



OBSERVATOIRE DE TERRAIN EN HYDROLOGIE URBAINE

LES FICHES TECHNIQUES DE L'OTHU

Eaux
pluviales

Laboratoire
hors murs

Infiltration
Rejets urbains

Assainissement

Milieux
aquatiques

Aide à la décision

Recherches
pluridisciplinaires

Pluie

Impact

Impact de l'urbanisation
sur les rivières périurbaines

Fiches 13, 14 et 22-25 - Edition Juin 2011



PARTENAIRES



Animation/Secrétariat de l'OTHU
Domaine scientifique de la Doua
66 bd Niels Bohr - B.P. 52132
69603 Villeurbanne Cedex – France
Tél : 33 (0)4 72 43 63 02
E.mail : info@othu.org

<http://www.othu.org>

SOMMAIRE

■ Présentation de l'OTHU	5
■ Présentation des sites expérimentaux OTHU	7
■ Les Fiches techniques de l'OTHU	11
■ Fiche technique N°13 « Méthode d'estimation de la modification du régime des crues dû à l'urbanisation » (2007)	13
■ Fiche technique N°14 « Une méthode de typologie hydro-géomorphologique d'états de référence de cours d'eau : vers un outil de gestion des hydrosystèmes périurbains » (2007)	17
■ Fiche technique N°22 « Délimitation d'un bassin versant périurbain et identification de son réseau de drainage » (2011)	21
■ Fiche technique N°23 « Méthodologies d'analyse de tendances sur de longues séries hydrométéorologiques » (2011)	25
■ Fiche technique N°24 « Méthodes de cartographie de l'occupation du sol et de son évolution pour le suivi des phénomènes hydrologiques de bassins versants périurbains » (2011)	31
■ Fiche technique N°25 « Méthodes de prospective territoriale pour simuler les évolutions de l'occupation future du sol appliquées à un bassin versant périurbains. » (2011)	35
■ Équipes membres et correspondants de l'OTHU	41

La rédaction des fiches a été réalisée avec la collaboration de Philippe BATTAGLIA, CETE de l'est, Nathalie LENOUEAU, Clara VILLAR, Muriel SAULAIS du CERTU

RAPPEL de l'ensemble des Fiches techniques de l'OTHU 2002-2011

Disponibles en téléchargement sur le site internet de l'OTHU : <http://www.othu.org>

- **Fiche technique N°1**
« Mesures de la pollution des sols issue des rejets urbains de temps de pluie » (2002)
- **Fiche technique N°2**
« Incertitudes de mesure des débits et prise en compte dans le calage des modèles » (2002)
- **Fiche technique N°3**
« Appréciation et suivi du potentiel écologique « PE » : application aux cours d'eau en paysages urbanisés. » (2007)
- **Fiche technique N°4**
« La base de données VIGILANCE du Grand Lyon » (2002)
- **Fiche technique N°5**
« Pré-validation automatique de données environnementales en hydrologie urbaine » (2002)
- **Fiche technique N°6**
« Plan d'expérimentation pour la mesure des impacts de l'infiltration des eaux pluviales sur la qualité physico-chimique et biologique des nappes en zones urbanisées. » (2005)
- **Fiche technique N°7**
« Métrologie de terrain et qualité des données » (2002)
- **Fiche technique N°8**
« Caractérisation des fonds de bassin d'infiltration : nouveaux paramètres physico-chimiques et microbiologiques » (2005)
- **Fiche technique N°9**
« Indicateurs de performance de stratégies d'assainissement pluvial par infiltration: Analyse critique » (actualisée en 2009)
- **Fiche technique N°10**
« Auto épuration des rejets urbains de temps de pluie par les bassins d'infiltration » (2005)
- **Fiche technique N°11**
« Éléments sur le colmatage des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales » (2005)
- **Fiche technique N°11-2**
« Nouveaux Éléments sur le colmatage des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales » (2009)
- **Fiche technique N°12**
« Micro-capteurs pour l'évaluation de la qualité chimique des petites rivières péri-urbaines » (2007)
- **Fiche technique N°13**
« Méthode d'estimation de la modification du régime des crues dû à l'urbanisation » (2007)
- **Fiche technique N°14**
« Une méthode de typologie hydro-géomorphologique d'états de référence de cours d'eau: vers un outil de gestion des hydrosystèmes périurbains » (2007)
- **Fiche technique N°15**
« Vers une méthodologie d'étude de la végétation naturelle de bassins d'infiltrations » (2009)
- **Fiche technique N°16**
« Tranchées d'infiltration » (2009)
- **Fiche technique N°17**
« Évaluation de l'aléa pluvieux rare » (2009)
- **Fiche technique N°18**
« Comportement hydrodynamique des bassins retenue/ décantation » (2009)
- **Fiche technique N°19**
« Accumulation des métaux au sein des bassins d'infiltration des eaux pluviales » (2009)
- **Fiche technique N°20**
« Amélioration des procédés de gestion des résidus de curage - Prétraitement des résidus de curage des bassins de rétention et d'infiltration » (2009)
- **Fiche technique N°21**
"Impact de l'infiltration artificielle d'eau pluviale sur le fonctionnement des aquifères : implications en termes de gestion"(2010)
- **Fiche technique N°22**
« Délimitation d'un bassin versant périurbain et identification de son réseau de drainage » (2011)
- **Fiche technique N°23**
« Méthodologies d'analyse de tendances sur de longues séries hydrométéorologiques » (2011)
- **Fiche technique N°24**
« Méthodes de cartographie de l'occupation du sol et de son évolution pour le suivi des phénomènes hydrologiques de bassins versants périurbains » (2011)
- **Fiche technique N°25**
« Méthodes de prospective territoriale pour simuler les évolutions de l'occupation future du sol appliquées à un bassin versant périurbains. » (2011)

L'OTHU est un laboratoire hors murs d'observation des rejets urbains et de leurs impacts sur les milieux récepteurs - notamment par temps de pluie - pour proposer de nouvelles solutions de conception et de gestion de l'assainissement

■ Enjeux et objectifs

L'OTHU vise à apporter des réponses à des problématiques très importantes pour les villes du prochain siècle :

- Comment améliorer la qualité des milieux naturels et protéger la ressource en eau ?
- Comment diminuer le risque d'inondation ?
- Comment diminuer les coûts de réalisation et d'exploitation des systèmes urbains d'assainissement ?
- Comment mieux intégrer l'eau dans le paysage urbain ?

■ Complémentarité des partenaires

L'OTHU repose sur une quinzaine de laboratoires de recherche de niveau international.

Les compétences scientifiques mobilisées par le projet couvrent une très grande diversité de champs disciplinaires complémentaires : géographes, climatologues, hydrologues, mécaniciens des fluides, hydrauliciens, mécaniciens des sols, chimistes, biologistes, microbiologistes, hydrobiologistes, sociologues, économistes.

Il bénéficie également du soutien technique de la Communauté urbaine de Lyon et de différents partenaires susceptibles de diffuser efficacement les résultats obtenus (GRAIE, CERTU, Agence de l'eau Rhône Méditerranée & Corse).

■ Structuration du partenariat

Les partenaires scientifiques ont constitué en 1999 la Fédération d'équipes de recherche OTHU qui regroupe aujourd'hui neuf établissements (BRGM, Cemagref, École Centrale de Lyon, ENTPE, INSA, Université Lyon 1, Université Lyon 2, Lyon 3 et VetAgro Sup*). **L'organisme porteur est l'INSA de Lyon.**

L'OTHU est doté d'un Conseil Scientifique et d'un Comité de Gestion. Il est placé sous la responsabilité d'un directeur.

Le Grand Lyon a inscrit le projet dans le cadre du contrat d'agglomération et signé une convention de partenariat avec la Fédération de recherche. L'OTHU est soutenu par ailleurs par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée & Corse, la Région Rhône-Alpes, les Ministères de l'Ecologie, de la Recherche.

Enfin, le GRAIE - Groupe de Recherche Rhône Alpes sur les Infrastructures et l'Eau, structure porteuse pour le montage du projet, assure aujourd'hui l'animation, la valorisation et le secrétariat de l'OTHU.

* Établissement associé en 2010

■ Programme de recherche

La mise en place de l'OTHU s'est appuyée sur une démarche parallèle de construction d'un programme de recherche associé à l'observatoire (basé sur les données acquises).

Les objectifs scientifiques à moyen terme de l'observatoire développé dans ce programme sont de mieux comprendre et mieux représenter :

- les mécanismes générateurs des flux urbains d'eau (inondations) et de polluants,
- la dynamique de ces flux dans le système d'assainissement et dans les milieux naturels,
- les effets à court et moyen termes de ces flux sur les écosystèmes aquatiques (rivières, nappes),
- l'efficacité des dispositifs de gestion urbaine des eaux (techniques d'assainissement).

Ce programme de recherche est validé par un comité scientifique constitué pour moitié des représentants des équipes et pour moitié d'experts internationaux reconnus. Et élaborer conjointement avec les partenaires scientifiques et opérationnels de l'observatoire.

Les thématiques retenues pour le programme 2010-2014 (4^{ème} programme) sont les suivantes :

- Amélioration des connaissances et développement d'outils et méthodes en matière de pluviométrie et de climatologie à l'échelle de l'agglomération, et facteurs de risques associés aux inondations et aux pollutions
- Amélioration des connaissances, modélisation, développement d'outils et méthodes en matière de processus de production et de transfert de l'eau et des polluants en temps sec et en temps de pluie issus des bassins versants urbains et périurbains
- Amélioration des connaissances, modélisation et développement d'outils et méthodes en matière de transformations physiques, chimiques, biologiques des systèmes alternatifs de retenue et d'infiltration et impact de ces systèmes sur les nappes – Amélioration des techniques et des processus d'adoption
- Amélioration des connaissances, modélisation et développement d'outils et méthodes en matière de d'impacts physiques, chimiques, biologiques des systèmes de gestion des eaux pluviales sur les rivières et méthode d'amélioration de ces systèmes (notamment meilleure gestion des déversoirs d'orage)
- Amélioration des outils météorologiques
- Amélioration de la compréhension et de la modélisation de la gestion des eaux pluviales à l'échelle d'une ville
- Actions transversales de mise en cohérence

■ Originalité et importance de l'outil d'observation

Ce programme de recherche repose sur l'exploitation des données issues du laboratoire de terrain, constitué d'un ensemble d'appareils de mesure, installés dans le système d'assainissement de l'agglomération lyonnaise et sur les milieux récepteurs recevant ses effluents. Ce système d'observation est exceptionnel par sa densité, sa qualité (redondance des mesures) et surtout par le fait qu'il est conçu pour être opérationnel pendant au moins une dizaine d'années. Dans le domaine de l'hydrologie urbaine, ce dispositif est unique au niveau international.

Résultats scientifiques et opérationnels

La mise en place de l'observatoire a commencé en 1998. Le matériel est en grande partie installé et de nombreuses campagnes de mesures sont réalisées depuis 2000.

Des résultats significatifs ont été obtenus, comme par exemple :

- L'analyse de l'influence d'un bassin d'infiltration sur la nappe, à partir d'un suivi original physico-chimique et biologique
- L'élaboration d'indicateurs de performances techniques, économiques et environnementaux pour les ouvrages d'infiltration en milieu urbain
- La réalisation d'un simulateur numérique du comportement des bassins versants périurbains à partir de données de pluie, débit et occupation des sols (conçu sur le bassin versant de l'Yzeron)
- Le suivi de l'impact d'un déversoir d'orage sur la qualité d'un petit cours d'eau (notamment sur la faune des sédiments grossiers superficiels)

Ces premiers résultats, sous forme de fiches techniques, sont accessibles sur le site Internet.

Budget

L'investissement depuis la création de l'OTHU s'élève à plus de 1,4 Millions d'€ sur 9 ans.

Acquérir des données coûte cher : le budget de fonctionnement annuel moyen de l'observatoire s'élève à 0,5 Millions d'€ (analyses et gestion du matériel). Ce budget est de 0,7 Millions d'€ lorsque l'on prend en compte le personnel mis à disposition pour assurer le fonctionnement de l'observatoire (budget consolidé).

Le budget de recherche proprement dite vient s'ajouter au fonctionnement de l'observatoire (environ 1 M d'€).

Le budget annuel global de fonctionnement de l'OTHU peut donc être évalué à 1,7 Millions d'€ HT.

Le dispositif expérimental

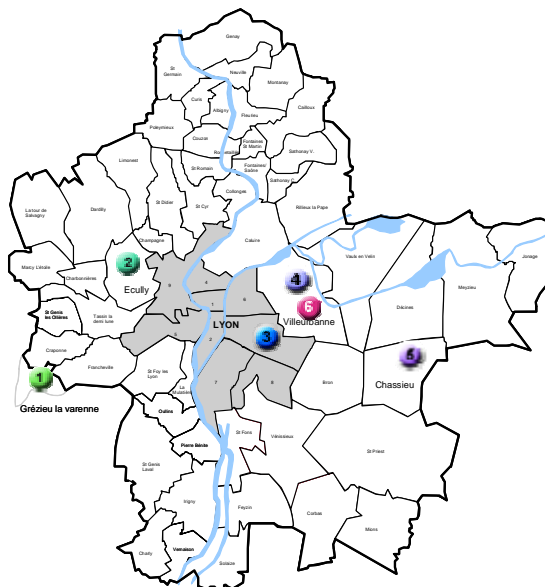
Dans l'état actuel de l'observatoire, deux milieux récepteurs, jugés particulièrement sensibles, sont étudiés :

- la Nappe de l'Est lyonnais,
- l'Yzeron et ses affluents, représentatifs des petites rivières périurbaines de l'ouest lyonnais.

Ultérieurement il est prévu d'étudier le Rhône, dans la traversée de l'agglomération lyonnaise, si les conditions méthodologiques sont remplies.

Cinq sites sont instrumentés ou en cours d'instrumentation sur l'agglomération lyonnaise.

Ces sites sont représentatifs de différents modes d'urbanisation et d'assainissement (réseaux séparatifs et unitaires, D.O., bassins d'infiltration et de retenue).



Carte 1: Localisation des sites expérimentaux OTHU sur l'agglomération Lyonnaise.

SITES	Type de bassin versant (BV)	Système d'assainissement	Milieux touchés par Le système	Objectifs	Etat de fonctionnement
1 Bassin versant de l'Yzeron	Péri-urbain	Réseau unitaire	Ruisseaux de la Chaudanne et du Mercier	Connaissance des flux d'eau et de polluants produits par BV et leurs impacts sur de petites rivières	2 bungalows équipés
2 Ecully	Urbain moyennement dense (Habitations)	Majoritairement unitaire	Nombreux déversements par déversoir d'orage vers le ruisseau du Trouillat	Connaissance des flux d'eau et de polluants produits par ce BV	1 bungalow équipé
3 Lyon Centre	Urbain dense (Habitations et activités commerciales)	Réseau unitaire	Déversement par déversoir d'orage dans le Rhône	Connaissance des flux d'eau et de polluants produits par ce BV	Site arrêté
4 IUT - La DOUA (Villeurbanne)	Urbain dense (activité universitaire)	Réseau séparatif dont l'exutoire est un bassin d'infiltration	Rejet en nappe peu profonde (Zone non saturée inférieure à 1 m)	Connaissance des flux d'eau et de polluants produits par ce BV et leurs impacts sur la nappe	Site équipé
5 Chassieu - Django Reinhardt	Urbain dense (activité industrielle)	Réseau séparatif dont l'exutoire est un bassin de rétention/infiltration	Rejet en nappe profonde (Zone non saturée de l'ordre de 13 m)	Connaissance des flux d'eau et de polluants produits par ce BV et leurs impacts sur la nappe	2 bungalows équipés
Site Eccampus-la doua	Urbain dense (activité universitaire)	Site retenu en 2010 – en cours de définition Destiné à l'étude des flux d'eau et de polluants, de la biodiversité produit par un BV muni de techniques alternatives innovantes de gestion des eaux pluviales (toitures végétalisées, chaussées réservoir, noues ..). Et également à l'analyse performantielle de ces techniques sur le plan hydraulique, environnemental et énergétique .			

Diffusion d'information

- Site internet de l'OTHU
- Journées techniques à destination des opérationnels (techniciens & décideurs)
- Journées thématiques visant à restituer les résultats de programme de recherche développés en appui sur l'OTHU
- Séminaires d'échanges entre chercheurs de l'OTHU
- Publications scientifiques et techniques .

<http://www.othu.org>

Disponible sur le site

- Fiches techniques OTHU : Documents de synthèse par action de recherche finalisée de l'OTHU destinés aux gestionnaires de système d'assainissement et éventuellement aux gestionnaires de milieux

- Recueil d'interventions

- Programme de recherche finalisé basé sur l'OTHU

- Liste des publications et thèses

- ...

Systeme métrologique et sites expérimentaux



Résumé :

L'OTHU est un « laboratoire de recherche hors murs ». Il est constitué de réseaux de mesure implantés sur les différents compartiments qui affectent le cycle de l'eau en milieu urbain ou périurbain (bassins versants, systèmes d'assainissement associés, milieux aquatiques et dans une moindre mesure atmosphère). Cela permet d'acquérir des données en continu ou de manière périodique en fonction des grandeurs suivies, sur de longues séries temporelles avec des pas des temps et d'espace appropriés.

Dans l'état actuel de l'observatoire, deux milieux récepteurs, jugés particulièrement sensibles, sont étudiés : (i) la nappe de l'est lyonnais et (ii) l'Yzeron et ses affluents, représentatifs des petites rivières périurbaines de l'ouest lyonnais. L'étude de milieux plus importants (Rhône & Saône par exemple), dans leur traversée de l'agglomération lyonnaise sont plutôt couplés aux actions de la ZABR dont l'OTHU est un des observatoires.

Depuis 1999, 5 sites expérimentaux, représentatifs de différents modes d'urbanisation et d'assainissement, ont été identifiés. Ces sites sont complétés par : (i) des sites satellites plus faiblement instrumentés et de durée de vie plus faible qui viennent infirmer ou confirmer des tendances observées sur les sites de base ou qui visent à augmenter encore la diversité de situations (13 sites satellites sont actuellement suivis) et (ii) des dispositifs de laboratoire (conditions contrôlées) directement en appui des observations faites sur le terrain et enfin (iii) un dispositif pluviométrique et météorologique réparti sur la totalité du territoire.

