelle, Q_{EP} le ruissellement de surface et I l'infiltration de l'eau dans le sol, tous les flux étant homogènes en unité et pouvant être exprimés en hauteur d'eau (mm) sur la surface du bassin versant pendant la période considérée.

Au sein du sol, le bilan peut s'écrire :

$$I + Q_{fuites} = \Delta S + Q_{EP_base} + Q_{EU_base} + Q_{transit} \quad (6)$$

où Q_{fuites} représente la quantité d'eau liée aux fuites du réseau d'eau potable dans le sol, ΔS est la variation de stock d'eau dans les zones non saturée et saturée sur une certaine profondeur, $Q_{\text{EP_base}}$ et $Q_{\text{EU_base}}$ les quantités d'eau infiltrées respectivement dans le réseau d'eau pluviale et dans le réseau d'eau usée par les défauts d'étanchéité de ce réseau (infiltrations parasites), et Q_{transit} le débit d'eau transversal dans la zone saturée.

Dans cette application, le bilan hydrologique a été effectué sur l'automne 2006, afin d'observer l'effet de la montée de la nappe, à partir d'une position de nappe basse à la fin de l'été, et pendant une période où les données sont de bonne qualité.

- Le cumul de pluie P , mesuré à partir du pluviomètre situé sur le bassin versant, atteint 509 mm.
- Le volume total d'eau mesuré à l'exutoire du réseau d'eau pluviale correspond à une hauteur d'eau de 203 mm. Ce débit représente la somme de la quantité d'eau ruisselée en surface Q_{EP} et de la quantité d'eau du sol infiltrée dans le réseau d'eau pluviale $Q_{\text{EP_base}}$. L'estimation de ce débit d'infiltration dans le réseau d'eau pluviale a été réalisée en faisant l'hypothèse que le débit de base varie linéairement entre 0,85 L/s et 4,2 L/s pendant cette période, ce qui représente une hauteur d'eau de $Q_{\text{EP_base}} = 85$ mm. La hauteur d'eau Q_{EP} est donc estimée à 118 mm.
- L'évapotranspiration réelle (ETR), a été estimée à partir de la valeur de l'évapotranspiration potentielle, et d'une hypothèse grossière souvent prise en hydrologie, pour laquelle on considère que $\text{ETR} = 80\% \text{ ETP}$. Cette hypothèse conduit à une estimation de l'ETR à 134 mm.

Ce bilan de surface est donc équilibré pour une valeur totale d'infiltration d'eau dans le sol :

$$I = P - \text{ETR} - Q_{\text{EP}} = 257 \text{ mm.}$$

En ce qui concerne le bilan hydrologique au sein du sol, le terme source est constitué des infiltrations de la surface (I), et de la quantité d'eau liée aux fuites des réseaux d'eau potable.

- Les fuites du réseau d'eau potable ne sont pas mesurables, et ce phénomène reste mal connu. Deux hypothèses ont été faites : i) la consommation journalière d'eau potable est de 150 L par habitant, ce qui est une moyenne à l'échelle nationale et ii) les pertes d'eau dans le réseau d'eau potable sont de 25 %, ce qui est une valeur standard pour un réseau âgé de plusieurs dizaines d'années (les pertes peuvent varier entre 10 et 40 % à l'échelle nationale). Pour les 2500 habitants du quartier du Pin Sec, ces hypothèses conduisent à un volume d'eau perdu dans le sol de 93 m³/jour. La hauteur équivalente sur la période étudiée est donc de 36 mm. Des études complémentaires seront à envisager pour affiner l'estimation de ce terme.
- Les débits d'infiltration dans le réseau ont été estimés précédemment.
- Le flux d'eau souterrain transversal a été estimé à partir de la loi de Darcy, appliquée à une section moyenne du sol du bassin versant de 12 m de profond et de 400 m de large :

$$Q_{\text{transit}} = K_s \cdot A \cdot \boxed{\text{grad}}(H)$$

- où K_s représente la conductivité hydraulique à saturation moyenne du sol, A l'aire de la section d'écoulement et H la charge hydraulique sur le bassin versant.

D'après les mesures réalisées in situ par analyse de pompages forcés dans les piézomètres par la méthode de Hrovslev, K_s est estimé à 10⁻⁶ m/s. La différence de charge hydraulique entre l'amont et l'aval du bassin correspond environ à 9,5 m, sur une distance d'environ 1000 m, ce qui conduit à un gradient hydraulique de 0,01 m/m. Ce calcul conduit à une estimation d'un débit transitant de 3,6 m³/jour, soit sur la période considérée à une hauteur d'eau équivalente de 1,4 mm sur la surface du bassin versant.

L'application de l'équation bilan dans le sol permet une première estimation de la variation de stock au sein du sol à partir du terme source équivalent à 293 mm, et à un terme « pertes » de 169 mm.

$$\Delta S = (I + Q_{\text{fuites}}) - (Q_{\text{EP_base}} + Q_{\text{EU_base}} + Q_{\text{transit}}) = 124 \text{ mm}$$

Cette variation du stock d'eau dans le sol est donc importante sur une période automnale très pluvieuse, dont le cumul dépasse environ de 50 % le cumul pluvieux moyen sur la période 1971-2000 donné par Météo France.

