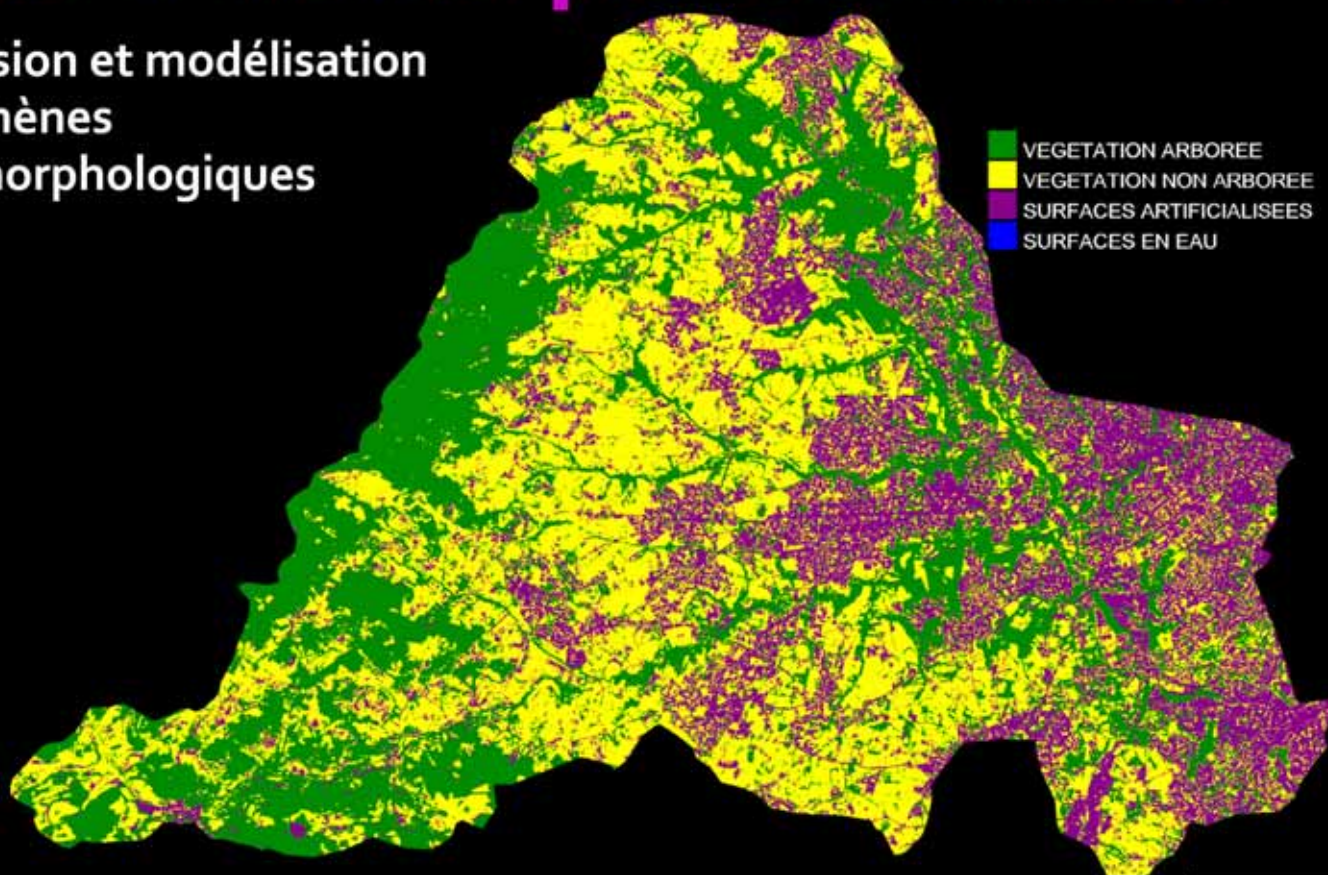


Jeudi 9 juin 2011 - INSA de Lyon - Villeurbanne (69)

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines

Compréhension et modélisation
des phénomènes
hydro-géomorphologiques



graie

GROUPE DE RECHERCHE RHÔNE-ALPES
SUR LES INFRASTRUCTURES ET L'EAU

Cemagref
Sciences, eaux & territoires

ANR



Certu

GRAND LYON

Rhône-Alpes

OBSERVATOIRE
DE TERRAIN
EN HYDROLOGIE
URBAINE

OTHU



SOMMAIRE

Programme	3
------------------------	---

Avant propos	4
---------------------------	---

Supports d'interventions

Pourquoi et comment étudier l'hydrologie des rivières périurbaines ? <i>I. BRAUD, Cemagref</i> <i>Avec la contribution de tous les participants à AVuPUR</i>	5
--	---

Pourquoi (et comment) caractériser la variabilité spatio-temporelle des précipitations pour l'étude des rivières péri-urbaines ? <i>E. LEBLOIS et AL. JEANPIERRE Cemagref</i> <i>F. RENARD et J. COMBY, UMR CNRS 5600 EVS</i> <i>B. CHOCAT, INSA de Lyon</i>	17
---	----

Comment cartographier l'occupation des sols et son évolution pour le suivi des phénomènes hydrologiques ? <i>C. JACQUEMINET, S. KERMADI et K. MICHEL,</i> <i>UMR CNRS 5600 EVS, Université de Saint Etienne</i>	27
---	----

Les apports d'un atelier de prospective territoriale pour anticiper les changements d'occupation du sol <i>C. DODANE, T. JOLIVEAU et A. HONEGGER,</i> <i>UMR CNRS 5600 EVS</i>	37
--	----

Quelles sont les caractéristiques hydro-géomorphologiques associées aux rivières péri-urbaines et comment quantifier le risque d'incision ? <i>L. SCHMITT et L. GROSPRETRE, A. BARRA, H. DELILE</i> <i>UMR 5600, Université Lumière Lyon 2</i> <i>P. BREIL, Cemagref,</i> <i>B. CHOCAT, INSA de Lyon</i>	49
--	----

Pourquoi et comment décrire l'espace et les chemins de l'eau dans les milieux péri-urbains ? <i>F. BRANGER et S. JANKOWFSKY, Cemagref</i> <i>F. RODRIGUEZ et K. CHANCIBAULT, IFSTTAR</i> <i>E. BOCHER, CNRS</i>	59
--	----

Comment représenter le fonctionnement du milieu périurbain dans les modèles hydrologiques ?

<i>K. CHANCIBAULT, IFSTTAR Nantes</i> <i>F. BRANGER, I. BRAUD, Cemagref</i> <i>C. FURUSHO, H. ANDRIEU et F. RODRIGUEZ, IFSTTAR</i> <i>B. CHOCAT, INSA de Lyon</i>	71
--	----

Quel impact de l'urbanisation simulé par les modèles hydrologiques ?

<i>Illustration avec QdF et CANOE,</i> <i>P. BREIL, Cemagref</i> <i>B. CHOCAT et G. LIPEME KOUYI, INSA de Lyon</i> <i>L. SCHMITT et L. GROSPRETRE, UMR 5600 Université Lumière Lyon 2</i>	79
---	----

Synthèse

<i>I. BRAUD, Cemagref</i>	89
---------------------------------	----

Projet de fiche technique

Estimation des incertitudes sur les courbes de tarage <i>F. BRANGER, J. LE COZ et B. RENARD, Cemagref</i>	93
--	----

AU VERSO :

Les fiches techniques de l'OTHU



PROGRAMME

ACCUEIL	09 H 00
Ouverture Yves CONFESSON, Directeur Régional du Cemagref Sylvie BARRAUD, Directrice de l'OTHU	09h30
Pourquoi et comment étudier l'hydrologie des rivières périurbaines ? Isabelle BRAUD, Cemagref	09h45
Pourquoi (et comment) caractériser la variabilité spatio-temporelle des précipitations pour l'étude des rivières péri-urbaines ? Etienne LEBLOIS, Cemagref	10h15
PAUSE	10 H 45
Comment cartographier l'occupation des sols et son évolution pour le suivi des phénomènes hydrologiques ? Christine JACQUEMINET, UMR CNRS 5600, Université de Saint Etienne	11h15
Quel est l'apport d'un atelier de prospective territoriale pour anticiper les changements d'occupation du sol ? Clément DODANE, UMR CNRS 5600, Université de Saint Etienne	11h45
DEJEUNER	12 H 15
Quelles sont les caractéristiques hydro-géomorphologiques associées aux rivières péri-urbaines et comment quantifier le risque d'incision ? Laurent SCHMITT, UMR CNRS 5600, Université Lumière Lyon 2	14h15
Pourquoi et comment décrire l'espace et les chemins de l'eau dans les milieux péri-urbains ? Flora BRANGER, Cemagref	14h45
PAUSE	15 H 15
Comment représenter le fonctionnement du milieu périurbain dans les modèles hydrologiques ? Katia CHANCIBAULT, IFSTTAR Nantes	15h45
Quel impact de l'urbanisation simulé par les modèles hydrologiques ? Illustration avec QdF et CANOE, Pascal BREIL, Cemagref – Gislain LIPEME KOUYI, INSA de Lyon	16h15
Synthèse Isabelle BRAUD, Cemagref – Elodie BRELOT, Graie	16h45
FIN DE JOURNEE	17 H 00



LE PROJET AVUPUR : ASSESSING THE VULNERABILITY OF PERI-URBAN RIVERS

Objectifs :

Le projet AVuPUR (<http://avupur.hydrowide.com>) s'est intéressé aux bassins versants périurbains, qui subissent une évolution rapide depuis les années 1970. Le projet a cherché à proposer des outils pour quantifier l'impact de l'anthropisation sur l'hydrologie de ces bassins versants et la modification des chemins de l'eau associée. Il s'est focalisé sur les flux d'eau uniquement, préalable indispensable pour aborder les questions de qualité des eaux.

Coordination :

I. Braud (Cemagref UR HHLY)

Partenaires:

Cemagref Lyon, Institut de Recherche des Sciences et Techniques de la Ville (IRSTV, Nantes), Hydrowide (Grenoble), LGCIE/INSA Lyon, ISARA Lyon, UMR 5600 Environnement Ville Sociétés Lyon (EVS). En lien avec le Syndicat d'Aménagement et de Gestion de l'Yzeron, du Ratier et du Charbonnières (SAGYRC), le Grand Lyon et Nantes-Métropole.

Financement:

Agence Nationale de la Recherche. Appel d'offre Vulnérabilité Milieux Climat & Sociétés (01/2008-08/2011)

Méthodes :

Le projet s'appuie sur deux sites pilotes instrumentés dans le cadre d'observatoires : le bassin versant de l'Yzeron (148 km²) en périphérie lyonnaise (OTHU) et le bassin de la Chézine (34 km²) en banlieue nantaise (ONEVU).

Les activités ont combiné de l'observation et de la modélisation. Pour l'observation, trois volets ont été développés : une phase de collecte des données existantes auprès des différents gestionnaires (topographie, réseaux naturels et d'assainissement, cadastre, données météorologiques, données sur le sol, etc..) ; un renforcement du réseau de mesures existantes notamment en terme de mesures de débits (stratégie de bassins emboîtés) et l'acquisitions de nouvelles données pour documenter certains processus (infiltration dans les sols, fonctionnement hydrologique des zones naturelles, estimation des débits critiques de mise en mouvement des sédiments). Un gros effort a aussi porté sur la cartographie à différentes échelles de l'occupation des sols et l'estimation de l'imperméabilisation du milieu. Une cartographie diachronique depuis 1945 a aussi été produite, ainsi qu'une projection en 2030 à partir d'un atelier de prospective territoriale.

Les données hydrologiques ont été analysées pour proposer des indicateurs pertinents permettant de décrire à la fois le milieu, les caractéristiques pluviométriques et le régime hydrologique (régime moyen, régime de crues, basses eaux, échelle annuelle et événementielle) et les évolutions géomorphologiques

La modélisation a été abordée à deux échelles : à une échelle fine (quelques km²) pour la compréhension et la hiérarchisation des processus et à l'échelle de l'ensemble du bassin pour dériver des outils utiles à la gestion. Autant que faire se peut, les paramètres des modèles ont été estimés à l'aide des données collectées, afin de minimiser le besoin en calibration et favoriser la transposabilité des outils à d'autres bassins versants. Les résultats des modèles ont été confrontés aux observations et différentes hypothèses de fonctionnement sont comparées. Les modèles ont aussi été utilisés pour évaluer, à l'aide des cartes obtenues en 2030, l'évolution attendue du régime hydrologique et le risque d'incision des cours d'eau.



Pourquoi et comment étudier l'hydrologie des rivières périurbaines ?

I. BRAUD, Cemagref

Avec la contribution de tous les participants à AVuPUR

→ fiches techniques OTHU 22 et 23

Pourquoi et comment étudier l'hydrologie des rivières périurbaines ?

Isabelle Braud, Cemagref, UR Hydrologie-Hydraulique

Contexte (Diapos 2 à 8, Diapo 22)

Les projections démographiques prévoient que les zones urbaines concentreront 60% de la population mondiale en 2030 et la France n'échappe pas à cette tendance. Les changements les plus rapides et les plus importants se produisent dans les zones périurbaines aux grandes agglomérations. Les bassins versants associés voient le régime hydro-géomorphologique de leurs cours d'eau affecté par les perturbations associées à l'artificialisation des milieux. Les problèmes les plus souvent rencontrés sont une augmentation et une accélération des écoulements liés à l'imperméabilisation des bassins, conduisant à des problèmes d'inondations. L'artificialisation des milieux conduit aussi à une diminution de l'infiltration et de la recharge des nappes, avec une baisse possible des écoulements de base dans les rivières, pouvant impacter les écosystèmes. L'urbanisation s'accompagne enfin d'une modification importante des chemins de l'eau liée à la création de réseaux pour acheminer l'eau potable ou évacuer les eaux pluviales ou usées. En particulier, pour les réseaux unitaires, des déversoirs d'orage sont souvent construits pour limiter les risques de débordement. Ils conduisent à des déversements d'eau polluée dans les cours d'eau, préjudiciables pour leur qualité et leur stabilité morphologique (incision, ensablement), ainsi que pour les écosystèmes associés.

En parallèle, des outils réglementaires, visant, d'une part, à maintenir une qualité écologique dans les rivières (Directive Cadre sur l'Eau) et, d'autre part, à limiter le risque d'inondation (Directive Cadre sur les Inondations) ont émergé. Pour atteindre les objectifs fixés par ces lois, il devient alors nécessaire de repenser la gestion des eaux pluviales. Pour aider les gestionnaires dans cette tâche, des outils et méthodes permettant de quantifier l'impact de l'artificialisation des milieux sur le régime hydro-géomorphologique des milieux et d'étudier différentes alternatives de gestion apportent des informations intéressantes pour le processus de décision.

Les bassins versants périurbains sont particulièrement concernés. Ils constituent un milieu particulièrement difficile à caractériser du fait de sa complexité : juxtaposition/imbrication de zones plus ou moins urbanisées et de zones rurales plus ou moins naturelles ; forte anthropisation du milieu liée aux zones urbaines elles-mêmes mais aussi aux réseaux associés : réseau routier, réseaux d'eau potable, d'eaux usées, d'eaux pluviales. Tout ceci modifie les chemins naturels de l'eau qui ne sont plus uniquement pilotés par la topographie. En termes d'hydrologie, les temps de réponse associés aux zones urbaines ou rurales sont

très différents, avec des variations spatio-temporelles marquées, qui rendent complexe l'appréhension de la réponse à l'échelle de l'ensemble du bassin versant.

Objectifs et méthodologie d'AVuPUR (Diapos 9 à 14)

Dans ce contexte, le projet AVuPUR (Assessing the Vulnerability of Peri-Urban Rivers), financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) de 2008 à 2011 vise à proposer des outils pour quantifier l'impact de l'artificialisation des bassins versants sur leur hydrologie et la modification des chemins de l'eau associée.

Le projet combine des travaux d'observation et de description des milieux, d'analyse des données hydrométéorologiques associées, et le développement d'outils de modélisation, à la fois pour comprendre les processus et les hiérarchiser, mais aussi pour essayer de dériver des outils qui puissent être utiles aux opérationnels. Le projet s'appuie sur deux sites pilotes instrumentés dans le cadre d'observatoires : le bassin versant de l'Yzeron (148 km²) en périphérie lyonnaise (OTHU) et le bassin de la Chézine (34 km²) en banlieue nantaise (ONEVU).

Un premier volet du projet a consisté à décrire et comprendre les systèmes étudiés. Pour cela, nous avons collecté l'ensemble des données disponibles sur les bassins versants : données climatiques, pluviométriques et hydrologiques d'une part, et données cartographiques et/ou SIG décrivant la topographie, les sols, l'occupation des sols, les réseaux (routes, chemins, eaux usées, eaux pluviales), etc.. Cette phase a été longue et laborieuse du fait de la multiplicité des interlocuteurs et des formats de données, ainsi que des restrictions parfois apportées sur leur utilisation ou leur diffusion. Les résultats du projet montrent que l'ensemble de ces informations sont nécessaires à l'appréhension complète du fonctionnement des bassins versants. Un accès plus aisé à l'ensemble des informations disponibles serait donc souhaitable pour faciliter l'étude des bassins versants périurbains.

Les informations existantes ont été complétées par l'acquisition de nouvelles données pour mieux documenter la réponse hydrologique à différentes échelles (mesure des débits pour des bassins emboîtés), caractériser l'impact des réseaux de fossés, en général non cartographiés ; et comprendre la réponse hydrologique des zones rurales : caractérisation de la capacité d'infiltration (Diapo 25), description des profondeurs de sol par mesures géophysiques, étude de la réponse hydrologique à l'aide d'analyse de topographie haute résolution (Lidar) et

d'un réseau dense de limnigraphes (Diapos 26 à 28), caractérisation des débits seuil de mise en mouvement des sédiments pour quantifier l'incision.

Un volet important du projet a aussi porté sur la description et la cartographie de l'occupation des sols présente et passée à l'aide de photos aériennes ou d'images satellitaires. L'effort méthodologique a porté sur la documentation de l'imperméabilisation et de l'artificialisation des milieux (Exposé C. Jacqueminet).

Un second volet du projet concerne le développement d'outils de modélisation à deux échelles spatiales distinctes. A l'échelle de bassins de quelques km², nous avons développé une modélisation en continu, permettant de comprendre le fonctionnement des bassins versants périurbains et s'appuyant sur une modélisation détaillée des différents objets du paysage : parcelles agricoles, urbaines, réseaux hydrographiques, de fossés, d'assainissement, bassins de rétention, déversoirs d'orage, etc...(modèle PUMMA). L'exploitation de cet outil permet de tester des hypothèses de fonctionnement de ces objets et de hiérarchiser leur importance sur la réponse finale (Exposé F. Branger).

A l'échelle de bassins plus grands, nous avons aussi travaillé sur l'adaptation de modèles existants pour la simulation en continu de l'hydrologie et qui puissent répondre aux enjeux de gestion des bassins versants périurbains de l'ordre de la centaine de km² : adaptation du modèle urbain CANOE et des modèles ruraux ISBA-Topmodel et J2000 (Exposé K. Chancibault).

Pour faire le lien entre ces deux volets, des indicateurs caractérisant le fonctionnement hydro-géomorphologique du système ont été développés. Ils s'appuient essentiellement sur l'analyse des données de débits que l'on a cherché à synthétiser pour en extraire des grandeurs caractérisant l'évolution temporelle du régime moyen, des basses eaux, des crues, mais aussi des seuils de débit déclenchant le processus de transport de la charge de fond. Les épisodes de crue ont aussi été analysés de manière systématique. Mais il a été nécessaire d'affiner les techniques « classiques » d'analyse des séries hydrologiques. Des techniques de filtrage spécifiques ont aussi été testées pour permettre de distinguer les contributions des zones urbaines et rurales dans les séries hydrométriques. Ces indicateurs permettent d'une part d'évaluer la pertinence des modèles développés. D'autre part, ils nous fournissent des grandeurs pour caractériser l'impact de modifications futures ou passées de l'occupation des sols sur l'hydrologie.

Enfin, un dernier volet a consisté à envisager les perspectives d'évolution du bassin de l'Yzeron à l'échéance 2030. Un atelier de prospective territoriale a permis de construire une vision, partagée par les acteurs, des évolutions possibles sur ce bassin (Exposé T. Joliveau). Les scénarios ainsi développés ont été introduits dans les modèles hydrologiques pour quantifier quel pourrait être l'impact sur l'hydrologie et le risque d'incision.

Quels indicateurs pour mesurer l'impact de l'urbanisation sur l'hydrologie ?

Nous détaillons ici quelques indicateurs qui se révèlent pertinents pour comprendre et caractériser le régime hydrologique des bassins versants périurbains.

- Une première série d'indicateurs permet de décrire le milieu (Diapos 15 à 17)
 - Deux premières grandeurs qui peuvent paraître triviales, mais se révèlent difficiles à déterminer pour un bassin périurbain, sont la frontière du bassin et sa superficie. Différentes méthodes combinant l'analyse de couches SIG (topographie, réseaux) mais aussi reconnaissance de terrain ont été proposées.
 - La délimitation des surfaces imperméabilisées/artificialisées est aussi un élément clé pour caractériser le milieu et le modéliser. Des méthodes s'appuyant sur l'analyse d'images de télédétection ou de photos aériennes ont été proposées, en essayant de fournir des résultats pertinents à l'échelle des unités de modélisation hydrologiques. L'imperméabilisation conditionne la propension du milieu à ruisseler, mais elle doit être complétée par une information qui se révèle très importante pour comprendre le fonctionnement hydrologique : la connexion entre les différents éléments du bassin et le cours d'eau. L'analyse des plans des réseaux et des reconnaissances de terrain sont nécessaires pour affiner cette connaissance. Nous avons aussi pu montrer que cette notion de connectivité est aussi pertinente pour la compréhension des processus hydrologiques actifs en zone rurale.
- Une deuxième grandeur qu'il est nécessaire de caractériser est la pluviométrie (Diapo 15 + exposé de E. Leblois) et sa variabilité spatio-temporelle. Compte tenu de l'hétérogénéité du milieu et des temps de réponse, une description fine est nécessaire (échelle kilométrique et pas de temps de l'ordre de 5 minutes). Nous avons exploré pour cela l'apport du radar hydrométéorologique et celui d'un simulateur spatio-temporel de pluie, conditionné aux observations existantes, lorsque le radar n'est pas disponible. La mise en œuvre de cet outil a conduit à une analyse détaillée du régime pluviométrique à l'aide du réseau de pluviographes du Grand Lyon.
- De l'analyse des séries hydrométriques, nous avons retenu les grandeurs suivantes pour caractériser le régime hydrologique et étudier son évolution (Diapos 18 à 20, diapo 24 + exposés de L. Schmitt et P. Breil/G. Lipeme)
 - Régime mensuel et coefficient de ruissellement
 - Courbes des débits classés.
 - Décomposition des hydrogrammes en débit de base, débits intermédiaires et débits de ruissellement.

- Rapport des écoulements de base aux écoulements totaux ou Base Flow Index (BFI)
- Analyse débit durée fréquence (QdF)
- Lorsqu'un déversoir d'orage est proche d'une station hydrométrique, les techniques de filtrage permettent de séparer la composante urbaine de la composante rurale et d'analyser le rôle de la zone urbaine sur le régime de crues
- Pour quantifier le risque d'incision, ces indicateurs ne se sont pas révélés suffisants. Nous avons montré que l'utilisation de fréquences de dépassement de certains seuils était plus pertinente et permet de caractériser la vulnérabilité des cours d'eau à l'incision.

Quelques résultats significatifs du projet AVuPUR

- Collecte de bases de données hydro-météorologiques (climat, pluviométrie, débitimétrie) et d'un ensemble de couches d'informations géographiques (SIG) décrivant le système sur l'ensemble des deux bassins (topographie, occupation des sols, réseaux d'assainissement et pluvial, sols, etc..) sur 25 ans (Yzeron) et 10 ans (Chézine).
- Evaluation de l'intérêt de nouveaux dispositifs de mesure : MNT lidar, réseaux denses de limnimètres, prospection géophysique, campagnes d'essais d'infiltration ciblées pour comprendre les chemins de l'eau et les fonctionnements hydrologiques.
- Proposition d'outils d'analyse des données pour dériver des indicateurs décrivant les différentes composantes du cycle hydrologique dans ces bassins, identifier des marqueurs de l'impact de l'urbanisation sur ce cycle hydrologique (synthèses statistiques, analyses d'épisodes, méthodes de filtrage des composantes urbaines rapides, fréquence de dépassement de seuils – notamment pour quantifier l'impact sur la géomorphologie des cours d'eau et le risque d'incision-).
- Mise au point de méthodes exploitant les différentes couches SIG (topographie, occupation des sols, réseaux) pour décrire la complexité de ces bassins versants et les chemins de l'eau : délimitation des bassins versants et de leurs sous-bassins, extraction des réseaux de drainage, description des chemins de l'eau (approches objet, triangulation contrainte), détermination de l'artificialisation et de l'imperméabilisation par analyse d'images (photos aériennes, images satellitaires).

- Développement d'outils de modélisation continus permettant de comprendre le fonctionnement des bassins versants périurbains de quelques km², s'appuyant sur une modélisation détaillée des différents objets du paysage : parcelles agricoles, urbaines, réseaux hydrographiques, de fossés, d'assainissement, bassins de rétention, déversoirs d'orage, etc...(modèle PUMMA). L'exploitation de cet outil permet de tester des hypothèses de fonctionnement de ces objets et de hiérarchiser leur importance sur la réponse finale.
- Adaptation de modèles existants pour la simulation en continu pour pouvoir répondre aux enjeux de gestion des bassins versants périurbains de l'ordre de la centaine de km² : adaptation du modèle urbain CANOE et des modèles ruraux ISBA-Topmodel et J2000.
- Mise en place d'ateliers de prospective territoriale impliquant les acteurs pour identifier les évolutions possibles de l'occupation des sols sur le bassin de l'Yzeron en 2030. Exploitation de ces scénarios pour évaluer les évolutions possibles des régimes hydrologiques et le risque d'incision en 2030.

Pour en savoir plus

Site web du projet : <http://avupur.hydrowide.com>

Braud I., Chancibault K., Debionne S., Lipeme Kouyi G., Sarrazin B., Jacqueminet C., Andrieu H., Béal D., Bocher E., Boutaghane H., Branger F., Breil P., Chocat B., Comby J., Dehotin J., Dramais G., Dodane, C., Furusho C., Gagnage M., Gonzalez-Sosa E., Grosprêtre L., Honegger A., Jankowsky S., Joliveau T., Kermadi S., Lagouy M., Leblois E., Martin J.Y., Mazagol P.O., Michell K., Molines N., Mosini M.L., Puech C., Renard F., Rodriguez F., Schmitt L., Thollet F., Viallet P., 2010. The AVuPUR project (Assessing the Vulnerability of Peri-Urbans Rivers) : experimental set up, modelling strategy and first results, Proceedings of the 7th Novatech 2010 Conference, June 28-July 1 2010, Lyon, France, 10pp.

1ère CONFERENCE THEMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

Pourquoi s'intéresser à l'hydrologie des bassins périurbains?

- **Contexte démographique :**
 - Augmentation de la population et concentration dans et autour des grandes villes
 - Pour l'agglomération lyonnaise: péri-urbanisation importante depuis les années 1970; 1.9 Millions d'habitants prévus en 2030 (Plan Local de l'Habitat, 2008), avec forte croissance des zones péri-urbaines
 - Pour Nantes-Métropole: + 85000 habitants sur les 20 dernières années, +100000 attendus d'ici 20 ans
- **Contexte institutionnel :**
 - Directive cadre sur l'eau (DCE): impose l'atteinte du bon état écologique des cours d'eau pour 2015
 - Directive cadre sur les inondations: cartographier les zones à risque pour 2013
 - Révision des SAGE, SDAGE

1ère CONFERENCE THEMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

Quels impacts attendus de l'urbanisation?

- **Modifications du régime hydrologique des cours d'eau attendues :**
 - Accélération et augmentation des écoulements liés à l'artificialisation du milieu
 - Diminution de l'infiltration et baisse potentielle du niveau des nappes et donc du débit de base dans les cours d'eau (impact sur les écosystèmes, notamment sur les petits cours d'eau)
 - Des eaux pluviales parfois directement rejetées dans le milieu récepteur (déversoirs d'orage) d'où risques pour les écosystèmes ou la santé (cf ANR INVASION en cours)
 - Des évolutions du lit des cours d'eau plus marquées à l'aval des déversoirs d'orage: incision des lits, dépôts à l'aval: risques pour les ouvrages, colmatage des habitats aquatiques en aval

1ère CONFERENCE THEMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

Quels impacts attendus de l'urbanisation?



Inondations Oullins
(Photo, Le Progrès)



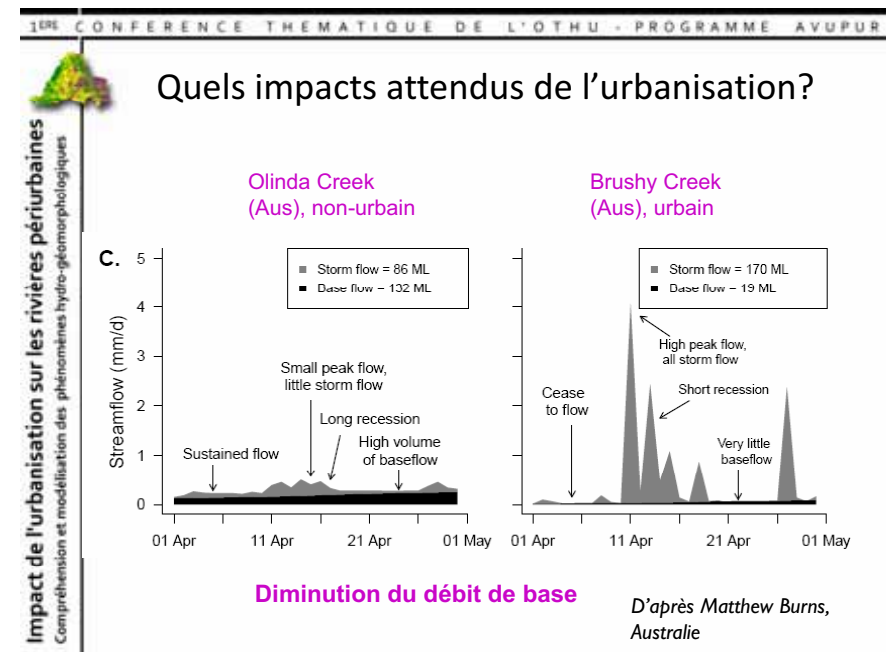
Incision du chenal
(Photo, L. Schmitt)



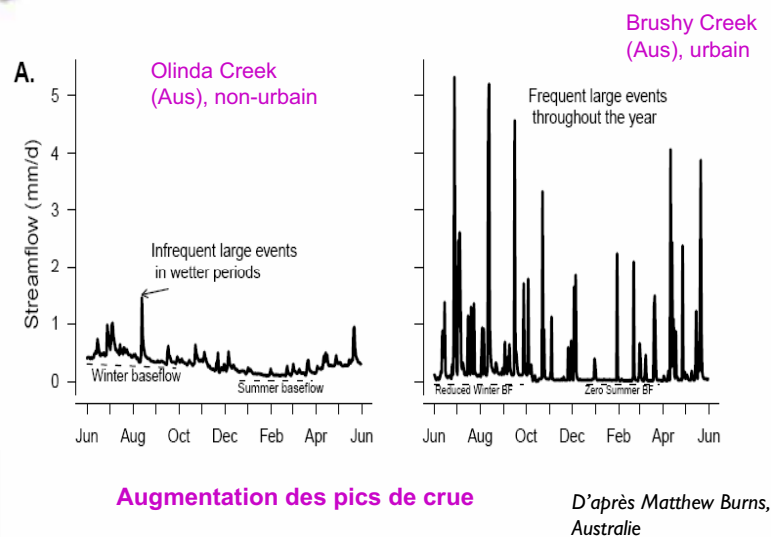
Inondations Parc de Procé,
Nantes (Photo, K. Chancibault)



Pollution
(Photo, Cemagref)



Quels impacts attendus de l'urbanisation?



Quel est le système à étudier?

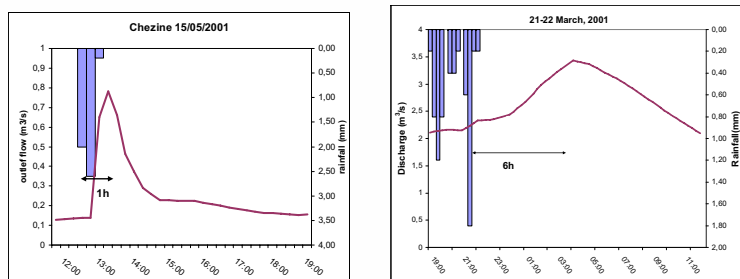
- **Complexité du système**
 - Juxtaposition/imbrication de zones plus ou moins urbanisées et de zones rurales naturelles
 - Forte anthropisation du milieu: réseaux routiers, chemins, réseaux d'assainissement d'où **modifications importantes des chemins naturels de l'eau**



BDOrtho® IGN

Quels impacts attendus de l'urbanisation?

Temps de réponse très contrastés en fonction de l'occupation des sols: très courts en zone urbaine, plus lents en zone rurale. D'où besoin d'une résolution spatiale et temporelle de la pluie très fine (1 km², 6min).



Episode en période sèche:
contribution urbaine uniquement:
réponse rapide

Episode en période humide:
contribution rurale importante:
réponse lente

Thèse C. Furusho

AVUPUR

Le projet AVUPUR

ANR

- **Constat :**
 - Un nombre important de travaux sur les bassins urbains et sur les bassins ruraux mais **peu de travaux sur les bassins périurbains**
 - Des besoins **d'outils de compréhension et d'aide à la décision** pour répondre aux enjeux (DCE, directive sur les inondations) et proposer des stratégies d'aménagement et de gestion de ces bassins
- **Questions scientifiques :**
 - Quel est l'impact de l'urbanisation sur les phénomènes hydro-géomorphologiques dans les bassins périurbains ?
 - Comment peut-on observer, décrire et modéliser le fonctionnement hydrologique de ces bassins ?