■ Les Sites expérimentaux

1 Site Bassin versant de l'Yzeron

destiné à l'étude des flux d'eau et de polluants produits par un bassin versant périurbain en cours d'évolution et à l'analyse de l'impact de ces flux sur un réseau de petites rivières (ruisseau de la Chaudanne et Yzeron notamment)

2 Site Ecully

destiné à l'étude des flux d'eau et de polluants produits par un bassin versant urbain à dominante résidentielle et des rejets d'un déversoir d'orage

3 Site Lyon centre

destiné à l'étude des flux d'eau et de polluants produits par un bassin versant urbain caractéristique d'un quartier résidentiel de centre ville (*face à des problèmes de maintenance, ce site a donc été arrêté en février 2008. Son re-déploiement est aujourd'hui étudié*)

4 Site de IUT – la Doua

destiné à l'étude du fonctionnement d'un bassin d'infiltration dans une situation de nappe peu profonde et à l'analyse de l'impact des flux infiltrés sur la qualité de la nappe (bassin de l'IUT) ;

5 Site de Chassieu – Django Reinhardt

destiné à l'étude des flux d'eau et de polluants produits par un bassin versant urbain à dominante d'activité industrielle, à la compréhension du fonctionnement d'un bassin de retenue-décantation et d'un bassin d'infiltration dans une situation de nappe profonde et à l'analyse de l'impact des flux infiltrés sur la qualité de la nappe (bassin de Django Reinhardt)

6 Site Ecocampus – la doua : Destiné à l'étude des flux d'eau et de polluants, de la biodiversité produit par un BV muni de techniques alternatives innovantes de gestion des eaux pluviales (toitures végétalisées, chaussées réservoir, noues ..). Et également à l'analyse performancielle de ces techniques sur le plan hydraulique, environnemental et énergétique (*site en cours de définition*)

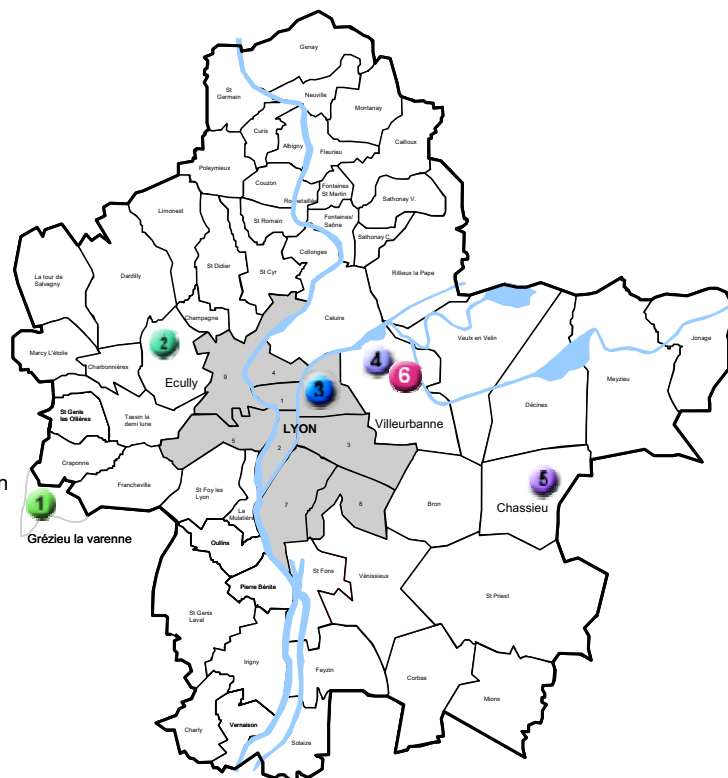


Figure 1: Localisation des sites expérimentaux sur la Communauté Urbaine de Lyon

■ Contacts

GRAIE - Groupe de Recherche Rhône-Alpes sur les Infrastructures et l'Eau
Domaine scientifique de la Doua – 66, Bd Niels Bohr, BP 52132 - 69603 VILLEURBANNE Cedex
Tél: 04 72 43 63 02 . Fax: 04 72 43 92 77. E-mail: info@othu.org

■ Station métrologique type

Les différents sites de l'OTHU ont une installation métrologique de base commune.

Le bungalow de mesure type de l'OTHU, installé sur chacun des sites de l'OTHU, suit le schéma présenté ci-contre.

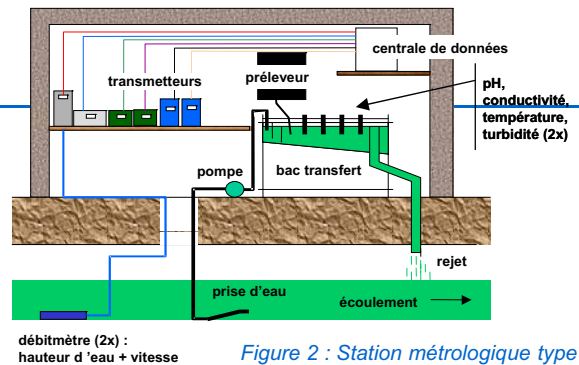


Figure 2 : Station métrologique type

■ Le site de Chassieu Django Reinhardt

Ce site est constitué d'un bassin versant à dominante industrielle de 185ha imperméabilisé à 75 % et drainé par un réseau séparatif dont la partie pluviale a pour exutoire un bassin de retenue/décantation suivi d'un bassin d'infiltration situé au-dessus d'une nappe dont le toit est à 13 m de profondeur. L'ensemble est situé dans la plaine de l'Est Lyonnais composé de dépôts fluvio-glaciaires

Il reçoit en permanence, en plus des eaux pluviales, des eaux de temps sec « théoriquement » propres issues de process industriels de la zone (eaux de refroidissement par exemple).

Le bassin Django Reinhardt est situé sur la zone industrielle de la commune de Chassieu, dans la plaine de l'Est Lyonnais, à proximité du parc Eurexpo.

Le dispositif permet la mesure :

- des flux produits par un bassin versant à caractère industriel, d'une surface de 185 ha ;
- de l'efficacité de dispositifs de décantation et d'infiltration des effluents ;
- de l'évolution de ces flux lors de leur transfert dans les sols et la nappe ;
- des impacts chimiques et biologiques de ces flux sur le sol et la nappe.

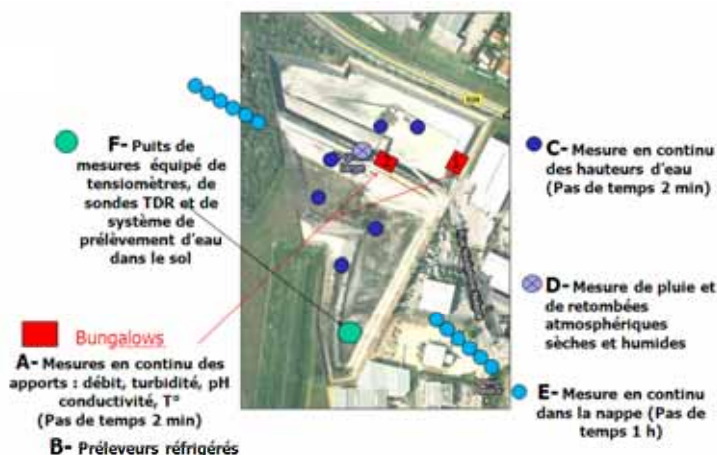


Figure 3 : Dispositif expérimental de Django Reinhardt

Le dispositif comprend :

Au niveau de retombées atmosphériques sèches et humides d'un prototype de collecte composé de deux bacs de collecte ouverts en alternance : un récepteur des retombées atmosphériques humides ouvert pendant les événements pluvieux et un récepteur des retombées atmosphériques sèches ouvert en temps sec.

Au niveau des deux collecteurs d'arrivée et de la connexion entre les deux bassins : mesure des débits en continu (hauteur - vitesse), installation d'un préleveur et d'une station qualité fonctionnant en continu (turbidité, pH, conductivité, température). Les principales mesures en continu sont doublées (hauteur, vitesse, turbidité) pour fiabiliser l'acquisition de données. Un spectromètre UV-visible vient aujourd'hui compléter le dispositif et permet l'acquisition en continu des MES et de la DCO.

Au niveau du bassin de retenue : mesure en continu des hauteurs d'eau dans le bassin en 2 points et sur la surverse; installation lors de campagnes de 12 pièges à sédiments en fond de bassin

Au niveau du bassin d'infiltration, le dispositif expérimental comprend le suivi de 4 hauteurs d'eau permettant de suivre le colmatage, et d'un puits de mesure (environ 1 m de diamètre sur 1.5 m de profondeur), percé radialement par des tubes à différentes profondeurs permettant d'installer des sondes tensiométriques et d'humidité ainsi que des bougies poreuses et des drains destinés à collecter puis analyser les effluents. Des prélèvements de sol sont périodiquement effectués.

Au niveau de la nappe :

À l'amont et à l'aval du bassin d'infiltration sont installés deux batteries de piézomètres (respectivement de 6 et 5 piézomètres). Ils permettent des analyses à différentes profondeurs et des diagraphies jusqu'à 4 m en dessous du niveau de la nappe. Des sondes multiparamètres sont installées dans chacun des piézomètres pour mesurer l'oxygène dissous, la conductivité, le niveau piézométrique, la température, le pH. Des prélèvements manuels ponctuels sont également effectués.



Figure 4 : Site de Chassieu (a) bassin de rétention – (b) bassin d'infiltration

■ Le site Bassin versant de l'Yzeron

Ce site est situé dans la partie Ouest de l'agglomération lyonnaise. Il est dédié à la mesure :

- des flux produits par une zone périurbaine en évolution rapide et
- de l'impact de ces flux sur de petits ruisseaux à écoulement non pérenne, coulant sur un substrat de schistes et granitique.

Dans ce contexte, les rejets de temps de pluie concentrés par les déversoirs d'orage peuvent conduire à des débits équivalents à bien supérieurs à ceux produits par le milieu naturel.

Les équipements se situent à plusieurs échelles:

- **L'échelle du bassin versant de l'Yzeron (150 km²):** elle est organisée selon une logique amont-aval et de surface drainée par emboîtement des bassins jaugés. Cela permet d'étudier l'influence du développement urbain sur le régime hydrologique naturel. Un suivi pluviométrique est réalisé au moyen de 4 pluviomètres (Grézieu, Pollionnay, Croix du Ban, Oullins ; ce dernier poste a été ajouté au réseau en 2009) et d'1 station météo complète localisée en amont du bassin de l'Yzeron, sur la commune de Montromant. Les postes pluviométriques mesurent également la température de l'air et les précipitations (augets basculeurs) à pas de temps variable. Parallèlement un suivi débitmétrique est effectué sur les cours d'eau du bassin. Le réseau hydrométrique sur l'Yzeron est constitué en 2010 de 4 stations : Mercier, Chaudanne à la Léchère, Ratier et Charbonnières (station Cemagref pour cette dernière station). Les chroniques limnimétriques sont acquises à pas de temps variable et transformées en débit avec des courbes de tarage. Sur l'année 2010, les stations de la Léchère et du Charbonnières ont fonctionné sans problème majeur. Celle du Mercier a connu environ 1.5 mois de lacune dues à une panne de la centrale d'acquisition. Sur le Ratier, des données fiables sont obtenues depuis novembre 2010. Parallèlement, une quarantaine de jaugeages ont été réalisés, permettant de préciser les courbes de tarage.
- **L'échelle du bief de la Chaudanne (400 m):** la partie principale de l'équipement est constituée par 4 stations de mesure organisées autour d'un déversoir d'orage (DO) afin d'étudier l'impact des rejets sur un petit cours d'eau. Le débit de la Chaudanne et du déversoir sont suivis en continu : 2 stations hydrométriques dans la rivière, deux stations dans le réseau d'assainissement (déversoir d'orage et collecteur principal) et des capteurs limnimétriques dans les bassins d'infiltration

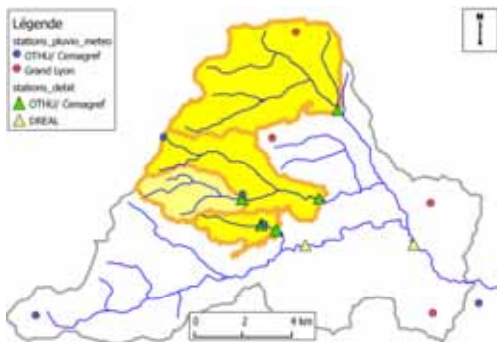


Figure 5 : Stations opérationnelles sur le BV Yzeron en 2010 et stratégie d'emboîtement des bassins

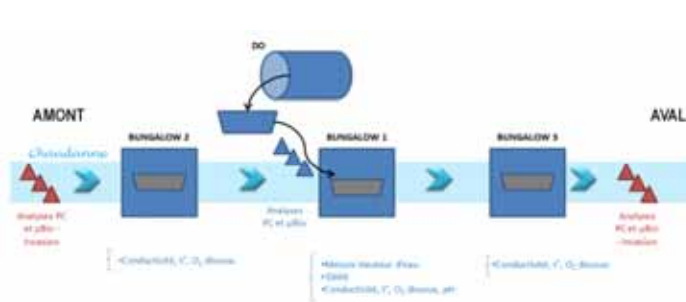


Figure 5 : Schéma du site expérimental OTHU à l'échelle du bief de la Chaudanne

Dans le cadre du contrat de rivière (Yzeron Vif, 2001-2007), le site a fait l'objet d'un aménagement fin 2002 en vue de réduire les rejets de temps de pluie. Les eaux pluviales rejoignent trois bassins d'orage en série. Les ouvrages ont été instrumentés début 2003 de façon à évaluer leur fonctionnement et efficacité quant à la réduction des rejets du déversoir de la Chaudanne.

■ Le site d'Ecully

Ce site est un bassin versant de 245 ha, qui couvre une grande partie du réseau d'assainissement de la commune d'Ecully, caractéristique d'un milieu urbain moyennement dense (impermeabilisation 42 %). Il est drainé par un réseau d'assainissement majoritairement unitaire et est muni en outre de 5 petits déversoirs d'orage rejetant les effluents dans le ruisseau du Trouillat (déversoirs non instrumentés car ne déversant que très exceptionnellement) et d'un déversoir d'orage principal, dit déversoir Valvert, situé à l'exutoire et qui est instrumenté. Le déversoir Valvert rejette les effluents de temps de pluie dans le ruisseau des Planches. Ce site est dédié à la mesure des flux d'eau et de polluants produits par le bassin versant et des rejets du déversoir d'orage situé à l'exutoire.

Le site d'Ecully est équipé depuis avril 2001. Les appareils installés sont les suivants :

Au niveau du collecteur à l'amont du déversoir du Valvert : la double mesure des débits en continu (hauteur - vitesse), un préleveur et une station qualité fonctionnant en continu (turbidité doublée, pH, conductivité et température).

Au niveau de la conduite de déversement vers le ruisseau du Trouillat : mesure du débit (hauteur - vitesse).

■ Le site la Doua-IUT

Ce site est constitué d'un bassin d'infiltration situé sur le campus de la Doua (Villeurbanne), dans le couloir fluvial du Rhône. Il reçoit les eaux pluviales d'un bassin versant de 2.5 hectares, caractéristique d'activités tertiaires.

Le bassin d'infiltration date d'une trentaine d'années. Sa capacité est de l'ordre de 4000 m³ et sa profondeur est d'environ 3 m. Le bassin est situé sur la nappe alluviale du Rhône. A cet endroit, la nappe est haute et ses fluctuations sont importantes, si bien que la zone non saturée sous le bassin est faible (parfois moins d'un mètre du fond du bassin), voire souvent inexistante.

Ce site a été retenu pour valider une méthodologie de suivi de la qualité physico-chimique et biologique de la nappe. Comme la nappe est très proche de la surface du sol, des études précises de variabilité temporelle et spatiale des différents paramètres peuvent être faites. La méthodologie est transposable à des ouvrages au dessus de nappes très profondes (comme le site de Django Reinhardt).

Ce site est principalement équipé avec des batteries de piézomètres permettant la vidéo prospection (activité biologique, hauteurs d'eau et chemins préférentiels, suivi de l'accumulation de fines, tests de perméabilité, prélèvements pour analyses physico-chimiques et diagraphies, ...).

Plusieurs configurations ont été testées au cours des quatre dernières années :

30 mini piézomètres, installés dans le bassin en septembre 1999 et redéployés en février 2002 ;

6 piézomètres, équipés de tubes en Plexiglas, échelonnés entre 2 et 7 mètres de profondeur (installés en novembre 2000) ;

4 piézomètres implantés en amont du bassin d'infiltration (site étang du campus) entre 8 et 11 mètres de profondeur (septembre 2001)

12 tubes plexiglas transparents, non crépinés, d'une longueur de 3,5 m, pour la vidéo prospection permettant d'échantillonner et d'inspecter par vidéo-caméra le lit d'infiltration et la nappe phréatique. (septembre 2003).

2 tubes plexiglass supplémentaires et 15 piézomètres métalliques (3 répliqués à 5 profondeurs entre 20 et 100cm sous la surface de la nappe) ont été installés à l'aplomb du dôme de recharge en eau pluviale dans le bassin , parallèlement 15 témoins ont été installés sur un site Etang du campus (depuis année 2006) (Figure 5)



Figure 5 : instrumentation du site de l'IUT.

■ Le site la Doua-Lyon centre

Le bassin versant Lyon-centre, d'une superficie de 298 ha, est caractéristique d'un milieu urbain dense de type centre ville. Ce site est dédié à la mesure des flux d'eau et de polluants produits par un tel bassin versant.

Il peut être décomposé en trois sous-bassins, auxquels correspondent 3 points à instrumenter : (i) à l'aval, le sous-bassin Lyon 6ème correspond à un centre ville avec des îlots denses ; (ii) dans la partie intermédiaire, le sous-bassin du parc de la tête d'or n'est quasiment pas urbanisé ; la plus grande partie des eaux de pluie s'infiltrent ou ruissellent dans le lac du parc ; (iii) à l'amont, le sous-bassin de la Doua comporte un bâti dense, entrecoupé de nombreux espaces verts de dimensions variables (pelouses ou terrains de sport).

Seul le sous-bassin de la Doua avait été instrumenté complètement en 2006 avec des équipements identiques à ceux de Django Reinhardt et d' Ecully, auquel il était prévu d'ajouter un capteur en continu pour le mesurage de la DCO (soit par analyseur micro-ondes, soit par absorption UV) de même principe que ceux du site Ecully. Cependant le fort encrassement des capteurs et des conditions limites de sécurité, du à la forte concentration en MES au niveau de la bache où a lieu le prélèvement, ne permettait pas une maintenance correcte du site. **Ce site a donc été arrêté en février 2008. Son re- déploiement est aujourd'hui étudié.**

Les Fiches techniques de l'OTHU

"Impact de l'urbanisation sur les rivières périurbaines"
Fiches 13, 14 et 22-25



Résumé:

La plupart des villes sont confrontées à une extension urbaine rapide de leur périphérie. Les zones nouvelles sont souvent situées en amont topographique de l'urbanisation antérieure. Une des conséquences fréquente qui accompagne ce développement est l'accroissement du régime des crues et du risque d'inondation des secteurs urbains denses à l'aval. Ceci en l'absence de toute mesure d'adaptation ou de compensation, difficile à mettre en place et souvent en déphasage avec le développement périurbain. Une méthodologie d'étude est donc proposée afin de cerner les conséquences sur le régime des crues d'un développement urbain non maîtrisé.