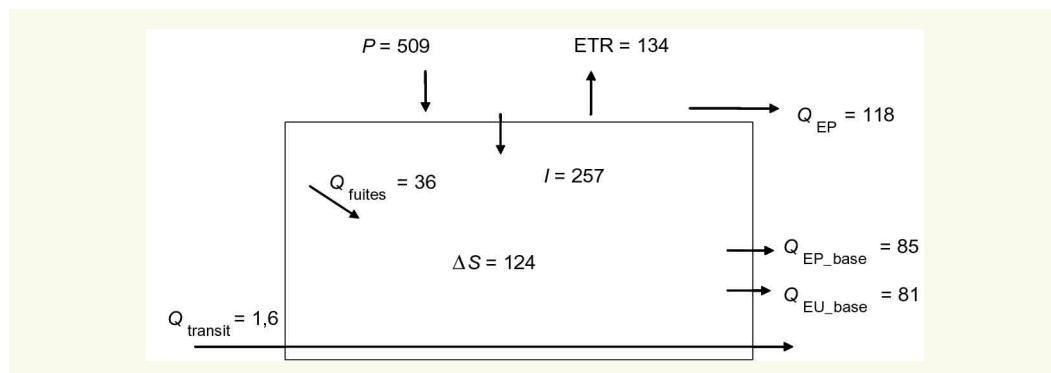
Ce premier bilan, résumé sur la **figure 3**, fournit un ordre de grandeur des différents termes, assorti de nombreuses incertitudes qui incitent à la prudence quant à l'interprétation des résultats :

- en premier lieu, l'estimation des débits de base dans les réseaux d'assainissement est sujette à caution, et en particulier en ce qui concerne le réseau d'eau usée. L'estimation de ce débit de base à partir d'une variation linéaire entre le début et la fin de la période sous-estime sans doute cette composante. Ensuite, l'observation de cette mesure a montré que le réseau d'eau usée véhiculait une part non négligeable d'eau pluviale par des mauvais raccordements, étant donnée la forte sensibilité de la mesure à la pluie, y compris lors des périodes estivales ;
- en second lieu, l'évapotranspiration réelle a été estimée de façon très grossière et sa valeur pourrait être affinée par rapport à la saison considérée, et pourrait également être estimée à partir des mesures micro-météorologiques réalisées à l'aide du LICOR ;
- enfin, l'estimation des pertes d'eau potable dans le sol sont basées sur des considérations générales qui mériteraient d'être affinées à partir d'une meilleure connaissance du fonctionnement réel du réseau d'eau potable considéré.

Ce bilan montre toutefois la part non négligeable des volumes d'eau présents dans les réseaux d'assainissement, et provenant des infiltrations d'eau du sol, particulièrement visible durant cette période de montée de la nappe, puisque la quantité d'eau infiltrée dans les deux réseaux d'eau (~166 mm) est plus importante que la quantité d'eau simplement ruisselée (~118 mm) ; ce phénomène a d'ailleurs été étudié en détail par [12], qui a montré le lien important qui existe entre les variations saisonnières de ces infiltrations d'eau du sol dans les réseaux et le niveau de saturation sur ce bassin.

figure 3

Bilan hydrologique du bassin versant du Pin sec du 01/09/2006 au 31/12/2006 – toutes les valeurs sont exprimées en hauteur d'eau (mm).