1ère CONFÉRENCE THÉMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

AVuPUR Le projet AVuPUR

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

- **Objectifs spécifiques d'AVuPUR :**
 - Mettre en place une **stratégie d'observation** permettant de décrire et comprendre le cycle hydrologique et **les chemins de l'eau** dans les bassins périurbains
 - Proposer des **indicateurs** pertinents pour quantifier l'impact de l'urbanisation sur les processus hydro-géomorphologiques
 - Proposer des **outils de modélisation hydrologique continus** de ces bassins à des fins de **compréhension des processus**, de **diagnostic** sur le passé et de **simulation pour le futur**
 - Projet focalisé sur l'**hydro-géomorphologie**, préalable pour aborder les questions de qualité dans le milieu
- **Etude de deux bassins périurbains dans des contextes hydro-climatiques contrastés**
 - Le bassin de l'**Yzeron** (150 km²) en périphérie lyonnaise : climat à influences continentale et méditerranéenne, topographie marquée
 - Le bassin de la **Chézine** (34 km²) en banlieue nantaise : climat océanique, faible topographie

ANR

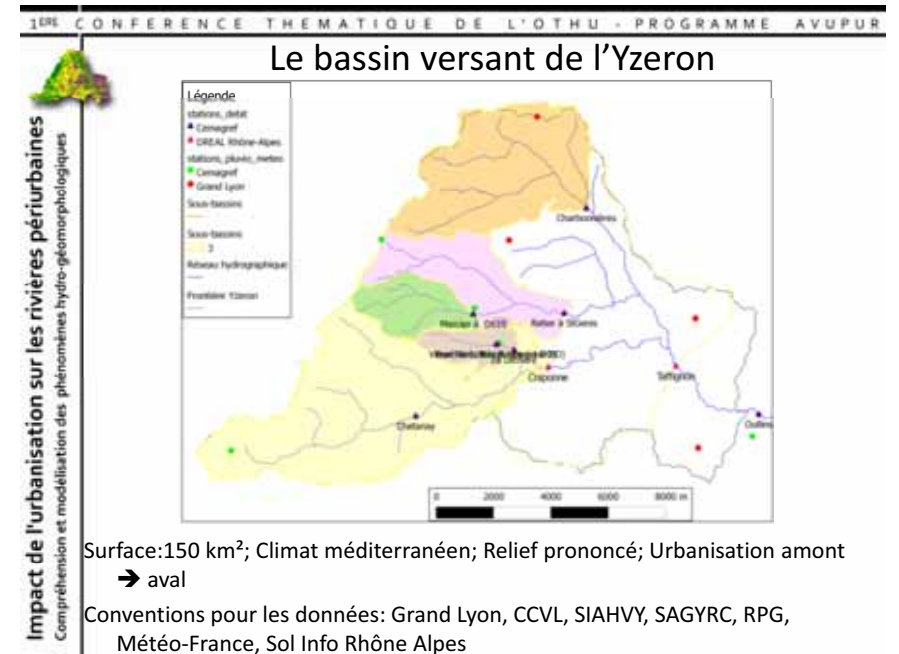
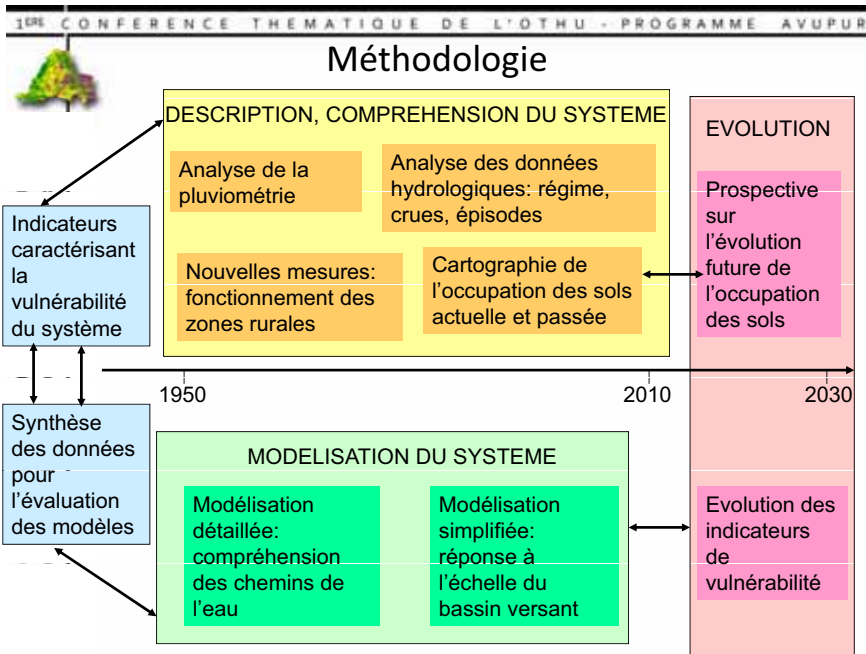
1ère CONFÉRENCE THÉMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

AVuPUR Le projet AVuPUR

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

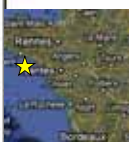
- Financé par l'ANR 2008-2011
- Associant des **laboratoires** de recherche et des **PMEs** ou associations
- Construction du programme de recherche en lien avec les **gestionnaires** (Grand Lyon, SAGYRC (contrat de rivière), Nantes-Métropole)
- **Pluri-disciplinaire**: hydrologie rurale et urbaine, géographie physique et humaine, géomorphologie, ingénierie informatique

Cemagref
irstv
HYDROWIDE
INSA
isara Lyon
EVS





Le bassin versant de la Chézine



Surface: 29 km²

Pente douce

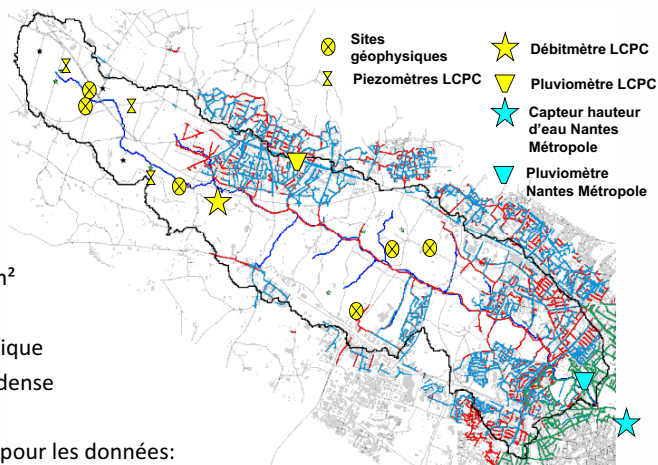
Climat océanique

Aval: urbain dense

Amont: rural

Conventions pour les données:

Nantes Métropole, Saint Etienne de Montluc



Quels indicateurs d'impact?

• Indicateurs décrivant le milieu

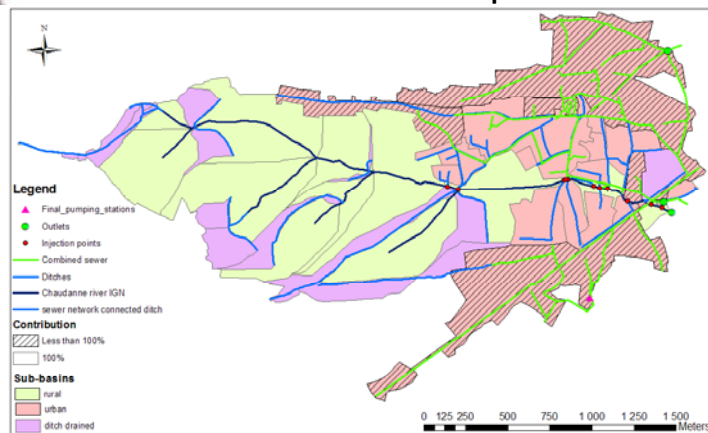
- Délimitation des bassins versants périurbains par analyse de la topographie, des réseaux de routes, fossés, des réseaux d'eaux pluviales et unitaires
- Caractérisation de l'occupation des sols à partir de photos aériennes ou images satellites et ateliers prospectifs pour le futur
- Utilisation pour déterminer les taux d'imperméabilisation ou artificialisation

• Caractérisation de la pluviométrie

- Régime pluviométrique
- Analyse de tendances sur la série de Bron (1920-2010): pas d'évolution significative de la pluie sur la période 1970-2010
- Caractérisation géo-statistique des pluies à l'aide du réseau de pluviographes de Grézieu



Délimitation d'un bassin périurbain

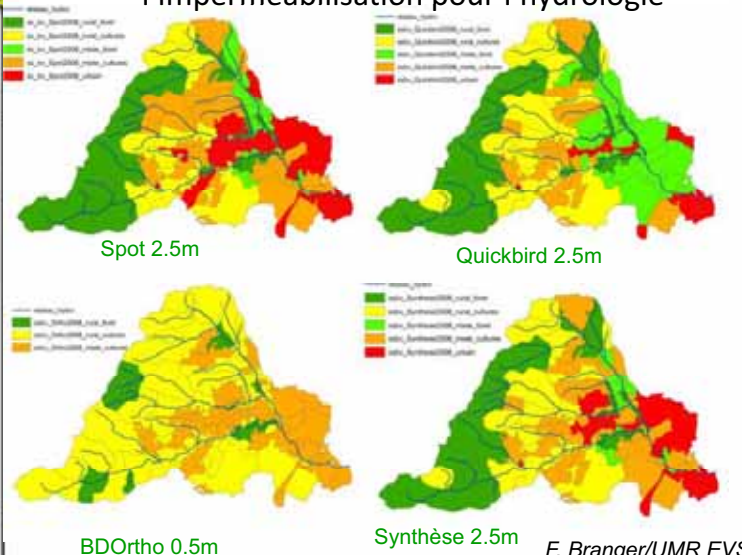


Les zones hachurées sont connectées au déversoir d'orage: elles ne contribuent au débit dans la rivière que lorsque les déversoirs débordent. De plus seule une partie de l'eau est déversée: la surface du bassin versant évolue au cours du temps

Thèse S. Jankowsky



Caractérisation de l'occupation des sols et de l'imperméabilisation pour l'hydrologie



F. Branger/UMR EVS

1ère CONFÉRENCE THÉMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

Outils d'analyse des débits

- Indicateurs hydrologiques pertinents
 - Régime hydrologique (débits moyens mensuels)
 - Distribution des valeurs de débits classés
 - Décomposition d'hydrogrammes (débit de base, débit intermédiaire, débit de ruissellement rapide)
 - Analyse du Base Flow Index (BFI)
 - Analyse des crues:
 - débit maximum annuel
 - débits sub-seuils et analyse des chroniques en débit-durée-fréquence (QdF)
 - Développement de méthodes de filtrage des séries pour séparer les composantes "urbaines" et "rurales"
 - Nombre et durée de dépassements de seuils de débits critiques (géomorphologie)
- Mais attention à la précision des données, surtout en basses eaux

1ère CONFÉRENCE THÉMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines

Quelques exemples

Impact du choix de la surface sur la courbe des débits spécifiques classés

Filtrage des composantes rurales (rouges) et urbaines (vertes) à la Lechère. En bleu les données du DO

1ère CONFÉRENCE THÉMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

Décomposition d'hydrogrammes

WETSPRO, Willems, 2009, Env. Mod. Soft.

50% écoulement de base, 24% écoulement intermédiaire (flux de sub-surface)
Tendance à la baisse.

26% écoulement rapide
Tendance à la hausse

1ère CONFÉRENCE THÉMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines

Prochaines présentations

Indicateurs caractérisant la vulnérabilité du système

Synthèse des données pour l'évaluation des modèles

DESCRIPTION, COMPREHENSION DU SYSTEME

- Analyse de la pluviométrie
- Analyse des données hydrologiques: régime, crues, épisodes
- Nouvelles mesures: fonctionnement des zones rurales
- Cartographie de l'occupation des sols actuelle et passée

MODELISATION DU SYSTEME

- Modélisation détaillée: compréhension des chemins de l'eau
- Modélisation simplifiée: réponse à l'échelle du bassin versant

EVOLUTION

- Prospective sur l'évolution future de l'occupation des sols
- Evolution des indicateurs de vulnérabilité

1950 2010 2030

Exemples de questions qui se posent aux gestionnaires

- Comment puis-je étudier le ruissellement et les rejets de temps de pluie sur mon bassin?
- Quelle est la frontière du bassin versant qui m'intéresse?
- Comment instrumenter mon bassin pour connaître son fonctionnement? Quelles données acquérir? Avec quelle précision?
- Comment modifier le mode de gestion des eaux pluviales pour limiter les rejets dans le milieu?
- Quel pourrait être l'impact du développement d'un nouveau quartier sur le risque de crue?
- Quelles ressources en eau sont mobilisables sur mon bassin versant (études volumes prélevables, etc..)
-

AVUPUR

ANR

Cemagref

irsty

HYDROWIDE

INSA

saralyon

EIS

MERCI POUR VOTRE ATTENTION DES QUESTIONS ??

Remerciements:

- Financement du projet : ANR VMS&S
- Fourniture de données : OTHU, SAGYRC, Grand Lyon, Dreal Rhône-Alpes, IGN, Météo-France, SIAVHY, CCVL, Nantes-Métropole, Projet ISI
- Soutien pour la conférence : Grand Lyon, Agence de l'Eau RM&C, Région Rhône-Alpes, DREAL, Conseil Général du Rhône, CERTU

Rhône-Alpes
GRAND LYON
communauté urbaine

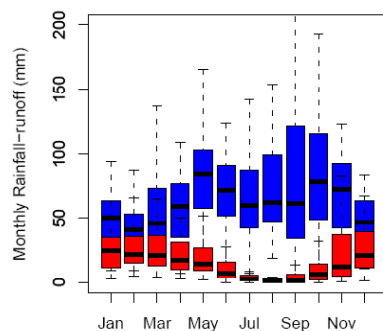
graie



Autres indicateurs

Régime hydrologique

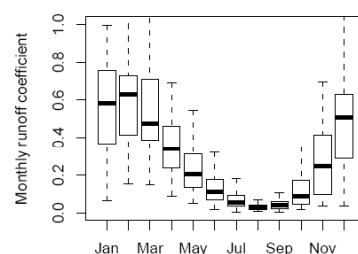
Craponne



En rouge (bas) l'écoulement mensuel

En bleu (haut) la pluviométrie mensuelle

Craponne



Coefficient d'écoulement mensuel

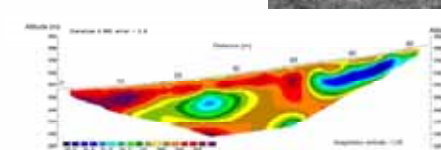
Caractérisation de l'infiltrabilité des sols et des profondeurs de sol



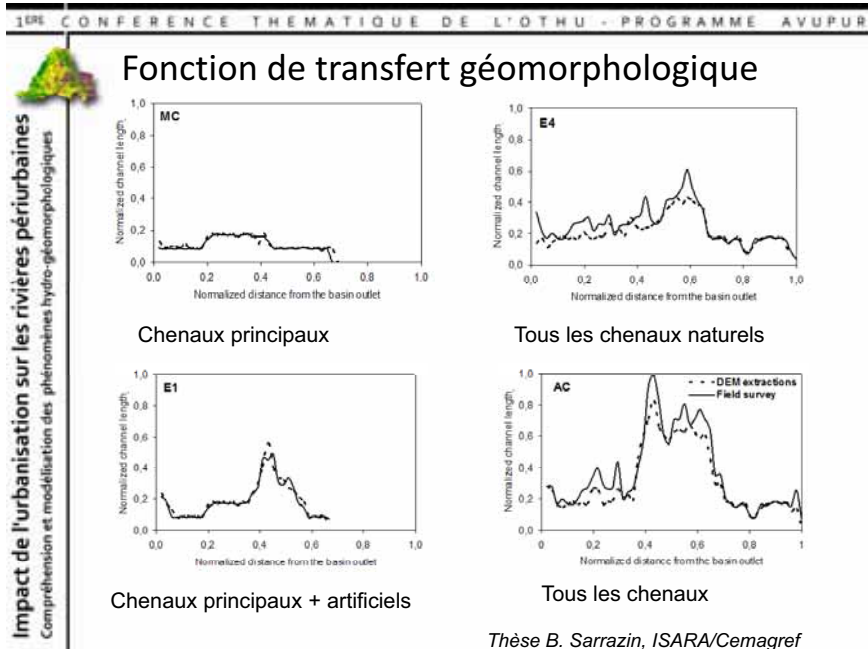
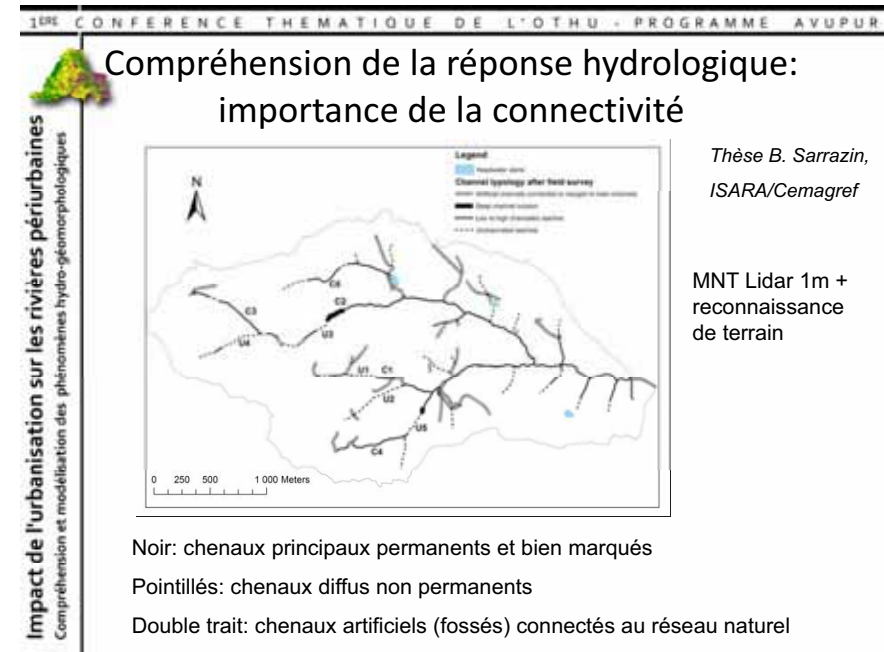
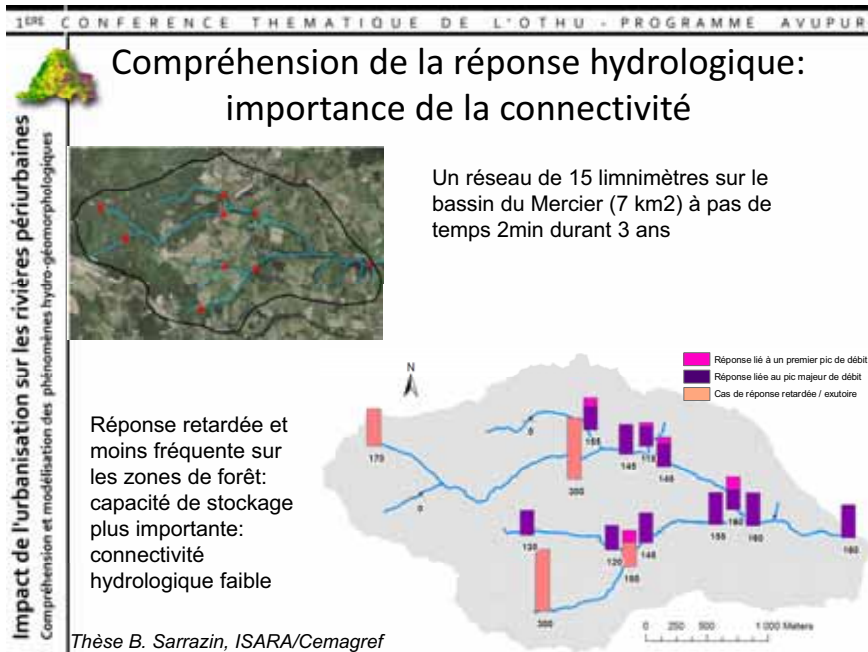
Essais d'infiltration sur surfaces naturelles

L'occupation des sols a un impact fort sur l'infiltrabilité: plus forte en forêt, prairie que sur les cultures

Gonzalez-Sosa et al., 2010



Prospection géophysiques (résistivité électrique) pour l'estimation des profondeurs de sol





Pourquoi (et comment) caractériser la variabilité spatio-temporelle des précipitations pour l'étude des rivières péri-urbaines ?

E. LEBLOIS et AL. JEANPIERRE, Cemagref
F. RENARD et J. COMBY, UMR CNRS 5600 EVS
B. CHOCAT, INSA de Lyon

Pourquoi et comment caractériser la variabilité spatio-temporelle des précipitations pour l'étude des rivières péri-urbaines ?

E. Leblois, A.-L. Jeanpierre (Cemagref) ; F. Renard, J. Comby (EVS) ; B. Chocat (INSA)

Les précipitations sont le facteur primaire de la formation des écoulements. Leur extrême variabilité dans le temps et dans l'espace n'est effacée ni lors du partage qui s'effectue au sol entre infiltration, écoulement et évaporation, ni lors de la collecte de l'écoulement et sa concentration en débit par les diverses structures naturelles ou artificielles au sol.

Dès lors, dans un contexte d'un projet scientifique à forte composante hydrologique où l'on veut suivre ou prédire le devenir d'un bassin versant évoluant dans sa structure et dans son occupation du sol, il est impératif de contrôler l'incertitude majeure que peut représenter une connaissance imparfaite des pluies et d'en préserver l'étude principale (chargée de détecter, suivre, prédire l'effet propre de ces transformations au sol).

Deux lignes de travaux sur la variabilité des pluies ont donc contribué au projet AVUPUR, et seront succinctement présentées.

Un premier axe, regroupant des contributions de l'INSA et de l'UMR5600, a consisté à valoriser les estimations de pluie par mesure radar. Ces mesures sont relativement récentes, et à la fois assez imprécises et spatialement exhaustives. Elles offrent à cet égard un regard très complémentaire aux pluviomètres, réputés fournir des données de référence, avec une antériorité plus longue, mais une couverture spatiale très fragmentaire. Les travaux effectués confirment que

- 1) la plus value essentielle de la mesure radar est dans le repérage de l'existence et la localisation des intensités fortes.
- 2) alors que le raccord entre la mesure quantitative radar et la pluviométrie observée par les pluviomètres est usuellement fait par l'adoption d'une correction des intensités en valeur moyenne (revenant à une règle de trois), une correction en distribution, également appelée quantile-quantile, est beaucoup plus efficace. Associée à une réflexion sur la représentativité spatiale des mesures, elle est appelée à permettre une bonne exploitation quantitative aux échelles urbaines et péri-urbaines

Ces travaux seront documentés par quelques illustrations.

Un deuxième axe plus directement porté par le Cemagref a consisté à reconstruire les pluies de la période 1985-2008 à l'aide de techniques de simulations

conditionnelles d'inspiration géostatistique. Les techniques classiques de cette discipline ont été nettement améliorées afin de tenir compte des particularités statistiques du signal pluviométriques.

On s'appuie sur un modèle conceptuel explicite qui est le suivant :

- 1) Homogénéité spatio-temporelle du processus, au moins temporaire. On entend par là qu'au dessus d'un domaine d'étude préalablement fixé (suffisamment modeste pour que les hypothèses qui suivent puissent être considérées comme réalistes), à tout instant ne se présente qu'un type de pluie.
- 2) Intermittence. Au sein d'un même type de pluie se présentent des zones pluvieuses et non pluvieuses, qui se combinent pour former un composite. Sauf exception on admettra qu'il y a indépendance, aux pas de temps et d'espace de la simulation élémentaire, des champs d'indicatrice et de pluie non-nulle.
- 3) Distributions non gaussiennes. Il est d'évidence empirique que les pluies non-nulles (on entend par là que les zéros ont été préalablement écartés) présentent une distribution asymétrique à droite (présence occasionnelle de valeurs très fortes) et ont le plus souvent un coefficient de variation relativement élevé (parfois supérieur à l'unité). Ces éléments orientent vers des distributions non gaussiennes.

Le simulateur est basé sur la technique géostatistique des bandes tournantes, technique qui en essence génère des champs Gaussiens de structure spatiale connue (imposée). Le champ de précipitation est élaboré comme composite d'un champ de précipitation non-nulle et d'un champ d'indicatrice de pluie. Le champ de précipitation non nulle est dérivé d'un premier champ Gaussien simulé. On applique une distribution calée sur l'ensemble des valeurs de précipitations non-nulles observées (il s'agit bien de l'ensemble des pluies non-nulles et pas seulement des valeurs extrêmes). Ces valeurs présentant souvent une forte asymétrie, on aura recours à une distribution compatible, la gaussienne inverse (IG). Le champ d'indicatrice est obtenu par seuillage dans un deuxième champ Gaussien, simulé indépendamment (seuillage).

Pour la simulation conditionnelle, toute valeur de précipitation non-nulle observée doit être transformée en son équivalent Gaussien pour que soit conditionné le champ Gaussien sous-jacent. Il faut réaliser une opération équivalente pour l'indicatrice de précipitation, mais le seuillage n'admet pas de fonction réciproque : nous recourrons donc préalablement à un échantillonneur de Gibbs, ou à l'algorithme de Metropolis-Hastings, pour fournir des valeurs Gaussiennes compatibles avec les valeurs d'indicatrice observées.

Les études de pluies se baseront sur des pluies regroupées en ensembles homogènes. En partant d'observations de long terme effectuées sur un réseau pluviométrique il convient de segmenter la chronologie en un calendrier d'occurrences de types de pluies distincts.

Du point de vue de la critique méthodologique on notera que la caractérisation numérique des objets (choix des descripteurs en sémantique, support spatial et temporel) et de la métrique utilisée sont fondamentales pour la pertinence des classifications obtenues. Cette interaction entre le choix des descripteurs de classification et la thématique d'étude est la raison fondamentale du caractère très peu opérant des classifications préexistantes à traiter de questions nouvelles.

Nous avons retenu la classification non supervisée de Kohonen, qui a la particularité de ventiler les individus dans un espace de classes ordonné sur un espace graphique prédéfini (self organizing map, SOM), en privilégiant la continuité entre classes voisines. Cet aspect en fait une technique originale dont l'usage se développe en climatologie-météorologie.

D'un point de vue opérationnel, on a ainsi obtenu un grand nombre de reconstructions des pluies passées sur la région du Grand Lyon et de l'Yzeron, à maille kilométrique, horaire, sur 1985-2008. Ces reconstitutions respectent les valeurs observées aux pluviomètres, et présentent une variabilité qui est sinon celle du modèle postulé pour chaque instant.

Les ordres de grandeur de l'incertitude pluviométrique sont ainsi disponibles ; par illustration, la quantité totale de pluie tombée lors de la crue de décembre 2003 ne serait connue qu'à 20% près.

La variabilité existant entre les différentes reconstructions des pluies montre une tendance à la baisse. Ce net resserrement des estimations avec le temps est fiable à la densité de postes pluviométriques sur le bassin versant de l'Yzeron, significativement renforcée dans les années récentes. Ceci amène un bénéfice scientifiquement objectivable sur les grandeurs mêmes qui intéressent l'hydrologue.

Pour ce qui est de retrouver les débits, et pour la période récente, ces reconstructions sont nettement meilleures que la simple interpolation des pluviomètres, ce qui a été une très agréable constatation.

Pour les périodes anciennes, les pluies conditionnées n'apparaissent pas seulement très différentes les unes des autres, leur disparité semble exagérée. Ceci suggère que certains éléments négligés (existence d'un gradient d'altitude par exemple) devraient être introduits. Les critères de délimitation des classes de pluie doivent inclure des indicateurs de la structure spatiale des pluies, malgré la difficulté de son estimation au jour le jour au vu des seules valeurs pluviométriques.

Pourquoi spatialiser les pluies en hydrologie ?

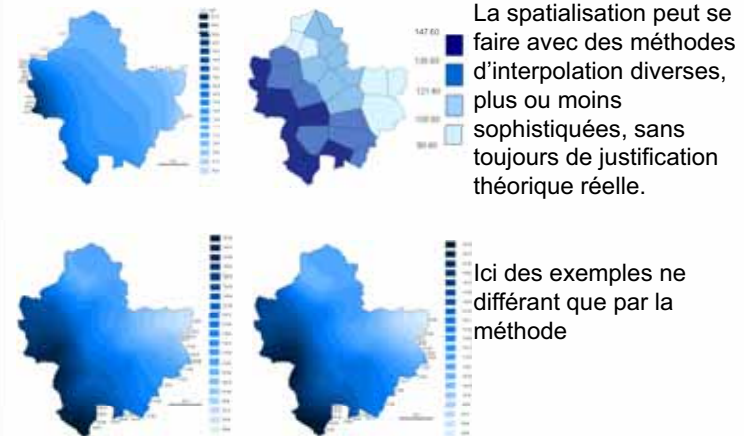


Dans le cas d'un réseau au sol, la pluie est connue sur un nombre limité de postes pluviométriques.

Les bassins ont une étendue spatiale, ils collectent la pluie.

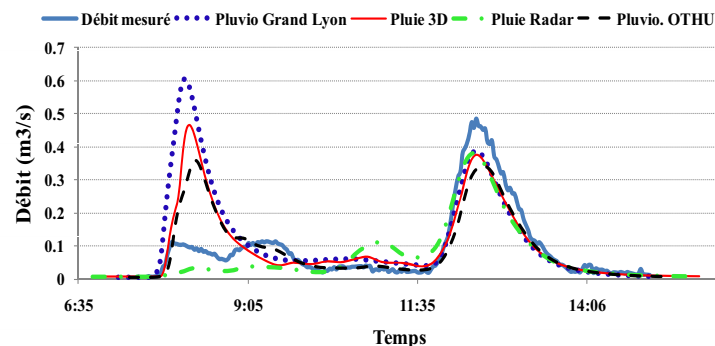
Il est donc nécessaire de spatialiser l'information pour connaître les lames d'eau sur les sous bassins versants

Comment spatialiser les pluies ?



Exemple de l'épisode du 1er et 2 décembre 2003

Impact hydrologique de ce problème



De fait, la mauvaise connaissance de la pluie spatialisée constitue une cause majeure d'incertitude dans les modèles hydrologiques.

Problématique de recherche, notamment, dans le cadre d'AVUPUR, à l'échelle du bassin périurbain

Les objectifs de la recherche

- Développer différentes méthodes de spatialisation;
- Comparer leur efficacité en termes hydrologiques

Concrètement : les pluies reconstituées permettent-elles simuler correctement des événements hydrologiques choisis ?

Les difficultés

- Caractère intermittent du phénomène pluvieux.
- Diversité des échelles d'espace.
- Diversité des échelles de temps pertinentes.

1ère CONFERENCE THEMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

**Premier axe :
Utilisation du radar météorologique**

- Le radar fournit une image spatiale (grille de 1km*1km)
- La grandeur mesurée est la réflectivité moyenne d'un volume d'atmosphère à un instant précis
- Il faut donc établir une relation entre cette réflectivité et l'intensité des pluies qui nous importe. De larges travaux de modélisation de la mesure existent dans la communauté.
- Pour nous : évaluation pratique de la qualité de mesure

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

1ère CONFERENCE THEMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

**Évaluation de la qualité de mesure
du radar météorologique**

- Sites** : Satolas (jusqu'à 2001) puis Saint-Nizier d'Azergues
- Réseau **Aramis** de **Météo-France**
- Bande C** – portée 280 km

Site de Satolas : Localisation à **trop faible altitude** → *mesure erronée données inexploitable*

Site de Saint-Nizier d'Azergues : 2001 - 2006

Évaluation de la mesure par **simulation** et **données réelles**

Mesure correcte mais des **échos de sols** sur la partie aval du BV de l'Yzeron, à **filtrer**

Site de Saint-Nizier d'Azergues : 2006 - 2011

Correction des échos de sols par Météo-France : **mesure précise**

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

1ère CONFERENCE THEMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

Utilisation du radar météorologique

Par rapport aux seuls pluviomètres (à gauche)

amélioration significative de la connaissance du champ pluvieux

Interpolation pluviomètres Grand Lyon Données radar corrigées par les pluviomètres

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

1ère CONFERENCE THEMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

Couplage des données radar avec les données au sol

Deux étapes

modélisation de la mesure :
 $\text{intensité_estimée} = f(\text{réflectivité})$

correction pluviométrique :
 $\text{intensité corrigée} = g(\text{intensité estimée, pluviométrique})$

- Usuellement, la correction par les pluviomètres est une règle de trois sur la quantité de pluie globale.
- La variabilité relative (C_v) est conservée.

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques



Couplage des données radar avec les données au sol

Nouvelle approche

- Nous proposons de mettre en relation
 - la réflectivité radar et les mesures d'intensité de pluie au sol *qui correspondent à la même fréquence de dépassement empirique* (correction dite quantile-quantile ou par d'ajustement des distributions).
 - correction plus forte, ici possible car le réseau est assez dense.
 - en essence le radar n'amène « plus que » la localisation (et c'est beaucoup !).
- Amélioration significative des débits simulés.



Deuxième piste : reconstruction des pluies par simulation conditionnée

Motivations :

Les données radar ne sont pas absolues (difficultés de la mesure quantitative)

Ne sont pas toujours disponibles (impossible de remonter loin dans le passé).

Comment reconstruire les pluies, notamment anciennes, en utilisant uniquement l'information des pluviomètres ?

La variabilité des pluies est telle que la reconstruction précise de la pluie ayant existé paraît définitivement inaccessible.

Si on considère la pluie comme un phénomène variable spatialement et temporellement, et connu en certains points seulement...

... de multiples reconstructions seront légitimes ; le passé n'apparaît plus unique : prix à payer, et mode d'expression, de l'incertitude.