■ Cadre Général

La concentration de population dans les zones urbaines est une tendance mondiale qui devrait s'accroître jusqu'à la fin du siècle (rapport des Nations Unies, UN 2003). En France, le dernier recensement fait état d'une forte extension des villes avec 76 % de la population classée urbaine et occupant 18 % du territoire. On constate l'absorption des zones rurales limitrophes des grandes villes par ce développement périurbain qui se traduit par une modification rapide de l'occupation des sols en périphérie des zones urbaines. Ce développement se propage dans la majeure partie des cas depuis un aval souvent plat, où les centres urbains historiques ont été créés, vers un amont topographique aux pentes plus prononcées. La modification des conditions de ruissellement par temps de pluie due à l'imperméabilisation et les modes de gestion par évacuation rapide des eaux pluviales ont des conséquences directes sur les écoulements superficiels (thalwegs, ru et cours d'eau périphériques) et dans les réseaux d'assainissement unitaires des centres urbains. Ces situations peuvent être la cause d'une augmentation des risques d'inondation car le développement urbain génère à la fois sa vulnérabilité par l'occupation de zones d'écoulement ou de stockage des crues et augmente la fréquence et l'intensité des événements.

Le risque d'inondation existe dès lors que la fréquence des inondations d'un lieu est supérieure à ce qui est compatible avec l'activité de ce lieu (Méthode Inondabilité, 1998). Le milieu urbain présente une grande vulnérabilité du fait de la densité de son habitat et de la concentration de ses activités. Ainsi, les zones urbaines situées en bordure des cours d'eau sont exposées à l'aléa des inondations. Cet aléa peut avoir une origine naturelle mais le développement périurbain peut contribuer à l'augmenter. Il n'est cependant pas aisé d'en évaluer la contribution car pour les crues importantes, par effet de saturation, les sols ruraux ont un comportement identique à celui des sols imperméables urbains. C'est sur les crues « petites à moyennes » que l'influence du développement périurbain sera sensible.

L'adaptation des infrastructures urbaines nécessitant du temps et de lourds investissements, il paraît légitime d'apprécier les limites acceptables du développement périurbain en l'absence de toute disposition pour en compenser les effets sur le risque d'inondation. Chaque bassin versant est un cas particulier qui va réagir différemment à la pluie selon plusieurs facteurs d'influence dont sa topographie, sa géologie, les types d'occupation du sol et le positionnement des zones imperméabilisées. Les facteurs anthropiques peuvent influencer la modification du régime des crues. Il faut y ajouter aussi l'évolution possible du régime des pluies.

Une méthodologie d'étude est proposée pour évaluer les modifications du régime hydrologique générées par l'urbanisation à venir et d'autres facteurs d'influence de l'évolution du régime des crues.

La démarche consiste en premier lieu à décrire les étapes de l'analyse des données disponibles afin de dégager au mieux l'influence des différents facteurs. On peut ensuite tester des scénarii de développement urbain qui intègrent les caractéristiques du bassin versant étudié.

■ Contacts

Pascal BREIL,
Cemagref, URHH, 3 bis quai Chauveau, 69380 Lyon cedex 09 - E-mail: Pascal.breil@cemagref.fr

Bernard CHOCAT,
LGCIE / Bat Coulomb, INSA LYON, 69621 villeurbanne cedex – E-mail: bernard.chocat@insa-lyon.fr

■ Les avancées de l'OTHU - Principaux résultats :

La méthode d'analyse est appliquée sur le bassin versant de l'Yzeron qui intègre dans son aval le sud de la ville de Lyon en rive droite du Rhône. La surface du bassin est de 150 km². Les altitudes varient de 162 à 917 m en cote IGN sur une distance de 20 kilomètres environ, avec des pentes à plus de 10% en amont. La rivière principale, l'Yzeron présente des étiages sévères témoignant d'une faible capacité inter-annuelle de stockage pour ce bassin. La partie urbanisée est passée de 6% à 19 % entre 1979 et 1996. Cette évolution s'est accompagnée d'une déprise agricole au profit de l'extension du milieu périurbain et dans une moindre mesure des forêts du haut bassin.

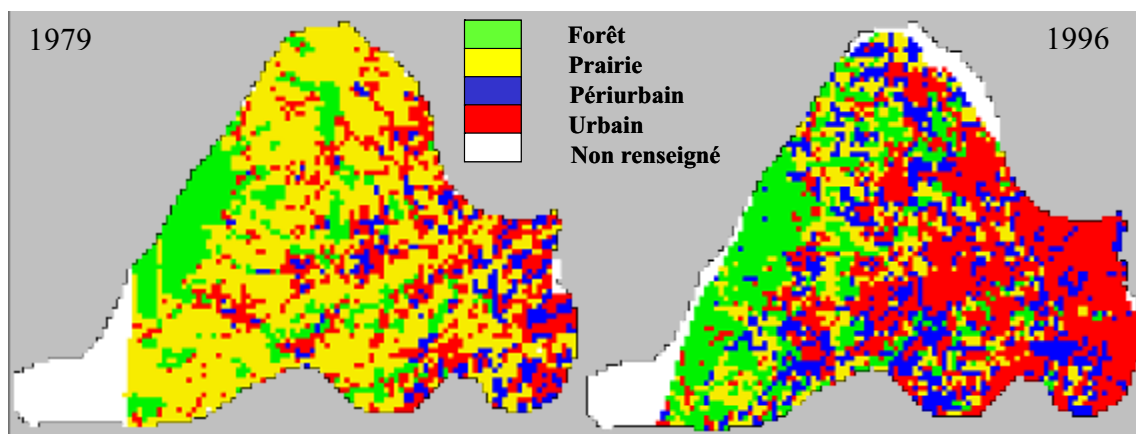


Figure 1. Evolution de l'occupation du sol. Ca sud bassin de l'Yzeron. Données tirées des campagnes aériennes IGN. Codage en maille carré de 167 m. (B. Radojevic, 2002).

La méthode d'analyse proposée repose sur le calage et la validation d'un modèle pluie-débit distribué. La seconde étape porte sur la simulation du régime des crues dans un contexte d'urbanisation différente. L'influence de l'urbanisation est testée non pas sur quelques crues mais sur le régime des crues lui-même par comparaison des échantillons de crues simulées avec des contextes d'urbanisation différents.

Etape 1 : Une chronique de débit et une chronique de pluie associées, représentatives du bassin et d'une dizaine d'années sont nécessaires. Il est préférable de disposer d'un pas de temps des données qui soit inférieur à la journée ceci afin de rendre compte au mieux de l'effet de l'urbanisation sur les pointes de crue. La cohérence des chroniques de données de débit et de pluie devra être vérifiée par toute méthode de critique adaptée.

Etape 2 : L'occupation du sol doit pouvoir être décrite au cours du temps (figure 1 ci dessus). Cette information est obtenue à partir des fonds cartographiques disponibles et des campagnes de photos aériennes. Ces données chronologiques peuvent être rares ou mal réparties dans le temps. Le recours à des sources d'images par satellite, plus récentes mais offrant maintenant suffisamment de recul, est à envisager mais nécessite des pré-traitements coûteux.

Etape 3 : Le modèle hydrologique de transformation pluie-débit est de nature distribuée, c'est à dire qu'il permet de représenter le fonctionnement hydrologique de sous bassins (ou de mailles) à l'intérieur du bassin versant. Il est ainsi possible de tester l'influence hydrologique de scénarii d'évolution de l'occupation du sol. Le bassin versant est donc découpé en sous bassins homogènes et les caractéristiques d'occupation du sol renseignées. Le modèle peut alors être construit (fig.2). Le modèle CANOE (INSA-SOGREAH) a été utilisé dans notre cas.



Figure 2. Construction du modèle hydrologique distribué de l'Yzeron. Base modèle CANOE (INSA-SOGREAH) (B. Radojevic, 2002).

Etape 4 : Le calage du modèle est réalisé sur 3 crues par saison tirées d'un échantillon de crues suffisamment variables pour représenter les crues fortes mais aussi moyennes et petites. L'effet de la saison intervient sur le calage des paramètres du modèle qui sont spécifiques au milieu rural. On obtient donc un calage saisonnier. L'échantillonnage des crues doit respecter des critères d'indépendance entre événements de crue, condition nécessaire à l'application des tests de l'étape 5. On retiendra 3n crues, « n » étant le nombre d'années de la chronique de débits.

Etape 5 : La validation du modèle repose alors sur la comparaison des régimes de crues observé et simulé. Les crues non utilisées de l'échantillon pour le calage sont simulées par le modèle. En complément des critères classiques de validation comme celui de Nash-Sutcliffe ou des volumes, une attention particulière porte sur la validation du comportement statistique des crues. Les régimes de crues sont ici décrits par la distribution des débits de pointe mais aussi des débits dépassés de manière continue sur différentes durées « d ». Cet échantillonnage permet de constituer des échantillons « débit-durée-fréquence » (Galea G. & Prudhomme C., 1997) à l'instar des échantillons « intensité-durée-fréquence » utilisées pour décrire les régimes de pluie. La durée (d) de dépassement d'un débit de crue est une donnée importante de l'inondation car elle détermine plusieurs éléments comme le volume qu'il serait nécessaire de stocker, la durée d'isolement de certains axes ou secteurs (le phénomène étant transitoire et le cheminement de l'eau complexe, il s'agit d'indicateurs), le temps de mouillage des terres agricoles pouvant être utilisées pour l'expansion des crues. Enfin, les termes durée-fréquence-intensité sont liés par des lois de probabilité dont l'ingénierie doit apprendre à tirer profit. Comme l'indique l'hydrogramme de la **figure 3**, cette procédure d'échantillonnage découpe les crues en tranches de durées « d ». Cela permet de décrire la forme et la dynamique des crues et donc d'apprécier au mieux l'efficacité du calage du modèle. Aux petites valeurs de « d » correspondent les débits de la partie haute des crues et vice versa. Les deux échantillons réalisés pour une durée « d » à partir des chroniques observée et simulée sont comparées à l'aide d'un test d'hypothèse. Nous avons retenu un test non paramétrique (ici le test de Wilcoxon-Mann-Whitney), portant sur le rang et donc très sensible à toute différence sur l'amplitude des crues de nos échantillons. Il faut de plus noter que les tests paramétriques imposent des conditions de normalité et (ou) de nombre minimum de valeurs pour être efficaces. Ces conditions sont rarement rencontrées dans le contexte d'étude. Selon un principe classique, le test est accepté ou rejeté en fonction d'un seuil défini par l'utilisateur. L'acceptation de l'hypothèse (H0) indique que les régimes de crues sont identiques et son rejet, qu'ils sont différents. Les seuils de rejets de 10%, 5% et 1% ont été retenus après avoir testé leur sensibilité sur différents pourcentages de modification de l'intensité des crues par translation de la distribution de l'échantillon ou encore de l'accroissement de cette distribution. L'acceptation de H0 au seuil de 10% indique un bon recouvrement des distributions des échantillons de crue. Le rejet au seuil de 1%, représente une différence très significative. Le **tableau 1** montre que le modèle reproduit le comportement statistique du régime des crues observées car accepté au seuil de 10%, et cela des durées de 1 heure à 12 heures. Il est rejeté pour les durées supérieures qui ne sont pas notre cible car correspondant pour l'essentiel à des débits peu importants.

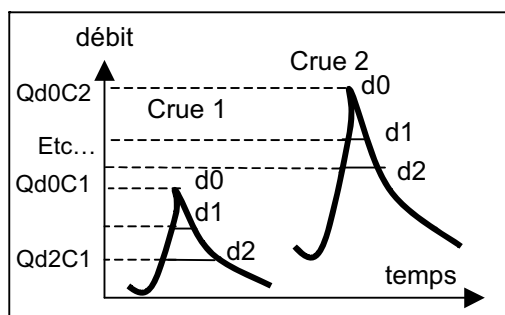


Figure 3. Principe d'échantillonnage des débits dépassés sur des durées « d ». Appliqué à « n » crues permet de décrire les régimes de crues

% d'urbanization 1990 = 10%

test Wilcoxon-Mann-Whitney / test bilatéral			
H0	P(QCX serie1 > QCX serie2) = 0.5		
H1	P(QCX serie1 > QCX serie2) <> 0.5		
durées Qd	seuil 10%	seuil 5%	seuil 1%
1h	oui	oui	oui
3h	oui	oui	oui
6h	oui	oui	oui
12h	oui	oui	oui
24h	non	non	non

Tableau 1. Validation statistique du modèle par comparaison des échantillons observés et simulés.

Etape 6 : La simulation de scenarii réalistes peut être testée en modifiant les caractéristiques d'occupation du sol des sous bassins versants. Il est possible de s'aider de documents comme le schéma directeur d'urbanisme, le SCOT et le PLU. Un schéma simple consiste à augmenter la surface urbaine à partir des sous bassins situés en limite de la zone urbaine sans toutefois négliger l'expansion des satellites urbains que constituent les villages limitrophes. Il est aussi possible de s'inspirer des axes préférentiels d'urbanisation observés entre les deux périodes étudiées. Il convient d'identifier dans cette étape un seuil ou un intervalle de pourcentage d'urbanisation additionnel pour lequel la distribution statistique des crues est sensiblement modifiée. Le **tableau 2** montre que entre 25% et 50% d'urbanisation, la situation en 1996 étant de 19%, l'influence du développement urbain sur le régime des crues devient sensible sur la forme et le débit des pointes de crues.

Simulation avec 25% d'urbanisation

test Wilcoxon-Mann-Whitney / test unilatéral			
H0	P(QCXserie1>QCXserie2) = 0.5		
H1	P(QCXserie1>QCXserie2) >0.5		
durées QCX	seuil 10%	seuil 5%	seuil 1%
1h	oui	oui	oui
3h	oui	oui	oui
6h	oui	oui	oui
12h	oui	oui	oui
24h	non	non	oui

Simulation avec 50% urbanisation

test Wilcoxon-Mann-Whitney / test unilatéral			
H0	P(QCXserie1>QCXserie2) = 0.5		
H1	P(QCXserie1>QCXserie2) >0.5		
durées QCX	seuil 10%	seuil 5%	seuil 1%
1h	non	non	non
3h	non	non	non
6h	non	non	non
12h	oui	oui	oui
24h	oui	oui	oui

Tableau 2. Test de scenarii d'évolution de l'urbanisation et détection statistique sur les régimes de crue.

La figure 4 illustre l'évolution des rapports des débits seuils de crue pour les différentes durées. Pour une durée « d », les rapports sont plus importants pour les crues fréquentes comme l'indique les faibles périodes de retour. Les débits de pointes qui correspondent à la durée de 1 heure sont en moyenne multipliés par 4 y compris pour la période de retour 10 ans. L'augmentation de l'urbanisation dans la gamme 25 à 50% a donc un effet très sensible sur l'intensité des crues. Dans cette simulation, la crue décennale devient presque annuelle.

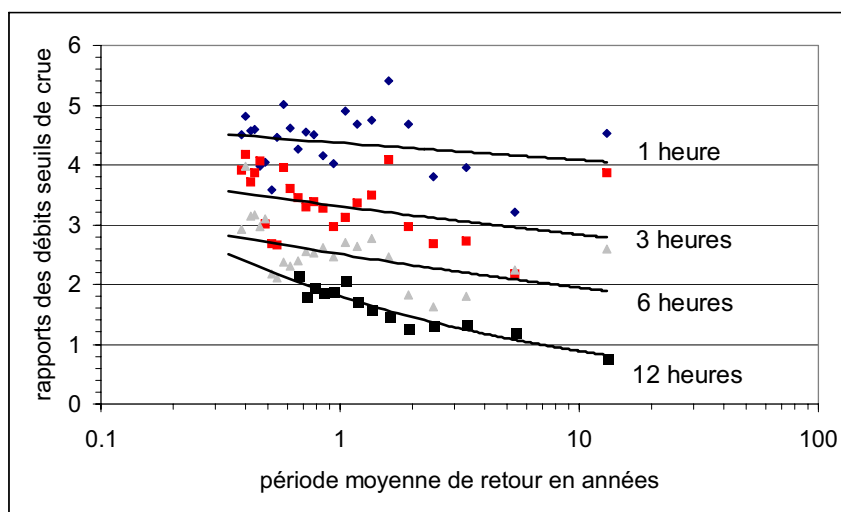


Figure 4 : Evolution des rapports de débits simulés à 50% et 19% d'urbanisation. Débits dépassés pour les durées de 1 heures à 12 heures.

■ Cadre d'utilisation

En l'état, cette méthode permet de définir un seuil d'urbanisation susceptible d'engendrer un accroissement significatif des fréquences et intensités des crues.

■ Développements futurs :

Les principales incertitudes de la modélisation sont liées à une mauvaise représentation de la distribution spatiale de la pluie dans le bassin versant ainsi qu'à une modélisation approximative de la contribution hydrologique des zones rurales. La simulation d'ouvrages hydrauliques de laminage des crues permettrait de tester des hypothèses de développements périurbain combinés à des ouvrages de compensation.

Ces points sont en cours d'amélioration au sein des travaux de l'OTHU. La fiche technique devrait développer dans l'avenir une approche méthodologique sur la répartition des ouvrages de compensation au sein d'un bassin versant devant s'urbaniser.

■ Documents publiés :

- Galéa, G., Prudhomme, C. (1997) Notions de base et concepts utiles pour la compréhension de la modélisation synthétique des régimes de crue des bassins versants au sens des modèles QdF. Rev. Sci. Eau 10 (1) : 83-101
- Guide pratique de la méthode Inondabilité (1998) : Coll. Des cahiers techniques Inter-Agence, N°60, 160p.
- Radojevic, B., Breil, P., Chocat, B. (2002) Quantification du rôle de l'urbanisation en particulier et de l'usage des sols en général sur les crues de l'Yzeron depuis quarante ans, Rapport final, Programme RIO, 60p.
- Radojevic, B. (2002) Méthode d'évaluation de l'influence urbaine sur le régime des crues d'un bassin versant de 130 km². Thèse : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. <http://docinsa.insa-lyon.fr/these/pont.php?id=radojevic>
- UN, 2003. WORLD POPULATION PROSPECT. URBAN AND RURAL AREAS. <http://www.un.org/esa/population/publications/>

FICHE TECHNIQUE OTHU N°14

Une méthode de typologie hydro-géomorphologique d'états de référence de cours d'eau : vers un outil de gestion des hydrosystèmes périurbains.