■ Caractérisation des eaux pluviales

➤ Paramètres globaux

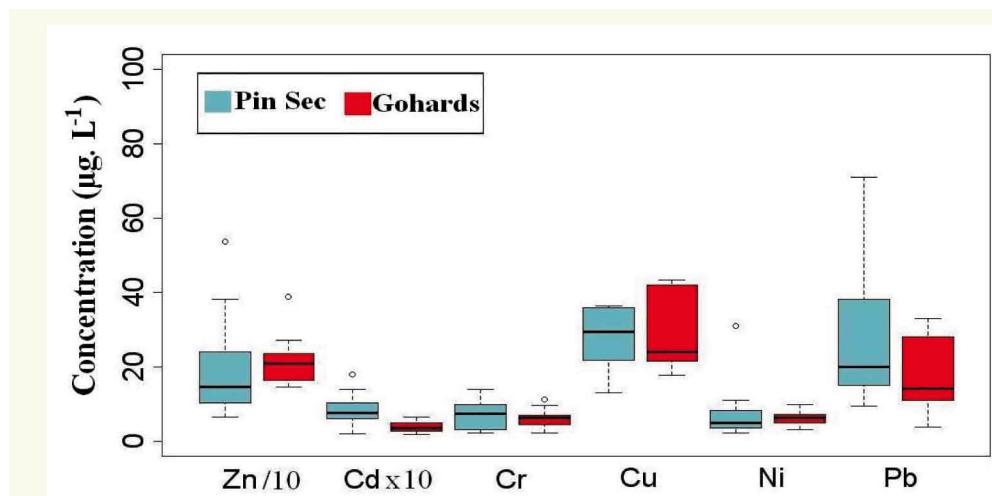
Au cours d'un événement pluvieux le pH varie de 6,4 à 7,2 ; ces valeurs sont proches de celles mesurées dans le collecteur par temps sec. Par temps de pluie, la conductivité varie de 92 à 250 $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$. Ces valeurs sont 3 à 4 fois plus basses que celles mesurées lors des périodes de temps sec ce qui s'explique par des concentrations en ions plus faibles dans les eaux de ruissellement et par un phénomène de dilution. Dans 90 % des cas les concentrations en MES dépassent la valeur maximale de $35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ fixée par la directive européenne sur les eaux résiduaires urbaines [13]. La valeur médiane de concentration ($69 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) est bien supérieure à la valeur mesurée par temps sec. Il convient de noter que 2 valeurs sont particulièrement élevées (315 et $413 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) probablement en raison d'une pollution accidentelle survenue en septembre et octobre 2008, en relation avec des travaux à l'amont du réseau. Les concentrations en COT sont 2 fois plus fortes que celles mesurées par temps sec, avec une médiane de $9,8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

➤ Métaux traces

La **figure 4** montre que les concentrations en métaux varient d'une campagne à l'autre. Les concentrations en Zn et Cu sont 4 fois plus fortes par temps de pluie, alors que les concentrations en plomb sont similaires. L'abondance relative des métaux est la même que celle observée pour les retombées atmosphériques et les eaux de ruissellement de toiture [14]. Le zinc est le métal le plus abondant (75 %) suivi du plomb et du cuivre (environ 10 %) ; le nickel, le chrome et le cadmium sont en concentrations très faibles. A l'exception de Zn, les métaux dans les eaux pluviales sont majoritairement sous forme particulaire : 80 % (Cd), 100 % (Cr), 75 % (Cu), 74 % (Ni), 95 % (Pb). Le zinc est réparti de manière égale entre les phases dissoute (48 %) et particulaire (52 %).

figure 4

Concentrations en métaux traces dans les eaux de ruissellement du bassin versant du Pin Sec (Nantes).



➤ Hydrocarbures aromatiques polycycliques et pesticides

Pendant les périodes de temps sec, les concentrations en HAP sont faibles ($58 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$). Les concentrations sont supérieures par temps de pluie (de 35 à $274 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$) mais restent faibles ce qui s'explique par un trafic automobile réduit (1200 véhicules/jour) sur ce bassin versant principalement résidentiel. Parmi les 15 HAP mesurés, 9 sont fréquemment détectés : fluoranthène (Flu), pyrène (Py), benzo(a)anthracène (B[a]An), chrysène (Chry), benzo(b)fluoranthène (B[b]Fl), benzo(k)fluoranthène (B[k]Fl), benzo(a)pyrène (B(a)Py), indéno(1,2,3-c,d), benzo(g,h,i)perylène (B[g,h,i]Pe) et pyrène (I[1,2,3c-d]Py)). Le Flu et le Py sont majoritaires avec 24 et 20 % respectivement. Le naphtalène, l'accénaphthilène et le fluorène n'ont pas été détectés. Le Flu et le Py indiquent une origine pyrolytique, probablement due à la combustion incomplète de carburants (gazole et essence) [15-17].

Les concentrations en diuron et AMPA sont identiques par temps sec et temps de pluie, avec respectivement 73 et $1,45 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Malgré la réduction de la consommation de pesticides sur la métropole nantaise (84 % de réduction depuis 2004 (www.nantesmetropole.fr)), l'utilisation des produits à base du glyphosate et leur présence dans les eaux de ruissellement est encore observée. Lors de cette étude, les concentrations en glyphosate sont restées autour des $3,27 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Un fort pic de pollution par le glyphosate a été mesuré en juin 2008 ($71 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). Les pratiques de désherbages par les particuliers constituent la source principale de pesticides dans les eaux de ruissellement du bassin versant du Pin Sec. Cette constatation a été faite par [18].

➤ Qualité des eaux pluviales et comparaison avec d'autres études

Les concentrations en micropolluants mesurées dans les eaux pluviales du bassin versant du Pin Sec ont été comparées aux valeurs seuil fixées par le système d'évaluation de la qualité (SEQ-Eau) [19] et aux valeurs du décret 2001-1220 concernant la production d'eau potable pour la consommation humaine [20]. Les concentrations en Cr et HAP correspondent à une qualité « passable » selon le SEQ-Eau, pour Cd, Cu et Zn la qualité varie de « passable » à « très mauvaise ». Les concentrations

en Cd, Cr, Cu, Ni et Zn sont par ailleurs inférieures aux valeurs de référence fixées pour la production d'eau potable ; en revanche, les concentrations en Pb, pesticides et HAP excèdent souvent ces valeurs.