Simulation (en général)

Simulation

- Respecte la variabilité attribuée aux pluies réelles

Un corpus technique existe

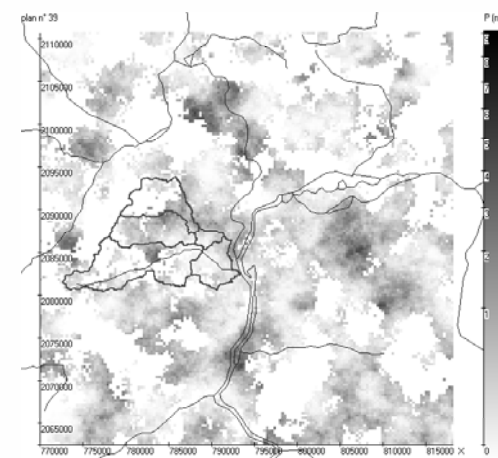
- Géostatistique

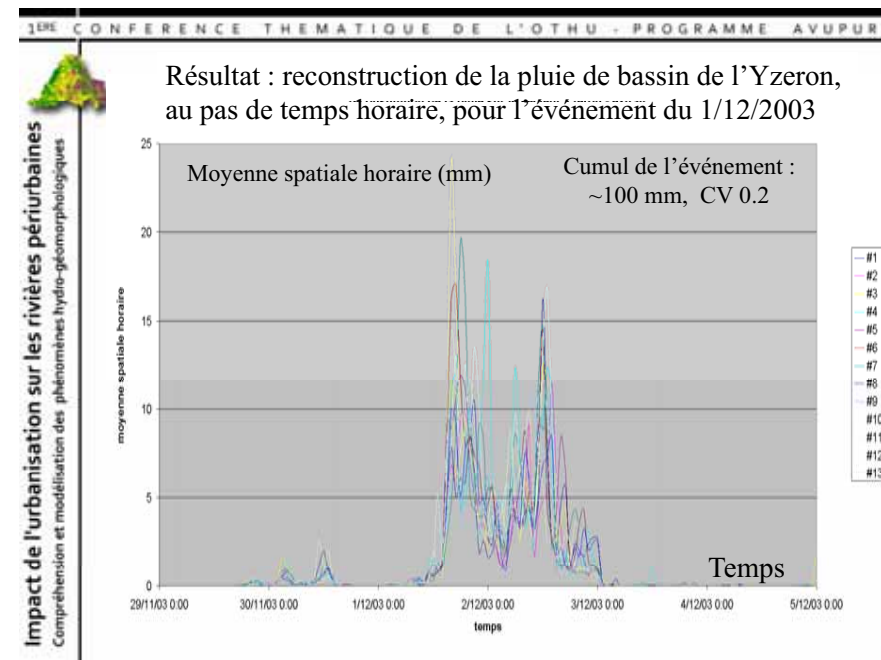
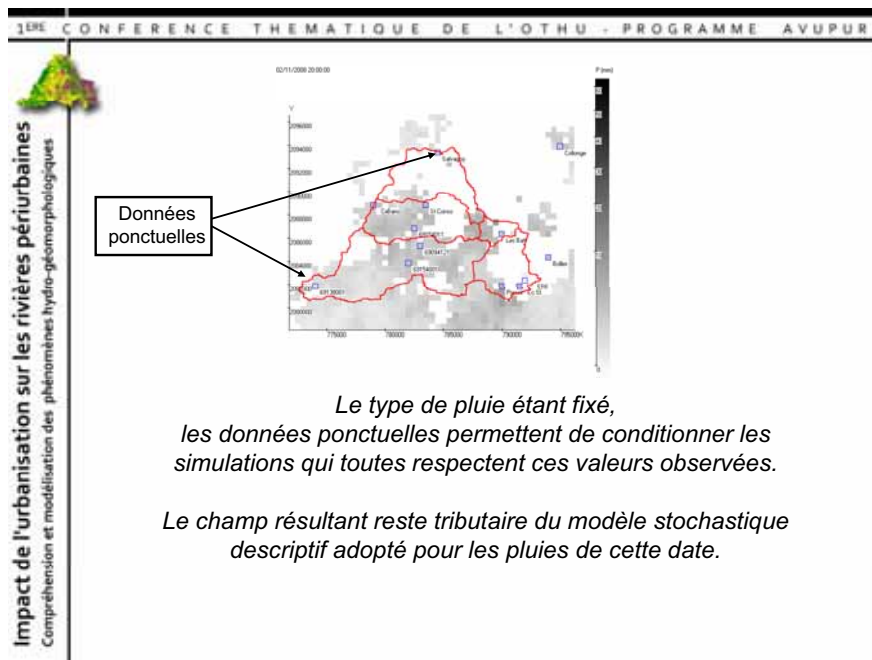
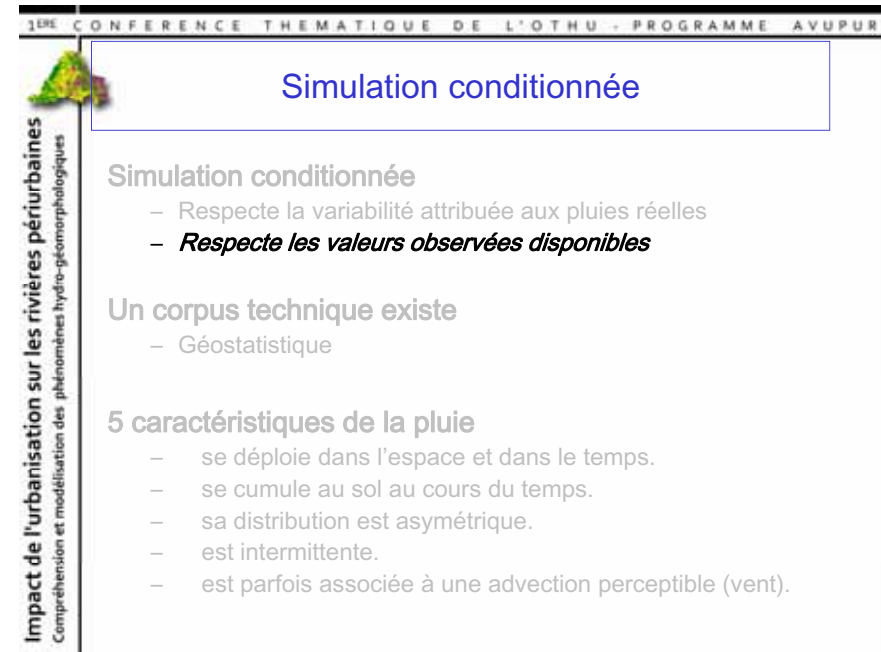
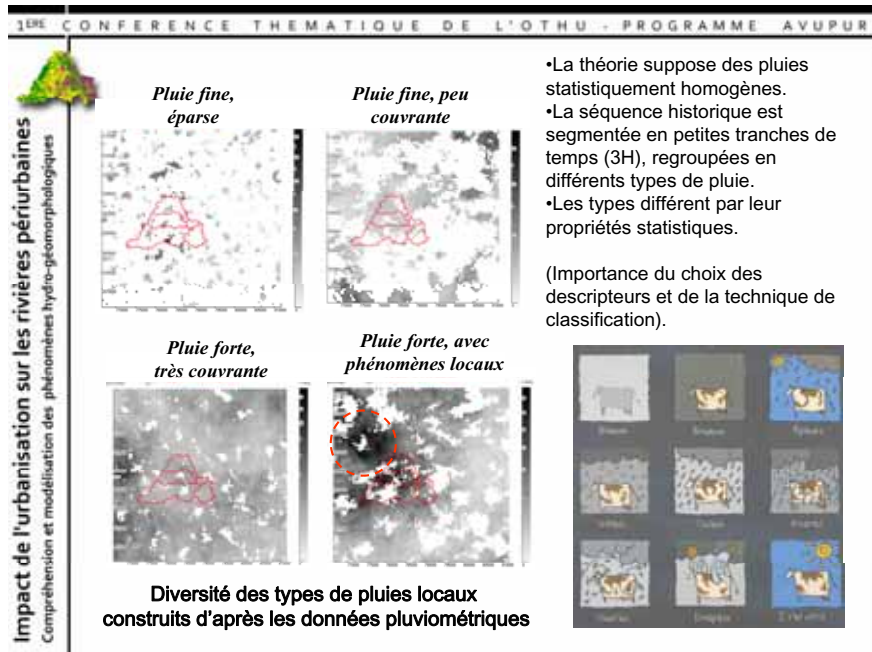
5 caractéristiques de la pluie

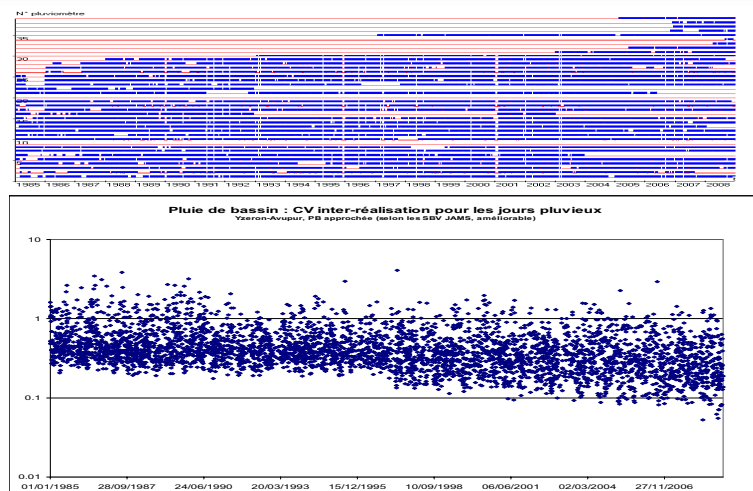
- se déploie dans l'espace et dans le temps.
- se cumule au sol au cours du temps.
- sa distribution est asymétrique.
- est intermittente.
- est parfois associée à une advection perceptible (vent).



Exemple d'une telle simulation







Reconstitutions nettement plus resserrées sur la période récente.
Ceci suggère que le renforcement du réseau a été bénéfique
De plus amples analyses restent nécessaires

Résultats et Perspectives

Pour les fusions radar & pluviomètres

- une méthode améliorée de correction des lames d'eau radar, la correction quantile quantile.
- une estimation quantitative beaucoup plus finement spatialisée que ce que permettent les seuls pluviomètres.

Résultats et Perspectives

Pour les simulations conditionnelles

- 64 reconstitutions (horaires, kilométriques, 1985-2008) couvrant le Grand Lyon et l'Yzeron ; 1 Go par reconstitution.
- Les reconstitutions sont significativement plus resserrées sur la période récente. Le renforcement du réseau a été essentiel, mais de plus amples analyses restent nécessaires.

Premier examen hydrologique

- Quelques pluies reconstituées appliquées à des modèles de L'Yzeron
 - JAMS, modèle distribué, simplifié, déterministe sans calage (F. Branger)
 - GR4, modèle conceptuel global, calé (AL Jeanpierre).
- Comparés aux simulations de référence, les résultats sont contrastés.
 - ⇒ années 2003-2004 : **amélioration** très nette du critère de Nash.
 - ⇒ années 1995-2004 : **dégradation** très nette du critère de Nash.
- ⇒ Conclusions provisoire :
 - ⇒ reconstitutions biaisées et/ou trop dispersées pour les périodes anciennes.
 - ⇒ technique puissante, mais restant exigeante en matière de données locales

Résultats et Perspectives

Quelques axes possibles

- Apport de la géostatistique à la fusion radar-pluviomètres
- Améliorations du modèle stochastique ; par exemple pour tenir compte du gradient altitudinal qui existe sur certains types de temps ; volonté de réduire la dispersion des simulations conditionnées sur les périodes anciennes.
- Rapprochement aux débits générés permettant d'accepter certaines reconstitutions et d'en rejeter d'autres (évolution vers une estimation conjointe).

Tout ceci est également passionnant...

... on acceptera donc les priorités qui ressortiront de l'évolution du consortium de recherche en échange avec « les opérationnels »



Comment cartographier l'occupation des sols et son évolution pour le suivi des phénomènes hydrologiques ?

C. JACQUEMINET, S. KERMADI et K. MICHEL
UMR CNRS 5600 EVS, Université de Saint Etienne

→ fiche technique OTHU 24

Comment cartographier l'occupation du sol et son évolution pour le suivi des phénomènes hydrologiques ?

Jacqueminet C., Kermadi S. , Michel K. , Béal D., Gagnage M., Université de Lyon, UMR CNRS 5600 EVS

Cette étude sur la cartographie de l'occupation du sol répond à deux objectifs :

- Fournir une information appropriée sur l'occupation du sol pour la modélisation du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant à une échelle fine (type de couvert végétal, surfaces agricoles, composition et organisation des surfaces artificialisées) ;
- Restituer l'évolution de l'occupation du sol pour alimenter la réflexion sur les changements et les processus qui affectent un bassin versant et influent sur son régime hydrologique.

Le développement méthodologique consiste à analyser les potentialités de capteurs à très haute résolution pour traduire l'hétérogénéité des surfaces à l'échelle la plus fine possible. Plusieurs méthodes de cartographie, manuelles et automatisées, ont été élaborées.

Cette étude développée dans le cadre du programme AVuPUR, a pour terrain d'application le bassin-versant de l'Yzeron, localisé dans la périphérie ouest de Lyon.

La cartographie de l'occupation du sol actuelle

De nombreuses bases de données du type Corine Land Cover (CLC) renseignent sur l'occupation du sol. Leur emploi s'est avéré limité pour deux raisons :

- 1/ leur échelle, trop grossière, par exemple dans le cas de CLC ;
- 2/ une nomenclature basée sur l'usage des surfaces (ex : bâti urbain discontinu) ne permettant pas d'appréhender l'hétérogénéité des surfaces à une échelle fine (jusqu'à la parcelle foncière).

Trois capteurs sont étudiés :

- des images aériennes - BDOrtho® IGN - (0.50 m de résolution, information dans le visible) du 5/05/2008 ;
- une image satellite Quickbird (2.44 m, visible et proche infrarouge) du 31/08/2008 ;

- une image satellite Spot (2.50 m, visible et proche infrarouge) du 22/08/2008.

Pour chaque image, une méthode de traitement d'images automatisée est mise au point. Ces méthodes sont développées à partir de logiciels et d'algorithmes différents.

L'information extraite renseigne sur les caractéristiques biophysiques des surfaces (tableau 1). La comparaison des trois images, enregistrées à trois dates différentes du calendrier agricole, permet également de reconnaître les parcelles agricoles en végétation permanente des parcelles soumises à une alternance sol nu / couvert végétal.

Le bilan du traitement des trois images montre :

- La nécessité de disposer d'une information dans le proche infrarouge pour renseigner sur les caractéristiques du couvert végétal et mesurer des indices (ETP, LAI) discriminants ;
- Le rôle de la résolution spatiale, notamment pour les surfaces artificialisées, où la très haute résolution de la BDOrtho® IGN (0.50 m) apporte une restitution du bâti et de la voirie très précise, alors que ces objets apparaissent agrégés sur les cartes issues des images satellites (2.44 et 2.50 m). Ces variations de restitution affectent les mesures de superficie réalisées ensuite.
- L'apport de l'algorithme de segmentation orienté objet pour extraire plus précisément les contours des objets (bâti, parcellaire agricole...).

Occupation du sol et variables hydrologiques

L'information sur l'occupation du sol alimente la modélisation hydrologique sous plusieurs formes :

- Chaque type d'occupation du sol est interprété en termes de perméabilité et, pour la végétation, d'ETP également ;

- Chaque unité hydrologique de référence, par exemple, le sous bassin versant, est décrite par : son occupation du sol dominante (forêt, rurale ou urbaine), le pourcentage de surfaces imperméabilisées...

La cartographie de l'évolution de l'occupation du sol

Deux méthodes de cartographie multi-temporelle sont conduites à partir de deux types d'images : 1/ des photographies aériennes IGN de 1970, 1990 et 2008 et 2/ des images Spot de 1990, 1999 et 2008.

A partir des photographies aériennes, la cartographie rétroactive (de la date la plus récente à la date la plus ancienne) est réalisée par photo-interprétation manuelle. La typologie extraite comporte une information sur l'occupation du sol mais également sur ses usages. Les différents types de surfaces artificialisées sont distingués (habitat pavillonnaire, zone d'activités...) (tableau 1). Les images anciennes en N/B, de qualité moyenne, ne peuvent être interprétées que manuellement, les méthodes automatisées sont inefficaces sur de telles images. Cette digitalisation est coûteuse en temps de travail et ne peut-être menée sur de grandes superficies.

L'usage des images satellites et de méthodes automatisées constitue une alternative intéressante. Cependant, la principale difficulté d'une étude multi-date réside dans le changement de résolution des capteurs au cours du temps. Dans ce travail, le choix a été fait de rééchantillonner toutes les images à une même résolution médiane.

Lors d'une analyse quantifiée des superficies, il importe d'être attentif à la nature et à la résolution de l'information produite. La nomenclature des cartes construites par digitalisation manuelle n'est pas identique à celle des cartes élaborées par les méthodes automatisées. Les objets (bâti, voirie) extraits automatiquement sont différents des entités « habitat, zone d'activité », reconnus par photo-interprétation. (tableau 1 et diaporama).

Conclusion

Cette étude atteste de l'intérêt des images à très haute résolution pour fournir une information appropriée à l'analyse de paramètres hydrologiques. Les méthodes automatisées sont aisément reproductibles mais apportent une information essentiellement biophysique sur les surfaces. L'emploi de la photo-interprétation manuelle présente l'avantage de renseigner sur les usages et en général, de produire une information spécifique aux besoins de l'utilisateur.

Tableau 1 : Nomenclatures des cartes d'occupation du sol réalisées :

2008		Images Spot	Photos aériennes
BDOrtho® IGN	Quickbird, Spot	1990 - 2008	1970 - 2008
Traitements d'image automatisés			Photo-interprétation manuelle
Forêt	Conifères	Conifères	Forêt, bois
Herbacées	Feuillus	Feuillus	Vergers, vignes
Sols nus	Herbacées I*	Herbacées I*	Prairies et cultures
Eau	Herbacées II*	Herbacées II*	Jardins, maraîchage
Piscines	Sols nus	Sols nus	Eau
Bâti	Eau	Eau	Habitat individuel
Routes, parkings	Bâti	Bâti	Habitat collectif
	Routes, parkings	Routes, parkings	Centre ou pôle
			Grandes propriétés
			Zones d'activités
			Equipements divers
			Exploitations agricoles
			Voirie

* Ces deux classes d'herbacées sont distinguées selon l'intensité de l'activité chlorophyllienne du couvert végétal

Publications des auteurs

Beal D., Gagnage M., Jacqueminet C., Kermadi S., Michel K., Jankowsky S., Branger F., Braud I., 2009. Cartographie de l'occupation du sol pour la modélisation hydrologique spatialisée du cycle de l'eau en zone périurbaine. Actes

du XXVII^e congrès INFORSID, Atelier SIDE2009 « Systèmes d'Information et de Décision pour l'Environnement », Toulouse, France, 26 mai 2009, 23-32

Jacqueminet, C., Kermadi, S., Michel, C., Jankowsky, S., Braud, I., Branger, F., Béal, D., Gagnage, M., 2010. Three very high resolution optical images for land use mapping of a suburban catchment: input to distributed hydrological. EGU General Assembly, 2-7 May 2010, Vienna, Austria, *Geophysical Research Abstracts*, vol. 12, EGU2010-6926, poster

Kermadi S., Florent R., Jacqueminet C., Michel K., 2010, Inondations et occupation du sol dans un bassin versant périurbain : l'Yzeron (ouest lyonnais), *Actes du colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, n°23, Rennes, pp. 313-318

Fiche technique OTHU n°, Méthodes de cartographie de l'occupation du sol et de son évolution pour le suivi des phénomènes hydrologiques de bassins versants périurbains (2011) (en préparation)

Jacqueminet C. , Kermadi S. , Michel K. , Béal D. , Gagnage M. , Branger F. , Jankowsky S. , Braud I., 2011. Land cover mapping using aerial and VHR satellite images for distributed hydrological modelling of periurban catchments: application to the Yzeron catchment (Lyon, France). *In Journal of Hydrology*, special issue dedicated to the "Hydrology of peri-urban rivers: processes and modelling".(en préparation)

Les besoins du suivi hydrologique

- Evaluer l'impact de l'occupation du sol et de ses changements sur le fonctionnement hydrologique du bassin / modélisation **à une échelle fine** (parcelle cadastrale) 
- Renseigner sur les propriétés hydrologiques des surfaces :
 - Leur hétérogénéité et les chemins de l'eau
 - Leurs capacités d'infiltration / imperméabilisation
 - La nature des couverts végétaux (sempervirents, décidus, permanents ou non) pour l'évaluation d'indices (ETP, LAI)
- Renseigner sur les usages / évolution et prospective

Cartographie de l'occupation du sol

- Objectifs méthodologiques :
 - Quelles images de base : résolution, information spectrale ?
 - Quels méthodes de cartographie : automatisée(s) ou manuelle ? leur reproductibilité ?
 - **Occupation actuelle** : analyse des potentialités de capteurs optiques à très haute résolution
 - **Occupation multi-temporelle** : photographies aériennes ou images satellites ?
- Application : le BV de l'Yzeron (Lyon ouest)

Cartographie de l'occupation du sol actuelle (2008)

- Comparaison de trois images :

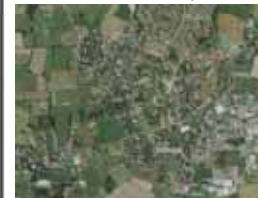
Images	BDOrtho® IGN	QuickBird 2	SPOT 5
Résolution	0.50 m	2.44 m	2.50 m
Information spectrale	Visible	Visible + Proche-infrarouge	Visible + Proche-infrarouge
Date d'acquisition	5 mai	31 août	22 septembre
Traitement numérique	Segmentation orientée objet (@Matlab)	Segmentation orientée objet (@Definiens)	Classification pixellaire (@ ENVI)
Nombre de types d'occupation du sol extraits	6 ex : Forêt	8 Conifères Feuillus	8 Conifères Feuillus

Occupation du sol actuelle (2008)

BD ORTHO® IGN, 5 mai

QuickBird 2, 31 août

SPOT 5, 22 septembre



Clas° orientée objet (@Matlab)

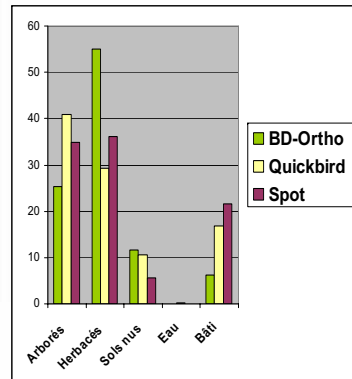
Clas° orientée objet (@Definiens)

Clas° pixellaire (@ ENVI)



■ Arbres
 ■ Herbacées
 ■ Sols nus
 ■ Eau
 ■ Bâti
 ■ Routes, parkings
 0 250 500 m

Occupation actuelle : bilan

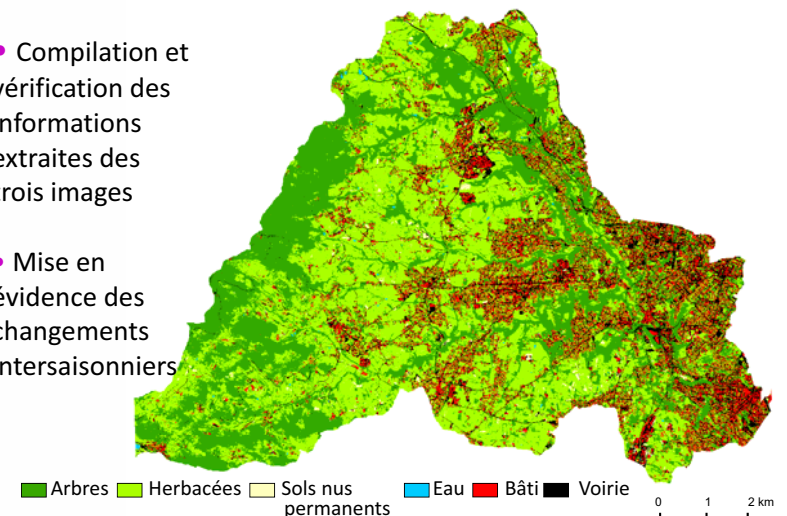


Pourcentages de pixels par classe selon le capteur

- La résolution :
 - 0.50 m : objets bâtis délimités finement
 - 2.50 m : objets bâtis agrégés
- La date de l'image :
 - Herbacées +/- couvrantes / pratiques agricoles
- Méthodes
 - Segmentation orientée objet adéquate pour l'extraction fine des objets bâtis

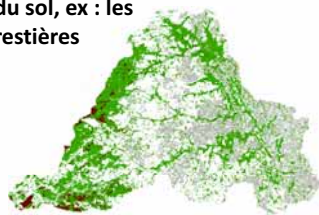
Occupation actuelle : synthèse

- Compilation et vérification des informations extraites des trois images
- Mise en évidence des changements intersaisonniers

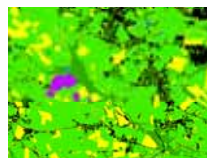


Les informations extraites

- Distribution spatiale des types d'occupation du sol, ex : les superficies forestières



- Cultures annuelles et pérennes



- Taux d'imperméabilisation des surfaces

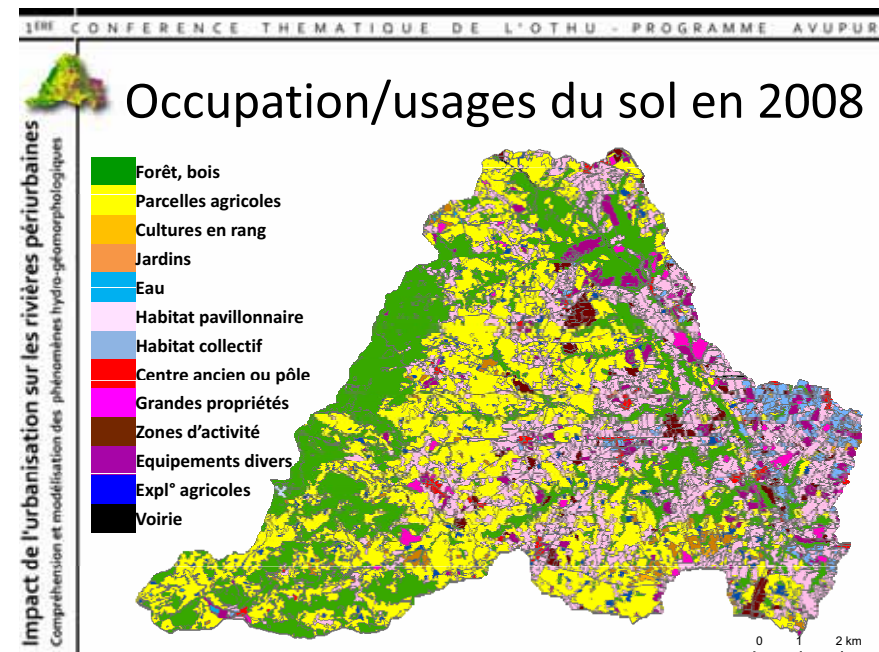
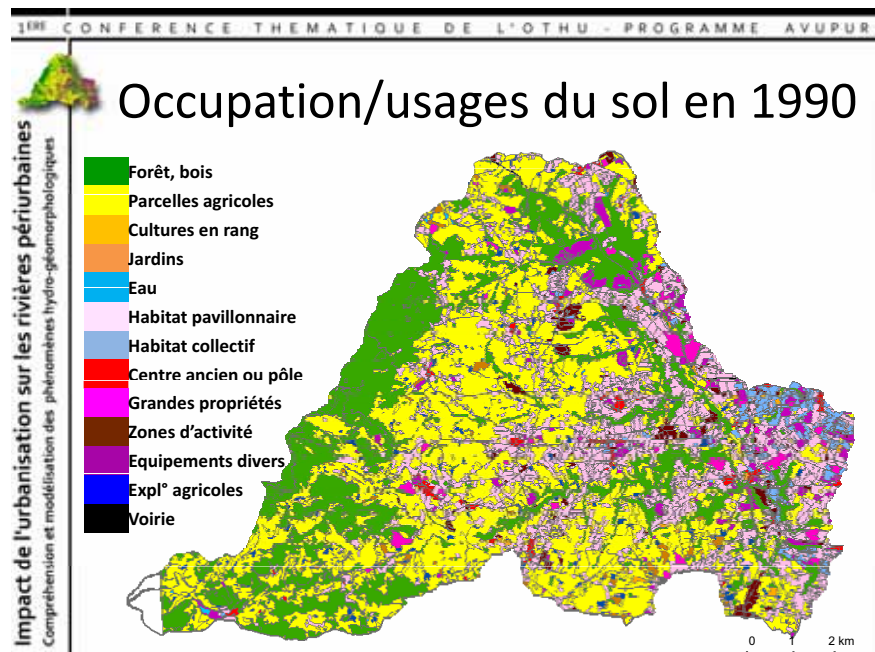
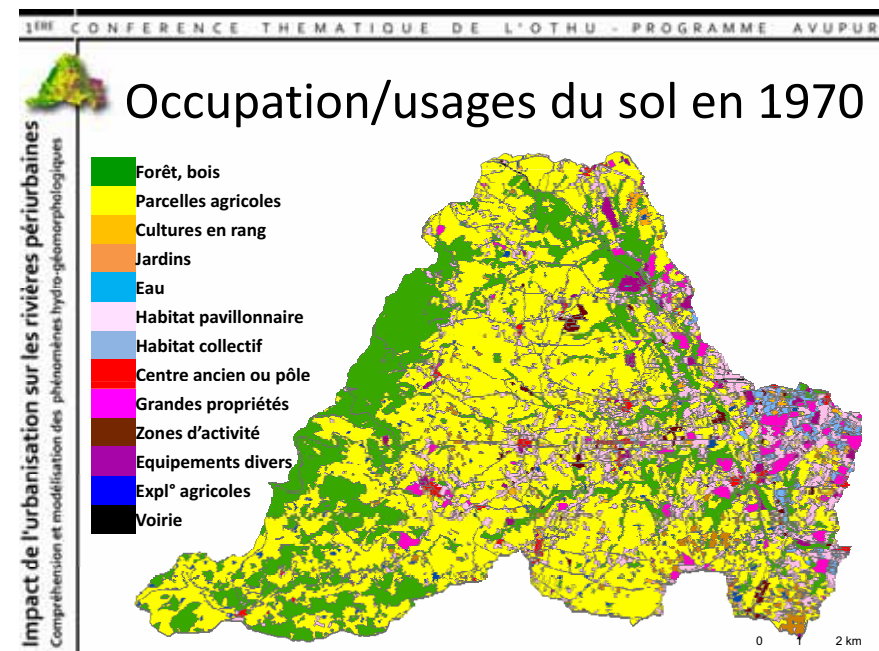
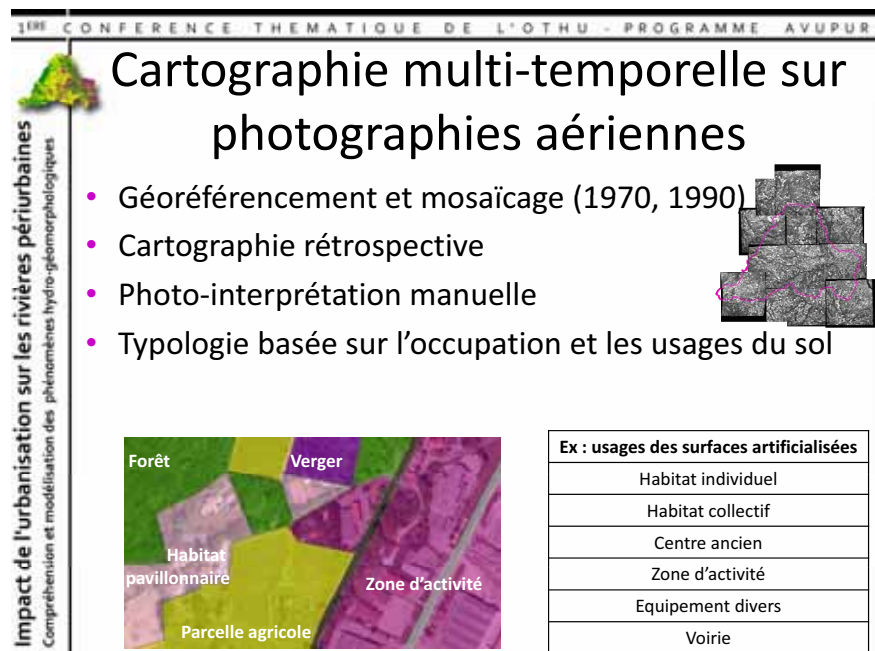
Occupation du sol	Propriété hydrologique
Arbres	Perméable
Herbacées	
Sols nus	
Eau	Imperméable
Bâti	
Voirie	



Cartographie multi-temporelle de l'occupation du sol

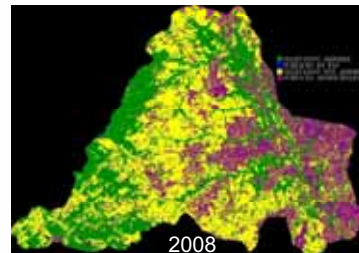
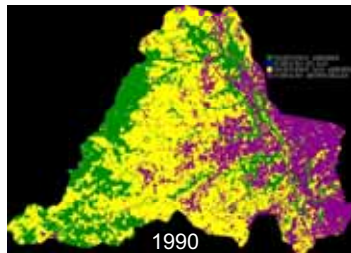
- Méthode 1 : photographies aériennes de 1970 à 2008
Pas de temps de 20 ans
- Méthode 2 : images satellites Spot de 1990 à 2008
Pas de temps de 10 ans

Photographies aériennes	2008 : couleurs naturelles	1970 à 1990 : N/B
Images satellites Spot	2008, résolution : 2.50 m	1990 à 1999, R : 10 et 20 m



Cartographie multi-temporelle sur images satellites Spot

- Traitement numérique semi-automatisé
- Rééchantillonnage des images à 10 m
- Typologie basée sur les propriétés biophysiques des surfaces



Conclusion : cartes réalisées

Occupation du sol

Usages du sol



Traitement automatisé

Digitalisation manuelle

Conclusion : apports des méthodes

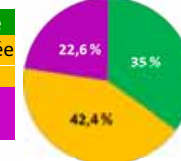
- La cartographie des **propriétés biophysiques** à partir de l'imagerie aérienne et satellite est automatisée et reproductible sur des secteurs étendus
 - des **objets** dont on évalue les propriétés hydrologiques : capacité d'infiltration, évapotranspiration...
- La cartographie des **usages** nécessite une analyse visuelle sur des images à très haute résolution = méthode manuelle
 - des **entités spatiales** qui informent sur les pratiques des usagers du bassin-versant : délimitation, intensité...