Résumé:

Les rejets urbains de temps de pluie dans les petites rivières périurbaines engendrent des impacts différenciés selon le contexte géomorphologique des tronçons fluviaux récepteurs. Nous présentons ici une méthode innovante de typologie hydro-géomorphologique d'états de référence de cours d'eau, ainsi que des pistes d'utilisation pour une gestion environnementale des hydrosystèmes périurbains.

■ Cadre Général et problématique

La géomorphologie fluviale (ou hydro-géomorphologie) est la science qui étudie les formes des cours d'eau (méandres, géométrie...), ainsi que les processus contrôlant l'évolution de ces formes (débits liquide et solide, érosion, sédimentation...). Il est important de prendre en compte la géomorphologie fluviale dans les études intégrées des cours d'eau car elle permet de caractériser les biotopes physiques des écosystèmes aquatiques et contribue à résoudre les problèmes d'érosion (latérale et verticale), de transport solide (excès ou déficit), de gestion de la ripisylve et de risque d'inondation.

Les cours d'eau étant très diversifiés, les classifications hydro-géomorphologiques d'états de référence de rivières reflètent la diversité des fonctionnements physiques « naturels » des hydrosystèmes. Elles constituent un outil de gestion pour les suivis écologiques, l'évaluation de la qualité des biotopes physiques et la restauration (Directive Cadre Européenne sur l'Eau ; Kondolf et al., 2003). En milieu périurbain, l'étude du bassin de l'Yzeron (fig. 1) est fondée sur l'hypothèse que les impacts des rejets urbains de temps de pluie diffèrent en fonction du contexte hydro-géomorphologique des tronçons de cours d'eau récepteurs.

■ Objectifs spécifiques de l'étude :

Cette étude présente une méthode de typologie hydro-géomorphologique d'états de référence de cours d'eau potentiellement utilisable en Europe et adaptée, entre autres, aux hydrosystèmes périurbains. Une application au bassin versant de l'Yzeron illustre ici cette méthode.

■ Méthode typologique pouvant être utilisée par les gestionnaires

La méthode typologique découle de recherches antérieures portant sur les cours d'eau d'Alsace. L'approche repose sur un emboîtement hiérarchique d'échelles du système fluvial : le bassin versant, le fond de vallée et le lit mineur. La méthode comporte les étapes suivantes (Schmitt et al., 2006a) :

1. Déterminer à l'échelle du bassin versant, les unités hydro-géomorphologiques homogènes. Pour cela, le bassin versant est découpé par expertise sur la base de variables contrôlant la fonctionnement des cours d'eau : climat, relief, géologie, héritages géomorphologiques (empreintes dans le paysage de processus géomorphologiques anciens, souvent quaternaires : paléo-dynamique fluviale, dépôts glaciaires ou fluvio-glaciaires, formations péri-glaciaires...), occupation du sol. Des études cartographiques (cartes topographiques et géologiques) et bibliographiques (articles et monographies climatologiques, hydrologiques, géologiques et géomorphologiques) sont nécessaires.

Ce découpage du bassin versant en unités hydro-géomorphologiques homogènes peut être testé relativement aisément à partir de variables de contrôle relatives au fond de vallée ou à l'hydrologie, notamment la pente du fond de vallée, le rapport d'encaissement (rapport de la largeur du fond de vallée sur la largeur du lit mineur ; tabl. 1) et, si le nombre de stations hydrométriques dans le bassin le permet, des descripteurs hydrologiques. Il est par exemple possible de tester si les relations crues biennales surface drainée ou débit spécifique de l'étiage décennal débit spécifique de la crue décennale discriminent les différentes unités hydro-géomorphologiques ;

2. Sectorisation des cours d'eau à partir de variables faciles d'accès :
 - (i) les changements d'unités hydro-géomorphologiques traversées par la rivière ;
 - (ii) les variations de la pente longitudinale (du fond de vallée ou, à défaut, du lit mineur), estimée à partir de profils en long (données topométriques, Modèles Numériques de Terrain, cartes topographiques au 1/25 000è, profils des Grandes Forces Hydrauliques) ;
 - (iii) les changements de morphologie du fond de vallée (largeur) ;
 - (iv) les discontinuités liées aux héritages géomorphologiques (empreintes dans le paysage de processus géomorphologiques anciens, souvent quaternaires : paléo-dynamique fluviale, dépôts glaciaires ou fluvio-glaciaires, formations péri-glaciaires...) ;
 - (v) les changements de styles fluviaux et de sinuosité (cartes topographiques au 1/25 000è, photographies aériennes) ;

■ Contacts

Laurent SCHMITT, Université Lyon2 - Faculté de Géographie, Histoire, Histoire de l'Art, Tourisme - UMR 5600
CNRS - Laboratoire Rhodanien de Géographie de l'Environnement - 5, av. Pierre Mendès-France 69676
BRON cedex - laurent.schmitt@univ-lyon2.fr - tél : 04 78 77 23 23 - fax : 04 78 77 24 26

■ Méthode typologique pouvant être utilisée par les gestionnaires:

3. Regroupements, par expertise, des différents secteurs pour élaborer une classification. Chaque type est caractérisé par une dénomination ;
4. Validation et/ou amélioration de la typologie à partir de données morphodynamiques de terrain, variables de « réponse » et d'analyses statistiques multivariées (Classification Ascendante Hiérarchique, Analyse en Composantes Principales, Analyse Discriminante...). Des analyses statistiques peuvent également être réalisées à partir des variables de contrôle du fond de vallée ou relatives à la taille des cours d'eau (tabl. 1) pour faire apparaître la structure de la typologie ;
5. Caractérisation morphodynamique des types de cours d'eau à partir de l'ensemble des données collectées et relatives aux trois échelles spatiales prises en compte (bassin versant, fond de vallée, lit mineur).

■ Application au bassin versant de l'Yzeron

- Mise en évidence d'unités hydro-géomorphologiques homogènes (bassin versant)

Cinq unités hydro-géomorphologiques sont discriminées : (i) Monts du Lyonnais ; (ii) plateau lyonnais métamorphique ; (iii) plateau lyonnais recouvert de cailloutis miocènes et pliocènes ; (iv) arène granitique de Charbonnières ; (v) formes héritées d'origine fluviale et glaciaire (fig. 2 ; Valette, 2004). Ce découpage a été validé à partir de deux variables morphologiques de contrôle : la pente des fonds de vallée et le rapport d'encaissement (Valette, 2004 ; Schmitt et al., 2006a).

- Sectorisation des cours d'eau et élaboration de la typologie

Le réseau hydrographique de l'Yzeron a été sectorisé à partir des variables citées précédemment. L'exemple de la Chaudanne est donné dans la figure 3. Des rapprochements entre les secteurs homogènes, ont permis de classer tout le réseau hydrographique de l'Yzeron en 8 types (fig. 4).

- Validation statistique à partir de variables de terrain

46 sites de mesures ont été localisés sur les différents types (fig. 4 ; Valette, 2004 ; Valin, 2004). Seuls les secteurs les moins anthropisés ont été pris en compte car la typologie porte sur les états de référence. La longueur d'un site est égale à 36 fois la largeur à pleins bords. L'analyse statistique retenue ici est l'Analyse en Composantes Principales (ACP) Inter-classes (logiciel : ADE4). Elle a été appliquée sur :

- les variables de contrôle relatives au fond de vallée et à la superficie drainée, pour montrer comment la typologie est structurée vis-à-vis de ces variables. Nous ne présentons pas ici ces résultats pour ne pas alourdir la Fiche Technique. Le lecteur pourra se reporter à Schmitt et al. (2006).

- les variables de réponse pour valider la typologie.

10 variables de réponse sont prises en compte (tabl. 1). Le premier axe (F1 : 60,8 % de variance ; fig. 5) est lié à l'intensité de la dynamique latérale, au rapport largeur/profondeur et au pourcentage de plats. Ces variables s'opposent au coefficient de variation des sédiments du fond des lits et au pourcentage de moulles. Le deuxième axe (F2 : 21,4 % de variance) traduit la granulométrie. Inertie inter-classes : 27,8%. Ce résultat reste cependant satisfaisant puisque, sur 1000 permutations aléatoires, une seule combinaison donne une variance inter-classes plus élevée.

L'ACP discrimine les types comme suit : (i) B1, lié à une granulométrie très grossière ; (ii) lié à une granulométrie fine (sableuse) ; (iii) A1, pour lequel le tri sédimentaire est faible, comme l'intensité de la dynamique latérale, le rapport largeur/profondeur et le pourcentage de plats ; (iv) B4 et C sont proches et présentent un bon tri sédimentaire, ainsi qu'une intensité de la dynamique latérale, un rapport largeur/profondeur et un pourcentage de plats élevés. Notre expertise confirme que les types C et B4 sont semblables. En effet, le poids des héritages géomorphologiques vis-à-vis de la morphodynamique actuelle apparaît faible pour le type C. Les types C et B4 pourraient donc être agglomérés ; (v) les types A2, B2 et B3 se chevauchent partiellement. Il sont toutefois discriminés par expertise en raison de différences d'encaissement des fonds de vallée et de géologie (Schmitt et al., 2006a).

- Caractérisation des types

Le fonctionnement hydro-géomorphologique de chaque type d'état de référence est synthétisé dans des Fiches Descriptives (fig. 6).

■ Les avancées de l'OTHU : principaux résultats

- élaboration d'une typologie hydro-géomorphologique fonctionnelle d'états de référence du réseau hydrographique de l'Yzeron ;
- mise en évidence de la structure de la typologie ;
- validation de cette dernière avec des variables de terrain (dépendantes) ;
- caractérisation fonctionnelle des types (fig. 6) ;
- large utilisation de la typologie dans les études biologiques, physico-chimiques et géomorphologiques de l'Yzeron.

■ Cadre d'utilisation et développements futurs

Cette classification hydro-géomorphologique constitue un cadre de référence pour l'étude écologique de l'Yzeron.

Elle a permis :

- de localiser les sites d'étude de la qualité de l'eau, des biocénoses et de la capacité d'auto-épuration (cf. Fiche Technique « Appréciation et suivi du potentiel écologique PE : application aux cours d'eau en paysages urbanisés ») ;

- d'interpréter les résultats biologiques et physico-chimiques en prenant en compte la géomorphologie (Breil et al., 2006 ; Lafont et al., 2006) ;
- de proposer une carte de la capacité d'auto-épuration des polluants de l'ensemble du réseau hydrographique de l'Yzeron. Nos premiers résultats montrent en effet que la capacité d'auto-épuration est liée à l'énergie des types géomorphologiques (Jezequel, 2006). La carte de la capacité d'auto-épuration doit encore être validée. Des recherches dans ce sens sont en cours ;
- de proposer une carte de la sensibilité aux phénomènes d'incision et d'ensablement du réseau hydrographique de l'Yzeron. Des recherches se poursuivent également sur ce thème (Grosprêtre et Schmitt, 2006).

Le modèle méthodologique présenté est susceptible d'être utilisée sur tout bassin versant, notamment périurbain, dont la taille n'excède pas 2 000 km². Pour des bassins plus grands, il peut s'avérer important de développer des méthodes automatiques ou semi-automatiques, fondées sur des modèles numériques de terrain, de sectorisation-classification de cours d'eau (Hallot et al., 2006).

■ Documents publiés :

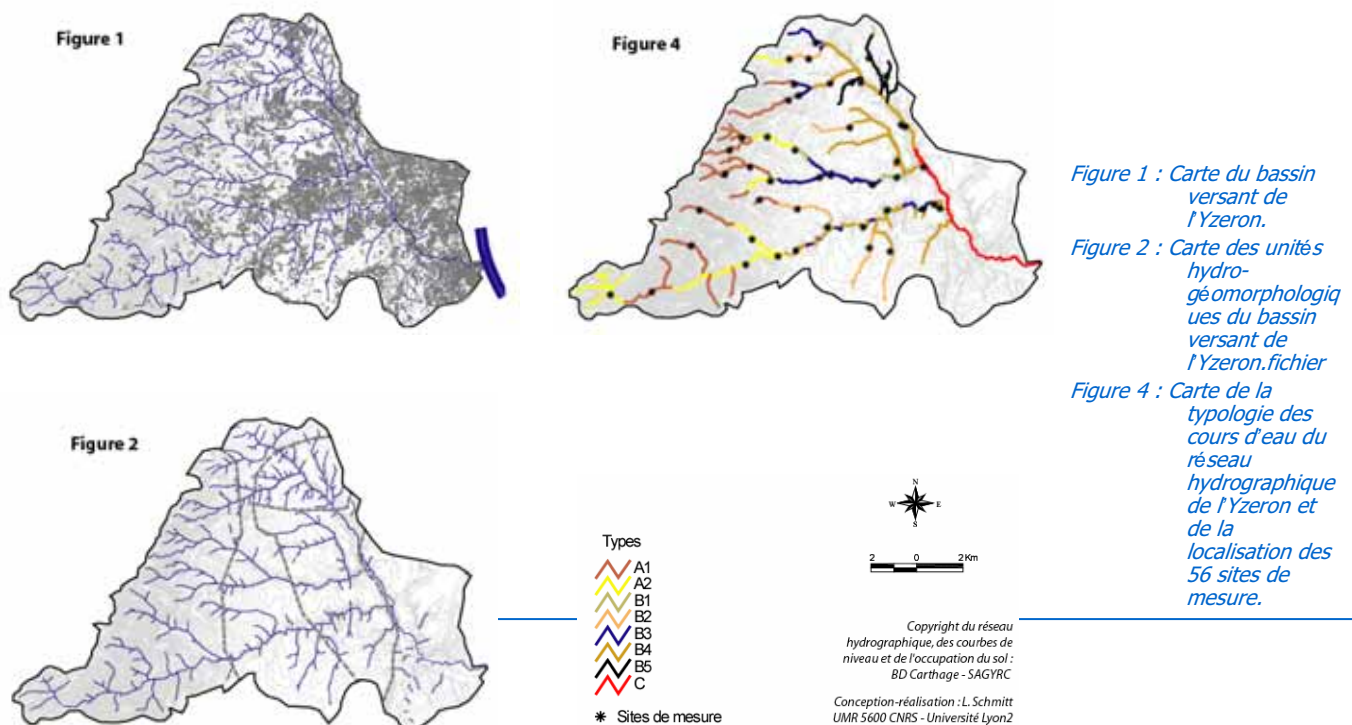
Références bibliographiques citées

- Hallot E. J., Schmitt L., Mols J. & Petit F., 2006. Elaboration d'une typologie hydro-géomorphologique de cours d'eau dans l'Euregio Meuse-Rhin. *Mosella*, XXIX, 3-4, pp. 309-322.
- Kondolf G.M., Montgomery D.R., Piégay H. & Schmitt L., 2003. Geomorphic classification of rivers and streams. In: Kondolf G.M. & Piégay H. (Eds), *Tools in fluvial geomorphology*. John Wiley & Sons, pp. 169-202.

Documents publiés

- Breil P., Lafont M., Namour P., Perrin J.-F., Vivier A., Bariac T., Sebilo M., Schmitt L., Chocat B., Aucour A.-M., Zuddas P., 2005. Dynamique du Carbone et de l'Azote en rivière dans un gradient rural – urbain. Actes du Premier colloque de restitution scientifique du Programme National / ACI « Ecosphère continentale, risques environnementaux (ECCO) », CNRS, 5-7 déc. 2005, Toulouse, pp. 387-392.
- Grosprêtre L. et Schmitt L., 2006 (août). Etude hydro-géomorphologique de l'Yzeron et définition d'indicateurs de suivi – Rapport d'avancement n°2. Université Lyon 2 – CNRS/UMR 5600. Réalisé pour le compte du Grand Lyon et du S.A.G.Y.R.C. 92 p. + ann.
- Jezequel C., 2006. Le rôle de la géomorphologie sur les échanges nappe-rivière et les écosystèmes aquatiques interstitiels en milieu pollué (compartiments superficiel et hyporhéique). Mémoire de Master 1, Université Lyon 2, CEMAGREF-Lyon, 52 p. + ann. Co-direction avec M. Michel Lafont (Cemagref Lyon).
- Lafont M., Breil P., Perrin J.-F., Schmitt L., Namour P., Malard F., Asté J.-P., Burnoud S., Guérin S., & Bonnefille M., 2006. Rapport final du Projet GEREHPUR (Gestion de la Ressource en Eau des hydrosystèmes péri-urbains), Thématique prioritaire Région Rhône-Alpes 2003 – 2005 « Développement Durable », 19 p. + ann.
- Schmitt L., Valette L., Valin K., Piégay H. & Hallot E., 2006a. Proposition d'une méthode de typologie hydro-géomorphologique des cours d'eau et test sur un sous-bassin du Rhône (bassin de l'Yzeron). *Mosella*, XXIX, 3-4, pp. 323-340.
- Schmitt L., Trémolières M., Lafont M., Vivier A., Jezequel C., Breil P., Perrin J.-F., Namour P., Valin K. and Valette L., 2006b. Hydro-geomorphological typologies of rivers as a basis for ecological monitoring and management of aquatic ecosystems. Extended abstracts, International Symposium "Man and River Systems II, Interactions among Rivers, their Watersheds, and the Sociosystem", Paris, December 4-6, 2006, pp. 212-215.
- Piégay H., Naylor L.A., Habersack H., Kail J., Schmitt L. & Bourdin L., in press. Some European Experiences in River Restoration. In: Brierley G. & Fryirs K. (Eds), *River Futures*, Island Press.
- Valette L., 2004. Typologie hydro-géomorphologique naturelle des cours d'eau du bassin versant de l'Yzeron. Mémoire de Maîtrise, Université Lyon 2, 106 p.
- Valin K., 2004. Intégration d'une typologie hydro-géomorphologique dans l'étude écologique d'un bassin versant périurbain. Premiers résultats et perspectives. Mémoire de DEA, Université Lyon 2, CEMAGREF-Lyon, 52 p. + ann.

■ Figures et tableaux



Dénominations et codes des types de cours d'eau	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

Figure 5 : Résultats de l'ACP inter-classes des variables de contrôle.

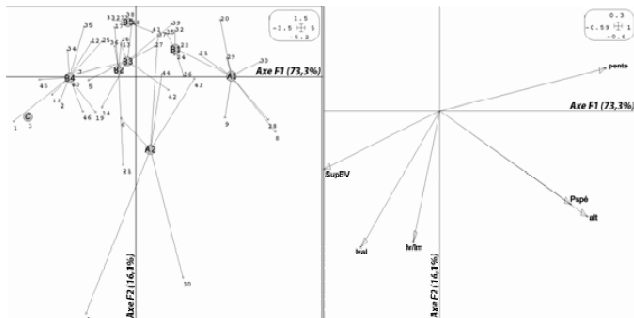


Figure 6 : Résultats de l'ACP inter-classes des variables de réponse.