Ces résultats ont été comparés à d'autres études menées dans des zones équipées de réseaux d'assainissement séparatifs [21-22], cette comparaison n'est pas facile car de nombreux facteurs peuvent varier d'une étude à l'autre (nature du site, conditions météorologiques, échantillonnage et analyses etc.). Le **tableau 1** montre les concentrations mesurées au bassin versant du Pin Sec (d10 et d90 pour les métaux et les HAP, min et max pour les pesticides). Pour les études de [21] sur le bassin de St Joseph de Porterie (NE de Nantes) et de [22] les valeurs des d10 et d90 ont été retenues. Pour les MES, Cd, Cr et Ni les concentrations mesurées au Pin Sec sont comparables à celles rapportées par [21]. Les concentrations en Cu, Zn et Pb sont plus élevées au Pin Sec, sans doute en relation avec l'utilisation de matériaux différents pour le mobilier urbain et les accessoires de toitures. Les concentrations en HAP sont comparables dans les 2 bassins nantais. Les concentrations en diuron à St Joseph sont de 4 à 23 fois plus élevées que celles mesurées au Pin Sec ce qui peut s'expliquer par une réduction de l'utilisation de cet herbicide (interdit depuis décembre 2008). A l'inverse, les concentrations en glyphosate mesurées au Pin Sec sont très supérieures à celles de St Joseph en raison d'une utilisation plus importante par les particuliers (désherbage). Enfin, les concentrations en métaux au Pin Sec sont comparables à celles de l'étude suisse [22].

tableau 1
Comparaison des concentrations en polluants dans les eaux de ruissellement. Matières en suspension (MES) en mg·L⁻¹, métaux traces, HAP et pesticides en µg·L⁻¹.

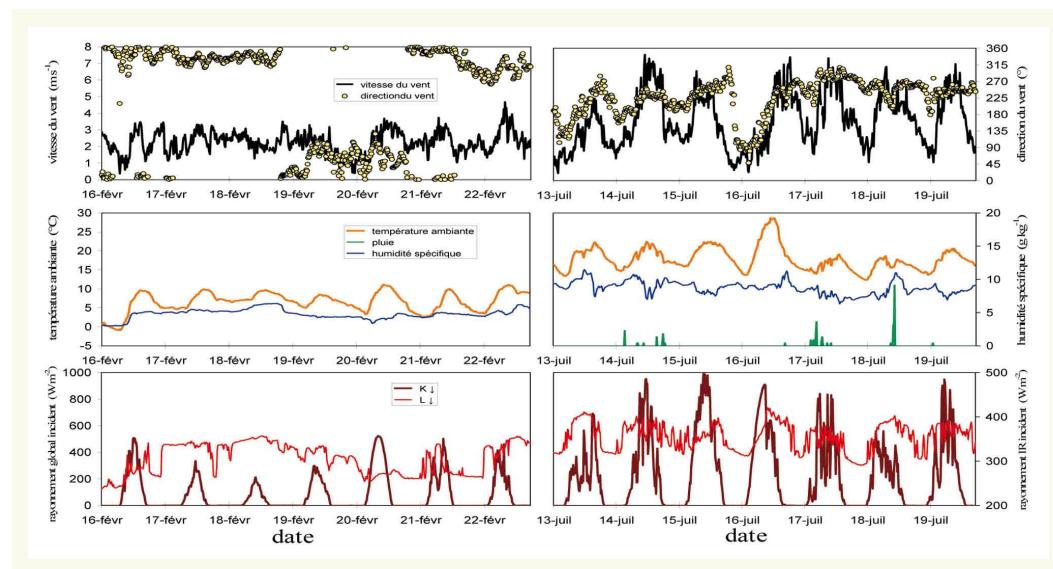
Paramètre	Pin Sec	Ruban et al. (2005)	Rossi (1998)
SS	52-299	35-238	10-204
Cd	0,5-1,5	0,1-0,6	0,5-3,8
Cu	17-75	8,5-35	41-197
Pb	11-58	5,5-28	19-170
Zn	82-373	99-262	52-541
Cr	2,7-11	2,0-8,5	2,0-68
Ni	3,2-11	3,0-17	-
Σ 15 PAH	0,06-0,13	0,09-0,8	0,3-9,2
Glyphosate	1,1-71	0,2-3,0	-
AMPA	0,2-1,5	0,1-0,8	-
Diuron	0,1-0,7	0,5-3,0	-