Quantification des changements

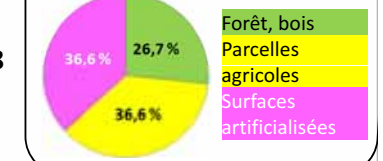
Occupation du sol

Usages du sol

Végét. Arborée
Végét. Herbacée
Sols nus
Bâti,
Voorie



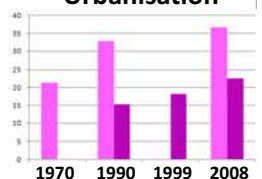
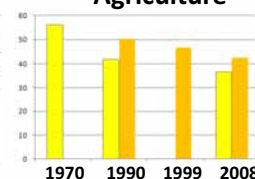
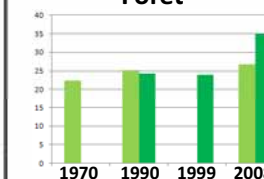
2008

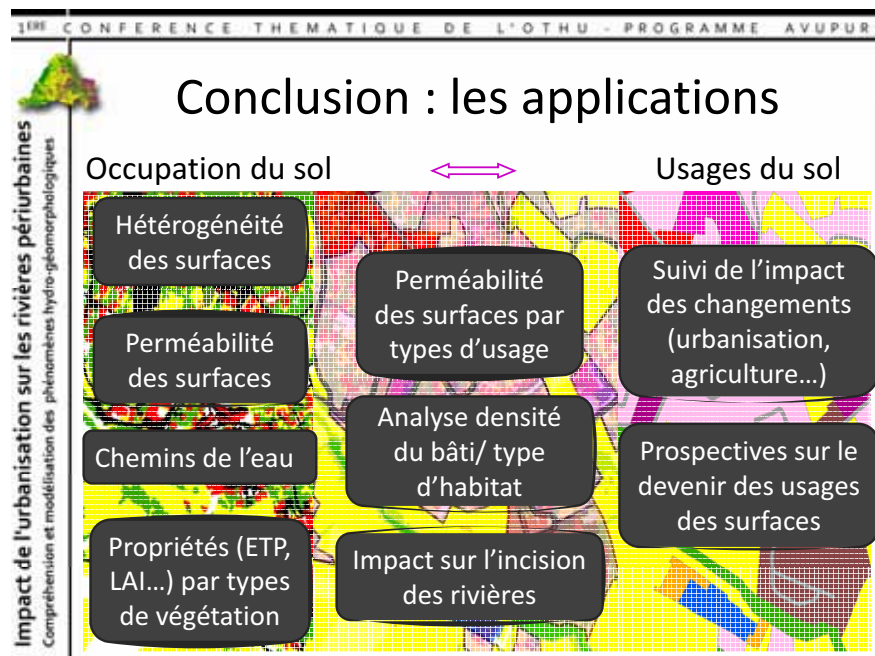


Forêt

Agriculture

Urbanisation





1ère CONFERENCE THEMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

Quantification des changements

Photographies aériennes				Images satellites Spot			
Usages du sol (%)	1970	1990	2008	Occupations du sol	1990	1999	2008
Forêt, bois	22.4	25.2	26.7	Végétation arborée	24.3	23.9	35
Parcelles agricoles	56.2	41.8	36.6	Végétation herbacée, sols nus	50.4	46.7	42.4
Surfaces en eau	0.02	0.14	0.16	Surfaces en eau	0.01	0.01	0.01
Surf. artificialisées	21.4	32.8	36.6	Bâti, voirie	15.2	18.2	22.6



Les apports d'un atelier de prospective territoriale pour anticiper les changements d'occupation du sol

C. DODANE, T. JOLIVEAU et A. HONEGGER
UMR CNRS 5600 EVS

→ fiche technique OTHU 25

Les apports d'un Atelier de prospective territoriale pour anticiper les changements d'occupation du sol

Dodane C. Joliveau T., Honegger A., UMR CNRS 5600, Université de Saint Etienne

Étudier et modéliser l'impact de l'urbanisation et de l'anthropisation passée et future des bassins versants périurbains sur les flux d'eau nécessite de pouvoir apprécier les évolutions de l'occupation du sol à long terme au moyen de simulations spatiales. La simulation des évolutions de l'occupation du sol future est elle-même dépendante de la compréhension et de la prise en compte des facteurs à l'origine des changements de l'occupation du sol dans un bassin versant.

Dans le cadre du projet de recherche ANR AVuPUR, un Atelier a été mis en place. Cet Atelier relève d'une démarche prospective, qui consiste à combiner prospective territoriale et simulation spatiale.

La mise en œuvre de cette démarche constitue le principal développement méthodologique de ces travaux. À l'issue du projet de recherche, ce dispositif pourra être approfondi au service des collectivités territoriales et de leurs partenaires institutionnels.

Objectifs

Le premier objectif est de produire une analyse partagée des problèmes actuels, des tendances et des facteurs de changement de l'occupation du sol.

Le deuxième consiste à anticiper les évolutions de l'occupation du sol par le moyen de scénarios à long terme.

Enfin, le troisième objectif repose sur l'intégration des différents scénarios élaborés avec les acteurs du territoire dans les simulations des évolutions de l'occupation du sol future.

Les résultats obtenus sont des cartes des usages du sol en 2030. Elles peuvent être utilisées pour intégrer l'évolution de l'imperméabilisation des

sols urbanisés à long terme dans la modélisation des flux d'eau dans un bassin versant périurbain.

La démarche

L'Atelier de prospective territoriale

L'Atelier de prospective territoriale a réuni une quinzaine d'acteurs du territoire et d'experts thématiques dans les domaines de l'eau, de l'agriculture, de la forêt, de l'environnement, de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire. Il s'est déroulé en mai et juin 2010, durant trois matinées, dans une commune du bassin versant de l'Yzeron.

Le principe de la première séance repose sur l'organisation d'un débat entre les experts participants sur le devenir du bassin versant, à partir de supports cartographiques variés qui présentent les dynamiques passées de l'occupation du sol dans le bassin versant entre 1990 et 2008.

Ce travail de diagnostic collaboratif très fouillé produit un document qualitatif de type prospectif rassemblant les différents points de vue du collectif. Il permet d'organiser les données nécessaires à la représentation de différentes thématiques, ainsi que de réfléchir sur les facteurs ayant déterminé les changements de l'occupation du sol dans le passé et de construire des schémas explicatifs pour le futur.

La deuxième séance est dédiée principalement à l'écriture de scénarios prospectifs d'évolution de l'occupation du sol à partir de l'analyse partagée des problèmes actuels, des tendances et des facteurs de changement de l'occupation du sol.

La troisième séance est consacrée à la présentation et à la discussion des simulations spatiales informatisées produites entre temps en laboratoire, car elles demandent une importante expertise technique.

Modélisation et simulation

L'outil utilisé est le Logiciel Land Change Modeler (LCM) développé par le Clark Lab de l'Université de Worcester aux États-Unis (logiciel propriétaire).

Les données utilisées proviennent d'une cartographie de l'occupation du sol en 1990 et 2008, réalisée à partir de la digitalisation manuelle de photographies aériennes de l'IGN (Jacqueminet C., Michel K., Kermadi S., 2010).

Les évolutions de l'occupation du sol passée entre 1990 et 2008 ont été modélisées à partir de facteurs géographiques. La première difficulté est de pouvoir construire des modèles des transitions passées statistiquement valides. La seconde difficulté est de construire des simulations tenant compte des éléments issus de la réflexion prospective. Pour cela, il est possible de jouer sur les paramètres disponibles dans l'outil cartographique. Premièrement, la matrice de transition permet de fixer le rythme de chacune des transitions d'occupation du sol (par exemple pour simuler une densification). Deuxièmement, le paramétrage des zonages et des effets offre la possibilité de freiner ou d'accélérer une ou plusieurs transitions dans certaines zones ou à une certaine distance d'un lieu. Il est possible d'intégrer dans la simulation les zonages des Plans d'Occupation des Sols et des Plans Locaux d'Urbanisme, notamment en prenant en compte les futures zones à urbaniser ou bien en respectant les zonages agricoles et naturels qui limitent ou interdisent les nouvelles constructions. Les effets sont liés à des projets ou à des situations et dépendent plus ou moins directement de réalités sociétales : l'affirmation d'une polarité accrue dans un centre urbain donné, l'instauration d'une gare ou d'un échangeur routier, etc.

C'est par l'intermédiaire de variantes sur un scénario tendanciel que les discussions de l'Atelier de prospective territoriale sont traduites en simulations spatiales à l'horizon 2030.

Enfin, les résultats des simulations spatiales sont soumis aux acteurs du territoire afin de collecter leurs avis. L'objectif est d'obtenir une validation d'ensemble des travaux par les participants de l'Atelier, en respectant les quatre critères de validation de la prospective territoriale : pertinence, cohérence, vraisemblance, transparence (Godet, 1991).

Il ne faut pas sous-estimer le temps nécessaire pour conduire une telle démarche prospective, d'autant plus dans un cadre expérimental qui avait pour objectif de concevoir la méthodologie de la démarche (atelier de prospective territoriale, modélisation et simulation). Sans comptabiliser ce temps de conception, et sous réserve de la disponibilité de données sur deux dates d'occupation du sol, il semble raisonnable de penser que la démarche prospective peut se dérouler sur 4 à 6 mois.

Les apports

Un Atelier de prospective territoriale a pour objectif principal d'enrichir la connaissance générale du système territorial sur lequel il porte. C'est un outil collectif permettant de « faire jouer » et d'« activer » la réflexion en s'appuyant sur trois types de méthodes : la constitution d'un jeu de données multi-temporelles sur l'occupation du sol, la mobilisation de techniques de simulations spatiales et l'élaboration d'une démarche prospective.

Il produit des résultats à trois niveaux :

- Une amélioration de l'information (données) et un approfondissement des dispositifs d'observation du territoire,
- Une meilleure connaissance des processus spatiaux passés et en cours, afin d'anticiper les processus futurs (relations dynamiques),
- Une prise de recul sur les outils de la planification territoriale en éprouvant leur efficacité.

Références

Dodane C., Joliveau T., Honegger A., Molines N., 2010. Quelle occupation du sol dans le bassin versant de l'Yzeron en 2030 ? Premiers résultats d'un atelier alliant prospective territoriale et simulation spatiale. Lyon : Université de Lyon, CNRS – UMR 5600 Environnement Ville Société. Poster.

Godet M., 1991. *De l'anticipation à l'action : manuel de prospective et de stratégie*. Paris : Dunod, 390 p.

Jacqueminet C., Michel K., Kermadi S., 2010. Carte des usages du sol dans le bassin versant de l'Yzeron en 1990. Université de Lyon, UMR 5600 EVS. Cartographie réalisée par digitalisation manuelle d'une mosaïque de photographies aériennes ©IGN en noir et blanc de 1990.

Jacqueminet C., Michel K., Kermadi S., 2010. Carte des usages du sol dans le bassin versant de l'Yzeron en 2008. Université de Lyon, UMR 5600 EVS. Cartographie réalisée par digitalisation manuelle de la BD ORTHO®IGN de 2008.

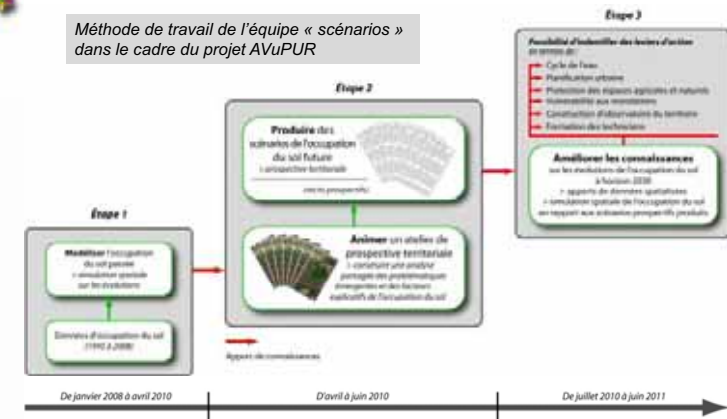
L'objectif de l'équipe

- Anticiper les évolutions de l'occupation du sol par le moyen de scénarios à long terme.

Notre démarche a donc été de combiner prospective territoriale et simulation spatiale dans le cadre d'un Atelier de prospective territoriale.

Anticiper les changements d'occupation du sol

Méthode de travail de l'équipe « scénarios » dans le cadre du projet AVuPUR

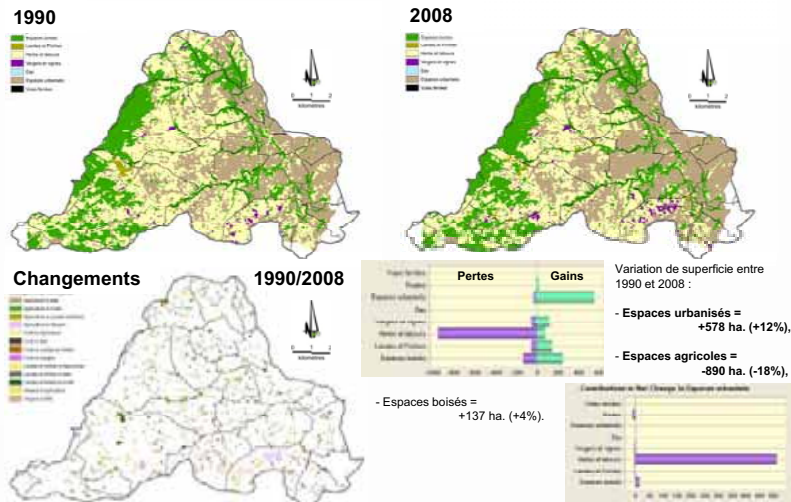


Étape 1 : cartographier et modéliser les évolutions de l'occupation du sol passée (1990 - 2008).

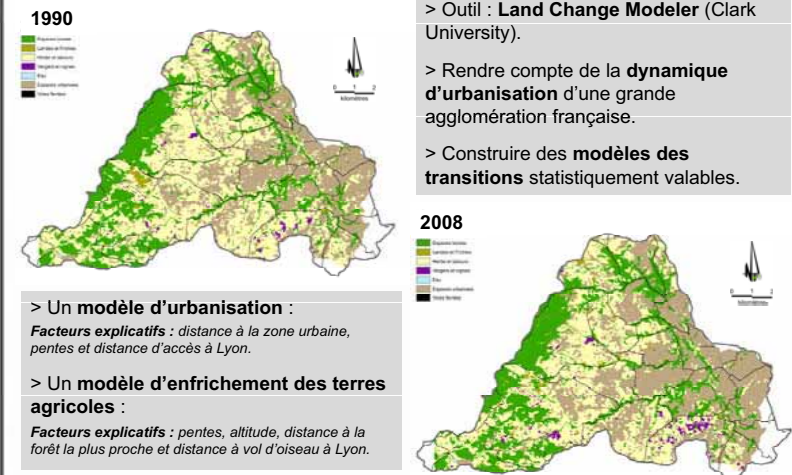
Étape 2 : aboutir à une analyse partagée des problèmes actuels, des tendances et des facteurs de changement de l'occupation du sol et élaborer des scénarios à long terme en Atelier de prospective territoriale pour anticiper les évolutions de l'occupation du sol future.

Étape 3 : simuler les évolutions de l'occupation du sol à horizon 2030 en intégrant les différents scénarios produits avec des experts thématiques et de l'aménagement du territoire.

Étape 1 : modéliser les évolutions de l'occupation du sol passée (1990 - 2008)



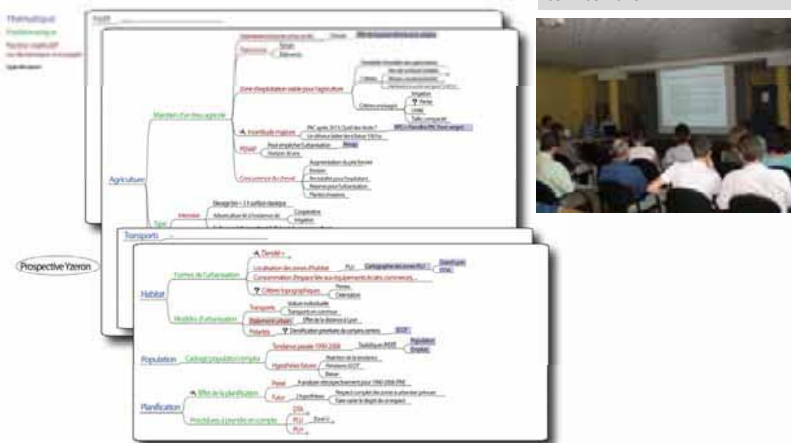
Étape 1 : modéliser les évolutions de l'occupation du sol passée (1990 - 2008)



Étape 2 : élaborer des scénarios de l'occupation du sol future en Atelier de prospective territoriale

Un système des composantes explicatives des évolutions de l'occupation du sol

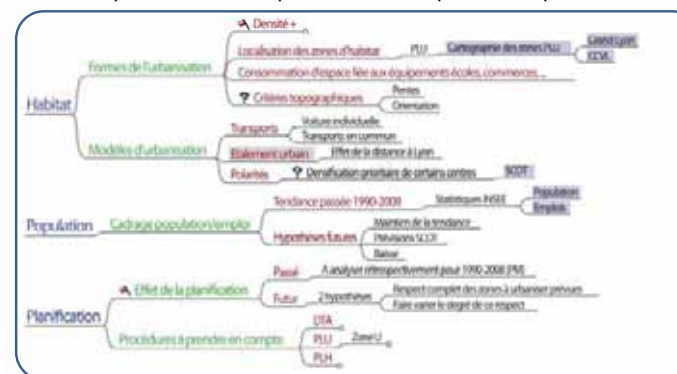
Un atelier de prospective territoriale



Étape 2 : élaborer des scénarios de l'occupation du sol future en Atelier de prospective territoriale

Un système des composantes explicatives des évolutions de l'occupation du sol

Thématique – Problématique – facteurs explicatifs - Spécifications



Étape 2 : élaborer des scénarios de l'occupation du sol future en Atelier de prospective territoriale

Des scénarios consultables sur : <http://e-geo.fr/Yzeron/Accueil.html>

	Rythme des changements dans l'occupation du sol (2008 - 2030) par rapport au passé (1990 - 2008)	Application des règlements	Application d'un effet polarité, déprise agricole	Scénarios 2030
S1	Inchangé	Pas de contrainte réglementaire	Sans effet (image v3360)	S1Aa : densification minimale (tendance), sans contraintes réglementaires de la planification et sans effet.
			Effet déprise agricole (image v3360)	S1Aa : densification minimale (tendance), sans contraintes réglementaires, mais avec effet de déprise agricole.
		Contraintes réglementaires	Sans effet (image v3360)	S1Ba : densification minimale (tendance), avec contraintes réglementaires de la planification, mais sans effet.
			Effet polarité (image v3360)	S1Bb : densification minimale (tendance), avec contraintes réglementaires de la planification et effet de polarité SCOT.
S2	Ralentissement étalement urbain	Contraintes réglementaires	Sans effet (image v3360)	S2Ba : densification accrue, avec contraintes réglementaires de la planification, mais sans effet de polarité.
S3	Accélération déprise agricole	Pas de contrainte réglementaire	Sans effet (image v3360)	S3Aa : accélération de la déprise agricole (enrichissement), sans contrainte réglementaire et sans effet.

Étape 3 : simuler les évolutions de l'occupation du sol à horizon 2030

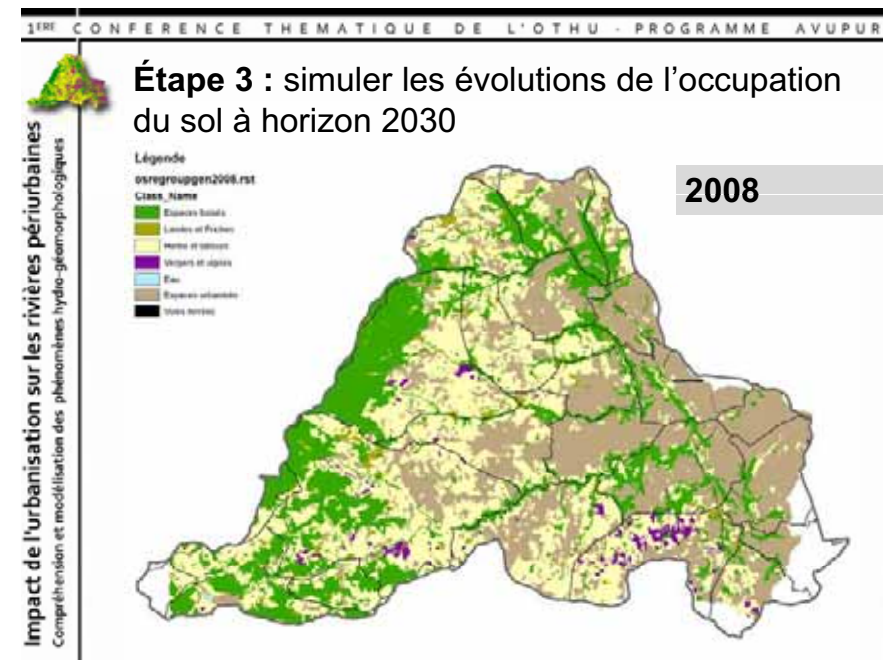
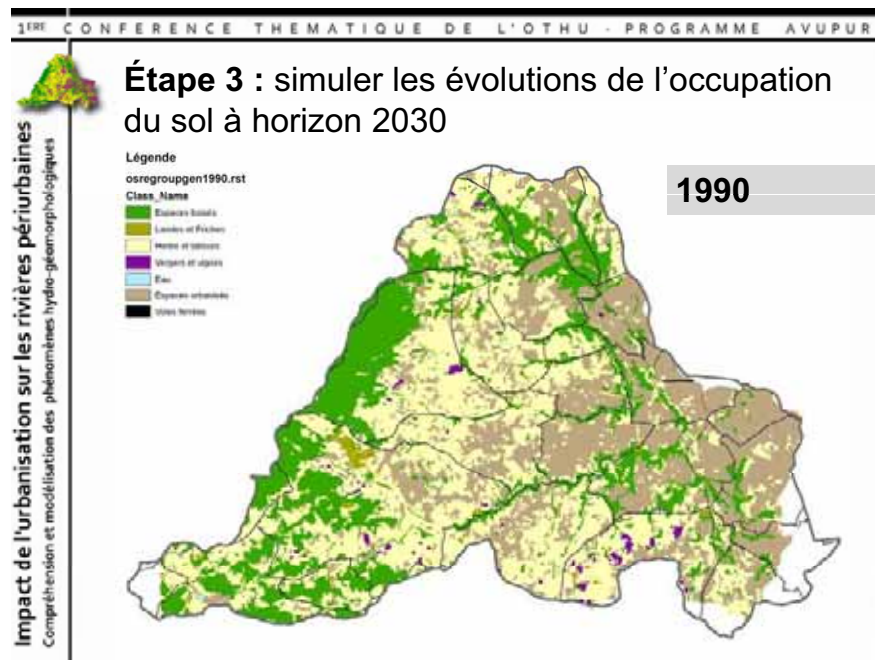
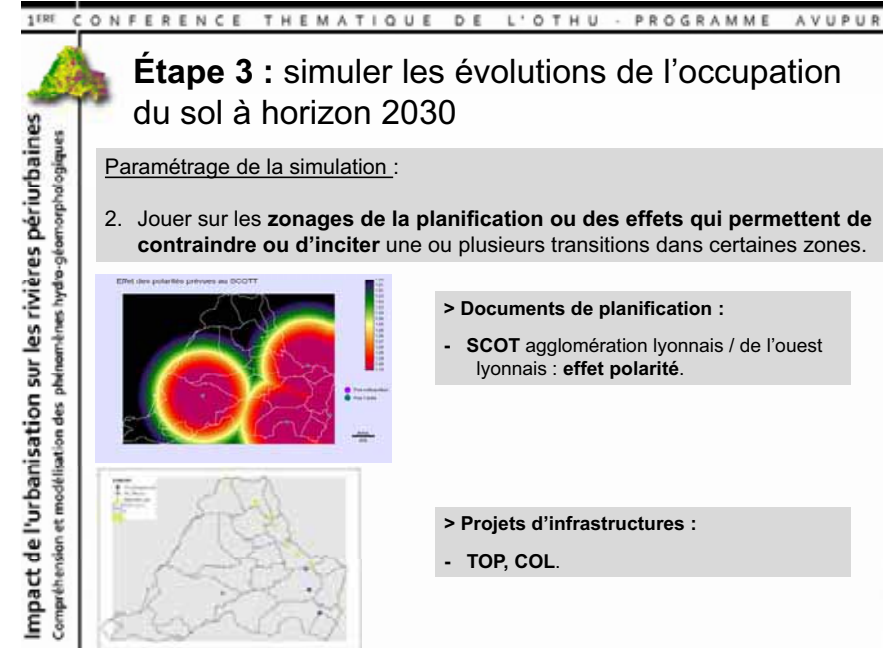
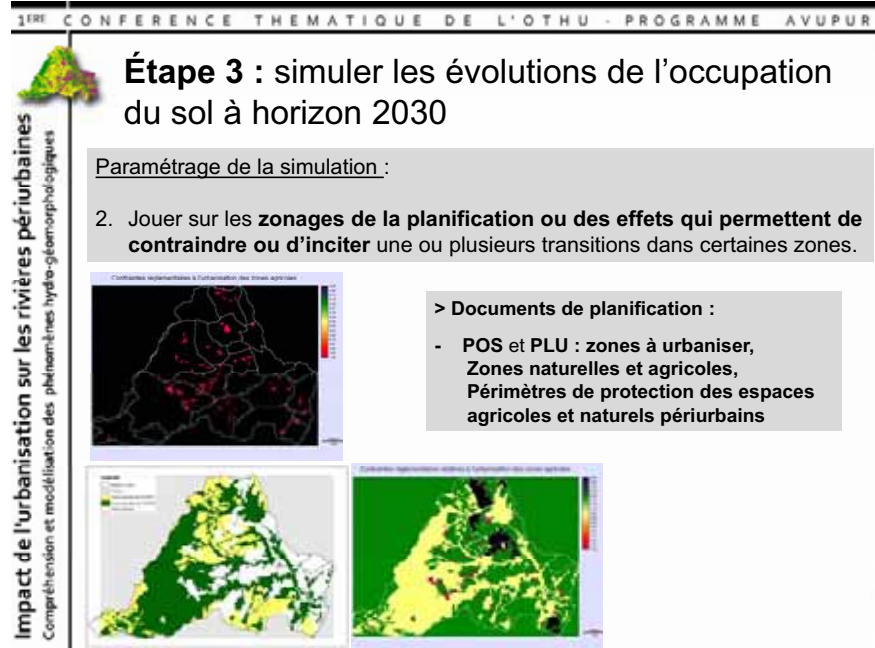
Paramétrage de la simulation :

1. Jouer sur la **matrice de transition** qui permet de fixer le rythme de chacune des transitions d'occupation du sol.

	Espaces boisés	Landes et Friches	Herbe et labours	Vergers et vignes	Eau	Espaces urbanisés
Espaces boisés	0.9553	0.0225	0.0090	0.0007	0.0001	0.0123
Landes et Friches	0.3513	0.4753	0.1442	0.0001	0.0000	0.0292
Herbe et labours	0.0429	0.0178	0.7975	0.0259	0.0004	0.1155
Vergers et vignes	0.0177	0.0079	0.4661	0.4390	0.0000	0.0693
Eau	0.0142	0.0000	0.0148	0.0000	0.9678	0.0032
Espaces urbanisés	0.0045	0.0002	0.0011	0.0000	0.0000	0.9942

Mutation très probable

Mutation peu probable



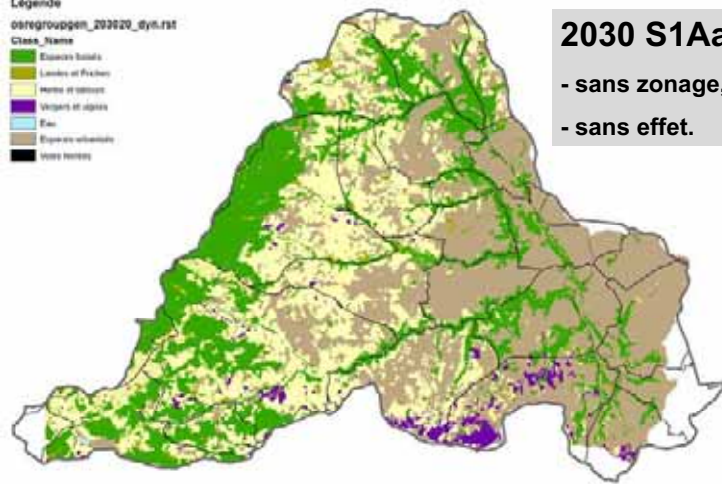
Étape 3 : simuler les évolutions de l'occupation du sol à horizon 2030

Légende
osregroupen_203020_dyn.rst
Classe_Nom

Écospace forestier
Landes et Prairies
Mêles et cultures
Végétation et algues
Eau
Espaces urbanisés
Vieux forêts

2030 S1Aa

- sans zonage,
- sans effet.



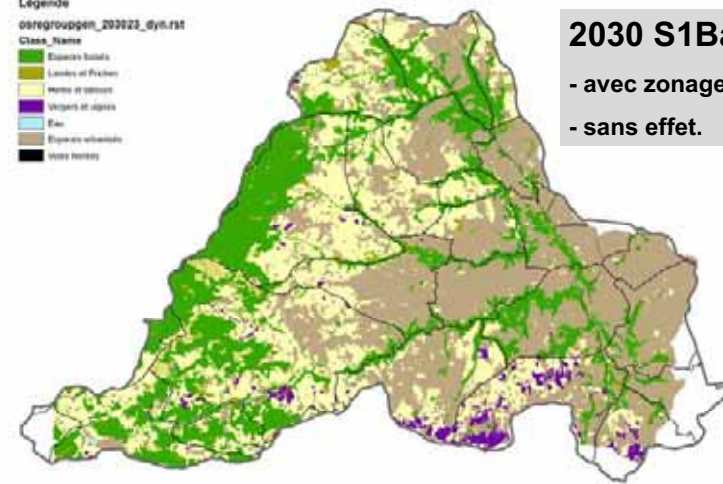
Étape 3 : simuler les évolutions de l'occupation du sol à horizon 2030

Légende
osregroupen_203020_dyn.rst
Classe_Nom

Écospace forestier
Landes et Prairies
Mêles et cultures
Végétation et algues
Eau
Espaces urbanisés
Vieux forêts

2030 S1Ba

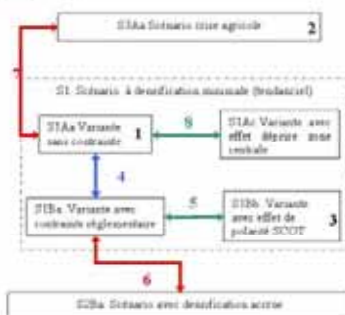
- avec zonages,
- sans effet.



Les apports de l'Atelier de prospective

Des scénarios intégrés dans les simulations spatiales

Comparaisons possibles
Vitesse de changement
Contraintes
Effet



Évolution passée 1990-2008 :
0. 1990 2008

Visualisation des résultats des scénarios sans contraintes réglementaires :

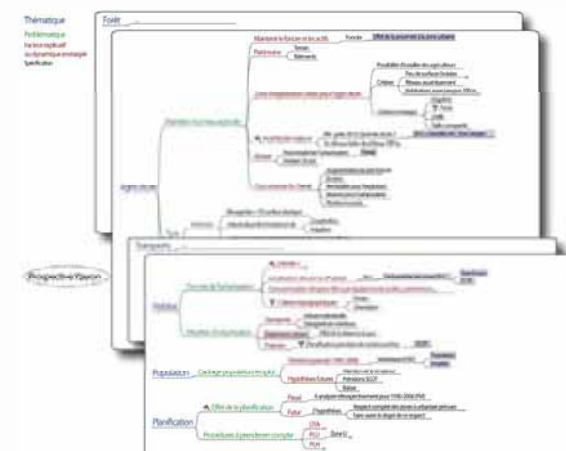
1. 2008 2030S1Aa : S. Densification minimale
2. 2008 2030S3Aa : S. Déprise agricole
3. 2008 2030S1Ba : S. Densification minimale & contrainte réglementaire

Comparaison des scénarios entre eux :

4. 2030S1Aa 2030S1Ba : Impact des contraintes réglementaires dans le cadre d'une densification minimale
5. 2030S1Ba 2030S1Bb : Impact de l'effet de renforcement des polarités des SCOT dans le cadre d'une densification minimale
6. 2030S1Ba 2030S2Ba : Impact d'une densification par réduction de l'étalement de 10 % en prenant en compte les contraintes réglementaires
7. 2030S1Aa 2030S3Aa : Impact du changement de transition agricole dans un contexte de densification minimale sans contrainte ni effet
8. 2030S1Aa 2030S1Ac : Impact d'un effet de déprise agricole dans la zone centrale dans le cadre d'une densification minimale sans contraintes réglementaires

Les apports de l'Atelier de prospective

Analyse des changements de l'occupation du sol > Comment enrichir la connaissance du système territorial ?



Les apports de l'Atelier de prospective

Cartographie des usages et de l'occupation du sol

> Comment estimer l'imperméabilisation des sols en 2030 ?

Les usages du sol en 2008



Espace urbanisé



L'occupation du sol en 2008

(propriétés physiques des sols)



Propriétés physiques des sols dans l'espace urbanisé



Taux d'imperméabilisation = environ 38% (ssbv de la Beffe)

Les apports de l'Atelier de prospective

Synthèse :

- **Enrichir la connaissance générale du système territorial** avec un outil collectif permettant de « faire jouer » et d'activer la réflexion en s'appuyant sur 3 types de méthodes :
 - Jeu de données multi-temporelles,
 - mobilisant des techniques de simulations spatiales,
 - Techniques de géoprospective.
- **3 résultats espérés :**
 - Une amélioration de l'information (données) et un approfondissement des dispositifs d'observation du territoire,
 - Une meilleure connaissance des processus spatiaux passés et en cours, afin d'anticiper les processus futurs (relations dynamiques),
 - Une prise de recul sur les outils de la planification territoriale et leur efficacité.