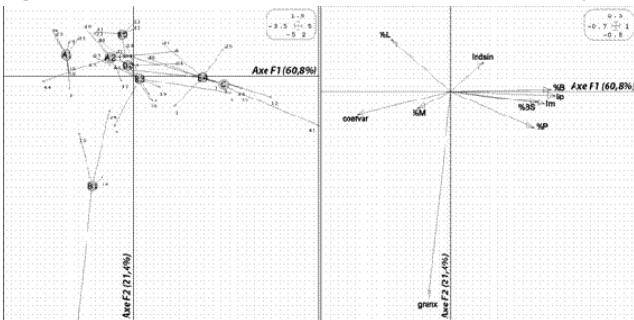


Figure 3 : Exemple de la sectorisation d'un affluent de l'Yzeron (la Chaudanne).

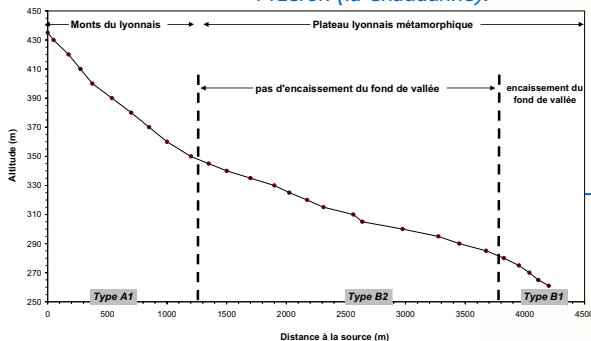


Figure 7 : Exemple de Fiche descriptive d'un type de cours d'eau.

Type B4
Cours d'eau à énergie modérée et à fond de vallée encaissé et large de la bordure orientale du plateau lyonnais

Description générale
Les cours d'eau de type B4 parcourent l'unité naturelle du plateau lyonnais recouvert de cailloutis. Le fond de vallée est encaissé et large, ce qui autorise une dynamique latérale active. L'intensité de celle-ci est variable selon les secteurs. La charge solide, assez hétérométrique, est constituée de galets, graviers, sables et limons. Les unités morphodynamiques s'organisent en séquences seuils/mouilles, associées à des plats, voire localement des rapides. Le colmatage sableux est important.

Données qualitatives
Unité naturelle : plateau lyonnais recouvert de cailloutis miocènes/pliocènes
Type de fond de vallée : alluvial
Charge solide dominante : sables, graviers, galets

Données quantitatives

Pente moyenne (‰)	0,91 (0,4)	Tri des sédiments du fond du lit	0,70 (0,2)
Largeur du fond de vallée (m)	103,3 (0,5)	% de faciès lotiques	42,3 (0,3)
Rapport d'encaissement	17,5 (0,7)	% de mouilles	37,5 (0,5)
Puissance spécifique (W.m ⁻²)	99,9 (0,4)	% de plats	20,3 (0,9)
Sinuosité	1,18 (0,2)	% de berges sapées	37,2 (1)
Rapport largeur/profondeur	6,98 (0,4)	% de rives occupées par des bancs	22,4 (0,8)
Diamètre moyen (mm)	47,7 (0,2)	Indice de mobilité pondéré	9,23 (1,1)

Moyenne (coefficient de variation)

Site de référence : YzPclubB4.

Site Charbe pépité. Vue vers l'amont. Banc médian gravilo-sableux.

Tableau 1 : Variables sélectionnées et modes d'estimation

VARIABLE	MODE D'ESTIMATION
Variables informatives	
Coordonnées de l'extrémité amont du site	Terrain (GPS) ou SIG
Longueur du site	Terrain, topofil
Variables indépendantes (de contrôle)	
Superficie du bassin versant (SupBV)	SIG
Altitude du site (alt)	SIG
Largeur du fond de vallée (lval)	Terrain, topofil
Rapport d'encaissement (l/lm)	Largeur du fond de vallée/largeur du lit mineur ; Terrain, topofil
Pente moyenne du lit mineur (pente)	SIG
Puissance spécifique (Pspé)	Terrain, SIG
Variables dépendantes (de réponse)	
Rapport largeur/profondeur du lit mineur (l/p)	Terrain, topométrie simplifiée
Indice de sinuosité (Indsin)	Terrain, topofil
Granulométrie moyenne des sédiments du fond du lit (granx)	Terrain, Méthode de Wolman (1954) sur les seuils naturels et les rapides, Méthode de Chin (1998) sur les torrents à séquences marches-cuvettes
Tri des sédiments du fond du lit (coefvar)	Coefficient de variation de la largeur (axe-B) des sédiments du fond du lit
Pourcentage de faciès découlement lotiques (%L)	Terrain, topofil, Faciès pris en compte : seuils naturels, rapides, marches, bedrock
Pourcentage de mouilles (%M)	Terrain, topofil
Pourcentage de plats (%P)	Terrain, topofil
Pourcentage de berges sapées (%BS)	Terrain, topofil
Pourcentage de bancs (%B)	Terrain, topofil
Indice de mobilité pondéré I_m	Terrain, topofil, $I_m = \frac{S+3B}{4L} \cdot 100$; S=longueur des berges sapées, B=longueur des bancs, L=longueur du site.

Tableau 2 : Caractéristiques hydro-géomorphologiques quantitatives des types de cours d'eau, [Moyenne (coefficient de variation)].

	lval (m)	l/lm	Indsin (%)	pente (%)	l/p	Pspé (W.m ²)	granX (mm)	coefvar	%M	%P	%L	%BS	%B	I_m
A1	16 (1,2)	8,6 (0,9)	1,11 (0,1)	7,58 (0,3)	3,1 (0,2)	313 (0,5)	42 (0,4)	1,05 (0,2)	43 (0,3)	1 (1,9)	56 (0,2)	3 (1,2)	2 (2,8)	1,9 (1,5)
A2	110 (1,4)	39,7 (1,1)	1,20 (0,1)	2,77 (0,4)	5,1 (0,7)	275 (0,4)	44 (0,3)	0,97 (0,4)	42 (0,2)	6 (0,9)	52 (0,2)	11 (1,4)	9 (0,9)	9,2 (0,9)
B1	17 (0,9)	6,4 (1,1)	1,09 (0,1)	4,90 (0,1)	3,8 (0,3)	267 (0,3)	145 (0,7)	1,10 (0,5)	43 (0,3)	14 (1,3)	43 (0,2)	12 (1,5)	7 (1,4)	7,8 (1,5)
B2	63 (0,9)	30,2 (1)	1,06 (0)	2,38 (0,4)	4,3 (0,5)	103 (0,4)	37 (0,1)	1,00 (0,2)	37 (0,4)	15 (1,0)	48 (0,3)	29 (0,9)	14 (2,9)	17,8 (0,2)
B3	46 (0,7)	16,2 (0,8)	1,10 (0,1)	3,05 (0,6)	4,7 (0,3)	181 (0,4)	47 (0,4)	0,85 (0,2)	41 (0,2)	18 (0,8)	40 (0,3)	24 (1,4)	13 (0,5)	17,0 (0,6)
B4+C	103 (0,5)	17,5 (0,7)	1,18 (0,2)	0,91 (0,4)	7,0 (0,4)	100 (0,4)	48 (0,2)	0,70 (0,2)	38 (0,3)	20 (0,9)	42 (0,3)	37 (1)	22 (0,8)	26,1 (0,6)
B5	19 (0,4)	12,0 (0,3)	1,16 (0,1)	3,14 (0,5)	3,8 (0,4)	89 (0,5)	14 (0,4)	0,94 (0,2)	38 (0,4)	15 (0,5)	46 (0,3)	14 (1,1)	12 (0,9)	12,7 (0,7)

Résumé :

Dans les bassins versants périurbains, l'anthropisation du milieu naturel conduit à des modifications des chemins naturels de l'eau qui ne sont plus déterminés par la seule topographie. Les méthodes traditionnelles d'extraction du réseau hydrographique ou de délimitation des sous-bassins versants, fondées sur l'analyse des modèles numériques de terrain ne sont donc plus adaptées pour ces bassins. Nous présentons ici une méthodologie, utilisant des informations additionnelles sur les réseaux, qui permet de délimiter les frontières d'un bassin versant périurbain et de déterminer son réseau de drainage. La méthode permet aussi de connaître les aires drainées par les différents sous-bassins (urbains/ruraux) et donc peut fournir une aide précieuse pour les études de schémas directeurs des eaux pluviales à l'échelle de bassins versants, le dimensionnement d'ouvrages, etc. .

■ Cadre Général :

Pour de nombreuses applications en hydrologie, il est nécessaire de connaître la délimitation et les frontières d'un bassin versant ainsi que son réseau de drainage. Ceci permet en particulier d'en estimer la surface, grandeur nécessaire lorsqu'on veut convertir un volume d'eau écoulé dans une rivière (estimé à l'aide de mesures de débit par exemple) en lame d'eau, puis calculer un coefficient de ruissellement (rapport entre lame d'eau ruisselée et lame pluviométrique reçue par le bassin). Ces grandeurs adimensionnelles permettent de comparer la réponse hydrologique de bassins versants différents. La connaissance du réseau de drainage et des sous-bassins qu'il draine est aussi importante pour aborder des questions d'aménagement et de gestion des eaux, en particulier des eaux pluviales (dimensionnement d'un bassin de rétention, d'un ouvrage, etc..).

Depuis que des modèles numériques de terrain (MNT) sont disponibles, le réseau de drainage et la superficie des bassins versants sont souvent obtenus à l'aide de logiciels d'analyse du MNT où les directions des écoulements sont déterminées par la topographie (écoulement selon la plus grande pente par exemple).

L'anthropisation croissante du milieu conduit à des modifications des chemins naturels de l'eau liées par exemple aux réseaux de routes, de fossés, aux réseaux d'assainissement et à l'imperméabilisation des sols. Les directions d'écoulement ne sont donc plus uniquement déterminées par la topographie. Les outils permettant l'extraction automatique du réseau de drainage et des frontières des bassins versants doivent donc être adaptés pour ces bassins. Nous présentons ici une méthodologie permettant de délimiter les frontières d'un bassin versant périurbain et d'extraire son réseau de drainage, en combinant les informations issues d'un MNT mais aussi des réseaux d'assainissement (eaux usées et eaux pluviales) et des informations de terrain en concentrant leur collecte sur les zones les plus critiques (fossés et réseaux séparatifs d'eau pluviale). Ces informations permettent de prendre en compte les modifications des directions d'écoulement induites par les éléments anthropiques dans la détermination du réseau de drainage. La méthode fournit aussi les aires drainées par les brins du réseau et donc les différents sous-bassins (urbains/ruraux) associés. Ces informations peuvent être utiles pour le dimensionnement d'ouvrages ou la gestion du bassin versant. .

■ Objectifs:

Compte tenu de la complexité des bassins périurbains, il s'agit de proposer une méthode de délimitation des bassins versants et d'extraction du réseau de drainage qui soit suffisamment précise tout en minimisant le travail de recueil de données de terrain et en exploitant au maximum les bases de données existantes dans les collectivités (topographie, réseaux d'assainissement et d'eau pluviales, etc..). La méthode permet aussi d'extraire le réseau de drainage et les sous-bassins correspondants. Une meilleure connaissance des sous-bassins et de leur surface drainée est importante pour améliorer l'estimation des volumes ruisselés et déterminer les techniques les plus efficaces en terme de gestion des eaux pluviales.

■ Contacts :

Isabelle BRAUD, Sonja JANKOWFSKY, Flora BRANGER, Cemagref, UR HHLY, 3bis Quai Chauveau, CP 220, 69336 Lyon Cédex 9. Tel : 04 72 20 87 78. E-mail Isabelle.Braud@cemagref.fr.

■ Les avancées de l'OTHU : Principaux résultats

Les trois étapes de la méthodologie sont résumées sur la Figure 1 et sont détaillées ci-dessous. La méthode est illustrée pour le sous-bassin de la Chaudanne (4 km²), situé dans le bassin de l'Yzeron en périphérie lyonnaise.

Hypothèses de travail et données nécessaires

Seules les eaux pluviales sont considérées pour la délimitation des frontières du bassin versant. On exclut donc les réseaux d'eau potable et d'eaux usées séparatifs de l'analyse car ces eaux n'ont pas vocation à être drainées par les cours d'eau naturels. Ceci nous amène à considérer les réseaux suivants : i) les réseaux unitaires normalement connectés à la station d'épuration, sauf en cas de débordements via les déversoirs d'orage, où ils se connectent au réseau hydrographique ; ii) les réseaux d'eau pluviale séparatifs, en général connectés au réseau naturel ; iii) les réseaux de routes, souvent bordées de fossés ; iv) les fossés agricoles et, enfin, v) le réseau hydrographique naturel et les plans d'eau. A noter que la méthode ne prend pas en compte d'éventuels puits ou de sources d'eau souterraine. Si ce type d'écoulement existe, les frontières du bassin seront ajustées manuellement.

Les données nécessaires à l'analyse sont i) un modèle numérique de terrain, à résolution fine si possible ; ii) une description de l'occupation des sols (photo aérienne, cadastre, carte détaillée) correspondant à la période étudiée, compte tenu de la rapidité d'évolution dans ces zones. iii) Une carte du réseau hydrographique naturel, incluant de préférence la distinction entre cours d'eau pérennes et intermittents (cf BDTopo® de l'IGN) et une carte topographique sont très utiles pour le recueil des données de terrain. iv) De plus, toute information, de préférence sous forme numérique, sur les réseaux d'assainissement et leurs directions d'écoulement, ainsi qu'un inventaire des ouvrages (déversoirs d'orage, bassins de rétention, station de pompage) est utile et minimise le travail de terrain. Ce dernier consistera bien souvent à inventorier et cartographier les réseaux d'eaux pluviales séparatifs et les fossés qui ne sont en général pas renseignés dans les bases de données existantes.

Etape 1 : Détermination des frontières approximatives du bassin versant

On commence par déterminer la frontière topographique du bassin versant à l'aide d'utilitaires qu'on trouve dans la plupart des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) du commerce ou en logiciels libres (Etape 1A). Ces outils fournissent aussi un premier réseau de drainage, défini à partir de la topographie. Dans notre étude, nous avons utilisé le logiciel Taudem (Tarboton, 2008) disponible gratuitement à l'adresse suivante : <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem3.1/>.

On détermine ensuite les exutoires du bassin (réseau naturel, stations d'épuration) et les points de connexion des réseaux unitaires avec le réseau naturel (déversoirs d'orage) (Etape 1B). Les surfaces drainées par l'ensemble de ces réseaux définissent la frontière maximale du bassin (Etape 1C). La Figure 3 présente le résultat pour le sous-bassin de la Chaudanne.

Etape 2 : Détermination du réseau de drainage

Pour compléter la première ébauche de réseau hydrographique naturel obtenu à l'étape précédente (Etape 1A), on s'intéresse plus particulièrement aux réseaux d'eau pluviale et aux fossés, en général non répertoriés dans les bases de données existantes, mais le plus souvent connectés au réseau naturel. C'est pour leur tracé que le travail de terrain s'avère nécessaire.

Dans un premier temps, une reconnaissance de terrain, le long de la rivière, permet d'identifier tous les points de connexion/rejet dans la rivière (eaux pluviales et réseaux séparatifs) (Etape 2A).

Ensuite, on réalise une seconde reconnaissance de terrain pour répertorier les réseaux de fossés et d'eaux pluviales en restreignant le travail de collecte aux zones suivantes : i) zones avec réseau séparatif où seule la localisation des tuyaux d'eaux usées est connue et où les eaux pluviales seront probablement drainées par des fossés ; ii) réseau routier inclus dans le bassin topographique où les eaux pluviales sont souvent drainées par des fossés ; iii) intersections du réseau routier et de la frontière topographique du bassin ; iv) zones hors bassin topographique connectées à des stations de pompage ou proches du réseau hydrographique car elles peuvent contenir des fossés avec des inversions de pente par rapport au réseau d'assainissement.

Les informations sont répertoriées sur une carte puis digitalisées. On peut aussi utiliser un GPS pour les géoréférencer directement. Pour limiter ce travail, on ne considère que les fossés qui sont directement connectés au réseau hydrographique, car ce sont ceux qui influenceront le plus les écoulements à l'exutoire. On cartographie ensuite les bassins de rétention si cette information n'est pas déjà disponible. Enfin, on peut déterminer le réseau de drainage final en ne conservant que les brins connectés au réseau naturel. Au final, tous les points de connexion et les bassins de rétention doivent être connectés à une partie du réseau de drainage artificiel.

Sur la Figure 3, on trouve une illustration de zones où des traitements particuliers ont été nécessaires (notées "a", "b", "c" sur la figure). Les zones notées "a" sont des zones où l'examen des intersections entre frontières topographiques et réseau routier a conduit à augmenter la surface du bassin à cause de fossés qui interceptent les écoulements et les dirigent vers l'intérieur du bassin versant. On a aussi identifié plusieurs zones avec des fossés coulant en sens inverse des réseaux d'assainissement (flèches noires). Les réseaux séparatifs (notés "b") et les réseaux unitaires en zones naturelles (notés "c") hors du bassin topographique ont aussi été exclus du réseau final. La Figure 4 montre le réseau de drainage finalement retenu.

Étape 3 : Extraction des sous-bassins

On combine deux méthodes, la première adaptée aux zones urbaines, la seconde pour les sous-bassins ruraux. Pour les zones urbaines (Etape 3A, Figure 2), on utilise une approche où chaque parcelle contenant un bâtiment est connectée au tuyau ou au fossé le plus proche (principe de proximité) ou au point de connexion le plus bas (principe de gravité) si deux tuyaux/fossés sont situés à égale distance de la parcelle (Rodriguez et al., 2003). Si des informations numérisées sont disponibles (cadastre, carte détaillée d'occupation des sols ou photos aériennes), la procédure peut être automatisée (Rodriguez et al., 2003). Sinon, les connexions sont réalisées manuellement à l'aide de photos aériennes et d'une carte topographique.

Pour les zones rurales, les sous-bassins sont délimités automatiquement à l'aide d'outils standard d'analyse de MNT (par exemple le logiciel Tudem cité plus haut), en affectant un sous-bassin à chaque brin de rivière ou de fossés (Etape 3B). On fusionne ensuite les deux cartes obtenues aux étapes 3A et 3B, en remplaçant les sous-bassins ruraux par les sous-bassins urbains lorsqu'il y en a. Pour les hameaux isolés ou les petits villages en zone rurale, nous proposons des corrections manuelles des frontières en partant du principe que ces zones sont connectées au réseau le plus proche, selon le principe de proximité. On ne conservera ensuite que les brins du réseau drainant vers l'intérieur du bassin topographique.