■ Micrométéorologie

Le climat nantais est de type tempéré océanique. Sur l'ensemble de l'année, les pluies sont fréquentes mais peu intenses. La station Météo-France de Bouguenais, au Sud-Ouest de l'agglomération nantaise et à environ 6 km de la station du SAP donne pour l'année 2009 une hauteur cumulée de précipitations égale à 927 mm, supérieure à celle relevée sur le SAP : 733 mm, avec des pluies particulièrement abondantes en novembre (222 mm). Ce climat est favorable à la végétation comme en témoignent les nombreux parcs et jardins nantais. Pour l'année 2009, la température moyenne a été de 6,3°C en hiver avec une température minimale de -7,1°C (respectivement 6,0°C et -8,5°C à la station de Bouguenais). En été, la température moyenne a été de 18,4°C et la température maximale de 32,1°C (respectivement 18,2°C et 34,2°C à la station de Bouguenais). Les effets d'îlot de chaleur sur Nantes restent modérés en été comme en hiver. Les capteurs qui sont utilisés pour le calcul des flux turbulents de chaleurs sensible et latente, l'anémomètre sonique et surtout l'analyseur de gaz dans sa version « *open path* » sont sensibles aux épisodes de pluie. Ce dernier est souvent inopérant (valeurs aberrantes) longtemps encore après la fin de la pluie. Les données non valides sont éliminées lors du contrôle de qualité. Pour l'année 2009, les données manquantes ainsi que celles éliminées représentent 26 % pour le flux de chaleur latente, contre 8 % pour les flux de chaleur sensible.

figure 5

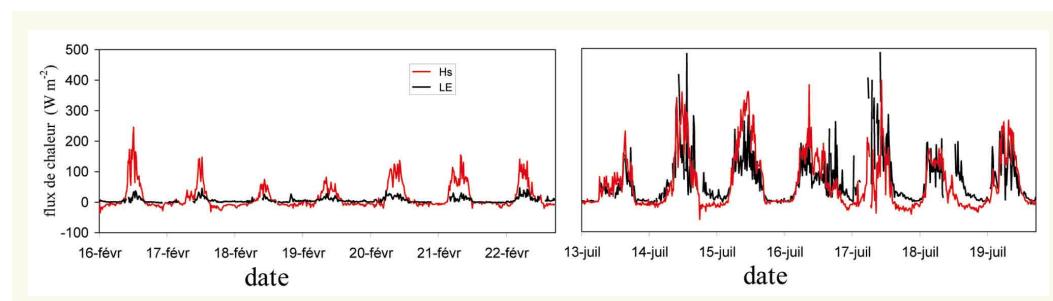
Paramètres micro-météorologiques mesurés à la station du Pin Sec pendant les périodes 16-23 février (à gauche) et 13-19 juillet (à droite) en 2009.



Les données météorologiques (vent, température, humidité, pluie), ainsi les flux radiatifs incidents relatifs au site sont indiqués sur la **figure 5** pour une semaine typique d'hiver et une semaine de juillet. Ces valeurs sont comparables à celles fournies par la station de Bouguenais, à l'exception de la vitesse du vent qui est environ 2 fois plus faible alors que la hauteur de mesure est plus élevée (15 m au lieu de 10 m). On note que le mois de juillet a été assez humide (hauteur des précipitations de 48 mm) avec des pluies régulièrement réparties. Pour les mêmes périodes, les flux turbulents de chaleur mesurés à 26 m sur le mât sont présentés sur la **figure 6**.

figure 6

Flux turbulents de chaleur obtenus sur le mât (à 26 m) par la méthode d'eddy covariance pendant les périodes 16-23 février (a) et 13-19 juillet (b) en 2009.