Quelles sont les caractéristiques hydro-géomorphologiques associées aux rivières péri-urbaines et comment quantifier le risque d'incision ?

L. SCHMITT, L. GROSPRETRE, A. BARRA et H.DELILE

UMR 5600, Université Lumière Lyon 2

P. BREIL, Cemagref de Lyon

B. CHOCAT, INSA de Lyon

→ fiche technique OTHU 17

Quelles sont les caractéristiques hydro-géomorphologiques des rivières périurbaines et comment quantifier le risque d'incision ?

Grosprêtre L., Schmitt L., Breil P., Barra A., Chocat B., Delile H.

Avec la collaboration de :

Sarrazin B., Jacqueminet C., Michel K., Joliveau T., Dodane C., Honegger A., Branger F., Jacob. N., Privolt G., Kermadi S.

Dans le bassin de l'Yzeron, les RUTP sont fréquemment à l'origine d'incisions des chenaux des ruisseaux élémentaires, ou dans certains cas d'accentuations d'incisions antérieures aux aménagements liés aux RUTP. Le principal objectif de ce travail est d'estimer le risque d'incision futur d'ici 2030.

L'approche repose sur :

- (i) la détermination des débits critiques de mise en mouvement de la charge de fond (Q_c),
- (ii) l'évaluation des impacts hydrologiques de l'urbanisation sur les Q_c et
- (iii) l'estimation du risque d'incision futur (2030).

Les deux premières étapes ont été mises en œuvre essentiellement sur le sous-bassin de la Chaudanne, où des données hydrologiques sont disponibles grâce au dispositif de l'OTHU. Sur ce ruisseau fortement incisé, l'évolution hydrologique s'est traduite par une augmentation de la durée, de l'intensité et surtout de la fréquence des crues morphogènes (dépassement des débits critiques de mise en mouvement).

La dernière étape, mise en œuvre sur 45 sous-bassins, repose sur des modélisations hydrologiques appliquées à l'occupation du sol de 2008 et à celle de 2030.

Enfin, l'étude de l'évolution morpho-sédimentaire des fonds de vallée de têtes de bassins depuis la fin du Moyen-Âge permet une meilleure compréhension des processus d'incision et une interprétation plus pertinente des résultats obtenus.

1ère CONFERENCE THEMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

Plan

1. Zone d'étude et problèmes de gestion
2. Objectifs
3. Estimation du risque d'incision futur (2030)
 - 3.1. Détermination des débits critiques de mise en mouvement de la charge de fond (Qc)
 - 3.2. Evaluation des impacts hydrologiques de l'urbanisation sur les Qc
 - 3.3. Cartographie du risque d'incision futur (2030)
4. Mise en perspective historique (pluri-séculaire)
5. Conclusion et recommandations opérationnelles
6. Perspectives

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

1ère CONFERENCE THEMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

1. Zone d'étude

bassin versant de l'Yzeron (150 km²)

Plateau lyonnais
Couronne périurbaine
Zone urbaine de LYON
Monts du lyonnais
Zone rurale
Chaudanne
Yzeron
Rhône

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

1ère CONFERENCE THEMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

Typologie hydro-géomorphologique

= une « discrétisation » du fonctionnement hydro-géomorphologique
(Schmitt et al., 2004)
Fiche tech. OTHU N°14

Types

- A1
- A2
- B1
- B2
- B3
- B4
- B5
- C

Site de mesure

Dénomination des types de cours d'eau

Dénomination	Code
Torrents des Monts du lyonnais	A1
Cours d'eau à énergie modérée des replats des Monts du lyonnais	A2
Cours d'eau à haute énergie de l'extrémité amont des secteurs à fond de vallée encaissé	B1
Cours d'eau à énergie modérée et à fond de vallée peu encaissé du plateau lyonnais	B2
Cours d'eau à énergie modérée et à fond de vallée encaissé et étroit du plateau lyonnais	B3
Cours d'eau à énergie modérée et à fond de vallée encaissé et large du plateau lyonnais	B4
Cours d'eau sur arène granitique de la région de Charbonnières	B5
Cours d'eau des paléo-vallées du Rhône et de la Saône	C

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

1ère CONFERENCE THEMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

1. Problèmes de gestion

Incisions de têtes de bassins

Typologie
→ sensibilité à l'incision

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

Ensablement en aval**2. Objectifs**☞ **Estimer le risque d'incision futur (2030)**

- Déterminer les Q_c
- Etudier l'influence de l'évolution du régime hydrologique vis-à-vis des Q_c (et donc des incisions)
 - Fréquence
 - Intensité des crues (au-delà des Q_c)
 - Durées de dépassement
 - Établir un(des) indicateur(s) hydrologique(s) de (in)stabilité morphologique des cours d'eau de têtes de bassins
- Prédire les probabilités d'incision à l'horizon 2030 (45 sous-bassins) à partir de :
 - Modélisations hydrologiques...
 - ... fondées sur l'évolution des surfaces imperméabilisées entre 2008 et 2030

☞ Replacer les évolutions morphologiques récentes dans **un contexte temporel long** (pluri-séculaire) pour une meilleure compréhension des tendances évolutives des cours d'eau

3. Estimation du risque d'incision futur (2030)**3.1. Détermination des débits critiques de mise en mouvement de la charge de fond (Q_c)**☞ **Application sur deux tronçons de cours d'eau**

- Le ruisseau de la Chaudanne



- Le ruisseau des Presles



1ERE CONFERENCE THEMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

Méthodes

Approche théorique

- Utilisation de formules de mise en mouvement des particules (Schoklitsch 1950, Bagnold 1980, Bathurst *et al.* 1987, Ferguson 1994, 2005, Petit *et al.* 2005, Parker *et al.* 2010, etc.)

Approche expérimentale de terrain

- Suivi de particules grossières peintes (graviers)
 - détermination de la largeur maximale des particules peintes mises en mouvement
 - % de particules peintes mises en mouvement
- Suivi de la charge en suspension (sables)

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

1ERE CONFERENCE THEMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

Méthodes

Approche théorique : exemples d'équations

Schoklitsch 1950	Bagnold 1980
$q_c = 1,89 \cdot 10^{-5} \cdot d_{40}^{1,5} \cdot S^{-1,17}$	$\omega_{c50} = 0,121 \cdot d_{50}^{1,5}$
Bathurst <i>et al.</i> 1987	Ferguson 2005
$q_c = 1,49 \cdot 10^{-5} \cdot d_{50}^{1,5} \cdot S^{-1,12}$	$\omega_{c50} = 0,125 \cdot d_{50}^{1,5} \cdot S^{-0,17}$
Ferguson 1994	Petit <i>et al.</i> 2005
$q_{c50} = 3,01 \cdot 10^{-6} \cdot d_{50}^{1,5} \cdot S^{-1,37}$	$\omega_{c50} = 0,130 \cdot d_{50}^{1,438}$
Bathurst 2007	Petit <i>et al.</i> 2005
$q_{c2} = 5,08 \cdot 10^{-6} \cdot d_{50}^{1,5} \cdot S^{-1,20}$	$\omega_{c50} = 1,374 \cdot d_{50}^{0,963}$
$q_{c2} = 1,32 \cdot 10^{-6} \cdot d_{84}^{1,5} \cdot S^{-1,23}$	Etc.

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

1ERE CONFERENCE THEMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

Méthodes

Approche expérimentale

- Particules grossières peintes




avant la crue après la crue

- Particules fines (car les lits sont à dominante sableuse)
 - Prélèvements de matières en suspension en crue (conc° et granulométrie des MES)
 - Mesures de turbidité
 - débit critique de mise en mouvement des sables

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

1ERE CONFERENCE THEMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

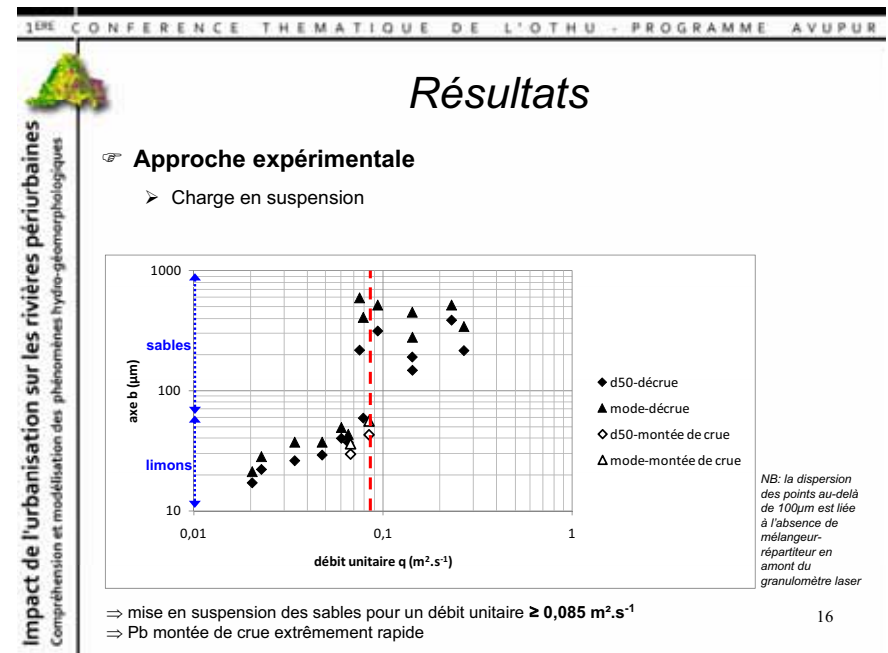
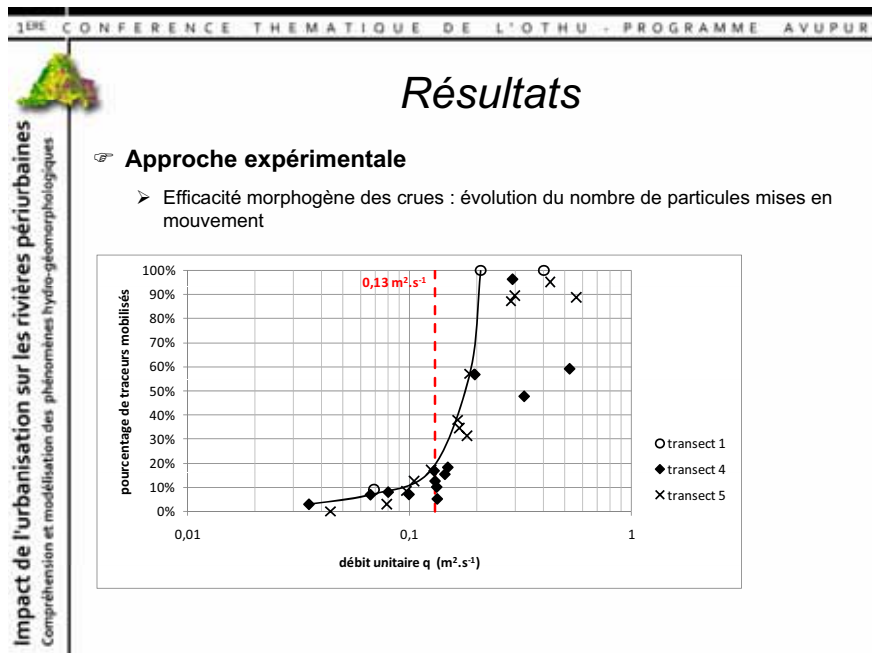
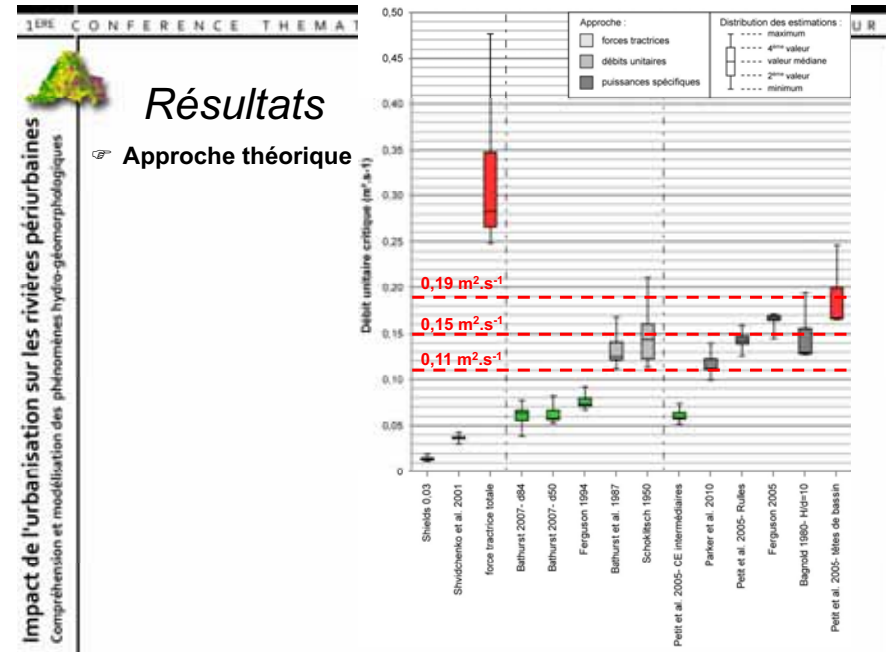
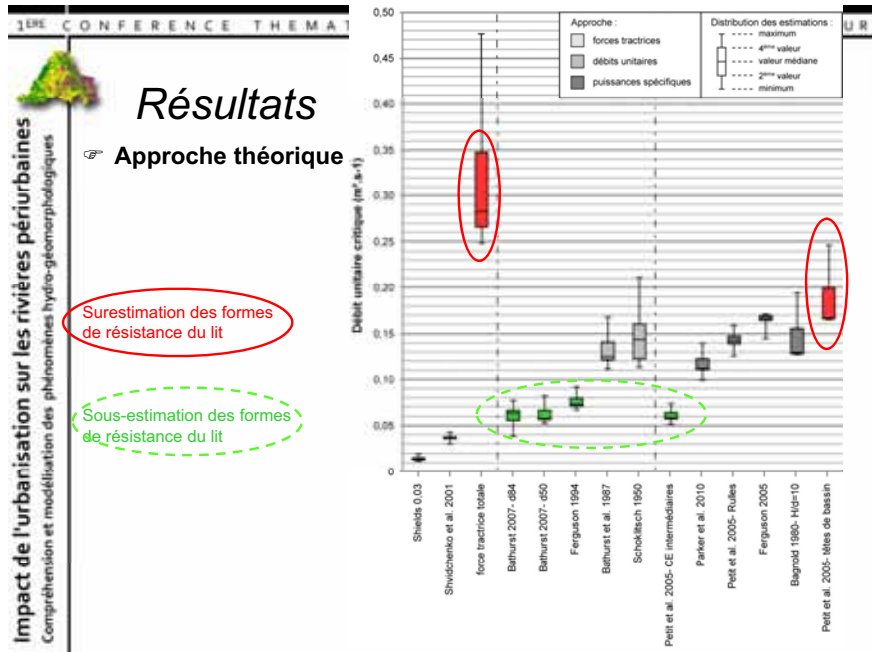
Méthodes



Dispositif de suivi de la charge en suspension sur le ruisseau de la Chaudanne (Barra, 2009)



Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques



1ère CONFERENCE THEMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

Bilan des résultats Qc

Chaudanne

- Suivi des particules grossières
 - mise en mouvement d'une portion significative des traceurs pour un débit unitaire $\approx 0,13 \text{ m}^2/\text{s}$
 - Remarque : légère sous-estimation des conditions critiques de mise en mouvement !
- Suivi des particules fines
 - mise en suspension (montée de crue) massive des sables pour un débit unitaire $\geq 0,085 \text{ m}^2/\text{s}$
- Synthèse avec l'approche théorique
 - débit unitaire critique compris entre **0,11** et **0,19 m^2/s** (**0,15 m^2/s**)

Presles

- Pas de mobilisation des sédiments grossiers pendant la période de suivi
- Débits critiques non atteints
 - témoigne qualitativement de la différence de fréquence du transport sédimentaire grossier entre un ruisseau rural et un ruisseau périurbain
 - impossible de valider les équations

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

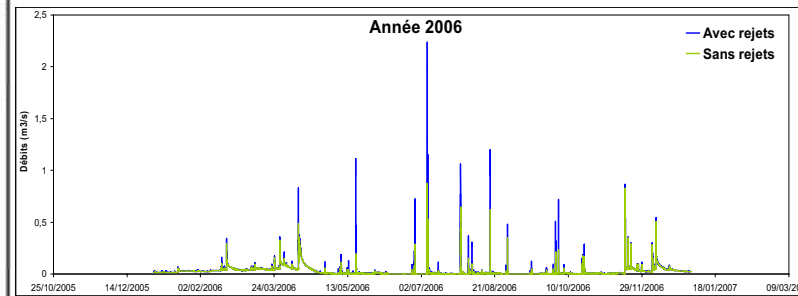
1ère CONFERENCE THEMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

3. Estimation du risque d'incision futur (2030)

3.2. Impacts hydrologiques de l'urbanisation sur les Qc

Influence de l'urbanisation sur les débits critiques

- Filtrage de la chronique 2005-2010 à pas de temps variable (cf. P. Breil)



Source : P. Breil (2005)

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

1ère CONFERENCE THEMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

Résultats

Influence de l'urbanisation sur les débits critiques

- Evolution par rapport aux écoulements ruraux

Débit unitaire ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	Débit ($\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$)	Δ durée annuelle	Δ durée moyenne par dépas st	Δ fréquence	Δ Qp moyen
0,11	264	+ 14%	- 13%	+ 31%	+ 16%
0,15	360	+ 15%	- 14%	+ 34%	+ 17%
0,19	446	+ 12%	- 16%	+ 34%	+ 17%

Indicateurs hydrologiques

- Rapport $\text{Fréq}_{\text{urb}}/\text{Fréq}_{\text{rur}}$ (Fréquence des dépassements Qc avec urbst)/(Fréquence des dépassements sans urbst)
- Rapport $\text{Durée}_{\text{urb}}/\text{Durée}_{\text{rur}}$ (Durée de dépassement Qc avec urbst)/(Durée de dépassement Qc sans urbst)
- Rapport $\text{Pic}_{\text{urb}}/\text{Pic}_{\text{rur}}$ (Pic de crue > Qc avec urbst)/(Pic de crue > Qc sans urbst)

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

1ère CONFERENCE THEMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

3. Estimation du risque d'incision futur (2030)

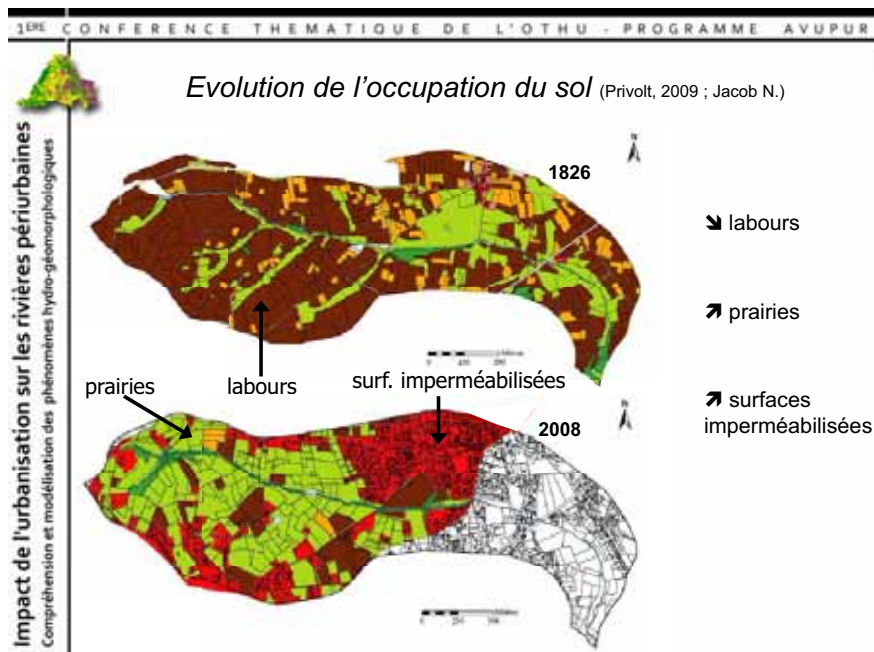
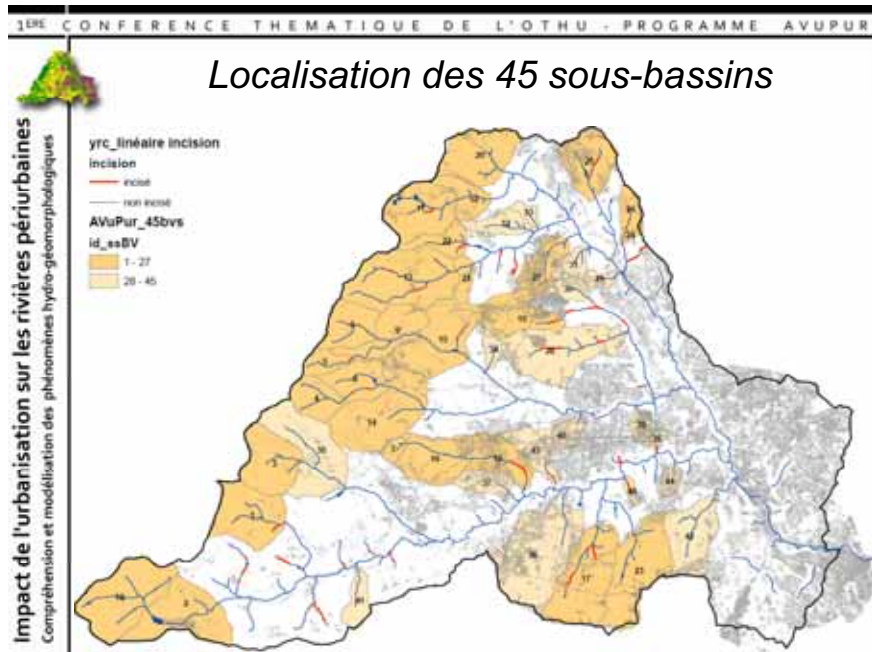
3.3. Cartographie du risque d'incision futur (2030)

En cours...

Méthodes :

- Estimation des Qc sur 45 sous-bassins
 - Équations de Schoklitsch (1950), Bathurst et al. (1987), Ferguson (2005), Parker et al. (2010)
 - Données de terrain nécessaires : pente, largeur à pleins bords, granulométrie
- Modélisation des chroniques de débits sur ces 45 sous-bassins :
 - Occupation du sol 2008
 - Occupation du sol 2030
- Calcul des indicateurs hydrologiques ($\text{Fréq}_{\text{urb}}/\text{Fréq}_{\text{rur}}$...) et identification des sous-bassins présentant le plus grand risque d'incision (indicateur élevé)
- Cartographie du risque d'incision d'ici 2030
- Évaluation de l'efficacité des techniques de gestion alternative des eaux pluviales vis-à-vis du risque d'incision

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques



1ERE CONFERENCE THEMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

5. Conclusions et recommandations opérationnelles

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

Conclusions :

- Les données et les innovations méthodologiques produites dans le cadre d'AVuPur vont permettre d'évaluer le risque d'incision futur, ce qui constitue une avancée scientifique (et opérationnelle) majeure
- Les incisions ne sont pas seulement liées aux changements de flux hydriques, mais aussi à la baisse de la fourniture sédimentaire des bassins. Comme celle-ci est très marquée depuis un siècle, des incisions peuvent se produire en l'absence de rejets
 - C'est déjà le cas ; ces incisions devraient se développer...
 - Mais ces incisions ont généralement une ampleur limitée

Recommandations opérationnelles :

- Traiter les RUTP à la source (infiltration à la parcelle, revêtement poreux... [Fiche Technique OTHU 16](#))
- Traiter les RUTP à l'amont des rivières : bassins de rétention, bassins d'infiltration...
- Les Qc paraissent liés aux types géomorphologiques (résistance au transport solide) → en première approche, rejeter les eaux pluviales dans les types les moins sensibles à l'incision (meilleure résistance au transport solide)
- Pour réduire l'ensablement (aval), lutter contre les incisions (amont) (L. Grosprêtre)

6. Perspectives

- ☞ Cartographie du risque d'incision sera produite dans quelques semaines
- ☞ Validation :
 - Appliquer la méthode sur les mêmes sous-bassins en prenant en compte l'évolution des surfaces imperméabilisées entre 1970 et 2008 et les mêmes indicateurs hydrologiques (cf. présentation de P. Breil et G. Lipeme avec méthode des QDF)
- ☞ Transposition à d'autres bassins périurbains



Remerciements :

- ANR AVuPUR

- Yvan Beranger (Graie/INSA)

- Fabien Thollet (Cemagref)

- Marion Peredes (université Lyon 2)



Pourquoi et comment décrire l'espace et les chemins de l'eau dans les milieux péri-urbains ?

F. BRANGER et S. JANKOWFSKY, Cemagref

F. RODRIGUEZ, K. CHANCIBAULT, IFSTTAR

E. BOCHER, CNRS

Pourquoi et comment décrire l'espace et les chemins de l'eau dans les milieux péri-urbains?

Flora Branger, Cemagref, UR Hydrologie-Hydraulique

F. Rodriguez, S. Jankowsky, E. Bocher, K. Chancibault

Les milieux péri-urbains sont des milieux complexes et hétérogènes. En surface, des zones bâties et /ou imperméabilisées, les réseaux routiers, plutôt caractéristiques des occupations du sol urbaines, s'interpénètrent avec le parcellaire agricole, les haies, les fossés... liés au paysage rural. L'urbanisation modifie également profondément le sous-sol par l'implantation de réseaux d'assainissement par exemple. Ces hétérogénéités ont une influence forte sur l'hydrologie : selon leur nature, elles peuvent soit faire office d'obstacles aux écoulements (haies derrière lesquelles le ruissellement va s'accumuler, bassins d'infiltration...), soit au contraire les concentrer et les accélérer (fossés, réseau souterrain unitaire ou séparatif). Ces hétérogénéités sont par ailleurs organisées selon des morphologies contrastées : dans les zones urbaines, le paysage est organisé selon un réseau structurant artificiel, qui est constitué de la voirie en surface et du réseau d'assainissement en souterrain. Par contre, dans les zones rurales l'organisation du paysage suit une organisation dépendante de la topographie selon le réseau hydrographique naturel. Enfin, les évolutions sont très rapides puisque liées au rythme de l'urbanisation.

Dans des objectifs à la fois de suivi en temps réel de l'évolution du milieu, mais aussi de la formalisation de ces évolutions dans des modèles de simulation numériques à même de préciser l'impact hydrologique de l'urbanisation, il est donc souhaitable d'être capable de décrire l'espace péri-urbain de façon adéquate, à partir des informations descriptives disponibles.

Le projet AVuPUR a donné lieu au développement et à la mise en œuvre de plusieurs méthodes de description de l'espace, ainsi qu'à la construction d'un modèle hydrologique détaillé appliqué sur de petits sous bassins versants péri-urbains (modèle PUMMA, travail de thèse de S. Jankowsky). **Méthodologies de description de l'espace**

Ces méthodes s'appuient toutes sur des données SIG : modèle numérique de terrain (MNT), données d'occupation des sols (vecteur ou raster telles que photographies aériennes ou images satellite), plans des réseaux (assainissement, voirie, réseau hydrographique naturel) et cadastre. Une difficulté importante est liée au fait que les informations disponibles ne sont pas de même nature dans les

zones urbaines et rurales (notamment les réseaux de drainage artificiels, tels que les fossés, ne sont en général pas renseignés dans les zones rurales), ou de résolutions très différentes faisant qu'on ne peut pas nécessairement les utiliser partout de la même manière (cadastre par exemple).

Méthode MNT

Cette méthode est la méthode de référence de l'hydrologie rurale. A partir de la topographie uniquement, elle permet de déterminer un réseau de drainage et le bassin versant ayant pour exutoire un point donné. Une variante de cette méthode consiste à utiliser en plus du MNT une carte du réseau hydrographique disponible issue d'une autre source de données (BD Carthage par exemple) et de forcer le MNT avec ce réseau de drainage.

Cette méthode présente l'avantage de nécessiter peu de données d'entrée, et d'être facile et rapide à mettre en œuvre. Quasiment tous les logiciels SIG présents sur le marché ou issus de la communauté du logiciel libre présentent cette fonctionnalité. En revanche, cette méthode ne prenant en compte que la topographie, elle est peu adaptée aux zones urbaines dans lesquelles les écoulements sont influencés par le réseau artificiel.

Méthode objet

La méthode objet (Rodriguez et al., 2003) s'appuie sur l'utilisation des données détaillées des banques de données urbaines (cadastre, plan des réseaux) et du MNT. Elle considère des objets élémentaires constitués des parcelles cadastrales. La méthode consiste à connecter chacune de ces parcelles à l'élément de réseau (voirie, fossé, réseau d'assainissement) le plus proche ou le plus bas topographiquement (principe de proximité et de gravité). On peut ainsi reconstituer le chemin d'écoulement depuis chaque parcelle jusqu'à l'exutoire du bassin versant.

Cette méthode est plus complexe que la précédente et requiert plus de données, mais elle peut néanmoins être automatisée dans un logiciel SIG pour une mise en œuvre relativement facile. Par contre, autant elle convient bien à la morphologie

urbaine pour laquelle elle a été développée, autant elle est moins adaptée aux zones rurales, pour lesquelles les réseaux viaires ou d'assainissement sont moins développés, et les parcelles cadastrales de dimensions parfois trop importantes.

Méthode MNT-objet

Cette approche mixte (Jankowsky et al., 2011) combine la méthode MNT avec forçage du réseau de drainage en zone rurale, et la méthode objet en zone urbaine. Les données nécessaires sont le MNT, les cartes des réseaux, ainsi qu'une description de l'occupation des sols qui peut être le cadastre, une carte vectorielle ou une photographie aérienne.

La particularité de cette méthode est liée au fait qu'elle comporte une étape de reconnaissance de terrain pour la détermination d'un réseau de drainage mixte urbain/ rural. En effet, les informations cartographiques seules sont en général insuffisantes pour décrire de façon définitive ce réseau. Le travail de terrain permet notamment d'identifier les fossés (en zone rurale ou zone d'assainissement séparatif sans réseau pluvial bien localisé), les points de connexion entre le réseau artificiel et la rivière, et de préciser les sens d'écoulement, surtout en bordure des routes et dans les zones situées en-dehors du bassin versant purement topographique.

Il s'agit donc d'une méthode, mixte, véritablement adaptée au milieu péri-urbain et enrichie par l'expérience du terrain. Par contre, elle ne peut être entièrement automatisée et est donc d'une mise en œuvre plus longue.

Méthode TANATO

Il s'agit là aussi d'une méthode mixte, qui s'appuie sur le concept de mailles irrégulières contraintes (Triangulated Irregular Network) (Bocher et al., 2011). Elle s'appuie sur des données topographiques (courbes de niveau ou points cotés), à partir desquels une triangulation est établie. Cette triangulation peut être contrainte par des obstacles en surface issus de données vectorielles (fossés, routes, parcellaire...) et par les points d'entrée dans le réseau d'assainissement souterrain.

Là encore, cette méthode est bien adaptée aux milieux mixtes péri-urbains. Elle permet également une analyse des écoulements en surface plus fine que dans les autres méthodes : on peut ainsi retracer le chemin d'une goutte d'eau depuis n'importe quel point jusqu'à l'exutoire, déterminer l'aire contributive de tout point du domaine et identifier par exemples des zones d'accumulation d'eau. La succession d'étapes d'application de TANATO est automatisée dans le logiciel SIG libre OrbisGIS. Cependant il reste à l'heure actuelle de mise en œuvre délicate.

Intégration dans une modélisation hydrologique détaillée : principes du modèle PUMMA

De façon à représenter au mieux les hétérogénéités du milieu péri-urbain, la modélisation PUMMA (Jankowsky et al., 2010) s'appuie sur un maillage irrégulier en objets hydrologiquement homogènes. Ce maillage est déterminé en croisant les différentes informations géographiques disponibles : cartes géologiques, pédologiques, sous-bassins (issus des méthodes précédentes), occupation du sol, avec une priorité donnée à l'occupation du sol. Cela permet d'obtenir des objets hydrologiques associés au parcellaire (parcelles urbaines et parcelles rurales). Les processus hydrologiques en jeu sont formalisés au niveau de chacun de ces objets sous forme de modules. Ces modules sont assemblés entre eux grâce à l'utilisation d'une plate-forme de modélisation hydrologique, qui est un outil informatique permettant la construction de modèles hydrologiques adaptatifs.

La connexion des objets entre eux est un élément clef du modèle PUMMA car elle détermine le routage des écoulements d'un objet à l'autre, depuis l'amont du bassin versant jusqu'à l'exutoire. Pour les écoulements de surface, les parcelles urbaines sont connectées à l'élément de réseau le plus proche ; alors que sur les parcelles rurales, le ruissellement est routé de voisin en voisin en suivant la topographie. Pour les écoulements souterrains (nappe), les parcelles urbaines sont connectées à la fois au réseau pour prendre en compte le drainage partiel de la nappe par un réseau non étanche, et aux parcelles voisines pour représenter l'écoulement naturel de la nappe suivant le gradient hydraulique. Sur les parcelles rurales, seul cet écoulement naturel est considéré.

Pour quelles applications?

Les méthodes de description de l'espace décrites dans le présent document (MNT, objet, MNT-objet, TANATO) peuvent avoir plusieurs applications pratiques. Parce qu'elles permettent d'identifier, en zone péri-urbaine, le réseau de drainage naturel et artificiel et les zones contributives drainées par ce réseau, elles peuvent être utilisées pour :

- Définir des schémas directeurs de gestion des eaux pluviales ;
- Identifier des sources potentielles de pollution en temps de pluie et temps sec (par analyse des zones contribuant en eaux usées / eaux claires) ;
- Dimensionner des ouvrages d'évacuation et de rétention des eaux pluviales.