La Figure 4 illustre le résultat final pour le bassin de la Chaudanne. Cette carte illustre en particulier que la superficie du bassin change en fonction des conditions hydrologiques. En période sèche, la superficie du bassin est de 2.9 km² (zones vertes, violettes et roses non hachurées). En période humide, si tous les déversoirs d'orage sont actifs, elle grimpe à 4.1 km², soit 30% de plus qu'en période sèche. Mais attention car dans ce cas, les surfaces roses hachurées ne contribuent que partiellement aux écoulements : la part de l'eau ruisselée qui arrive au cours d'eau dépend des seuils de débordement des déversoirs d'orage et l'autre partie des écoulements continue à être acheminée vers la station d'épuration. Dans ce cas, le calcul d'un coefficient d'écoulement demeure donc incertain si les seuils de débordement des déversoirs d'orage ne sont pas bien connus.

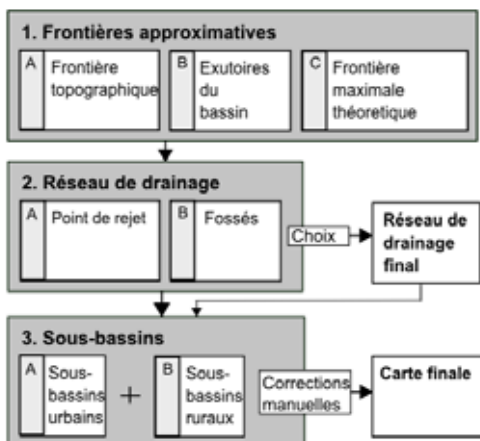


Figure 1 : Schéma de la méthodologie. L'étape 1 permet de définir les frontières approximatives du bassin afin de cibler le recueil des informations de terrain. L'étape 2 permet la détermination du réseau de drainage et l'étape 3 conduit à l'extraction des différents sous-bassins en s'appuyant sur le réseau de drainage obtenu à l'étape 2.



Figure 2 : Illustration de l'extraction du réseau hydrographique (en noir) et délimitation d'un sous-bassin urbain (en blanc) par principe de proximité. On utilise ici la BDTopo® de l'IGN pour connecter chaque parcelle au tuyau le plus proche. Dans cet exemple, le sous-bassin est connecté à un bassin de rétention.

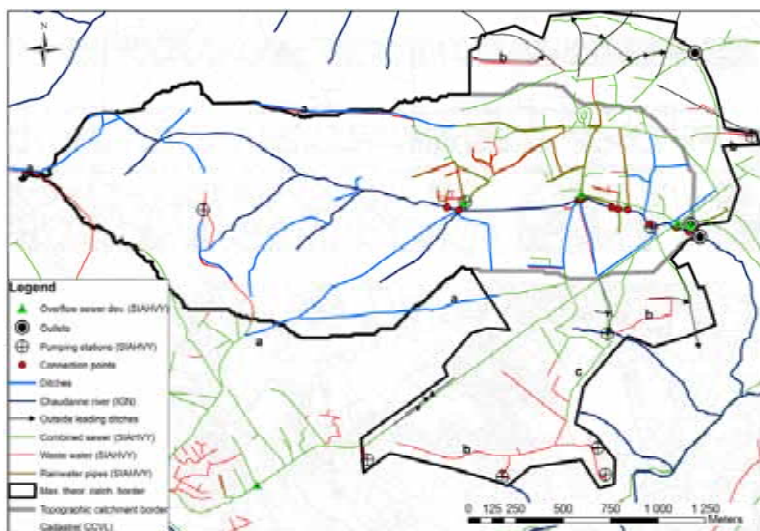


Figure 3 : Identification des frontières maximales du bassin de la Chaudanne. Le logiciel Tudem a été utilisé pour les traitements topographiques sur un MNT à 25m issu de la BDTopo® de l'IGN, ce qui donne la frontière en gris et le réseau naturel en bleu foncé. Les brins bleu clair correspondent aux fossés directement connectés au réseau naturel. L'exutoire naturel + deux exutoires vers des stations d'épuration ont été identifiés (points noirs). On recense aussi 4 déversoirs d'orage (triangles verts) connectant le réseau unitaire au réseau naturel et 9 autres points de connexion du réseau d'eau pluviale ou de fossés (points rouges). Les réseaux d'eau usés apparaissent en rouge et les réseaux unitaires en vert. Les zones drainées par l'ensemble des réseaux définissent la frontière maximale du bassin (en noir).

Évaluation de la pertinence de l'approche

La méthode proposée a été comparée à 5 autres techniques proposées dans la littérature, toutes automatiques et s'appuyant uniquement sur le MNT et des données numériques. La méthode proposée ici, qui contient une part de recueil d'informations de terrain s'est révélée plus précise et robuste que ces 5 autres méthodes en terme de superficie du bassin, de longueur du réseau final, du nombre des sous-bassins et de détection des fossés (Jankowfsky et al., 2011).

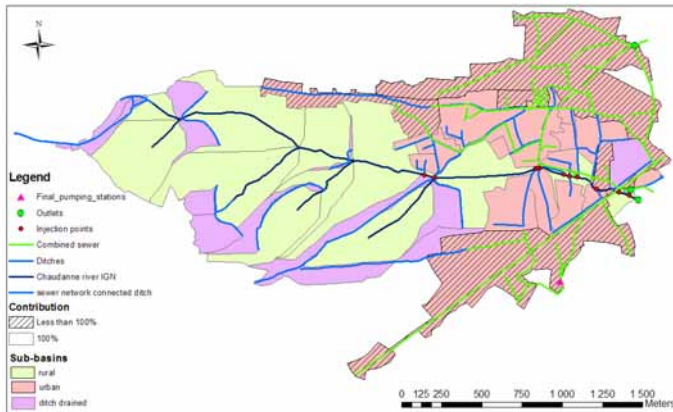


Figure 4. Les sous-bassins extraits à partir du MNT et du logiciel Taudem apparaissent en vert pour ceux qui sont drainés par un cours d'eau naturel et en violet pour ceux qui sont drainés par un fossé. En rose, apparaissent les sous-bassins urbains délimités par la méthode décrite en Figure 2. Ceux qui sont hachurés correspondent au drainage par le réseau unitaire. Ces sous-bassins ne contribuent donc au débit dans le cours d'eau qu'en cas de débordement des déversoirs d'orage

■ Cadre d'utilisation

Cette méthode peut être utilisée lorsque l'anthropisation du bassin versant est telle que les écoulements sont largement modifiés par rapport à des écoulements déterminés uniquement par la topographie. Pour les bassins peu anthropisés, les outils standard fournis par les outils SIG sont suffisants pour extraire le réseau de drainage et les frontières des bassins. La méthode proposée s'applique à des bassins de 1 à 10 km² pour lesquels des informations précises sont nécessaires pour des questions d'aménagement par exemple. L'exploitation des données nécessite l'utilisation de systèmes d'informations géographiques. Les logiciels disponibles sont soit des outils commerciaux (e.g. ArcGIS, MapInfo), soit des logiciels libres (e.g. QuantumGIS, OrbisGIS). On a aussi besoin d'outils permettant de réaliser l'analyse d'un MNT (e.g. Taudem ou des fonctionnalités disponibles dans ArcGIS, OrbisGIS,...). Le travail de terrain nécessaire pour collecter les informations dépend des informations numériques disponibles. Pour la Chaudanne, deux journées de terrain ont été nécessaires à la collecte des informations sur les réseaux d'eau pluviale et les fossés et entre une ou deux semaines de travail par un géomaticien ont permis de réaliser l'analyse complète du bassin. L'application de la méthode nécessite des compétences en géomatique, mais aussi une bonne connaissance du terrain d'étude.

Comme nous l'avons vu, les données nécessaires, si possible sous forme numérique, sont : i) un modèle numérique de terrain le plus précis possible (l'apport d'un MNT lidar à résolution métrique ou inférieure peut être intéressant notamment pour détecter les réseaux de fossés potentiels) ; ii) le cadastre, des photos aériennes et/ou une carte d'occupation des sols détaillée; iii) une carte du réseau hydrographique naturel et de la topographie, du réseau routier ; iv) les réseaux d'assainissement séparatifs, unitaires et pluvial ; v) un inventaire des ouvrages. Un contact avec les organismes gérant les réseaux est une étape indispensable permettant de récolter des informations souvent précieuses.

Cette méthodologie peut être utilisée aux gestionnaires pour les applications suivantes : études des écoulements de temps de pluie, évaluation des incidences de l'urbanisation sur les écoulements et régimes hydrologiques, étude de schéma directeur de gestion des eaux pluviales à l'échelle de bassins versant, dimensionnement de réseaux ou de bassins de rétention, etc.

■ Développements futurs

Il conviendra de vérifier la pertinence et la robustesse de la méthode sur d'autres bassins versants périurbains. Des approches complémentaires ont été testées, dans le cadre du projet AVuPUR, sur le bassin de la Chézine en périphérie Nantaise, avec une comparaison d'approches fondées uniquement sur la topographie, une approche objet proche de celle décrite ici, et une approche par triangulation de la surface, en prenant en compte les modifications d'écoulement induites par les haies, fossés, routes, etc.. (Rodriguez et al., 2011). Dans tous les cas, une cartographie des réseaux de fossés, réalisée par reconnaissances de terrain, se révèle importante pour l'obtention d'un résultat cohérent. A l'avenir, on peut espérer disposer de MNTs plus précis (par exemple MNR Lidar), qui permettent une bonne identification de la localisation des fossés (Sarrazin et al., 2011). Même dans ce cas, la reconnaissance de terrain s'avère nécessaire pour ne conserver que les fossés directement connectés au réseau, qui sont ceux qui influencent directement les écoulements.

■ Quelques documents publiés sur le thème

Jankowfsky, S., 2011. Modélisation hydrologique spatialisée de petits bassins versants péri-urbains. Application aux sous-bassins de la Chaudanne et du Mercier (Yzeron). Ecole doctorale Terre, Univers, Environnement. l'Institut National Polytechnique de Grenoble. Soutenance prévue en Décembre 2011.

Jankowfsky, 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., Bocher E., Chancibault, K, 2011. Terrain representations of peri-urban catchments channels, en préparation pour le numéro special du Journal of Hydrology "Hydrology of periurban catchments : processes and modelling".

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.

Sarrazin, B., Braud, I., Puech, C., 2011. On the use of high resolution LiDAR DEM to study drainage network extensibility from a functional typology of channels, soumis à Hydrological Processes

Tarboton G.D. 2008. TAUDDEM Terrain Analysis Using Digital Elevation Model. Softwaredescription. User Guide. Utah State University. <http://hydrology.neng.usu.edu/taudem/taudem3.1/index.html>

Remerciements : Les travaux présentés dans cette fiche ont été partiellement financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) via le contrat n° ANR-07-VULN-01. Le bassin de l'Yzeron est un site de l'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine. Le CCVL, l'IGN, le Grand Lyon, le SAGYRC, Sol-Info Rhône-Alpes, le SIAVHY, nous ont fourni une partie des données nécessaires à cette étude.

Résumé :

Face au changement climatique, des questions se posent sur l'évolution des conditions climatiques et de leurs incidences sur le régime hydrologique des cours d'eau. Afin d'évaluer si, sur les années passées, des évolutions significatives des températures, de la pluviométrie ou des débits des cours d'eau peuvent être identifiées, des tests statistiques permettent de détecter soit des ruptures dans les séries, soit des tendances linéaires (augmentation ou diminution).

La présente fiche présente les principes de ces tests, leurs conditions d'utilisation ainsi qu'un exemple d'application sur des séries climatiques, pluviométriques et débitométriques du bassin de l'Yzeron, appartenant à l'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine (OTHU). Même si des évolutions ou des ruptures significatives sont mises en évidence, la méthode ne permet cependant pas de déterminer leurs causes et de leur attribuer une origine climatique ou anthropique par exemple.

■ Cadre Général :

Diverses études mettent en évidence des évolutions des températures, de la pluviométrie ou des débits dans les cours d'eau sur la période récente. L'ampleur et la réalité de ces évolutions dépendent des régions et des conditions hydro-climatiques. Pour les débits, il n'est par ailleurs pas toujours facile d'établir si l'origine des évolutions constatées est liée à des modifications climatiques ou à des évolutions de l'occupation des sols (imperméabilisation), des pratiques agricoles, etc...

Dans le cadre de l'établissement de « Plans Climat » ou de préparation à la mise en œuvre de la directive cadre sur les inondations, les décideurs peuvent être intéressés par les évolutions attendues à échéance de 30 ou 50 ans. Ceci peut permettre de proposer des mesures d'atténuation locales ou d'adaptation, par exemple à l'accroissement de l'exposition aux risques d'inondations, etc.

Mais, avant de quantifier l'ampleur des évolutions futures, une étape préliminaire est déjà l'établissement d'un diagnostic sur les années passées, à partir des séries de données existantes, afin d'identifier si des tendances sont déjà détectables.

Pour ce faire des tests statistiques permettent de détecter, sur de longues séries chronologiques d'au moins trente à quarante ans, des ruptures (test de Pettitt) ou des tendances linéaires à la baisse ou à la hausse (test de Mann-Kendall) et d'évaluer si les évolutions sont statistiquement significatives. Nous présentons dans cette fiche les principes d'utilisation de ces tests, leur cadre possible d'utilisation par des bureaux d'étude et leurs limites. Nous illustrons leur intérêt à l'aide de données météorologiques, de pluie, et de débits collectées sur le bassin versant de l'Yzeron en périphérie lyonnaise, qui fait partie de l'OTHU.

■ Objectifs:

Face à l'enchaînement d'épisodes extrêmes comme les crues, il est fréquent d'invoquer le changement climatique ou les modifications d'occupation des sols pour expliquer une augmentation de ces phénomènes, sans que ce discours soit toujours suffisamment étayé par l'analyse des données.

Sur le bassin versant périurbain de l'Yzeron (Figure 1), on constate depuis les années 1990 une recrudescence des crues dommageables à l'exutoire situé à Oullins. Si on observe la chronique des débits journaliers à la station de Craponne, drainant 48 km² (Figure 2), on constate que le nombre de crues ayant dépassé le débit journalier biennal a augmenté entre les périodes 1970-1990 et 1990-2010. Les évolutions récentes de ce bassin versant qui s'est fortement urbanisé depuis les années 1970, avec une progression de la périurbanisation de l'aval vers l'amont, et l'imperméabilisation des sols associée, (Kermadi et al., 2011a), posent la question du rôle de l'urbanisation sur cette recrudescence des crues.

Cependant, avant toute conclusion, il convient d'aborder deux questions préalables : 1) les évolutions constatées sont-elles statistiquement significatives ? 2) des évolutions du climat et/ou de la pluviométrie sur la période récente pourraient-elles expliquer ces changements ? Les données de température, d'évapotranspiration potentielle, de pluie et de débits sur ce bassin ont donc été analysées à l'aide des tests statistiques de Pettitt et Mann-Kendall afin d'obtenir des premiers éléments de réponse à ces deux questions (Kermadi et al., 2011b, Braud et al., 2011).

■ Contacts :

Isabelle BRAUD, Cemagref, UR HHLY, 3bis Quai Chauveau, CP 220, 69336 Lyon Cédex 9. Tel : 04 72 20 87 78.
E-mail Isabelle.Braud@cemagref.fr.

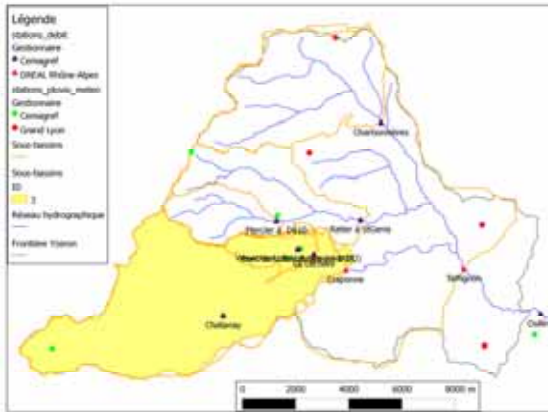


Figure 1 : Carte du bassin versant de l'Yzeron et des réseaux de mesures. Le sous-bassin en jaune est le sous-bassin de Craponne (48 km²) pour lequel nous disposons de 40 ans de débits (1970-2010).

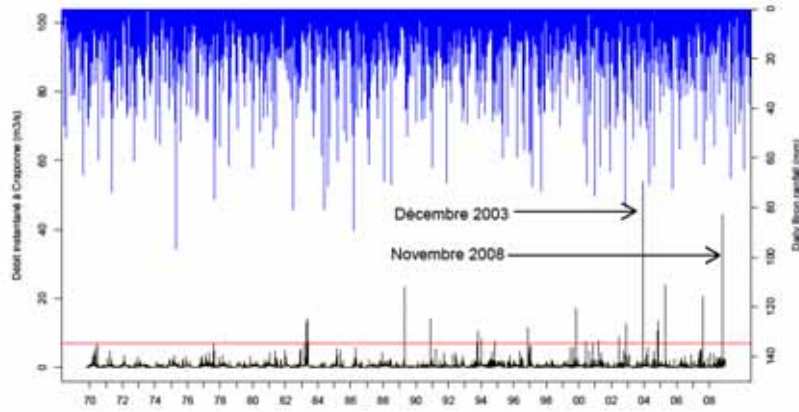


Figure 2 : Pluie journalière à la station de Bron et débits journaliers à la station de Craponne (48 km²) de 1970 à 2008. La ligne rouge correspond au débit journalier biennal (7 m³ s⁻¹)

■ Les avancées de l'OTHU : Principaux résultats

L'encart n°1 rappelle les principes généraux des tests statistiques. Nous décrivons ensuite les principes des tests statistiques de Pettitt et Mann Kendall utilisés pour détecter respectivement une rupture ou une tendance sur une série chronologique de données. Enfin, nous illustrons leur utilisation sur les données du bassin de l'Yzeron.

Encart n°1 : Rappel des principes généraux d'un test statistique

A quoi servent les tests statistiques ?

Un test statistique consiste à définir une règle de décision concernant la validité d'une hypothèse sur un échantillon de données.

Les calculs réalisés sur l'échantillon conduiront à retenir l'hypothèse H₀ ou son alternative H₁ sachant qu'une seule est vraie. Il reste malgré tout des éventualités de se tromper : refuser H₀ alors que H₀ est vraie (risque de 1^{ère} espèce) ou accepter H₀ alors que H₁ est vraie (risque de 2^{ème} espèce).