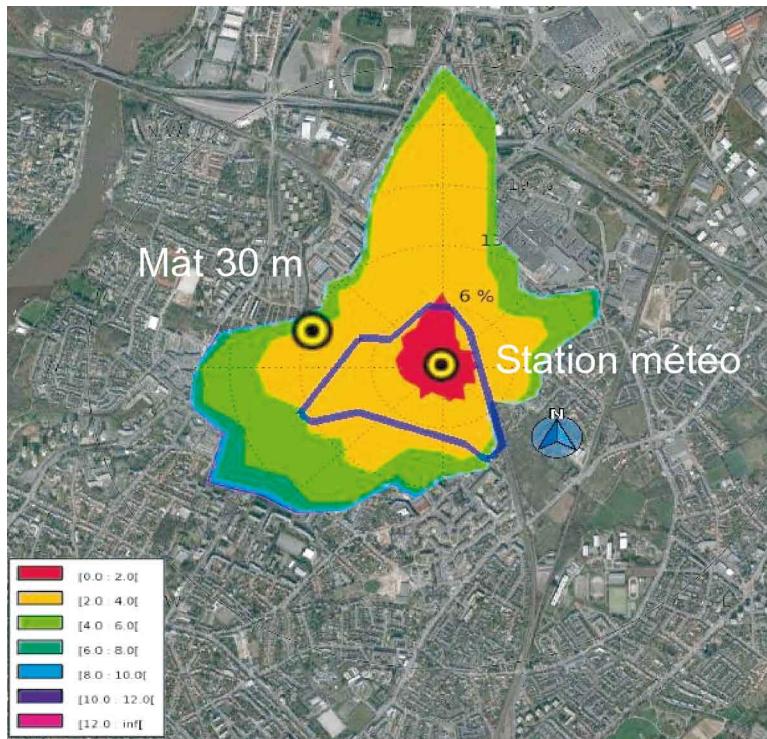
a | b

En dehors des périodes fortement pluvieuses, les flux turbulents ont des évolutions diurnes marquées et de fortes tendances saisonnières. Ils sont faibles la nuit (quasiment nuls pour le flux de chaleur latente), et augmentent au cours de la journée pour atteindre leur maximum à la mi-journée. En hiver (**figure 6a**), les flux de chaleur sensible restent faibles (100 à 200 W/m² au maximum), les flux de chaleur latente sont 2 à 3 fois plus petits, ils augmentent progressivement au printemps et en été (**figure 6b**), les deux flux sont alors du même ordre de grandeur (300 à 400 W/m² en milieu de journée) et ils diminuent ensuite nettement au cours de l'automne. Ce comportement est lié à la fréquence des précipitations et à la proportion significative des surfaces végétales autour du mât. La répartition entre l'évaporation sur les surfaces revêtues et l'évapotranspiration contrôlée par la végétation ne peut pas être évaluée à partir de cette analyse limitée à une seule année d'observations.

La distribution spatiale des flux turbulents est estimée par le modèle analytique FSAM [22-23]. Les zones sources représentatives des flux turbulents, appelées « footprint », sont déterminées sur une période de 15 minutes. Ces zones sources au sol, caractéristiques de l'étendue des flux turbulents, sont de forme approximativement elliptique. Leur localisation dépend du vent et de la stabilité de l'atmosphère ; leurs dimensions varient avec la hauteur de mesure et la morphologie du site à travers sa rugosité aérodynamique. Pour celle-ci nous avons choisi une valeur égale à 0,5 m pour

toutes les directions de vent, cette valeur a été déterminée d'après la formule proposée par [24] appliquée aux caractéristiques moyennes du bâti dans le quartier. L'année 2009 a été une année statistiquement bien représentative des données de vent à Nantes : les vents dominants étaient de secteur Sud-Ouest et de secteur Nord-Ouest (figure 7).

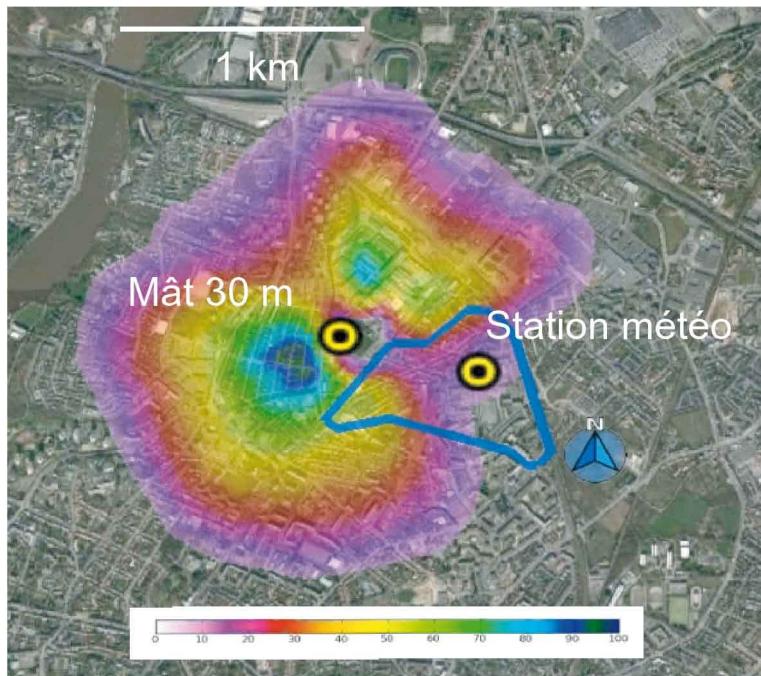
figure 7
Roses des vents de l'année 2009 sur le quartier du Pin Sec.



Le modèle FSAM impose certaines conditions et limites sur les paramètres d'entrée. Ces restrictions concernent généralement les situations stables et neutres de l'atmosphère. Dans cette étude, 77 % des flux mesurés sur le mât ont été acceptés pour le calcul, dont 67 % en condition d'atmosphère instable (typiquement en cours de journée) et 33 % en condition stable. Les résultats fournis par le modèle montrent que les aires d'influence contribuant à 80 % des flux mesurés sur le mât sont contenues dans une zone de rayon 1 km autour du mât. Les contributions cumulées des zones sources sont présentées sur la figure 8. Deux zones avec une contribution maximale ont été identifiées. La première, située au Sud-Ouest du mât, correspond à 31 % des cas traités ; son maximum est distant de 250 m du mât et elle est essentiellement constituée d'habitations individuelles (avec jardins). La seconde, représentant 11 % des cas traités, est située au Nord-Est du mât, elle est occupée par de grands bâtiments industriels. Avec une contribution non négligeable, le quartier Pin Sec, situé dans le secteur 80-180° du mât, représente 15 % des flux contribuant aux mesures. Les flux turbulents moyens journaliers mesurés ont été comparés aux simulations obtenues sur le Pin Sec avec le modèle de sol SM2U (pour les chaleurs sensible et latente) et avec le modèle hydrologique distribué URBS (pour la chaleur latente) sans prendre en compte les effets de footprint. Dans cette première approche un accord acceptable a été trouvé concernant les flux d'évapotranspiration moyens journaliers en fonction des saisons [25].