Toutes ces méthodes sont publiées et/ou implémentées dans des logiciels disponibles librement. Le choix particulier d'une méthode doit être déterminé par les objectifs spécifiques de l'étude, les données disponibles ainsi que le temps imparti pour réaliser le travail.

La modélisation hydrologique détaillée permet de quantifier plus précisément les flux d'eau pour la gestion des eaux pluviales et le dimensionnement d'ouvrages. Elle permet aussi de formuler et tester des scénarios d'aménagements passés et futurs, y compris impliquant des techniques alternatives de gestion des eaux pluviales. Elle est également un support pour l'ajout d'autres processus liés à la qualité de l'eau (nutriments, substances prioritaires...).

Références

Bocher et al, 2011 : <http://geosysin.iict.ch/irstv-trac/wiki/research/avupur/tanato>

Jankowsky, S.; Branger, F.; Braud, I.; Viallet, P.; Debionne, S. & Rodriguez, F., 2010. Development of a suburban catchment model within the LIQUID framework, in Swayne, D.; Yang, W.; Voinov, A.; Rizzoli, A. & T., F. (Eds.) Proceedings of the iEMSs Firth Biennial Meeting: International Congress on Environmental Modelling and Software (iEMSs 2010),

<http://www.iemss.org/iemss2010/index.php?n=Main.Proceedings>

Jankowsky, S., Branger, F., Braud, I., Gironas, J., Rodriguez, F., 2011. Integration of sewer system maps and field observations in topographically based sub-basin delineation in suburban areas, soumis à Hydrological Processes.

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.

Contenu de l'exposé

Pourquoi?

Enjeux de la description de l'espace pour l'hydrologie en milieu péri-urbain

Comment?

Plusieurs méthodologies pour décrire l'espace à partir des données disponibles

Intégration dans une modélisation hydrologique détaillée

Pour quelles applications?

Intérêt et limites des approches développées

Des milieux complexes et hétérogènes

Des hétérogénéités multiples

Zones bâties, imperméabilisées, routes, fossés

Réseaux d'assainissement



Une morphologie structurante

Morphologie urbaine: réseau structurant artificiel en surface et en souterrain (voirie, réseau assainissement)

Morphologie rurale: organisation selon le réseau hydrographique naturel dépendant de la topographie



Une influence forte sur les écoulements

Obstacles et déviation des écoulements naturels

Concentration et accélération

Une évolution rapide

Des milieux complexes et hétérogènes



Photos Cemagref, 2007

Intérêt d'une description adéquate

Pour décrire et comprendre de façon précise les écoulements en milieu péri-urbain, on a donc besoin au préalable de décrire l'espace de façon adéquate

Suivi en temps réel de l'évolution du milieu

Formalisation dans des modèles de simulation numérique

Informations descriptives disponibles: données SIG

Modèle numérique de terrain (topographie)

Occupation des sols

Plans des réseaux (assainissement, voirie) et cadastre

Mais:

Pas les mêmes informations en milieu urbain et rural

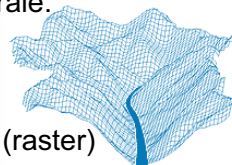
Résolutions et échelles différentes

Méthode topographique

Méthode de référence de l'hydrologie rurale:

Détermination du réseau de drainage

Délimitation du bassin versant



Données : modèle numérique de terrain (raster)

Variante: forçage par un réseau hydrographique issu d'une autre source de données

Avantages/ Inconvénients

simple et rapide, peu de données d'entrée

pas nécessairement adapté aux zones urbaines

Méthode s'appuyant sur le cadastre

Utilisation des données détaillées des banques de données urbaines (Rodriguez et al., 2003) et du MNT

Objet élémentaire: la parcelle cadastrale



Méthode s'appuyant sur le cadastre

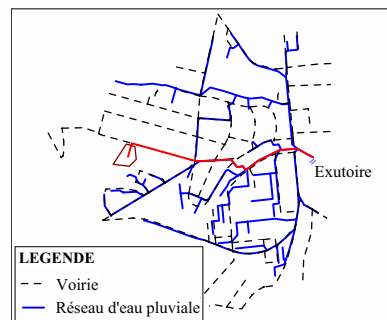
Utilisation des données détaillées des banques de données urbaines (Rodriguez et al., 2003) et du MNT

Objet élémentaire: la parcelle cadastrale

Connexion de chaque parcelle à l'élément de réseau le plus proche ou le plus bas (proximité et gravité)

Voirie et fossés

Réseau d'assainissement



Méthode s'appuyant sur le cadastre

Utilisation des données détaillées des banques de données urbaines (Rodriguez et al., 2003) et du MNT

Objet élémentaire: la parcelle cadastrale

Connexion de chaque parcelle à l'élément de réseau le plus proche ou le plus bas (proximité et gravité)

Voirie et fossés

Réseau d'assainissement

Avantages/ Inconvénients

Méthode plus complexe mais automatisée

Convient bien à la morphologie urbaine, moins aux zones rurales

Méthode mixte topographie / cadastre

Approche mixte (Jankowsky et al., 2011):

Méthode MNT avec forçage du réseau de drainage en zone rurale

Méthode objet en zone urbaine

Données : MNT, cartes des réseaux hydrographique et d'assainissement, description de l'occupation des sols

Travail de terrain sur le réseau de drainage

Identifier les fossés et les points de connexion (réseau pluvial)

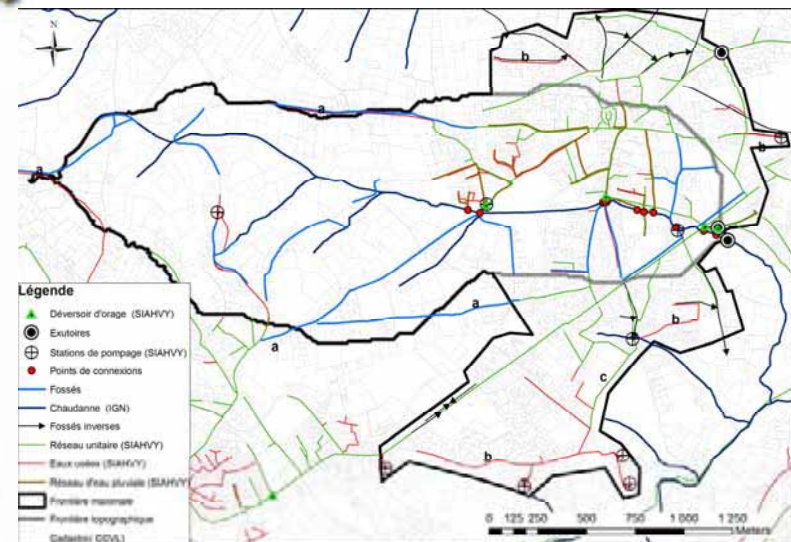
Préciser les sens d'écoulement (routes, zones hors bassin topographique)

Avantages/ Inconvénients

Méthode mixte véritablement adaptée au milieu péri-urbain

Implique un travail de terrain et des étapes manuelles

Méthode mixte topographie / cadastre



Méthode mixte topographie / cadastre



Méthode mixte topographie contrainte

Mailles irrégulières contraintes (Triangulated Irregular Network) (logiciel TANATO; Bocher et al., 2011):

Base = courbes de niveau ou points topographiques

Contraintes par les obstacles en surface (fossés, routes...) et les points d'entrée dans le réseau souterrain

Données : MNT, données vectorielles (réseaux et parcellaire)

Avantages/ Inconvénients

Méthode mixte bien adaptée au milieu péri-urbain

Permet une analyse fine des écoulements de surface (aire contributive en tout point, zones d'accumulation)

Succession d'étapes automatisées mais de mise en œuvre délicate

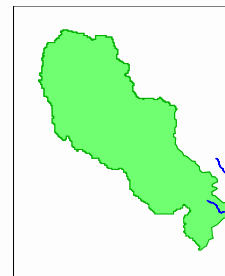
Méthode mixte topographie contrainte



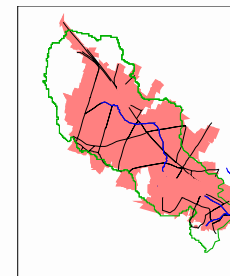
Applications

Bassin versant de la Chézine amont (~4.5 km², Nantes)

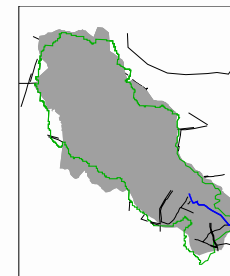
Méthode MNT



Méthode objet

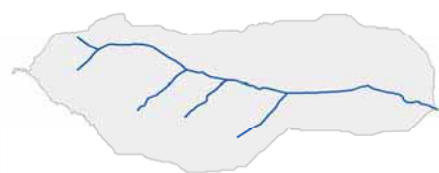


Méthode TANATO

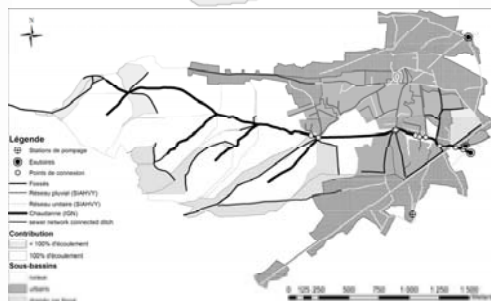


Applications

Bassin versant de la Chaudanne (~3 km², Lyon)



Méthode MNT
(avec forçage réseau
hydrographique)



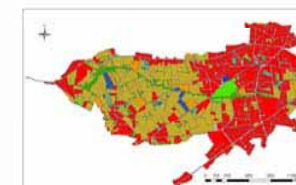
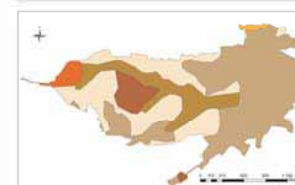
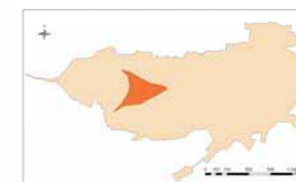
Méthode MNT-objet

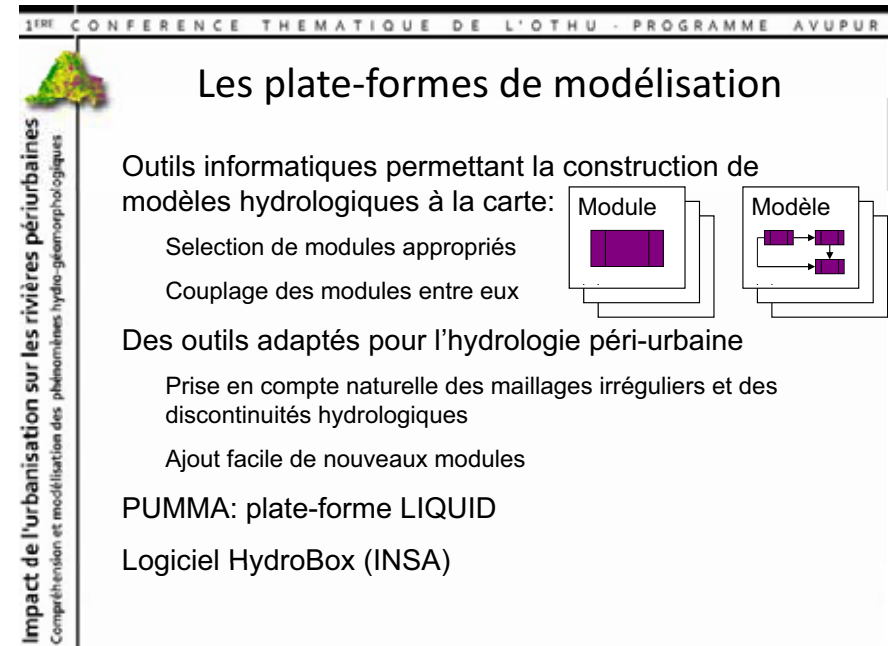
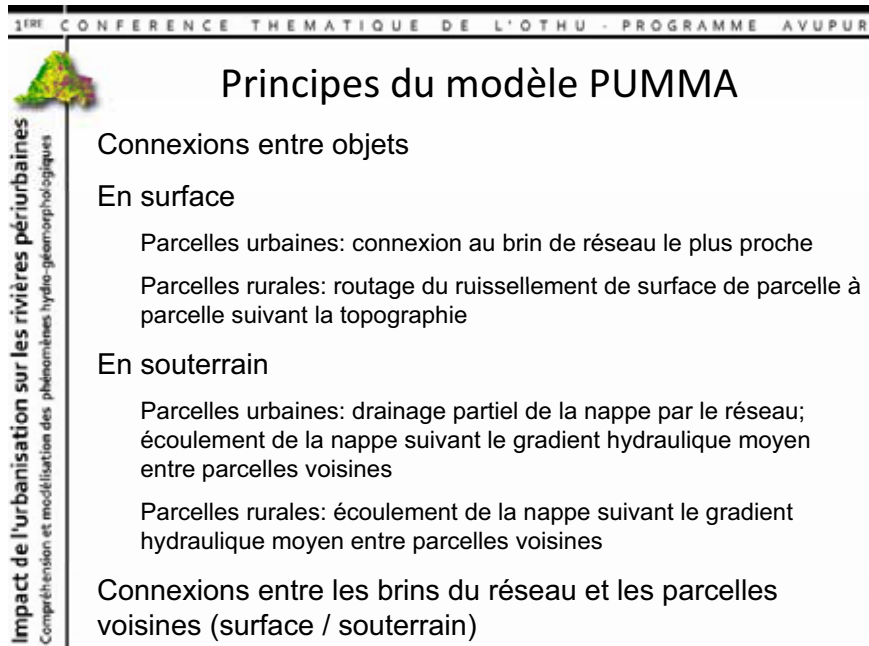
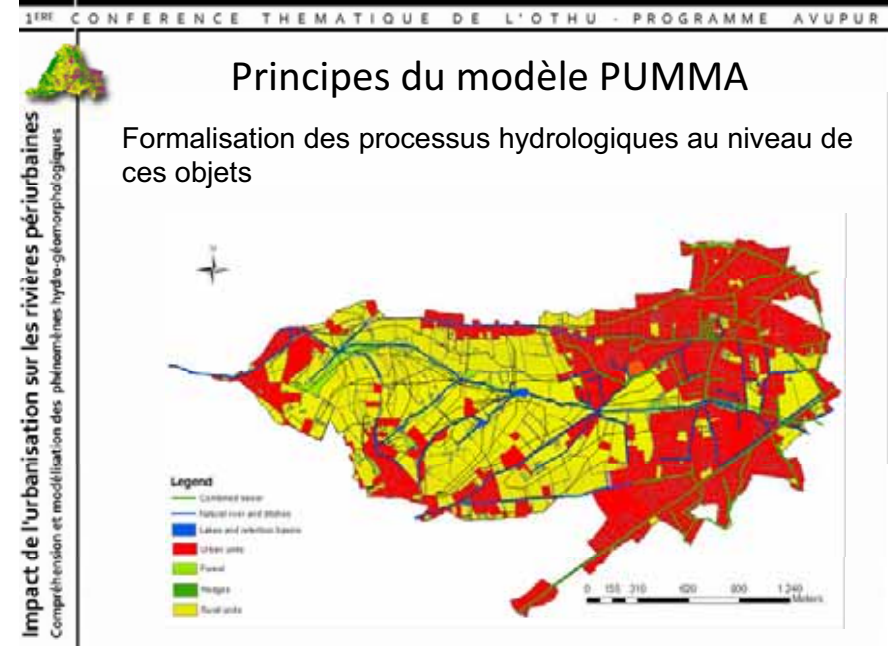
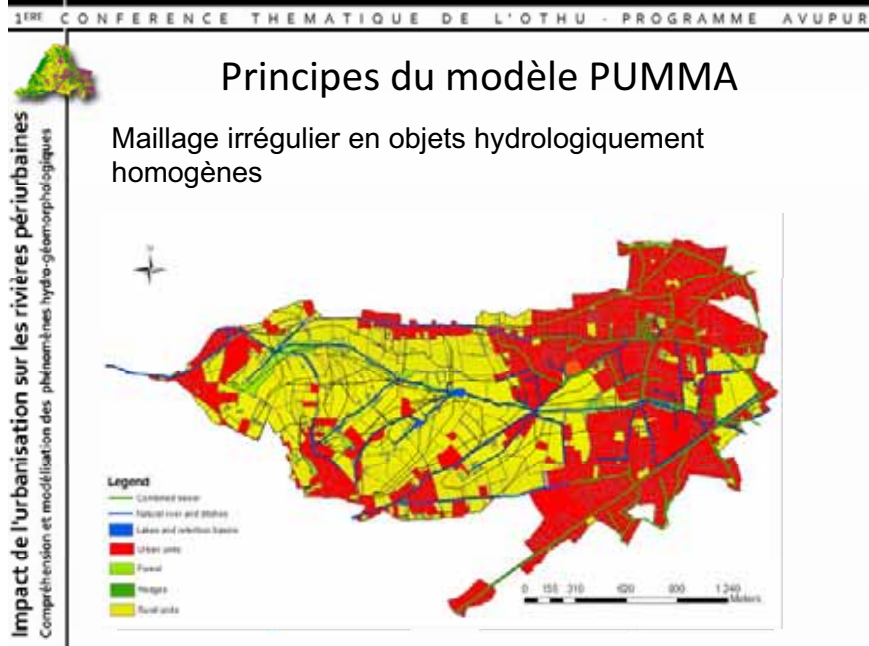


Principes du modèle PUMMA

Maillage irrégulier en objets hydrologiquement homogènes

Priorité donnée à l'occupation du sol







Intérêt des méthodes développées

Applications pratiques des méthodes de description de l'espace (topographie, cadastre, méthodes mixtes)

Identification du réseau de drainage et des zones contributives

Schéma directeur de gestion des eaux pluviales

Identification de sources potentielles de pollution en temps de pluie / temps sec (contributions d'eaux usées / d'eaux claires)

Dimensionnement d'ouvrages

Toutes les méthodes sont publiées et/ou implémentées dans des logiciels disponibles librement

Choix de la méthode en fonction des objectifs spécifiques, des données et du temps disponibles



Intérêt des méthodes développées

Apports de la modélisation hydrologique détaillée

Aller plus loin dans la compréhension du fonctionnement de bassins versants complexes

Quantification plus précise pour la gestion des eaux pluviales et le dimensionnement d'ouvrages

Test d'hypothèses de fonctionnement

Tests de scénarios sur aménagements passés et futurs y compris techniques alternatives de gestion des eaux pluviales

Ajout d'autres processus (polluants...)



Les limites actuelles

Disponibilité / Format / Qualité des données hétérogènes

Données urbaines VS données rurales (cartographie des fossés, occupation des sols)

Données du réseau d'assainissement selon l'organisme gestionnaire et la nature du réseau (unitaire / séparatif)

Traitements SIG automatiques

Nécessaires

Pas toujours efficaces ni pertinents (qualité des données): besoin d'interventions manuelles

Modélisation hydrologique spatialisée détaillée

PUMMA d'une mise en œuvre délicate

Réservé pour l'instant à un usage recherche



Pourquoi et comment décrire l'espace et les chemins de l'eau dans les milieux péri-urbains?

Merci de votre attention

Références et liens:

Jankowsky, S., Branger, F., Braud, I., Gironas, J., Rodriguez, F., 2011. Integration of sewer system maps and field observations in topographically based sub-basin delineation in suburban areas, soumis à *Hydrological Processes*.

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.

Logiciel TANATO: <http://geosysin.iict.ch/irstv-trac/wiki/research/avupur/tanato>



Comment représenter le fonctionnement du milieu périurbain dans les modèles hydrologiques ?

K. CHANCIBAULT, IFSTTAR Nantes

F. BRANGER, I. BRAUD, Cemagref

C. FURUSHO, H. ANDRIEU et F. RODRIGUEZ, IFSTTAR

B. CHOCAT, INSA de Lyon

Comment représenter le fonctionnement du milieu péri-urbain dans les modèles hydrologiques de grande échelle

K. Chancibault, C-Y Furusho, H. Andrieu, F. Rodriguez (Ifsttar)

F. Branger, I. Braud (Cemagref)

B. Chocat (INSA)

Les rivières dites péri-urbaines traversent des territoires dont l'occupation du sol peut être typiquement rurale ou urbaine. Hydrologiquement, ces surfaces réagissent différemment. De plus, en milieu urbain, les eaux de ruissellement sont récoltées et transférées via le réseau d'assainissement. Ainsi, en modélisation hydrologique deux communautés distinctes se sont naturellement formées. La modélisation hydrologique des bassins versants péri-urbains nécessite de prendre en compte les caractéristiques des deux milieux. Ainsi, pour reproduire le comportement hydrologique d'un bassin versant péri-urbain, un modèle hydrologique doit tout d'abord représenter la variabilité des occupations du sol avec des couverts naturels divers et des surfaces imperméabilisées. Il doit aussi prendre en compte le réseau hydrographique mixte constitué des cours d'eau naturels et du réseau d'assainissement. Enfin, le sol doit être aussi bien représenté en milieu naturel qu'en milieu urbain. Le développement d'un modèle hydrologique adapté au milieu péri-urbain peut se faire de différentes façons. Il est possible de développer un tout nouveau modèle ou bien d'adapter un modèle existant en ajoutant la prise en compte des surfaces urbaines à un modèle hydrologique des rivières « naturelles » ou en ajoutant la prise en compte du sol et de la végétation pour un modèle hydrologique initialement dédié au milieu urbain.

ADAPTATION D'UN MODELE HYDROLOGIQUE DEDIE AUX BASSINS URBAINS :

Le modèle CANOE a été appliqué au bassin versant de l'Yzeron en représentant le réseau hydrographique complet : réseau naturel et réseau d'assainissement ainsi que leurs interconnexions (plus de 60 déversoirs d'orage). Les sous bassins versants (environ 150 dans le modèle) ont pour exutoire soit un ruisseau soit un réseau souterrain (certains sous bassins versants peuvent se superposer). Le modèle permet la simulation en continue de l'ensemble du système hydrologique en tenant compte de l'hydraulique des écoulements. Les temps de calcul sont assez longs (environ 48 heures pour simuler 20 ans de pluies) sur un PC ordinaire.

Mais CANOE ne permet pas de décomposer le débit à l'exutoire en contributions rurale/urbaine ou lente/rapide. En effet, l'information sur l'origine de l'eau qui transite en un point donné du réseau est perdue. De plus, le découpage en sous bassins versants est compliqué du fait qu'il y a 2 exutoires possibles (le réseau et la rivière). Dans le cadre d'AVUPUR, une plate-forme de modélisation hydrologique originale a donc été développée (Hydrobox). Elle permet de représenter des sous-bassins versants avec différents exutoires et de représenter et visualiser l'état et le fonctionnement de tous les compartiments de l'hydrosystème. Ainsi, les surfaces imperméables peuvent être directement connectées au réseau d'assainissement (SICRA), ou directement connectées à la rivière (SICRIV). Quant aux surfaces perméables (SP) elles sont connectées à la rivière et au sous sol (SSSP) puis à la nappe (NSP).

ADAPTATION DE MODELES DEDIES AUX BASSINS VERSANTS NATURELS :

Le modèle rural J2000 (Krause, 2002) utilise une discrétisation spatiale utilisant un maillage irrégulier. La représentation de l'ensemble des processus hydrologiques est simplifiée (modèle conceptuel à réservoirs) mais explicite. Le modèle étant initialement rural, il ne considère qu'un seul réseau de drainage : le réseau hydrographique naturel (la rivière).

Afin de représenter l'urbanisation dans J2000, le maillage irrégulier a été utilisé en discrétisant manuellement l'espace en sous-bassins (HRU) en fonction de l'occupation du sol dominante (rurale ou urbaine), à partir de la carte du réseau d'assainissement et des photos aériennes (BD Ortho IGN). Chaque HRU urbaine est connectée au réseau hydrographique naturel soit par un exutoire du réseau pluvial (cas séparatif), soit par un déversoir d'orage (cas unitaire). On obtient ainsi un maillage mixte urbain / rural. De plus, les coefficients d'imperméabilisation des sols et les caractéristiques de la végétation ont été obtenus via une classification des cartes d'occupation des sols en 5 classes. Pour chaque classe, un jeu de paramètres dans le modèle a été spécifié (coefficient d'imperméabilisation, utilisé dans la partition

infiltration / ruissellement, et végétation, qui joue sur l'interception et l'évapo-transpiration). Ce modèle présente l'avantage d'avoir des paramètres correspondants à des grandeurs physiques et aux données disponibles : cela permet de travailler sans calage, et donc d'avoir une approche utilisable sur des bassins non jaugés. En revanche, le modèle travaille sur de grandes mailles (sous-bassins) et avec un pas de temps journalier, ce qui en fait une approche adaptée pour de grands bassins et pour faire des simulations longues durées centrées sur les bilans hydrologiques. Cependant, le pas de temps est trop grand pour faire de l'événementiel (crues rapides).

La simulation du bassin de l'Yzeron sur une période de dix ans montre des résultats encourageants : la dynamique du bassin est bien reproduite à l'échelle de la chronique annuelle : le critère statistique de Nash (qui vaut un lorsque les simulations et les observations sont confondues) pour toute la période de simulation est moyen (0.46), mais certaines années sont simulées avec une bonne qualité (chronique 2002-2003, Nash=0.72). Le modèle offre aussi la possibilité de connaître le débit de manière distribuée sur tout le bassin. Il permet aussi de calculer la contribution des sous-bassins au débit pour les différentes fractions du débit (écoulements rapides ou lents).

Parallèlement, un autre modèle rural (ISBA-TOPMODEL) initialement développé pour les bassins du sud-est, soumis aux crues-éclair, a été adapté au milieu péri-urbain en modifiant les codes informatiques. A l'origine, ce modèle représente le sol suivant trois couches sur une grille à mailles carrées (résolution : 100m à 10km) et fonctionne avec un pas de temps à déterminer en fonction des processus étudiés (5min). Les écoulements latéraux en surface et de subsurface sont résolus à l'échelle d'une grille issue des données topographiques (10m), selon le concept des surfaces contributives. Le routage est aussi réalisé à cette échelle. Le pas de temps à cette échelle est variable et s'adapte selon le temps de réponse du bassin versant étudié.

Le traitement des surfaces imperméables, définies suivant leur distance au réseau d'assainissement à partir des couches SIG de la banque de données urbaines, a été fait à l'aide d'un réservoir urbain (pertes initiales) et de la prise en compte des réseaux d'assainissement et du réseau naturel. De plus, les infiltrations d'eau parasite ont aussi été implémentées dans le code original. Ces modifications ont conduit à de nouveaux paramètres à caler en fonction des informations disponibles sur le bassin étudié.

Le modèle a été évalué sur le bassin de la Chézine, sur une période de dix ans (données fournies par Nantes Métropole). Le calage a été effectué sur les trois premières années (2002-2005), Les cinq années suivantes (2005-2010) ont permis d'évaluer les capacités du modèle à reproduire le débit observé. Le modèle montre une aptitude à reproduire la dynamique du bassin, à l'échelle de la chronique

annuelle : pour toute la période d'évaluation Nash=0.52, mais est variable d'une année à l'autre (compris entre 0.49 et 0.72). Il apparaît que le modèle a tendance à surestimer le débit en période humide et à le sous-estimer en période sèche. Le modèle permet aussi de connaître la contribution des différentes surfaces au débit (urbain/rural) et la part des écoulements lents ou rapides.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans le cadre du projet AVuPUR, différentes approches ont été étudiées pour modéliser la réponse hydrologique des bassins versants péri-urbains de plusieurs dizaines de km². Une première approche a consisté à utiliser un modèle hydrologique dédié à l'origine pour les bassins versants typiquement urbains (CANOE). Puis une plateforme (hydrobox) a été développée permettant de construire et de coupler facilement des modèles hydrologiques.

Deux approches sont parties de modèles hydrologiques « naturels ». La première approche avec J2000 s'est attachée à utiliser les données d'entrée disponibles pour prendre en compte l'impact des surfaces urbaines sur la réponse du bassin de l'Yzeron. La deuxième approche (ISAB-TOPMODEL) a choisi de modifier les codes sources pour prendre en compte les surfaces urbaines. CANOE, Hydrobox et J2000 ont été évalués sur le bassin de l'Yzeron, sur des chroniques plus ou moins longues (10 ans et 11 jours). Les premiers résultats sont encourageants. ISBA-TOPMODEL a été évalué sur le bassin de la Chézine sur une chronique de 10 ans et donne aussi des résultats encourageants.

Hydrobox a vocation à être utilisé par les gestionnaires. De même pour CANOE. En revanche, J2000 et ISBA-TOPMODEL nécessitent encore des améliorations pour être utilisés facilement en opérationnel. Cependant, leur application sur des bassins versants péri-urbains permet de mieux comprendre les processus à prendre en compte. Ces modèles peuvent aider au développement ou à l'amélioration d'outils pour les opérationnels.

CONTEXTE

- Modélisation hydrologique :
 - Milieu naturel : processus de génération du ruissellement prépondérants
 - chronique inter-annuelle ou événementielle
 - Processus : infiltration, évapotranspiration, ruissellement en surface.
 - Transfert peu d'impact
 - Taille bassins : 10 à 10000 km²
 - Milieu urbain : transfert prépondérant
 - dimensionnement réseau d'assainissement
 - Pluie de projet, événementielle
 - Processus : ruissellement. Transfert important
 - Taille bassins : 10 ha à 1000 ha
- Milieu péri-urbain : aucune surface (naturelle/urbaine) prépondérante

CONTEXTE

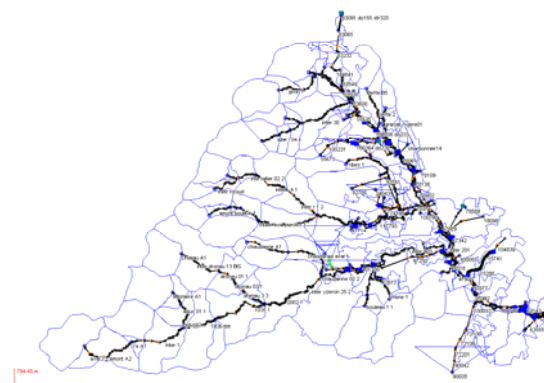
- Ingrédients nécessaires à la modélisation hydrologique en milieu péri-urbain
 - o Variabilité des surfaces (couvert végétal, surfaces imperméables)
 - o Réseau hydrographique : rivière + réseaux d'assainissement
 - o caractéristiques des sols <== données
- Développement d'un modèle hydrologique adapté aux bassins versants péri-urbains
 - o Développement d'un nouveau modèle
 - o Adaptation d'un modèle hydrologique urbain aux surfaces naturelles
 - o Adaptation d'un modèle hydrologique « rural » aux surfaces urbaines

PLAN DE LA PRESENTATION

- Adaptation d'un modèle urbain au milieu péri-urbain
 - Introduction des processus des surfaces naturelles
- Adaptation d'un modèle rural au milieu péri-urbain
 - Prise en compte des surfaces urbaines via les données d'entrée (description de l'espace)
 - Introduction des processus hydrologiques caractéristiques en milieu urbain
- Conclusions/Perspectives

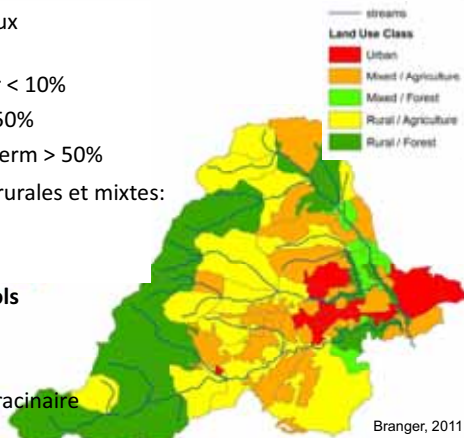
ADAPTATION D'UN MODELE URBAIN

- CANOE : modèle complet intégrant le réseau de rivières et le réseau d'assainissement



ADAPTATION D'UN MODELE RURAL

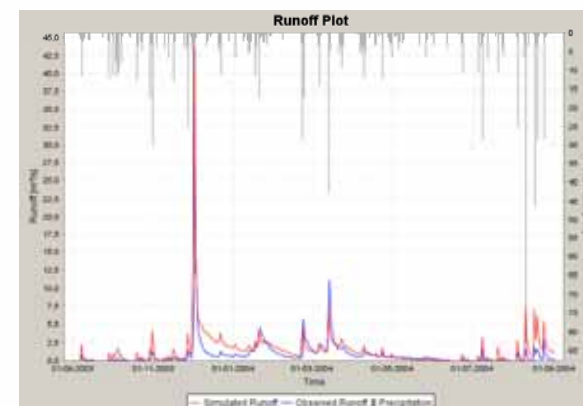
- Découpage du bassin de l'Yzeron et modification des paramètres physiques
- Classification en fonction du taux d'imperméabilisation
 - Dominante rurale: $os_imper < 10\%$
 - Mixte: $10\% < os_imper < 50\%$
 - Dominante urbaine: $os_imper > 50\%$
- Reclassification pour les zones rurales et mixtes:
 - Dominante cultures
 - Dominante forêt
- ➔ 5 classes d'occupation des sols
- ➔ Partage infiltration/ruissellement $\neq$ /classe
- ➔ Indice foliaire et profondeur racinaire / végétation dominante



Branger, 2011

ADAPTATION D'UN MODELE RURAL

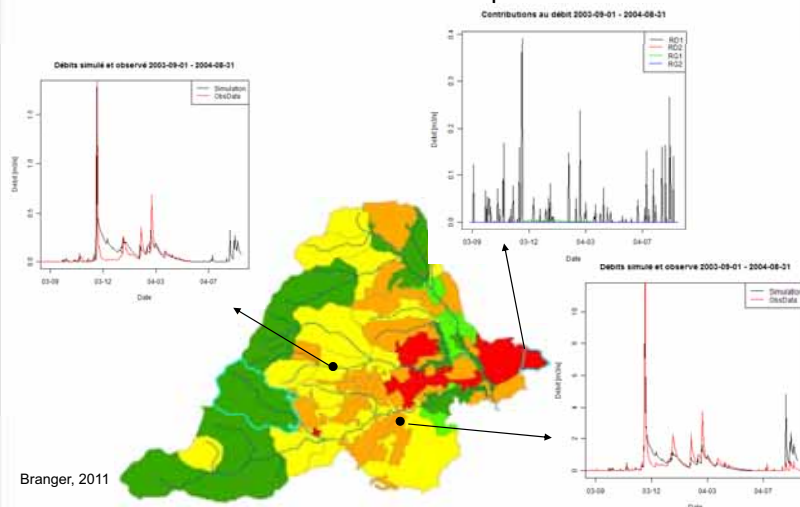
- J2000 : résultats sur l'Yzeron (Taffignon, 120km²)
- Simulation période de 10 ans : sept 1997 à sept 2007 (Nash=0.47)
- Année 2002-2003 (Nash=0.72)