Comment met-on en œuvre un test statistique ?

Les tests reposent tous sur une variable de décision ou statistique T dont on connaît la distribution sous l'hypothèse H₀. On peut alors définir les bornes d'un intervalle qui regroupe $(1-\alpha)$ % des valeurs que peut prendre la statistique si H₀ est vraie et y situer la valeur T prise pour l'échantillon analysé. Si T se situe en dehors de l'intervalle, la valeur est jugée peu plausible, et on en conclut que H₀ est fautive.

α est fixé par l'utilisateur (en général, $\alpha < 10\%$). Plus α est faible, plus l'intervalle est étendu, et on ne rejettera alors H₀ que dans des cas rarissimes. En pratique, les tests fournissent une valeur de probabilité p pour la valeur T de l'échantillon et on teste si $p < \alpha$. Si c'est le cas, l'hypothèse H₀ est rejetée au seuil α . Les valeurs $\alpha = 0.01$ (1%), 0.05 (5%), 0.1 (10%) sont couramment utilisées.

Comment doit-on interpréter le résultat d'un test ?

Il ne faut pas faire dire à un test statistique plus que ce qu'il veut dire. Ainsi, accepter H₀ ne signifie pas que cette hypothèse soit vraie, mais seulement que les observations disponibles ne sont pas incompatibles avec cette hypothèse.

a) Principes d'utilisation des tests de Pettitt et de Mann-Kendall

Les tests de Pettitt (1979) et de Mann-Kendall (Mann et Witney, 1947) sont des tests statistiques dits non-paramétriques car ils ne font aucune hypothèse sur la distribution sous-jacente des données. En particulier, ils s'appliquent à des données n'ayant pas une distribution gaussienne. Ils sont donc adaptés aux données hydrométéorologiques pour lesquelles les distributions sont souvent dissymétriques.



Figure 3 : Les types d'évolution recherchés dans les séries. (a) Rupture. (b) Tendance linéaire.

Le test de Pettitt permet de détecter des ruptures dans les séries chronologiques (Figure 3a). L'hypothèse H0 testée est la suivante : « il n'y a pas de rupture ». Le test repose sur les signes des différences entre valeurs qui forment l'échantillon. Une série temporelle résultante est élaborée. Au maximum observé sur la série correspond vraisemblablement la date de rupture. La valeur p de la statistique permet de savoir si cette rupture est statistiquement significative au seuil α .

Le test de Mann-Kendall permet quant à lui d'examiner l'existence d'une tendance linéaire (à la hausse ou à la baisse) sur une série chronologique (Figure 3b). L'hypothèse H0 testée est « il n'y a pas de tendance ». Si $p < \alpha$, seuil de significativité choisi, l'hypothèse H0 est rejetée et on conclut à l'existence d'une tendance significative, au seuil choisi. La robustesse du test a été validée par plusieurs essais de comparaison effectués par Yue et al (2004). Dans le cas de variables auto-corrélées, le test de Mann-Kendall doit être modifié pour prendre en compte l'effet de l'auto-corrélation (Yue et Wang, 2004 ; Renard, 2006 ; Renard et al, 2006b).

D'un point de vue pratique, les tests ont été appliqués en s'appuyant sur les fonctions existantes dans le logiciel R (R Development Core Team, 2004) pour le test de Mann-Kendall usuel et des fonctions développées au Cemagref dans R pour les tests de Pettitt et de Mann-Kendall modifié. Le logiciel KhronoStat, proposé gratuitement par l'IRD contient aussi des fonctionnalités permettant la mise en œuvre de ces tests (<http://www.hydrosociences.org/spip.php?article264&lang=en>)

b) Données utilisées sur le bassin versant de l'Yzeron

Nous rappelons ici que les tests présentés doivent être appliqués sur des séries de données d'au moins 30 à 40 ans, si possible sans lacunes importantes, si on veut pouvoir détecter des évolutions significatives.

Sur le bassin versant de l'Yzeron (Figure 1), nous disposons de 4 pluviographes à pas de temps 6 minutes issus du réseau géré par le Grand Lyon, complété par quatre postes à pas de temps variables gérés par le Cemagref. Cependant, ces séries ne débutent au mieux qu'en 1985, ce qui ne fait que 25 ans de données, durée trop courte pour l'application des tests. Nous avons donc utilisé, pour les pluies, les données journalières de la station Météo-France de Bron, disponibles depuis 1921.

Pour les données météorologiques, il n'existait pas de station sur le bassin avant 2008. Nous avons donc utilisé la base de données SAFRAN¹ (Quintana-Segui et al., 2008 ; Vidal et al., 2010) qui fournit, sur des mailles de 8x8 km², les variables climatiques (rayonnement solaire et grandes longueurs d'ondes incidents, température et humidité spécifique de l'air, vitesse du vent, pluviométrie) à pas de temps horaire. Les données étaient disponibles depuis 1970 et ont également été utilisées pour calculer une évapotranspiration potentielle journalière (ETP) sur le bassin versant selon la méthode préconisée par la FAO (1958).

Pour les débits, nous disposons de deux stations gérées par la DREAL Rhône-Alpes jaugeant les sous-bassins de Craponne (48 km²) depuis 1969 et de Taffignon (129 km²) depuis 1988. Plusieurs stations gérées par le Cemagref sont aussi disponibles sur des sous-bassins versants plus petits, mais sur une période plus récente avec des installations entre 1997 et 2009. Pour les analyses de tendance, seule la station de Craponne possède la durée suffisante pour l'application des tests statistiques (40 ans).

[1]: Cette base de données sera bientôt disponible sur la Publiothèque de Météo-France en accès gratuit pour la recherche et payant pour les autres usages. <http://publitheque.meteo.fr/okapi/accueil/okapiWebPubli/index.jsp>

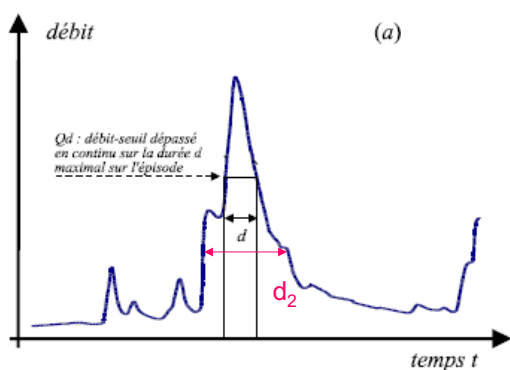


Figure 4 : Illustration de la méthode d'échantillonnage des débits sub-seuil. On déplace une fenêtre de largeur d le long de la chronique et on sélectionne les crues indépendantes. On peut faire ce travail pour une autre durée d_2 . La durée d choisie est la durée caractéristique de crue et on a échantillonné pour les durées $d/8$, $d/4$, $d/2$, d , $3d$ et $d=0$ (d'après Sauquet et Ribatet, 2004)

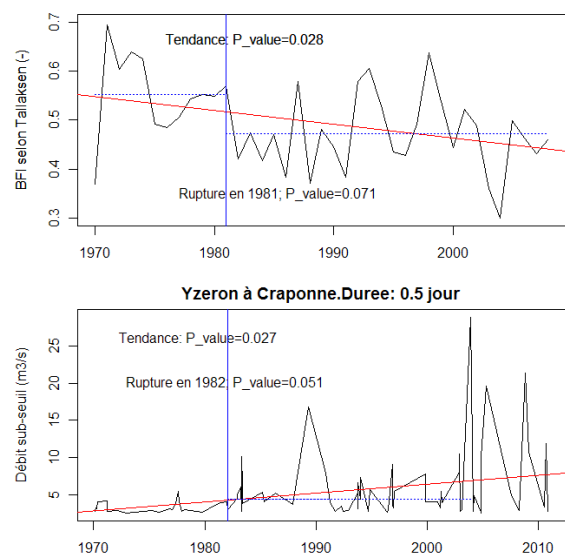


Figure 5 (a) BFI (-) à Craponne. (b) Débit sub-seuil (m³ s⁻¹) à Craponne pour la durée 12h. La ligne rouge est la tendance linéaire ajustée sur les données. La ligne verticale est la date probable de rupture et les lignes bleues sont les moyennes des données de part et d'autre de la date de rupture.

c) Grandeurs analysées

A partir des séries disponibles, il est possible de construire et analyser différents indicateurs selon les phénomènes que l'on veut caractériser : valeurs moyennes, extrêmes, etc.. Le choix de ces indicateurs est très important et conditionne grandement l'intérêt de l'analyse (voir par exemple Renard et al., 2006 pour un exemple sur les extrêmes dans les séries de débits).

Dans notre étude, plutôt exploratoire, nous avons retenu quelques indicateurs fréquemment analysés dans la littérature.

- Pour les débits, nous avons considéré le débit moyen annuel. Pour les hautes eaux, l'analyse a porté sur le maximum annuel, le débit sub-seuil avec un échantillonnage à deux crues par an et différentes durées d'analyse de 0 à 36h (voir Figure 4 pour la définition), la durée caractéristique de crue étant de 12h environ pour la station de Craponne. Pour les basses eaux, nous avons retenu l'indice BFI qui est le rapport entre la moyenne des débits de base et le débit moyen annuel. Le débit de base a été estimé à l'aide de l'algorithme de Tallaksen et Van Lanen (2004).
- Pour la pluviométrie, nous avons étudié la pluie annuelle et le maximum annuel des pluies cumulées sur 1, 3, 5, 10, 15 jours calculées sur la série de pluies journalières de Bron.
- Pour les variables météorologiques, nous avons analysé la température et l'ETP moyenne annuelle issues de la base de données SAFRAN.

d) Résultats

L'ensemble des résultats obtenus est synthétisé dans le Tableau 1. Nous commentons ici les résultats les plus significatifs.

- Sur les séries de débits à Craponne, les évolutions significatives détectées sont une tendance à la hausse des débits sub-seuils pour les durées de crue sur 3h, 6h, 12h (Figure 5b), mais pas sur les débits de pointe ni les durées 1h30 ou 36h. Sur le BFI, une tendance significative à la baisse est observée (Figure 5a).
- Sur les pluies, le test de tendance de Mann Kendall appliqué à la période 1920-2010 montre une augmentation significative au seuil 5% des valeurs du maximum annuel des pluies cumulées sur 5, 10, 15 jours avec une rupture détectée vers 1974 par le test de Pettitt. Ces mêmes tests, appliqués sur la période 1970-2010, ne révèlent aucune tendance/rupture significative (Tableau 1)
- L'analyse des données climatiques issues de la base SAFRAN sur la période 1970-2009 montre une tendance significative à la hausse des températures de 0.52°C tous les dix ans (Figure 6). Il n'y a pas en revanche de tendance significative à la hausse de l'ETP annuelle, mais une rupture significative à la hausse en 2002 qui restera à confirmer dans le futur (Figure 7).

Sur la période 1970-2010, il est donc peu probable que l'augmentation du nombre de crues puisse correspondre à une modification du régime des précipitations ou du climat sur cette même période. Pour les débits faibles, Breil et al. (2010) ont montré que le réseau d'assainissement peut collecter une part importante des eaux de nappe (eaux parasites). Ceci pourrait être une explication à la baisse de la contribution des nappes d'accompagnement à l'écoulement de base, mais ceci doit encore être approfondi.

Tableau 1 : Résultats des tests statistiques sur les indicateurs analysés sur le bassin de l'Yzeron. On fournit, dans la première ligne, la valeur p du test de Mann-Kendall et on indique entre parenthèses le sens de la tendance (+ si hausse, - si diminution) si elle est significative. La seconde ligne contient le p du test de Pettitt et la date probable de rupture entre parenthèses si elle est significative. Après le p, on indique les résultats significatifs au seuil 10% (*), 5% () et 1% (***)**

Débits	p	Pluie 1920-2009	p -période 1921-2009	p-Période 1970-2009
BFI	0.03 ** (-)	Pluie annuelle	0.88	1.24
	0.07 * (1981)		1.05	0.88
Débit max annuel	0.27	Max annuel pluie journalière	0.96	0.33
	0.66		0.40	0.21
POT instantané	0.35	Max annuel pluies cumulées sur 3 jours	0.12	0.30
	1.05		0.20	0.73
POT d=1h30	0.82	Max annuel pluies cumulées sur 5 jours	0.02 ** (+)	0.30
	1.17		0.04 ** (1974)	0.58
POT d=3h	0.08 * (+)	Max annuel pluies cumulées sur 10 jours	0.05 *	0.12
	0.16		0.08 * (1984)	0.31
POT d=6h	0.07 * (+)	Max annuel pluies cumulées sur 15 jours	0.03 **	0.16
	0.15		0.07 ** (1974)	0.38
POT d=12h	0.03 ** (+)	Météorologie	p	
	0.05 * (1982)	Température moyenne annuelle	<0.01 *** (+)	
POT d=36h	0.16		<0.01 *** (1987)	
	0.30	ETP annuelle	0.13	
			0.03 ** (2002)	

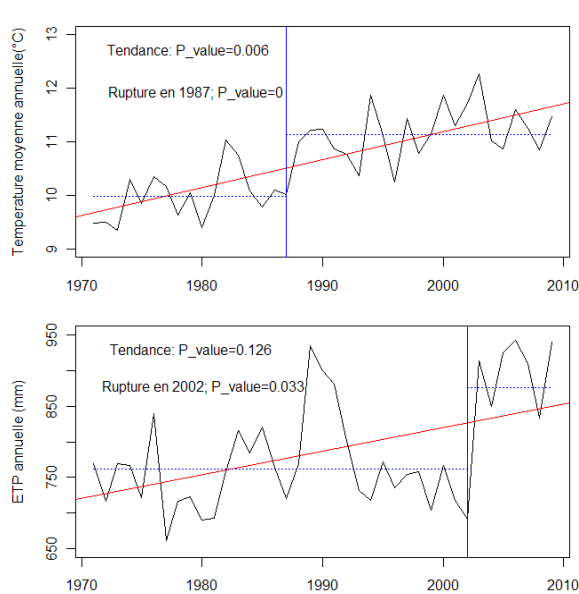


Figure 6 : (a) Température moyenne annuelle issue de la base SAFRAN. (b) ETP moyenne annuelle calculée avec la base de données SAFRAN

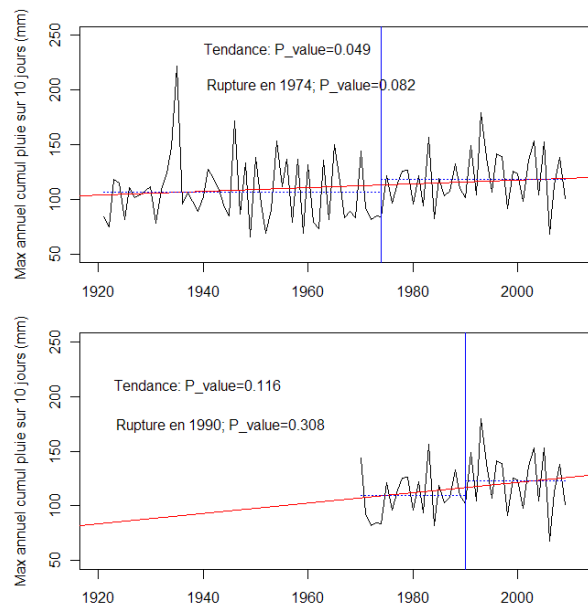


Figure 7 : Maximum annuel de la pluie cumulée sur 10 jours (a) sur la période 1921-2009 (b) sur la période 1970-2009 à la station de Bron (69)

■ Cadre d'utilisation et développement futur

Les tests statistiques présentés dans cette fiche s'appliquent sur des séries préalablement critiquées et/ou homogénéisées (c'est-à-dire corrigées de tout biais liés à des modifications de localisation, des changements de matériels, etc.). Ils ne permettent d'obtenir des résultats significatifs que sur des séries suffisamment longues (de trente à quarante ans minimum pour des données annuelles par exemple). De plus, si on s'intéresse aux extrêmes, il reste encore difficile de trouver des tendances significatives car la durée des séries n'est pas suffisante pour obtenir des résultats robustes. En cas de détection de ruptures/tendances, notamment sur les séries de débits, il est recommandé de prendre contact avec les gestionnaires des stations pour éliminer toute cause d'évolution dues à des problèmes liés à la gestion de la station (déplacements, travaux, modification de la courbe de tarage, etc.). Renard (2006) a ainsi montré que, sur les données de débits issues de la Banque Hydro (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>) analysées, près de 50% des tendances/ruptures détectées en première analyse sur les hautes eaux avaient des causes de cette nature. Les tests statistiques peuvent donc également être utiles à la critique des données en aidant à identifier les modifications sur le fonctionnement des stations hydrométriques.

Il est préférable de travailler sur des séries sans auto-corrélation temporelle, même si, pour le test de Mann-Kendall, il existe des adaptations du test permettant de la prendre en compte (Renard et al., 2006).

Par ailleurs, nous n'avons présenté ici que la version la plus simple de ces tests. Des travaux récents ont permis de développer des tests alternatifs, par exemple pour étudier conjointement les séries issues de plusieurs stations (Renard, 2006, Renard et al., 2006a)

Les tests statistiques présentés dans cette fiche peuvent être mobilisés dans le cadre d'études liées à l'impact du changement climatique sur les extrêmes ou la ressources en eau. Nous avons déjà mentionné qu'ils peuvent aussi être utiles aux gestionnaires de stations de mesures pour établir un diagnostic sur la qualité de leurs données. Enfin, nous avons souligné que ces tests ne permettent que d'établir un diagnostic. D'autres méthodes d'analyse doivent être mobilisées si on veut attribuer des causes aux tendances/ruptures détectées.

■ Développement futur

Les analyses présentées dans cette fiche pourront être réactualisées lorsqu'on disposera d'années de mesures supplémentaires, notamment pour les séries de pluie, ce qui nous permettra de faire une analyse directement avec les données du bassin de l'Yzeron.

Les analyses de tendance présentées sont complétées par des travaux, menés dans le cadre du projet de recherche AVuPUR (<http://avupur.hydrowide.com/>), pour identifier la part liée à l'urbanisation dans les séries de débits. On s'appuie sur des méthodes de filtrage, permettant d'isoler la composante urbaine rapide, pour essayer de reconstituer une série de débits « naturels ». La comparaison des régimes entre les deux séries, mesurées et naturelles reconstituées permet d'identifier l'incidence de l'urbanisation sur le régime hydrologique (Braud et al., 2011) ou la géomorphologie de la rivière et le transport de sédiments (Grosprêtre et al., 2011)

■ Remerciements

Les travaux présentés dans cette fiche ont été partiellement financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) via le contrat n° ANR-07-VULN-01. Le bassin de l'Yzeron est un site de l'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine. Le Grand Lyon, le SAGYRC, Météo-France, la DREAL Rhône-Alpes nous ont fourni une partie des données nécessaires à cette étude. Nous remercions Benjamin Renard et Clotilde Catalogne (Cemagref Lyon, UR Hydrologie-Hydraulique) pour leur aide dans l'utilisation des tests statistiques et pour avoir mis leurs outils à notre disposition. L'encart n°1 et la Figure 3 sont inspirés de documents fournis par Eric Sauquet (Cemagref Lyon, UR Hydrologie-Hydraulique).