La validation du footprint est une étape complexe mais primordiale afin de comprendre la variabilité spatiale des flux mesurés par des capteurs montés sur un mât. Dans les prochaines études, l'exploitation de la base de données topographiques BD Topo de l'IGN pour Nantes permettra une analyse détaillée des types de recouvrement et d'occupation des sols dans un large périmètre autour du mât, là où sont localisées les zones sources des flux. L'utilisation conjointe du modèle de sol SM2U pour l'évaluation des flux émis par un élément de surface et d'un modèle de footprint pour quantifier la contribution de cette même surface permettra de valider la méthode d'exploitation des flux mesurés en zone urbaine hétérogène.

figure 8
Contributions cumulées
des zones sources en 2009.



CONCLUSIONS

Une étude à long terme d'un petit bassin versant séparatif a démarré en janvier 2006 dans le cadre d'un projet de recherche fédératif de l'Institut de recherches en sciences et techniques de la ville (IRSTV). Des mesures hydrologiques (débit, conductivité, turbidité) sont réalisées en continu dans les collecteurs d'eaux pluviales et d'eaux usées ; des analyses de qualité des eaux (métaux lourds, pesticides, hydrocarbures) sont également effectuées afin d'établir des bilans hydrologiques quantitatifs et qualitatifs. Un enregistrement en continu de paramètres micro-météorologiques permet de compléter ce bilan du point de vue des échanges entre le sol et l'atmosphère.

Les premiers résultats apportent d'ores et déjà des informations intéressantes.

Une première estimation, imparfaite et à affiner, du bilan hydrologique laisse penser que le débit de base dans les réseaux, c'est-à-dire hors période pluvieuse, représente de l'ordre de 30 % des précipitations ce qui est considérable. Des expérimentations futures permettront d'affiner ce bilan ; des mesures sont notamment prévues pour affiner la composante d'évapotranspiration dans le cadre de la campagne FLUXSAP (du projet ANR VEGDUD) qui s'est déroulée en mai 2010.

Concernant le suivi de la qualité, il apparaît que les principaux polluants véhiculés par les eaux de ruissellement sont les matières en suspension, les métaux (Zn, Cu et Pb), le glyphosate et le diuron (interdit depuis janvier 2009) ; un traitement de ces eaux avant rejet au milieu naturel pourrait s'avérer nécessaire.

Sur une zone non homogène, l'analyse des flux turbulents de chaleur sensible et latente, composante des bilans énergétique et hydrique, reste délicate car ces flux résultent de surfaces sources, variables en localisation et en taille selon la hauteur du capteur et les conditions météorologiques. Une documentation détaillée de l'occupation des sols (surfaces naturelles et revêtues, morphologie du bâti, végétation) est nécessaire pour évaluer la contribution de ces sources locales. La difficulté essentielle concerne cependant la possibilité d'utiliser un modèle de footprint adapté à la canopée urbaine. La méthode qui est envisagée dans les analyses futures est la simulation des grandes échelles (LES) des champs turbulents associée à des calculs de rétro-trajectoires de particules stochastiques Lagrangiennes.