Branger, 2011

ADAPTATION D'UN MODELE RURAL

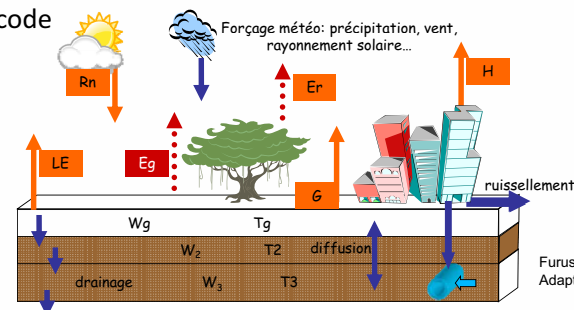
- J2000 : résultats sur l'Yzeron
- Débits distribués et contribution de chaque sous-bassin au débit



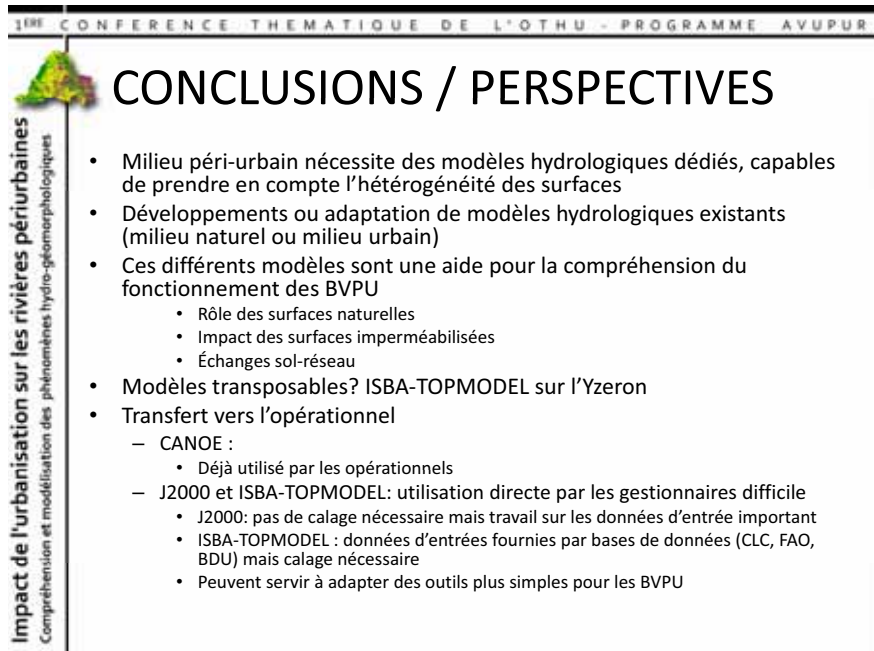
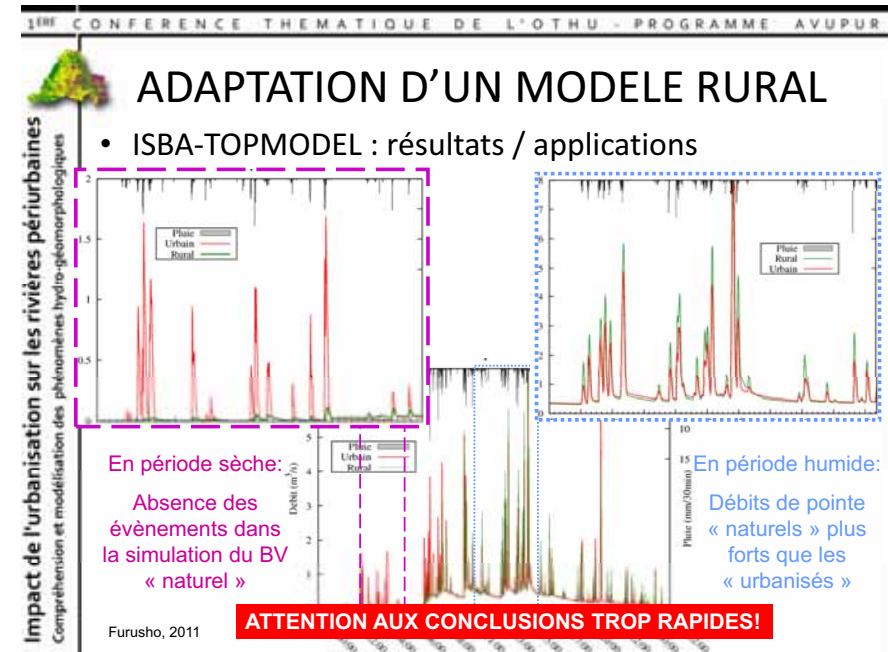
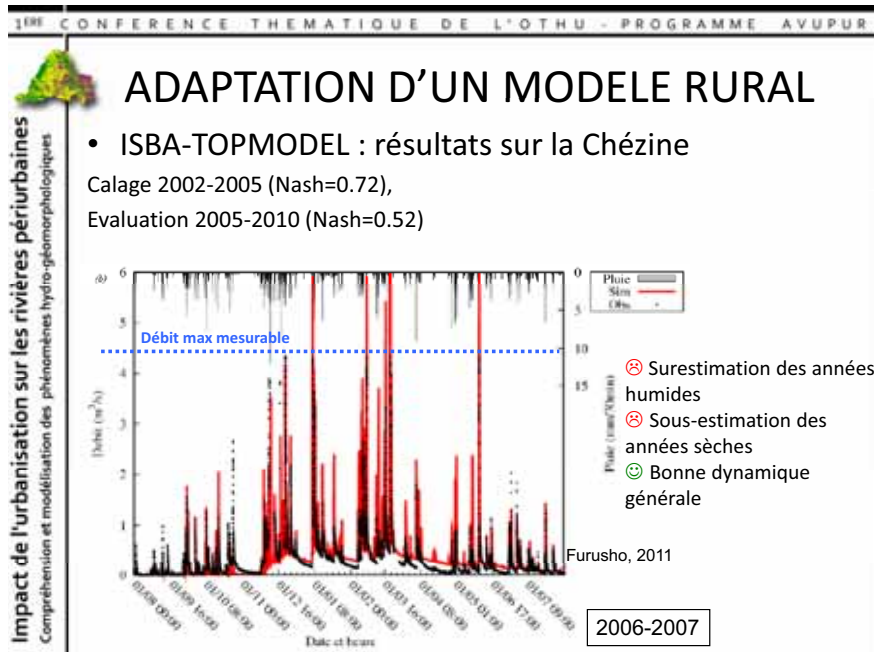
Branger, 2011

ADAPTATION D'UN MODELE RURAL

- ISBA-TOPMODEL : introduction des processus urbains dans le code

Furusho, 2011
Adapté de Voirin, 2003

- Paramètres du modèle :
 - Deux paramètres de sol (liés à K_s)
 - Paramètres pour le routage : vitesses ou coefficients (surfaces)
 - Paramètre échanges sol/réseaux
 - Proportion de surfaces urbaines reliées au réseau





Quel impact de l'urbanisation simulé par les modèles hydrologiques ? Illustration avec QdF et CANOE

P. BREIL, Cemagref Lyon

G. LIPEME KOUYI et B. CHOCAT, INSA de Lyon

L. SCHMITT et L. GROSPRETRE, UMR 5600 Université Lyon 2

Quel impact de l'urbanisation simulé par les modèles hydrologiques ?

Illustrations via les modèles QdF et Canoe

P. Breil (Cemagref Lyon), G. Lipeme Kouyi (Insa Lyon), B. Chocat (Insa Lyon), L. Schmitt (Lyon 2), L. Grospretre (Lyon 2)

PROBLEMATIQUE

Le projet AVUPUR prend en considération que la plupart des villes moyenne à grandes sont, au niveau mondial, confrontées à une extension urbaine rapide de leur périphérie, caractéristique des zones péri-urbaines. Ces zones sont souvent situées en amont topographique de l'urbanisation ancienne. Le développement périurbain accroît le ruissellement urbain direct ou par débordement des réseaux d'assainissement pluviaux et unitaires en direction des cours d'eau. Les conséquences en sont des débordements de rivière plus fréquents dans les secteurs urbains denses situés en aval, la dégradation des petits cours d'eau périphériques par des eaux souillées ou la déstabilisation hydro-géomorphologique qui sape les fondations d'ouvrages situés en berge. Sur le plan géomorphologique, cette dégradation se traduit par des ajustements plus ou moins rapides de la morphologie des cours d'eau, engendrant parfois d'importantes incisions du fond du lit.

La modélisation du développement périurbain ne se limite pas à un bassin versant mais à la combinaison des écoulements provenant de petits sous-bassins dont les temps de réactions et la production en eau vont évoluer rapidement. Ni une approche fine et coûteuse, possible sur un petit espace urbain, ni une approche globale « mélangeant tout » ne sont adaptées à l'évaluation de l'effet du développement périurbain sur les écoulements.

Afin d'anticiper ces phénomènes, les outils de modélisation hydrologique en domaine urbain et rural sont mis à contribution car les effets des écoulements de ces deux milieux sont combinés dans l'espace et dans le temps des zones périurbaines.

La portée prédictive de ces modèles sur des bassins non jaugés nécessite une validation préalable. La présentation est axée sur des essais de quantification des effets attendus de la périurbanisation sur les débits. Dans un premier temps les

modèles voient l'espace en mode binaire : perméable et imperméable. La réalité est plus complexe en zone périurbaine car les effets de l'urbanisation peuvent être antagonistes. Ainsi l'augmentation du ruissellement par les surfaces imperméables évolue conjointement à celui de l'augmentation de l'infiltration dans les zones de reprise forestière des anciennes terres agricoles. Les accélérations et ralentissements qui s'en suivent peuvent favoriser les concomitances ou les réduire au niveau des nombreuses imbrications entre réseau naturel et artificiel. Il faut cependant vérifier si certaines tendances émergent, à certains débits avant d'aller dans trop de détail.

OBJECTIF

L'objectif est de simuler l'évolution de débits caractéristiques en lien avec le développement urbain.

Pour ce faire, deux outils de modélisation hydrologique ont été utilisés.

Deux familles d'indicateurs liés aux effets de l'urbanisation sont visées dans cette étude :

- i) L'augmentation de la fréquence des débits morphogènes
- ii) L'augmentation de la fréquence des débordements de cours d'eau

METHODE ET MODELES

Les deux modèles proviennent chacun de logiques de construction différentes, l'un dédié au milieu urbain et l'autre au milieu rural. Chacun permet néanmoins de simuler le domaine complémentaire pour représenter les effets combinés des écoulements ruraux et urbains.

La comparaison des modèles porte sur des débits caractéristiques associés à des probabilités d'occurrence. Ces occurrences sont classiquement utilisées pour dimensionner des ouvrages hydrauliques avec un risque connu de défaillance. C'est le cas par exemple du diamètre d'un réseau d'assainissement comme d'une levée de berge pour éviter dans les deux cas un débordement. Les débits caractéristiques sont aussi utilisés pour décrire des phénomènes naturels comme le débit de plein-bord d'un cours d'eau auquel il est attribué classiquement une occurrence de 2 ans. Ce débit est considéré morphogène car il détermine le gabarit du cours d'eau. Il indique par ailleurs le débit au-delà duquel il déborde. Il présente donc un double intérêt en cas d'accroissement lié au développement périurbain : d'une part il peut expliquer les phénomènes d'incision des cours d'eau qui tentent de s'ajuster à ce nouveau débit de plein bord et d'autre part il traduit un aléa plus fort d'inondation.

Hydrologie des villes

Ce type de modèle a été initialement conçu pour dimensionner des réseaux d'assainissement. Dans cette configuration de projet, seule la donnée pluie est requise, les données d'occupation du sol étant planifiées. Les bassins urbains sont de quelques hectares en général et la collecte de données précises reste possible. Le modèle peut alors servir à simuler des bassins non jaugés. Le principe de modélisation utilisé dans le modèle CANOE consiste à décomposer le bassin versant en sous bassins de caractéristiques homogènes qui ont chacun pour exutoire un point (nœud) du réseau artificiel ou naturel. Le modèle de transformation pluie-débit utilisé distingue les apports en provenance de trois types de surface : les surfaces imperméables directement connectées au réseau, les surfaces imperméables non directement connectées et les surfaces perméables. Le débit calculé à un exutoire est donc la résultante de la somme des débits obtenus à partir des fonctions de production et de transfert appliquées aux différentes surfaces. Les hydrogrammes produits par les sous bassins versants sont ensuite propagés soit dans le système d'assainissement, soit dans le réseau naturel en utilisant un modèle hydraulique (en général le modèle de Barré de Saint Venant) ou un modèle dit simplifié de type réservoir linéaire (Muskingum). Les sous bassins perméables ou ruraux sont traités au moyen du modèle de Horton. Les débits caractéristiques sont obtenus par échantillonnage dans les chroniques de débit simulés.

Hydrologie des champs

Ce type de modèle répond à la demande des aménageurs pour dimensionner des sections de passage sans débordement ou encore des ouvrages de stockage dynamiques comme les barrages secs en rivière ou en fleuve. Il s'agit donc d'une modélisation intéressante des bassins de quelques dizaines à quelques milliers de kilomètres carrés. La modélisation est donc globale et ne discerne pas l'occupation du sol qui, à ces tailles, est souvent dominée par les espaces ruraux. Le modèle QdF utilise une propriété statistique des débits de crue qui montre que les plus forts débits atteints peuvent être représentés par des lois de probabilité. Le modèle associe ainsi un débit de crue à sa durée et à son occurrence de manière unique. On parle de quantile de crue. Un modèle générique de quantiles de crues a été validé sur la France entière et publié (Galéa & Prud'homme, 1997). Trois jeux de paramètres sont disponibles et le calage du modèle consiste à identifier le bon jeu à partir d'une étude régionale qui porte sur 2 à 3 stations de débits situées à proximité de la zone d'étude. La capacité à prédire les quantiles sur les grands bassins a pu être vérifiée à maintes reprises ainsi que sous des régimes de pluie très différents (Martinique). Le modèle QdF intègre de fait l'influence du régime de pluie et sa transformation en débit de crue. Une fois le modèle calé regionalement, il peut être utilisé en n'importe quel point d'un réseau hydrographique dans un bassin non jaugé. Une version du modèle a été adaptée aux écoulements à ruissellement rapide (Galéa & Ramez 1995). Elle a été comparée avec succès aux résultats donnés par des modèles de ruissellement urbains (Potier 2011 ; Breil & Poulard 2002 ; Gilard et al. 1997). Combinée avec les QdF « ruraux », les QdF « rapides » ouvrent des perspectives sur la prédiction de l'incision des cours d'eau périurbains (Dehotin et al. 2010).

RESULTATS

Les modèles font ressortir que l'augmentation de l'urbanisation accroît fortement la fréquence des crues faibles à moyennes : le ruissellement sur les surfaces imperméables qui est associé à des pluies courtes et intenses provoque des crues pour des pluies qui n'avaient aucun effet avant. L'influence est plus faible pour les crues les plus fortes pour lesquelles la contribution de la zone non urbanisée reste la plus importante.

Le glissement de fréquence opéré par l'urbanisation sur les débits morphogènes pourrait expliquer les incisions constatées dans une partie de jeu des 45 bassins tests retenus.

L'hypothèse de concomitance des pics de crue dans ces modèles dans leur version « binaire » s'avère pessimiste pour les débits des plus fortes crues, dont les augmentations peuvent devenir peu réalistes.

REFERENCES CITEES

Dehotin, J. ; Breil, P. ; Nedelec, Y. (2009). Actions exploratoires : Evaluation du risque de ruissellement. Rpport scientifique Cemagref : PUB00028201

Breil, P. ; Poulard, C. (2002).Rapport d'expertise de l'étude d'aménagement hydraulique du Ru du Balory par conduite Hydratec. Cemagref PUB00010706.

Galea, G. and Prudhomme, C., 1997. Basic notions and useful concepts for understanding the modeling of flood regimes of basins in QdF models. Notions de base et concepts utiles pour la compréhension de la modélisation synthétique des régimes de crue des bassins versants au sens des modèle QdF. Rev. Sel. Eau. 1: 83-101.

Galéa, G. ; Ramez, P. (1995). Maîtrise du ruissellement et de l'érosion en coteau de vignoble : guide à l'usage des aménageurs. Référence Cemagref : PUB00003156

Gilard, O. ; Gendreau, N. ; Breil, P. ; Tschudy, E. (1997) Inondabilité du ruisseau du Ravin et de son bassin versant. Rapport d'étude Cemagref : PUB00006670

Potier de la Varde, G. (2011). Modélisation comparée du ruissellement des petits bassins versants urbains en vue d'estimer les rejets de temps de pluie vers le milieu naturel. Rapport de stage, ENSGTI Pau. Référence Cemagref : PUB00031525.

1ère CONFERENCE THEMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

OBJECTIF **METHODE** **OUTILS** **RESULTATS**

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

- Tester l'applicabilité de modèles hydrologiques urbain (CANOE) et rural (QdF) au milieu périurbain
- Prédire des effets possibles sur des débits sensibles à l'urbanisation – dégager des indicateurs de vulnérabilité
 - Augmentation de fréquence des petites crues
 - Evolution des débits critique et de plein bord
 - Evolution débits inondant (supérieurs au plein bord)

1

1ère CONFERENCE THEMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

OBJECTIF **METHODE** **OUTILS** **RESULTATS**

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

- Simuler la combinaison des débits de ruissellement urbain et rural en s'appuyant sur un % d'imperméabilisation
- Comparer prédictions:
 - modèle / modèle
 - modèles / débits observés
 - modèles / débits critiques et plein bord (2 ans)

2

1ère CONFERENCE THEMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

OBJECTIF **METHODE** **OUTILS** **RESULTATS**

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

PRINCIPE DU MODELE CANOE

```

graph TD
    subgraph "Surfaces imperméables directement connectées"
        F1[Fonction de production] --> T1[Fonction de transfert]
    end
    subgraph "Surfaces imperméables non directement connectées"
        F2[Fonction de production] --> T2[Fonction de transfert]
    end
    subgraph "Surfaces perméables"
        F3[Fonction de production] --> T3[Fonction de transfert]
    end
    T1 --> S3[Somation des 3 hydrogrammes]
    T2 --> S3
    T3 --> S3
    S3 --> D[Débit à l'exutoire du réseau d'assainissement]
  
```

Dorval, 2011

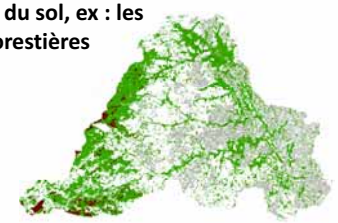
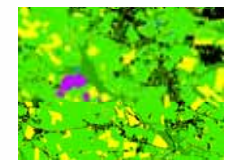
3

1ère CONFERENCE THEMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

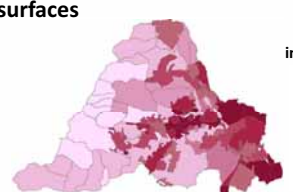
Les informations extraites

- Distribution spatiale des types d'occupation du sol, ex : les superficies forestières
- Cultures annuelles et pérennes
- Taux d'imperméabilisation des surfaces

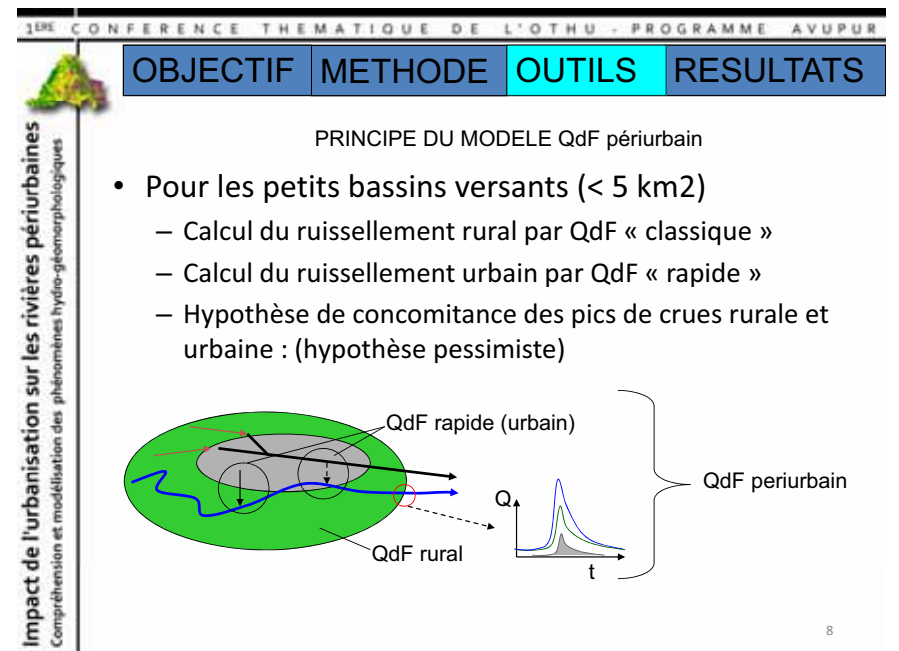
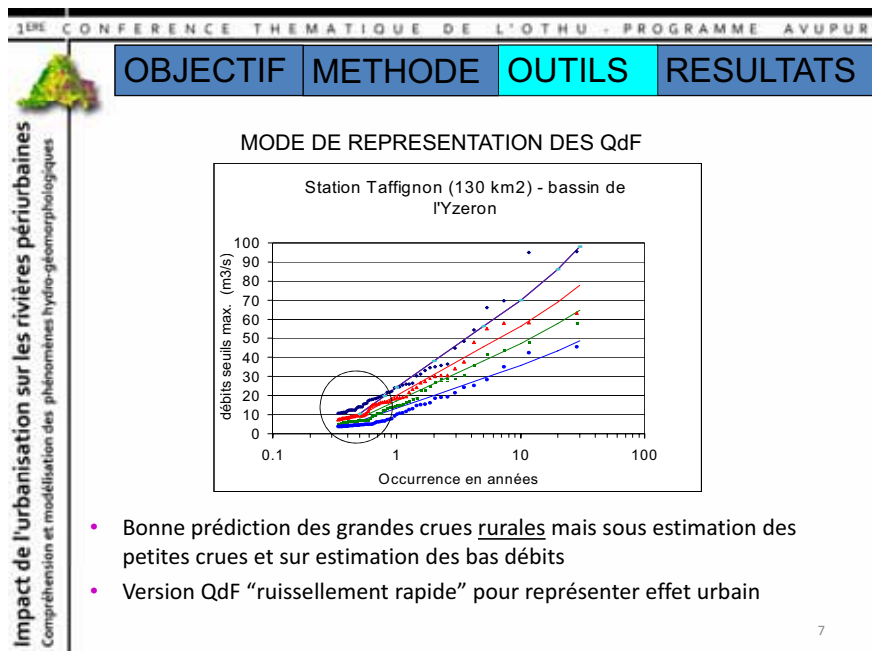
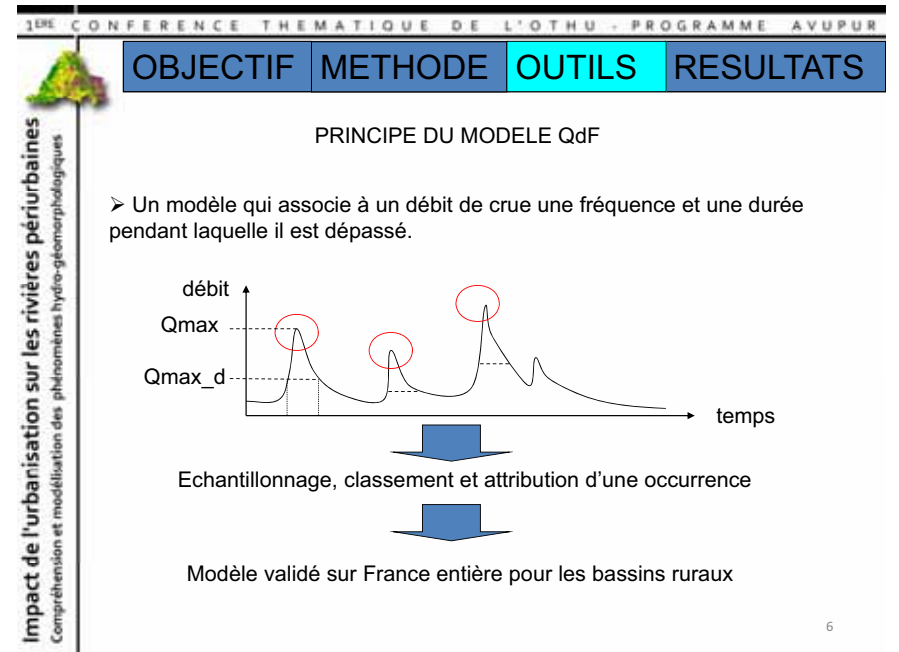
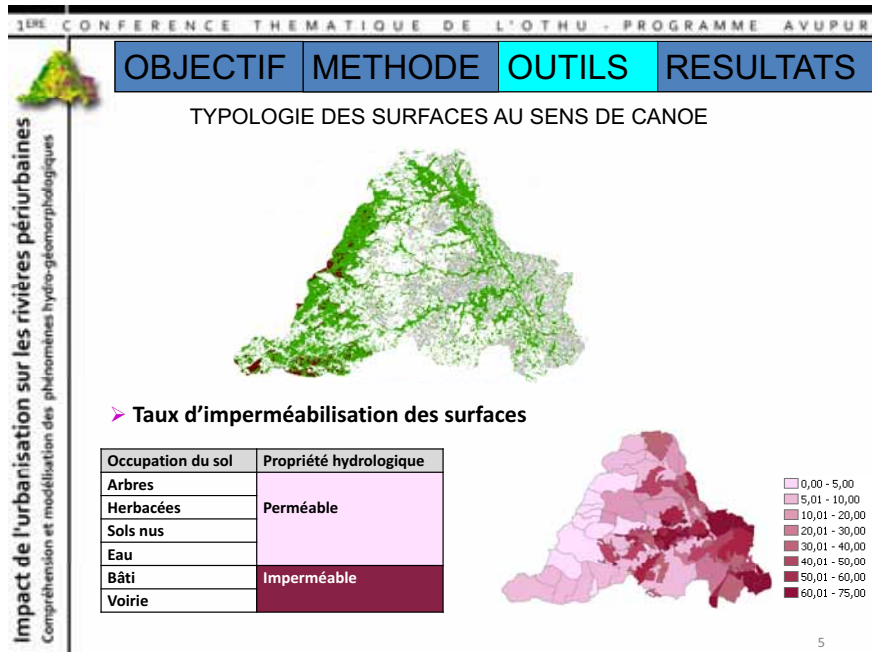
Prairies permanentes
 Cultures annuelles
 Cultures en rang

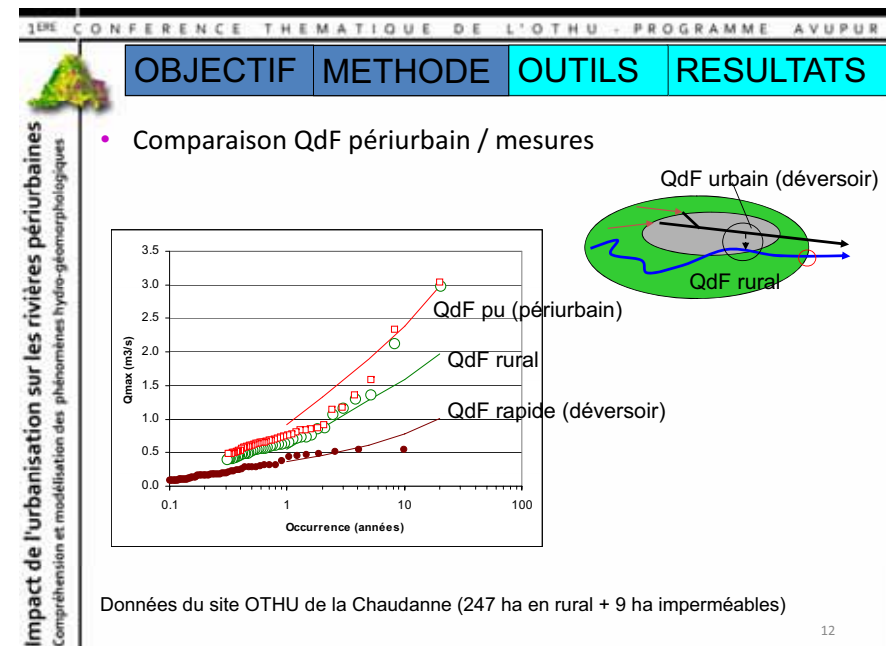
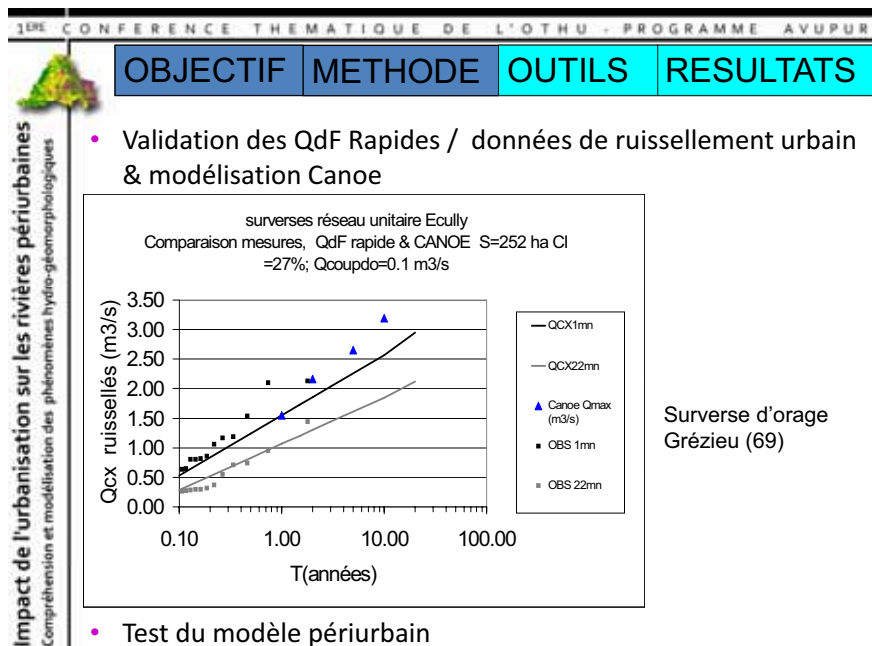
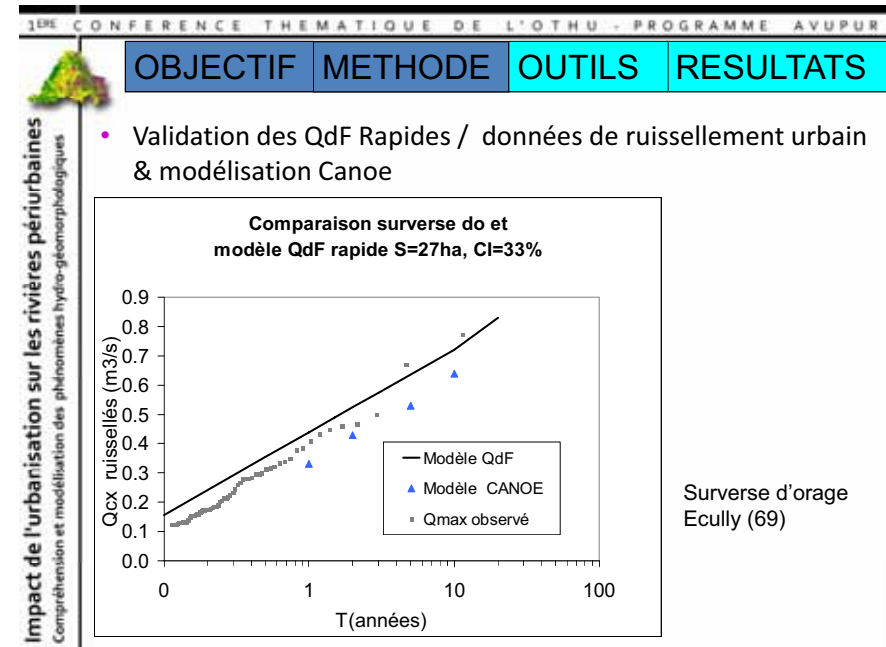
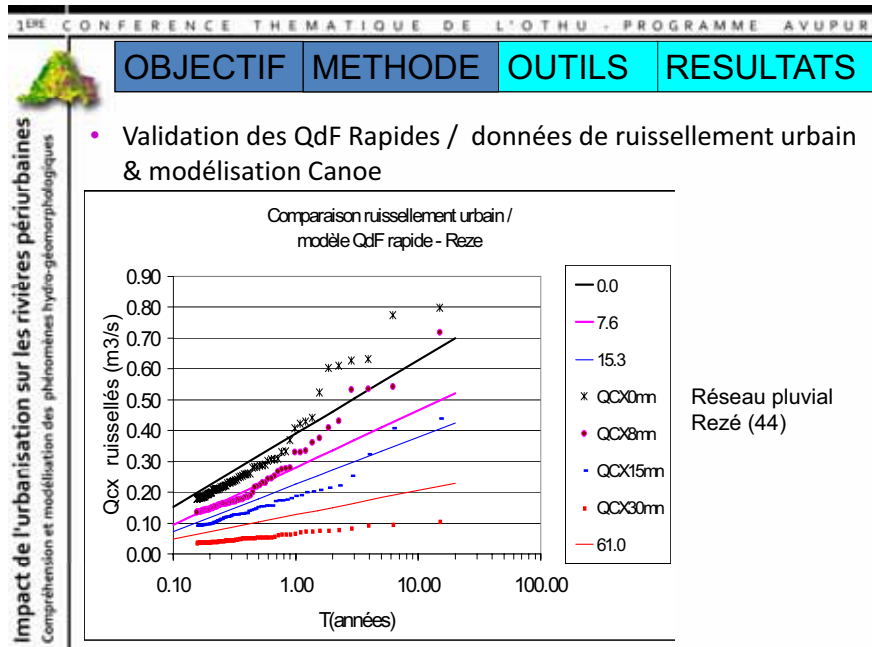
Occupation du sol	Propriété hydrologique
Arbres	Perméable
Herbacées	
Sols nus	
Eau	Imperméable
Bâti	
Voirie	

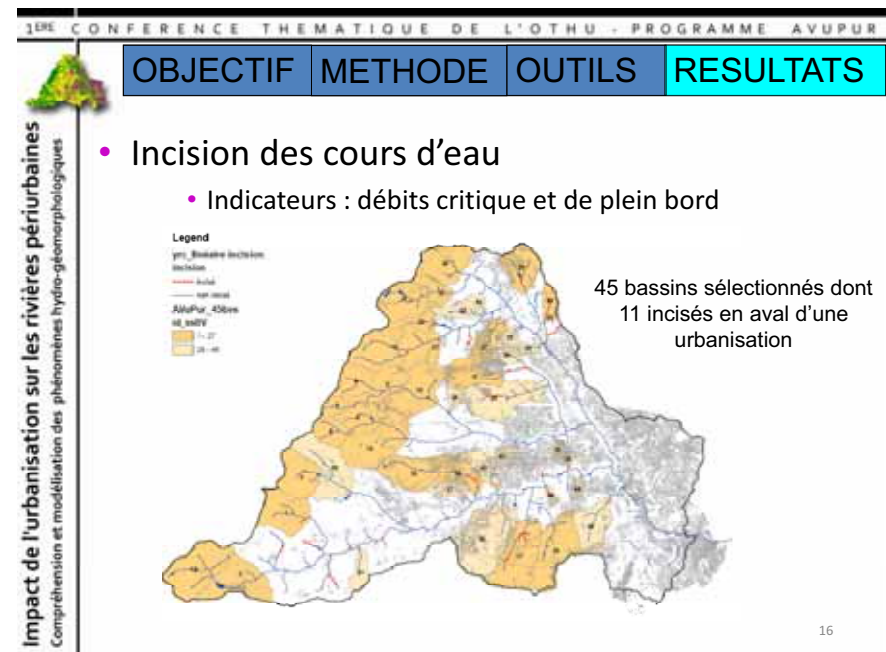
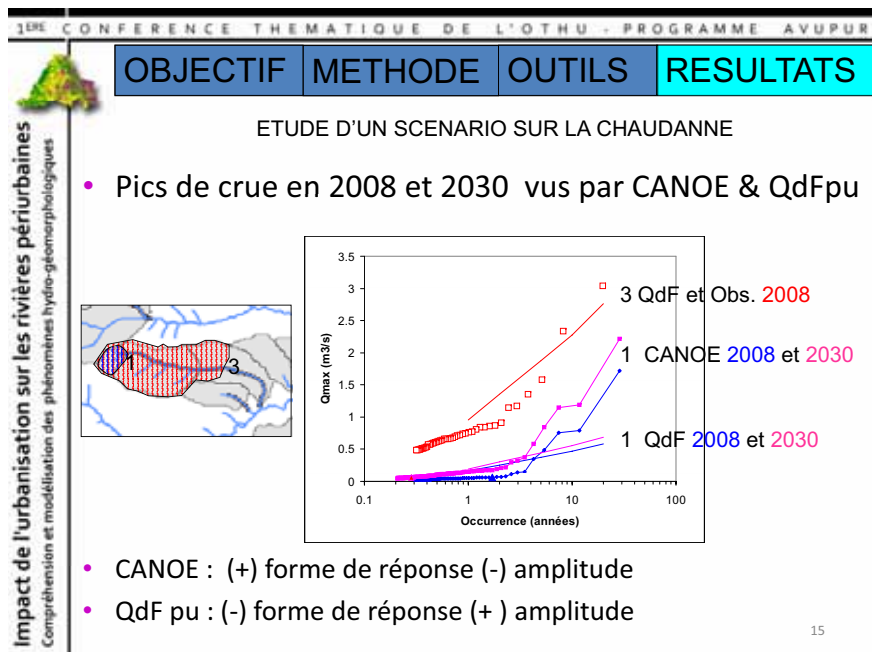
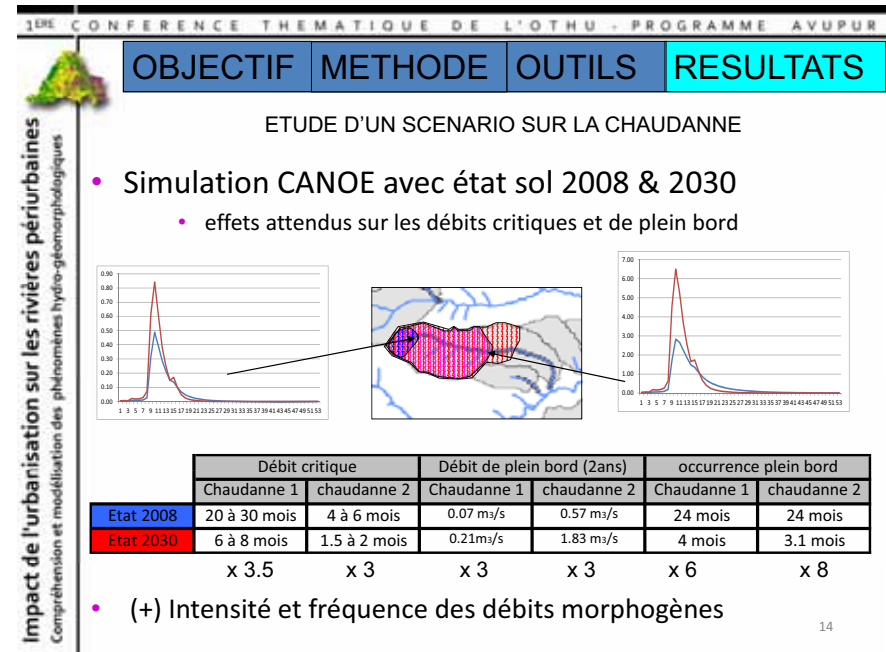
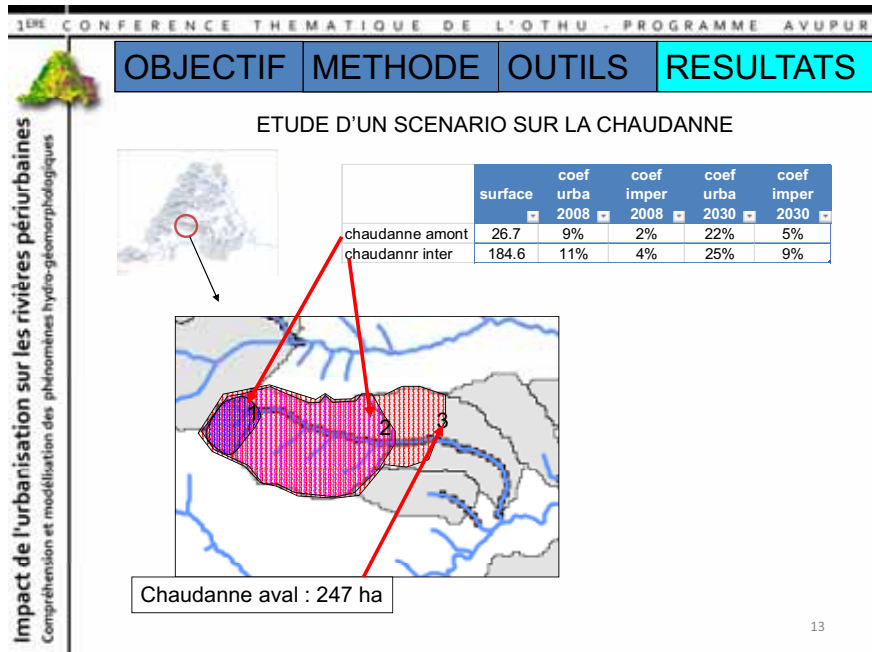


% surfaces imperméables

- 0,00 - 5,00
- 5,01 - 10,00
- 10,01 - 20,00
- 20,01 - 30,00
- 30,01 - 40,00
- 40,01 - 50,00
- 50,01 - 60,00
- 60,01 - 75,00



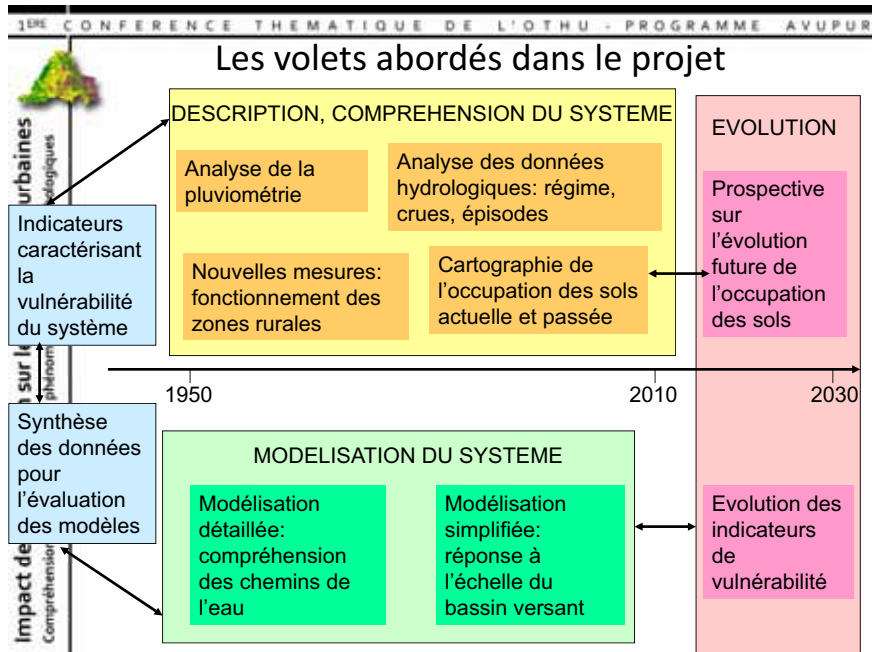






Synthèse

Isabelle BRAUD, CEMAGREF



1ERE CONFERENCE THEMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

De l'importance des données

- **Sans données, on ne peut rien faire....**
 - Des données de nature différentes pour l'étude des bassins périurbains **et bien souvent des sources très différentes, avec des formats et des contenus différents**, surtout si le bassin versant dépend de différentes communautés de communes
 - Pour AVuPUR: une douzaine de conventions pour l'utilisation des données, avec souvent des conditions restrictives (uniquement pour le projet, pas de droit de redistribution)
 - Et pourtant, c'est en **combinant** ces différentes sources de données qu'on peut **progresser**
 - Serait-il possible de mutualiser les données sur les bassins versants? Où? Comment?

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

1ERE CONFERENCE THEMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

De l'importance des données

- **Importance des observatoires sur le long terme....**
 - Un suivi de long terme qui permet une bonne connaissance des bassins
 - Une capitalisation des données
 - Une densité de l'information plus importante (bassins de recherche)
 - Nécessaire pour la mise au point de méthodes, l'évaluation des modèles
- **Et pour les autres bassins??**
 - Vers le développement de méthodes avec un minimum de calibration transposable à d'autres bassins
 - Exploitation de couches SIG et d'images pour leur description
 - Une chance: **les données de l'auto-surveillance des réseaux?** Quelle disponibilité?

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

1ERE CONFERENCE THEMATIQUE DE L'OTHU - PROGRAMME AVUPUR

Avoir conscience des incertitudes

- Incertitudes sur la connaissance du milieu, même si de plus en plus de données existent
 - Données SIG mais connaissance terrain irremplaçable
 - Images aériennes ou satellites: mais attention à l'interprétation, à la résolution. Ce qu'on en tire dépend de ce que l'on recherche!!
- Incertitudes sur la connaissance de la pluviométrie et sa variabilité spatio-temporelle
 - On le savait déjà
 - On commence à pouvoir les quantifier
- Incertitudes sur les résultats des modèles
 - Des progrès vers des modélisations transposables
 - Mais toujours besoin de données de validation
- Et **fortes incertitudes sur les projections futures**

Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines
Compréhension et modélisation des phénomènes hydro-géomorphologiques

Les questions encore en suspens

- Valorisation des résultats obtenus
 - Exploitation des résultats des simulations pour un calcul complet des différents indicateurs
 - Publication/diffusion des résultats vis-à-vis des scientifiques et des gestionnaires
- Des nouvelles pistes d'étude
 - Simulation de l'impact de techniques alternatives à l'échelle d'un bassin versant?
 - Faire le lien entre flux d'eau et flux de polluants.
 - D'autres pistes??

AVUPUR

ANR

Cemagref

iraty

HYDROWIDE

INSA

isara Lyon

EIS

**MERCI POUR VOTRE PARTICIPATION
ACTIVE AU SUCCES DE CETTE
JOURNEE**

Remerciements:

- Financement du projet : ANR VMS&S
- Fourniture de données : OTHU, SAGYRC, Grand Lyon, Dreal Rhône-Alpes, IGN, Météo-France, SIAVHY, CCVL, Nantes-Métropole, Projet ISI
- Soutien pour la conférence : Grand Lyon, Agence de l'Eau RM&C, Région Rhône-Alpes, DREAL, Conseil Général du Rhône, CERTU

Rhône-Alpes
GRAND LYON
communauté urbaine

graie



Projet de fiche technique OTHU : Estimation des incertitudes sur les courbes de tarage

F. BRANGER, J. LE COZ et B. RENARD, Cemagref

Titre : Estimation des incertitudes sur les courbes de tarage

Contacts/Auteurs

Flora BRANGER, Jérôme LE COZ, Benjamin RENARD, Cemagref, UR HHLY, 3bis Quai Chauveau, CP 220, 69336 Lyon Cedex 9. Tel : 04 72 20 89 24.
Email : flora.branger@cemagref.fr

Résumé

La plupart des stations de mesure de débit installées sur des cours d'eau naturels mesurent les débits de manière indirecte, en transformant des mesures de hauteurs d'eau en débits à l'aide de courbes de tarage. La méthodologie a été développée pour quantifier les incertitudes sur ces courbes de tarage, étape importante pour la quantification des incertitudes sur les débits instantanés. Pour une station donnée, cette méthode utilise le cadre statistique de l'inférence Bayésienne pour caler une courbe de tarage et estimer ses incertitudes, en fonction des incertitudes individuelles de chaque jaugeage et d'a priori obtenus par l'analyse hydraulique de cette station. Cette méthode a été appliquée sur plusieurs stations du bassin versant péri-urbain de l'Yzeron (site OTHU). Cela a permis de caler des courbes de tarage parfois composées, d'estimer leurs incertitudes et de cibler les gammes qui sont encore à améliorer par des jaugeages complémentaires (bas et très bas débits).

Cadre général et contexte

Les mesures de débit en continu sont des données de base indispensables pour les études hydrologiques en milieu urbain et péri-urbain, qu'elles s'intéressent aux inondations, étiages ou à l'estimation des flux de polluants arrivant aux milieux récepteurs. La plupart des stations de mesure de débit installées sur des cours d'eau naturels, mais aussi dans certains cas dans les réseaux d'eaux pluviales ou usées, mesurent les débits de manière indirecte. Un limnimètre mesure et enregistre en continu le niveau d'eau dans le cours d'eau ou la conduite. Cette hauteur d'eau est ensuite convertie en débit au moyen d'une loi de transformation hauteur – débit appelée aussi courbe de tarage. Ces courbes de tarage sont généralement établies au moyen de mesures ponctuelles appelées jaugeages. En fonction du nombre de ces jaugeages, de leur incertitude, de la gamme de débits dans laquelle ils sont situés, et de la configuration des stations, les lois de transformation peuvent être assez incertaines, surtout dans les gammes de débit très hautes (crues) et très basses (étiages). Il est donc particulièrement important

de quantifier les incertitudes sur les courbes de tarage pour avoir des estimations des incertitudes sur les débits instantanés, et par là pouvoir encadrer l'utilisation de ces données pour les études hydrologiques.

Objectifs spécifiques de l'étude

Le Guide ISO NF ENV 13005 (GUM) pour l'expression des incertitudes sur les mesures, qui constitue la référence internationale dans le domaine, considère que les valeurs possibles d'une grandeur suivent une distribution statistique autour de la valeur mesurée. L'écart-type de cette distribution est appelée incertitude-type u . On utilise en pratique l'incertitude élargie U , qui correspond à l'intervalle dans lequel on s'attend à ce qu'une fraction élevée des valeurs se situe. Le plus souvent, il s'agit du niveau de confiance à 95%, ce qui correspond à $k=2$ dans l'équation ci-dessous, en supposant une loi de distribution gaussienne.

En reprenant et en précisant la formulation établie par Olivier et al. (2008), on peut estimer l'incertitude totale sur le débit instantané mesuré Q comme la combinaison de trois termes :

- l'incertitude sur la loi $Q(h)$ établie pour des conditions qui correspondent à un régime hydraulique de référence ; c'est l'incertitude sur la courbe de tarage proprement dite ;
- incertitude due à l'écart aux conditions hydrauliques de référence. Ce terme regroupe l'incertitude liée aux modifications du contrôle hydraulique (changement de forme du lit par érosion ou dépôt, végétation saisonnière par exemple), et celle due à des effets transitoires (hystérésis en montée de crue par exemple) ;
- l'incertitude issue de la propagation de l'incertitude de mesure du niveau d'eau $u(h)$.

$$U(Q) = k \sqrt{u_{\text{tarage}}^2(Q) + u_{\text{écart}}^2(Q) + \left[u(h) \frac{\partial Q}{\partial h} \right]^2}$$

L'objectif de la présente fiche technique est de proposer une méthodologie d'estimation du premier terme u_{tarage} .

Avancées de l'OTHU/Principaux résultats

Methodologie : théorie

La méthodologie développée se place dans le cadre de l'inférence Bayésienne, et utilise des éléments d'analyse hydraulique sur les stations hydrométriques considérées. La formulation mathématique est la suivante : les couples $(H_i, \tilde{Q}_i)$ correspondent aux valeurs de hauteurs et débits mesurées ponctuellement (jaugeages). A H_i donné, on suppose que l'erreur ε_i^Q sur chaque débit jaugé $\tilde{Q}_i$ suit une loi normale d'écart-type u_i^Q connu (c'est l'incertitude-type de chaque jaugeage). On considère également qu'il existe une relation hydraulique f permettant de lier les hauteurs H_i aux débits Q_i en fonction d'un ensemble de paramètres θ (c'est la courbe de tarage), et que l'erreur associée ε_i^f suit également une loi normale d'écart-type constant inconnu σ_f . Les distributions a priori des paramètres θ sont considérées comme connues.

$$\tilde{Q}_i = Q_i + \varepsilon_i^Q \quad \varepsilon_i^Q \sim N(0, u_i^Q)$$

$$Q_i = f(H_i | \tilde{\theta}) + \varepsilon_i^f \quad \varepsilon_i^f \sim N(0, \sigma_f)$$

La combinaison de ces équations sous hypothèse d'indépendance des variables permet d'aboutir à la formulation suivante :

$$\tilde{Q}_i = f(H_i | \tilde{\theta}) + \varepsilon_i^f + \varepsilon_i^Q \quad \varepsilon_i^Q + \varepsilon_i^f \sim N(0, \sqrt{\sigma_f^2 + (u_i^Q)^2})$$

Un outil d'analyse Bayésienne, BaRatin a été développé (Cemagref, Renard *et al.*, 2011). Il permet d'estimer les distributions a posteriori des paramètres de la loi hydraulique θ , ainsi que l'incertitude restante σ_f , par des simulations MCMC (Monte Carlo Markov Chains) (Renard *et al.*, 2006). L'incertitude sur la courbe de tarage u_{tarage} correspond à la combinaison des incertitudes sur les paramètres θ et de l'incertitude restante σ_f .

Méthodologie pratique

La mise en pratique de cette méthodologie consiste, pour une station donnée, à :

1. Estimer l'incertitude-type de chaque jaugeage disponible.

Cette incertitude dépend de la méthode de jaugeage employée (exploration du champ des vitesses par courantomètre, profileur Doppler ADCP, dilution,...) et des conditions opérationnelles du jaugeage (Le Coz *et al.*, 2011). Par exemple, pour un jaugeage par exploration du champ des vitesses, il faut prendre en compte le nombre de verticales et le nombre de points de mesure de vitesse par verticale. Les variations de débit au cours du jaugeage, fréquentes en milieu urbain et péri-urbain où les dynamiques de crues sont extrêmement rapides, ajoutent également

à l'incertitude sur le débit estimé à hauteur fixée. Des ordres de grandeur typiques pour des jaugeages réalisés dans les bonnes conditions d'application sont des incertitudes-types de 2.5 à 5%.

2. Formuler les a priori hydrauliques (paramètres θ) par analyse/modélisation du site de la station.

Le principe physique permettant l'établissement de courbes de tarage est le contrôle hydraulique, c'est-à-dire les caractéristiques physiques d'un chenal qui déterminent la relation entre la hauteur et le débit à un emplacement donné. Ce contrôle peut être exercé par le chenal dans son ensemble (Figure 1a) ou par une section dite de contrôle (Figure 1b) où l'écoulement passe par le régime critique. Des sections de contrôle peuvent être obtenues par l'implantation de déversoirs rectangulaires ou triangulaires ou de canaux jaugeurs à constriction. La nature du contrôle hydraulique peut également varier selon la gamme de débit considérée (par exemple contrôle par déversoir à bas débit, et par le chenal à fort débit lorsque le déversoir est noyé).

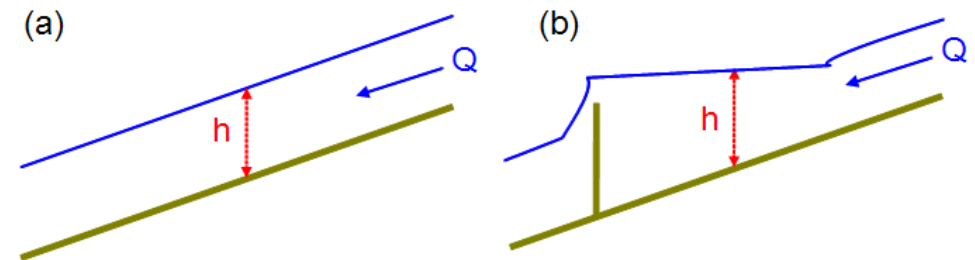


Figure 1 : contrôle hydraulique par chenal (a) ou par section de contrôle (b) le long d'un chenal idéalisé.

La définition des a priori hydrauliques se fonde sur l'expertise hydraulique du site (identification des contrôles, géométrie, hydraulicité, ouvrages). Pour chaque gamme de hauteur d'eau correspondant à un contrôle hydraulique identifié, la relation hauteur-débit peut être approchée par une équation du type :

$$Q = a(h - b)^c$$

On pourra utiliser la loi de Manning-Strickler ($c = 5/3$) pour un contrôle par le chenal, et des lois d'ouvrage classiques comme les formules de déversoir triangulaire ($c = 5/2$) ou rectangulaire ($c = 3/2$) selon la situation. Pour l'outil BaRatin, il faut préciser pour chaque gamme de hauteur les distributions estimées a priori des paramètres a , b et c , ainsi que les hauteurs de transition entre gammes, sous la forme de moyenne et écart-type dans le cas d'une distribution gaussienne. Cela permet de contraindre plus ou moins fortement la simulation selon la confiance que l'on accorde aux a priori (par exemple des écart-types faibles pour les valeurs des

exposants c). L'expertise peut également être confortée par une modélisation numérique (le plus souvent 1D, voire 2D/3D en cas d'écoulement complexe).

3. Le simulateur BaRatin permet enfin d'obtenir :

- La courbe de tarage estimée a posteriori (valeurs les plus probables des paramètres θ), prenant en compte les a-priori hydrauliques formulés, les jaugeages disponibles et leurs incertitudes respectives ;
- Une quantification de l'incertitude sur cette courbe calée, sous forme de distribution ou d'intervalle à un niveau de confiance donné (usuellement 95%).

Application sur le bassin versant de l'Yzeron

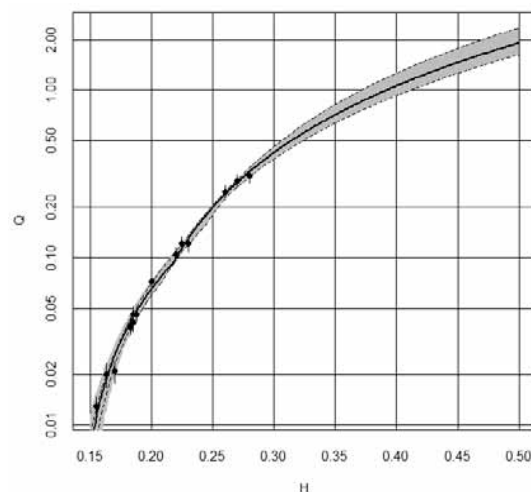


Figure 2 : station du Pont de la Barge sur la rivière Chaudanne (a) et courbe de tarage estimée en échelle logarithmique (b). Les hauteurs sont en m et les débits en m^3/s . En gris l'incertitude sur la courbe représentée par un intervalle de confiance à 95%. Les points sont les jaugeages représentés avec leurs incertitudes respectives.

Cette méthode a été appliquée sur plusieurs stations du site OTHU bassin versant de l'Yzeron, situé dans l'ouest lyonnais. Sont présentés ici à titre d'exemple les résultats sur les stations du Pont de la Barge et de la Léchère sur la rivière Chaudanne (~ 2 à 4 km^2), et sur la station du Charbonnières ($\sim 23 \text{ km}^2$). Ces stations ont des configurations contrastées : contrôle à bas débit par un seuil rectangulaire épais en béton, puis par la section à plus fort débit (la station est située sous un pont, Figure 2) pour la station du Pont de la Barge, avec 16 jaugeages disponibles ; contrôle par un canal jaugeur Parshall calibré avec 10

jaugeages disponibles pour la station de la Léchère (Figure 3); contrôle par un seuil à double sensibilité (déversoir triangulaire puis seuil rectangulaire épais) et 16 jaugeages disponibles pour la station du Charbonnières (Figure 4).

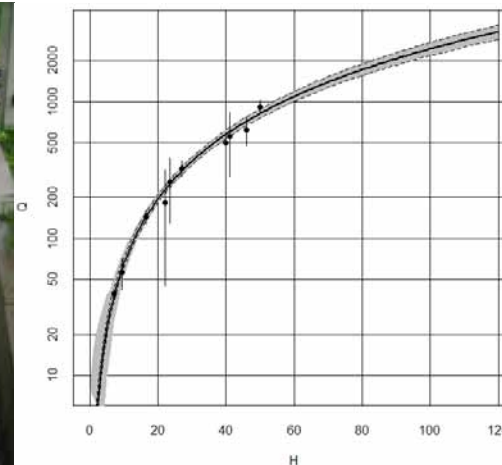


Figure 3 : station de la Léchère sur la rivière Chaudanne (a) et courbe de tarage estimée en échelle logarithmique (b). Les hauteurs sont en cm et les débits en L/s. En gris l'incertitude sur la courbe représentée par un intervalle de confiance à 95%. Les points sont les jaugeages représentés avec leurs incertitudes respectives.

Les résultats sont présentés Figures 2 à 4. La méthode a permis de caler une courbe de tarage pour chaque station, y compris dans le cas de lois composées. On a bien retrouvé a posteriori les a priori hydrauliques énoncés, notamment par rapport aux exposants et aux hauteurs de coupure qui correspondent aux mesures de terrain des hauteurs de seuil. Cela montre la pertinence de l'approche d'analyse hydraulique. Les résultats montrent également que les intervalles d'incertitudes sont variables en fonction des domaines, ce qui permet d'identifier les gammes de débits pour lesquelles les courbes sont les plus incertaines. Par exemple, sur la station Charbonnières (Figure 4), la gamme moyenne (y compris la zone de transition entre le contrôle par le déversoir triangulaire et par le seuil rectangulaire) est très bien connue ; mais les gammes basse et haute sont encore incertaines. Cela permet aux équipes de terrain de mieux cibler les gammes à jauger. D'une manière générale, l'utilisation des a priori hydrauliques a permis de diminuer l'incertitude à haut débit (extrapolation au-delà de la gamme jaugée). Par contre, les résultats pour toutes les stations montrent la nécessité de jaugeages à bas et très bas débit.

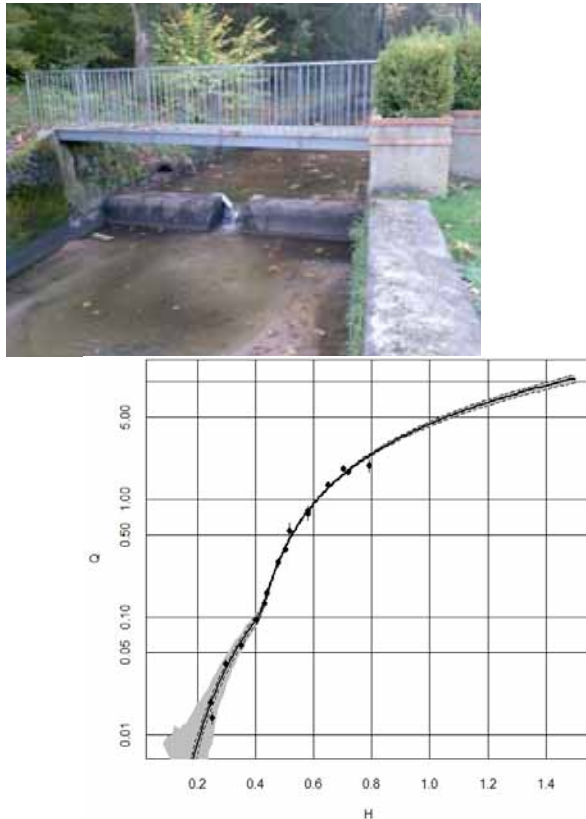


Figure 4 : station de la rivière Charbonnières (a) et courbe de tarage estimée en échelle logarithmique (b). Les hauteurs sont en m et les débits en m^3/s . En gris l'incertitude sur la courbe représentée par un intervalle de confiance à 95%. Les points sont les jaugeages représentés avec leurs incertitudes respectives.

Cadre d'utilisation

Cette méthode est construite pour le cas de courbes de tarage simples $Q(h)$, croissantes et univoques. Des relations plus complexes faisant intervenir d'autres variables que la hauteur d'eau (vitesse, pente de la ligne d'eau...) du fait par exemple d'une influence aval ou de la mise ne charge d'une conduite, ne sont pas traitées ici.

Par ailleurs, la méthode ne peut s'appliquer de façon pertinente que lorsque des mesures in situ (jaugeages) sont disponibles pour chaque gamme de contrôle

hydraulique. Dans le cas contraire, les résultats des simulations correspondront aux a priori indiqués par l'utilisateur, ce qui est souvent le cas dans la gamme de débordement en lit majeur. Il est souhaitable de disposer d'au moins 3 à 6 jaugeages pour chaque gamme de contrôle hydraulique identifiée, sachant que bien entendu la méthode sera d'autant plus fiable que les jaugeages seront nombreux et bien répartis.

La méthode n'est par ailleurs pas limitée aux seuls petits cours d'eau des bassins urbains et péri-urbains. Elle est actuellement en cours d'application sur plusieurs rivières françaises (Ardèche, Alsace...) sur des bassins jusqu'à 2000 km^2 .

Développements futurs

Le travail sera poursuivi dans trois directions pour améliorer la méthode. La première est l'amélioration du calcul des incertitudes individuelles sur les jaugeages, notamment pour les petits cours d'eau. Notamment, une difficulté rencontrée sur l'Yzeron est l'effet de l'intrusion de l'appareil dans de faibles tirants d'eau à bas débit. Cet effet n'a pas été pris en compte pour l'instant, ce qui conduit à des incertitudes probablement sous-estimées pour la station du Pont de la Barge sur la Chaudanne. Une autre source d'incertitude importante sur l'Yzeron est l'intégration temporelle d'un débit variable lors de jaugeages effectués en régime hydraulique variable.

Le second axe de travail est l'estimation de l'incertitude d'écart aux conditions hydrauliques de référence, liée à la variabilité des contrôles hydrauliques, et aux effets de régime transitoire. Il s'agit de la composante la plus difficile à évaluer, et doit nécessairement être appréciée au cas par cas. Dans le cas de détarage, il peut ne pas y avoir d'autre solution que le changement de courbe de tarage.

Enfin, on travaillera aussi sur l'automatisation de l'ensemble de la chaîne de calcul des incertitudes sur les débits instantanés, en propageant également l'incertitude sur la mesure de hauteur d'eau, de façon à obtenir de façon automatique l'incertitude associée à chaque valeur d'un hydrogramme.

Documents publiés

NF ENV 13005 (1999), Guide pour l'expression des incertitudes de mesure, ISO, 120 p.

Le Coz, J., B. Camenen, G. Dramais, M. Ferry, J.-L. Rosique, J. Ribot-Bruno (2011, sous presse) Guide pratique pour le contrôle des débits réglementaires, Onema/Cemagref, 174 p.

Olivier, O., G. Pierrefeu, M. Scotti, and Blanquart B. (2008) Incertitudes sur les débits issus des courbes de tarage, conférence SHF « Mesures hydrologiques et incertitudes ».

Renard, B., Garreta, V., Lang, M. (2006). An application of Bayesian analysis and Markov chain Monte Carlo methods to the estimation of a regional trend in annual maxima, Water Resources Research, 42, W12422.

Renard, B., M.-H. Ramos, M. Thyer, J. Le Coz, F. Branger, D. Kavetski, G. Kuczera (2011) Tracking the role of streamflow uncertainty in hydrological ensemble predictions, EGU 2011, Session: HS4.3/AS4.13/NH1.12.