Dans le cadre de l'Inter-Observatoire HURRBIS, il est prévu d'harmoniser les méthodes de mesures, les bases de données, et d'agir de façon concertée et complémentaire pour une meilleure gestion de l'eau en ville. Ainsi, les travaux engagés sur le SAP vont se poursuivre dans une dynamique inter-observatoire.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Région Pays-de-la-Loire pour son soutien financier.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 MONCRIEFF J., CLÉMENT R., FINNIGAN J., MEYERS T., Averaging, detrending, and filtering of eddy covariance time series, in *Handbook of Micrometeorology*, X. Lee, W. Massman and B. Law Eds, Kluwer Academic Publishers, **2004**.
- 2 GRIMMOND C.S.B., OKE T.R., Turbulent heat fluxes in urban areas: observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS). *Journal of Applied Meteorology*, vol. **41**, **2002**, pp. 792-810.
- 3 ROTACH M.W., VOGT D., BERNHOFER E., BATCHEVAROVA A., CHRISTEN A., CLAPPIER A., FEEDERSEN B., GRYNING S.E., MARTUCCI G., MAYER H., MITEV V., OKE T.R., PARLOW H., RICHNER M., ROTH Y.A., ROULET D., RUFFIEUX H., SALMOND J.A., SCHATZMAN M., VOOGT J.A., BUBBLE – an urban boundary layer meteorology project. *Theoretical and Applied Climatology*. **81**, **2005**, pp. 231-261.
- 4 FUEHRER P.L., FRIEHE C.A., Flux corrections revisited. *Boundary Layer Meteorology*, vol. **102**, **2004**, pp. 415-457.
- 5 LEE X., FINNIGAN J., PAW U K.T., Coordinate systems and flux bias error, in *Handbook of Micrometeorology*, X. Lee, W. Massman and B. Law Eds, Kluwer Academic Publishers, **2004**.
- 6 NF EN ISO 17993, *Qualité de l'eau*, **2004**.
- 7 NF EN ISO 15586, *Qualité de l'eau*, **2004**.
- 8 NF EN ISO 11885, *Qualité de l'eau*, **2004**.
- 9 RODRIGUEZ F., CUDENNEC C., ANDRIEU H., Application of morphological approaches to determine unit hydrographs of urban catchments. *Hydrological Processes* **19**(5), **1021-1035**, **2005**
- 10 RODRIGUEZ F., MORENA F., ANDRIEU H., RAIMBAULT G., Introduction of innovative stormwater techniques within a distributed hydrological model and the influence on the urban catchment behaviour. *Water Practice and Technology* **2** (2) doi10.2166/wpt.2007.0048, **2007**.
- 11 RODRIGUEZ F., ANDRIEU H., MORENA F., A distributed hydrological model for urbanized areas - Model development and applications to case studies. *Journal of Hydrology*, **351**(3-4), 268-287, **2008**.
- 12 Directive du conseil n° 91/271 du 21 mai 1991 relative au traitement des eaux résiduaires urbaines. JOCE n° L.135/40 du 30 mai **1991**.
- 13 LE DELLIU A.L., Rôle des interactions entre les réseaux d'assainissement et les eaux souterraines dans le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant en milieu urbanisé – Approche expérimentale et modélisation. Thèse Ecole Centrale Nantes, **2009**, 233 p.
- 14 LAMPREA K., Caractérisation et origine des métaux traces, hydrocarbures aromatiques polycycliques et pesticides transportés par les retombées atmosphériques et les eaux de ruissellement dans les bassins versants séparatifs périurbains. Thèse Ecole Centrale Nantes, **2009**, 242 p.
- 15 DORR G., HIPPELEIN M., KAUPP H., HUTZINGER O., Baseline contamination assessment for a new resource facility in Germany. Levels and profiles of polycyclic aromatic hydrocarbons (pah) in ambient air. *Chemosphere*, vol. **33**, **1996**, pp. 1578-1996.
- 16 YANG H.H., LEE W.J., CHEN S.J., LAI S.O., PAH emission from various industrial stacks. *Journal of Hazardous Materials*, vol. **60**, **1998**, pp. 159-174.
- 17 GASPERI J., Introduction et transfert des hydrocarbures à différentes échelles spatiales dans le réseau d'assainissement parisien. Thèse de doctorat, ENPC, Paris, **2006**, 268 p.
- 18 BLANCHOUD H., FARRUGIA F., MOUCHEL J.M., Pesticides uses and transfers in urbanized catchments. *Chemosphere*, vol. **55**, **2004**, pp. 905-913.
- 19 SEQ-Eau. Système d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau. Version 2. Technical report, *Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement*, **2003**.
- 20 Arrêté du 11/01/2007. Relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux conditionnées.
- 21 Rossi L., Qualité des eaux de ruissellement urbaines. Thèse Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, **1998**.
- 22 RUBAN V., LARRARTE F., BERTHIER E., FAVREAU L., SAUVOUREL Y., LETELLIER L., MOSINI M.L., RAIMBAULT G., Quantitative and qualitative hydrologic balance for a small suburban watershed in the Nantes Region, France. *Water Science & Technology*, vol. **51**, **2005**, pp. 231-238.
- 23 SCHMID H.P., Source areas for scalars and scalar fluxes. *Boundary Layer Meteorology*. vol. **67**, **1994**, pp. 293-318.
- 24 SCHMID H.P., Experimental design for flux measurements: matching scales of observations and fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. **87**, **1997**, pp. 179-200.
- 25 KASTNER K.P., ROTACH M.W., Mean flow and turbulence characteristics in an urban roughness sublayer. *Boundary Layer Meteorology*, vol. **111**, **2004**, pp. 55-84.
- 26 BAGGA I., CALMET I., RODRIGUEZ F., ROSANT J.-M., Measuring and modelling turbulent fluxes over an heterogeneous urban area, *6th International Scientific Conference on the Global Energy and Water Cycle*, Melbourne, Australie, 24-28 August, Proceedings in Water in a Changing Climate, *Progress in Land-Atmosphere Interactions and Energy/Water Cycle Research*, A. Reissel, M. Nyman, M. Vesala, T. Viisanen Eds., vol. **2**, **2009**, pp. 524-525.