■ Quelques documents publiés sur le thème

- Braud, I., Breil, P., et al. 2011. Impact of urbanization on the hydrological regime of periurban rivers. What can we learn from data analysis?, en preparation pour le numéro special Journal of Hydrology "Hydrology of periurban catchments: processes and modelling"
- Breil, P., Radojevic, B., Chocat, B., 2010. Urban development and extreme flow regimes changes, Proceedings of the 6th Friend Conference "Global change: facing risks and threats to water resources", 25-29 October 2010, Fez, Morocco, IAHS Public., 340, 314-319
- FAO, 1998. Crop Evaporation - Guidelines for computing crop water requirements. 56, FAO, Rome.
- Grosprêtre, L., Schmitt, L., Breil, P., Dodane, C., Chocat, B., Michel, K., Joliveau, T., Branger, F., Piegay, H., Barra, A., Honegger, A., Jacqueminet, C., Kermadi, S., 2011. Prediction of headwater stream channel incisions caused by hydrological changes due to urbanization by 2030 in the Yzeron basin (City of Lyon), Rhône valley, France, en preparation pour le numéro special Journal of Hydrology "Hydrology of periurban catchments: processes and modelling"
- Kermadi, S., Renard, F., Braud, I., Jacqueminet, C., Michel, K., Branger, F., 2011a. Occupation du sol et pluviométrie dans un bassin versant péri-urbain soumis aux inondations : Yzeron (Ouest Lyonnais), 14 pp, soumis à la revue Climatologie
- Kermadi, S., Braud, I., Jacqueminet, C., Michel, K., Branger, F., 2011b. Evolution de la pluviométrie dans le bassin péri-urbain de l'Yzeron (Ouest Lyonnais) depuis les années 1970 et caractérisation de l'imperméabilisation, XXIVème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, 6-11 Septembre 2011, Rovereto (Italie), 6 pp.
- Mann. H. B , Whitney.D. R., 1947. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. Ann. Math. Statist, 18(1), pp.50-60.
- Pettitt, A.N., 1979. A non parametric approach to the change point problem, Applied Statistics, 28, 126-135.
- Quintana-Segui, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., Morel, S., 2008. Analysis of near-surface atmospheric variables: validation of the SAFRAN analysis over France. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 47: 92-107 ;
- R Development Core Team, (2004) R: a language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing. Vienna, Austria. <http://www.r-project.org/>. Consulted on 2011/04/21.
- Renard B.,2006. Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France, Thèse de Doctorate de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 364 pp.
- Renard, B., Lang, M., Bois, P., 2006a. Statistical analysis of extreme events in a non-stationary context via a Bayesian framework: case study with peak-over-threshold data. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 21(2): 97-112.
- Renard, B., Lang, M., Bois, P., Dupeyrat, A., Mestre, O., Niel, H., Gailhard, J., Laurent, C., Neppel, L., Sauquet, E., 2006b. Evolution des extrêmes hydrométriques en France à partir de données observées. La Houille Blanche - Revue Internationale de l'eau, 6: 48-54.
- Sauquet, E., Ribatet, M., 2004. Caractérisation du régime des hautes eaux en débit-durée-fréquence. Application en région Rhône-Alpes, Cemagref, Lyon.
- Tallaksen. L.M, et Van Lanen. H.A.J, 2004. Hydrological drought : processes and estimation methods for streamflow and groundwater. Developments in water science 48 Elsevier, Amsterdam, the Netherlands, 579p.
- Vidal, J.P., Martin, E., Franchisteguy, L., Baillon, M., Soubeyroux, J.M., 2010. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the SAFRAN system International Journal of Climatology: in press, DOI: 10.1002/ioc2003.
- Yue. S et Wang.C.Y, 2004. The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. Water Resources Management Journal, 18: 201-218

Méthodes de cartographie de l'occupation du sol et de son évolution pour le suivi des phénomènes hydrologiques de bassins versants périurbains

Résumé :

L'occupation du sol joue un rôle essentiel sur le fonctionnement hydrologique d'un bassin-versant, a fortiori lorsque ce bassin connaît une périurbanisation croissante. A l'aide d'images aériennes et satellites à très haute résolution, plusieurs méthodes de cartographie de l'occupation du sol sont proposées. Un bilan des informations extraites et des procédures de réalisation, automatisées ou pas, est dressé. Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet ANR AVuPUR conduit par le Cemagref de Lyon.

■ Cadre Général et problématique :

Problématique : Les bassins péri-urbains subissent une pression de plus en plus forte face à l'urbanisation : augmentation des surfaces imperméabilisées, modifications du cheminement de l'eau, changements des usages de l'eau, modifications des superficies consacrées à la forêt et à l'activité agricole, etc.

L'analyse de l'influence des mutations de l'occupation du sol sur le régime hydrologique d'un bassin péri-urbain devient alors essentielle.

La progression des surfaces urbanisées se traduit globalement par une imperméabilisation des surfaces et par une artificialisation des chemins de l'eau. Dans le détail, l'intensité de ces modifications dépend des formes d'urbanisation développées (habitat dense, zone d'activités ou habitat pavillonnaire diffus).

Dans les espaces non bâtis, les écoulements de surface sont tributaires notamment de la présence et de la nature de la végétation : végétation arborée ou herbacée et de sa pérennité en lien avec les pratiques agricoles (cultures permanentes et/ou annuelles).

Définition : La cartographie des paysages à l'aide d'images aériennes et satellites permet d'extraire deux grands types d'information : l'occupation des sols (land cover) qui renseigne sur les caractéristiques biophysiques des surfaces (végétation, eau, bâti...) – et – l'utilisation des sols (land use) définie par la fonction que l'homme attribue à chaque portion de territoire (résidentielle, industrielle, agricole...). Les bases de données « occupation du sol » de type Corine Land Cover, associent fréquemment ces deux types d'informations dans une nomenclature unique.

■ Objectifs :

L'utilisation d'images aériennes et satellites à très haute résolution, a pour objectif de fournir une information permettant de comprendre, à grande échelle (parcelle cadastrale), l'impact des différents éléments du paysage sur les écoulements d'eau. Plusieurs caractéristiques des surfaces peuvent être étudiées à partir de l'occupation du sol : leur hétérogénéité spatiale qui influent sur le cheminement de l'eau, leur capacité d'infiltration (occupations du sol perméables et imperméables), la nature des végétaux qui détermine l'évapotranspiration. Par ailleurs, l'information sur l'utilisation des surfaces permet d'appréhender l'impact des usages du sol (résidentiel, agricole...) et leur évolution sur le fonctionnement hydrologique du bassin.

Les développements méthodologiques réalisés répondent à deux objectifs :

- Analyser les potentialités des images à très haute résolution pour fournir une cartographie actuelle de l'occupation et de l'utilisation du sol
- Réaliser le suivi multi-temporel de l'occupation / utilisation du sol en comparant deux méthodes différentes, l'une basée sur l'imagerie satellite et la seconde sur les photographies aériennes.

■ Contacts :

Christine Jacqueminet, Université de Lyon – UMR 5600 Environnement Ville Société - Université Jean Monnet, 6, rue basse des rives, 42 023 Saint-Etienne cedex - christine.jacqueminet@univ-st-etienne.fr

Saïda Kermadi, Université de Lyon – UMR 5600 Environnement Ville Société - Université Lyon 2, 5, Av. Mendès-France 69676 Bron cedex - saida.kermadi@univ-lyon2.fr

Kristell Michel, Plateforme ISIG (Imagerie et Systèmes d'Information Géographique) de l'UMR 5600 Environnement Ville Société – Université de Lyon – ENS de Lyon, site Descartes - 15, Parvis René Descartes, BP 7000, 69342 Lyon Cedex 07 – kristell.michel@ens-lyon.fr

Bernard Chocat, LGCIE / Bat Coulomb, INSA LYON, 69621 Villeurbanne cedex - bernard.chocat@insa-lyon.fr

■ Les méthodes de cartographie

TERRAIN D'ETUDE ET DONNEES

L'étude s'appuie sur le cas du bassin versant de l'Yzeron (148 km²), site expérimental de l'OTHU situé en périphérie immédiate de Lyon. Depuis quelques décennies, on observe une augmentation des pics de fréquence des crues et des inondations à l'aval du BV. Ce bassin connaît également un processus de périurbanisation important depuis les années 1970 (constat issu de l'analyse diachronique des photographies aériennes).

L'occupation du sol actuelle est cartographiée à l'aide de trois images THR (très haute résolution) : images aériennes issues de la BD-Ortho@IGN du 5/05/2008 (0.50 m de résolution et longueurs d'onde du visible), image satellite QuickBird du 29/08/2008 (2.44 m, visible et proche-infrarouge) et image satellite Spot 5 du 22/09/2008 (2.50 m, visible et proche-infrarouge).

Deux cartographies multi-temporelles sont réalisées à l'aide a) des images du satellite Spot enregistrées en 1990, 1999 et 2008 - et - b) des photographies aériennes IGN orthorectifiées de 1970, 1990 et 2008.

METHODE 1 : La cartographie de l'occupation du sol

Cette cartographie a été conduite sur chaque image THR de 2008. Le format numérique des images et l'information spectrale de base directement liée aux propriétés physiques des surfaces (couleurs, géométrie, activité chlorophyllienne), permettent l'extraction de la donnée « occupation du sol » à l'aide de méthodes automatisées. Plusieurs méthodes de traitement d'images (calcul d'indices, classifications, segmentations) ont été développées.

La confrontation des résultats montre que, plus le nombre de bandes spectrales disponible est élevé, plus la discrimination des objets est aisée. Ainsi, la bande du proche infrarouge est indispensable pour différencier des types de végétation (conifères, feuillus) et évaluer leur développement phénologique à travers l'activité chlorophyllienne. La résolution plus grossière des images satellites, restitue les objets urbains (bâti, routes - parkings) plus ou moins agrégés, selon le traitement d'image employé. La résolution à 0.50 m de la BDOrtho@IGN permet d'extraire ces objets de manière individualisée (figure 1). Ces nuances de restitution des surfaces liées à la résolution du capteur impactent les évaluations de superficies par types d'occupation du sol (figure 2).

METHODE 2 : La cartographie de l'utilisation du sol

La reconnaissance des usages du sol est difficilement automatisable. Elle est réalisée par digitalisation manuelle à partir de la BD-Ortho@IGN. Ce travail par photo-interprétation, coûteux en temps de réalisation, présente une forte subjectivité, liée au photo-interprète en premier lieu, mais également aux choix des typologies prédéfinies. De nombreuses bases de données « occupation du sol » sont réalisées en partie ou totalement selon cette méthode (Corine Land Cover (CLC), Spot thema...). Leur typologie peut se révéler incomplète à propos des usages des surfaces artificialisées (la nomenclature CLC distingue le tissu urbain continu et le tissu urbain discontinu selon un critère de densité des surfaces artificialisées. Leur usage (résidentiel, industriel...) n'est pas renseigné). Il peut alors s'avérer nécessaire de retravailler ce type de données en fonction des éléments que l'on souhaite identifier, délimiter et caractériser pour les besoins de l'application.

METHODE 3 : Le suivi multi-temporel de l'occupation/utilisation du sol

La cartographie multitemporelle de l'occupation du sol à partir d'images satellites numériques et multibandes, est réalisée à partir de méthodes automatisées. Cependant, il importe de prendre en compte les changements de résolution spatiale des images enregistrées à des dates différentes. Une résolution grossière entraîne des confusions entre types de surface dans les espaces hétérogènes (espaces bâtis) et une délimitation moins précise des objets. Les surfaces réfléchissantes (surfaces minérales, toitures...) apparaissent surestimées par rapport aux surfaces sombres, ce qui biaise les comparaisons chiffrées de date à date. Pour établir une comparaison, il est nécessaire de rééchantillonner les images à une même résolution.

La cartographie multitemporelle de l'utilisation du sol à partir des couvertures aériennes, s'appuie sur une digitalisation rétrospective de la couverture aérienne la plus récente à la couverture la plus ancienne. A chaque date, seuls les polygones ayant changé de caractère, sont modifiés. La qualité des clichés analogiques anciens et celle du géoréférencement entre les diverses couvertures, sont cruciales. Pour réaliser le suivi, la typologie définie à partir d'une couverture aérienne récente en couleurs doit être adaptée ou réduite à cause de la moins bonne lisibilité des clichés anciens en noir et blanc.

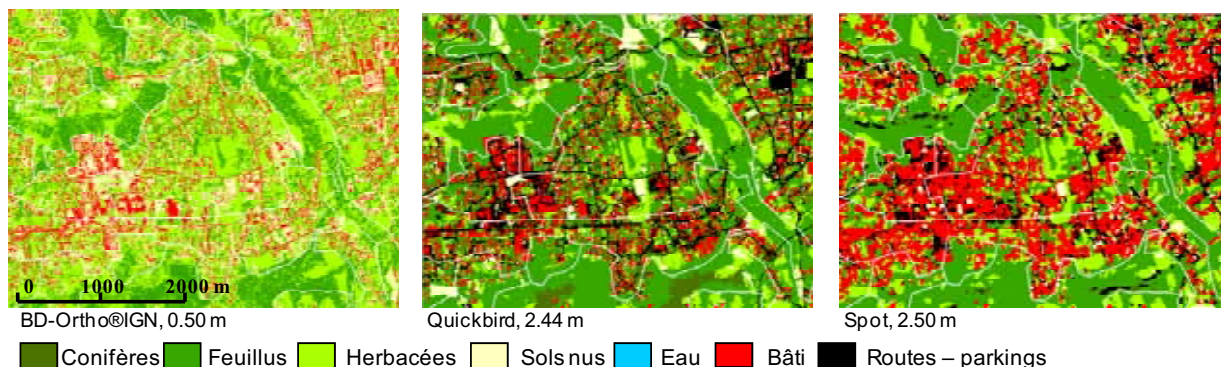


Figure 1 : Cartographies de l'occupation du sol à l'aide de la BD-Ortho@IGN du 5/05/2008, de l'image satellite Quickbird du 29/08/2008 et de l'image satellite Spot du 22/09/2008 (secteur de Francheville dans le bassin versant de l'Yzeron)

■ Les avancées de l'OTHU : Principaux résultats

Les cartes d'occupation/utilisation du sol fournissent des indicateurs directement intégrables dans les modèles hydrologiques, permettant d'étudier l'impact de la nature de l'occupation du sol et de ses changements sur les écoulements d'eau.

Un premier résultat consiste dans l'apport d'une connaissance spatialisée de la distribution des différents types d'occupation/utilisation du sol. Il est possible de partitionner l'espace selon une occupation du sol dominante : forestière, agricole, urbaine et de mesurer les superficies occupées par chaque type.

A chaque type d'occupation du sol, peut être attribué un caractère perméable ou imperméable. L'analyse spatialisée de la proportion de surfaces perméables et imperméables met en évidence sur le bassin les variations spatiales du taux d'imperméabilisation. La figure 3 illustre le calcul du pourcentage de surfaces imperméabilisées (bâti, routes) par sous bassin versant.

Les propriétés de perméabilité des surfaces artificialisées sont caractérisées selon leur nature en croisant l'information « Occupation du sol », qui renseigne sur la perméabilité des surfaces, et l'information « Utilisation du sol », qui recense les formes d'habitat, d'activités et les équipements (figure 4).

L'analyse de l'évolution multitemporelle (figure 5) a été conduite à partir des deux méthodes exposées ci-dessus. La différence de résolution des images de base (Spot à 10 m ; photographies aériennes à 0.50 m) et de nomenclature ne produit pas les mêmes évaluations chiffrées sur l'évolution des types de surfaces. Cette différence est particulièrement sensible dans le milieu urbain où la donnée « Occupation du sol » décrit les objets (bâtiments, parkings et routes) et la donnée « Utilisation du sol », les unités urbaines (habitat dense, habitat pavillonnaire...) (tableau 1). L'appréciation de ces évaluations nécessite d'être attentif aux nomenclatures, aux images de base et aux méthodes de cartographie employées.

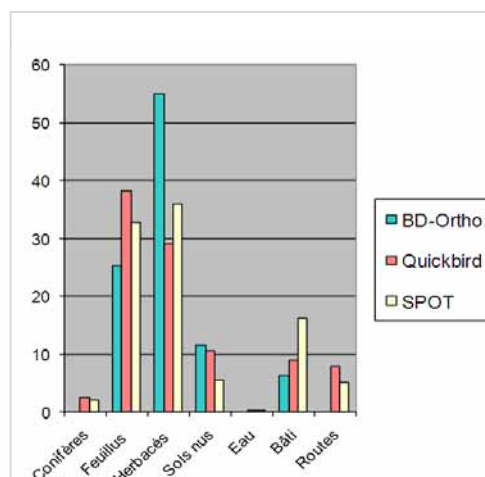
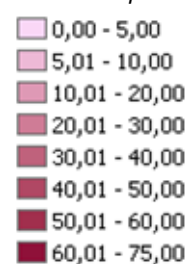


Figure 2 : Pourcentages des types d'occupation du sol du BV de l'Yzeron calculés à partir des cartes extraites de la BD-Ortho@IGN, de l'image satellite Quickbird et de l'image satellite Spot

Valeurs en pourcentage



0 5 km

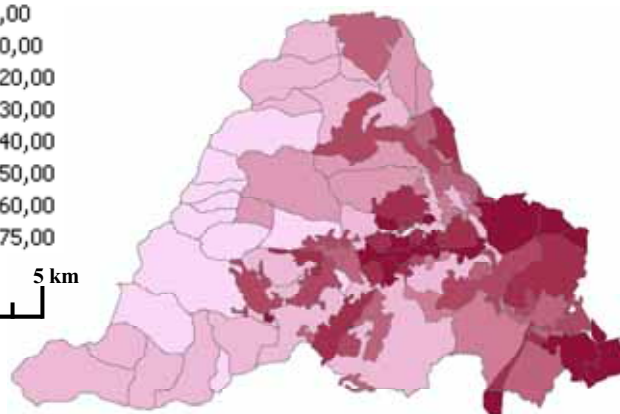


Figure 3 : Carte des pourcentages de surfaces imperméabilisées par sous bassins versants calculés à partir de l'image satellite Spot

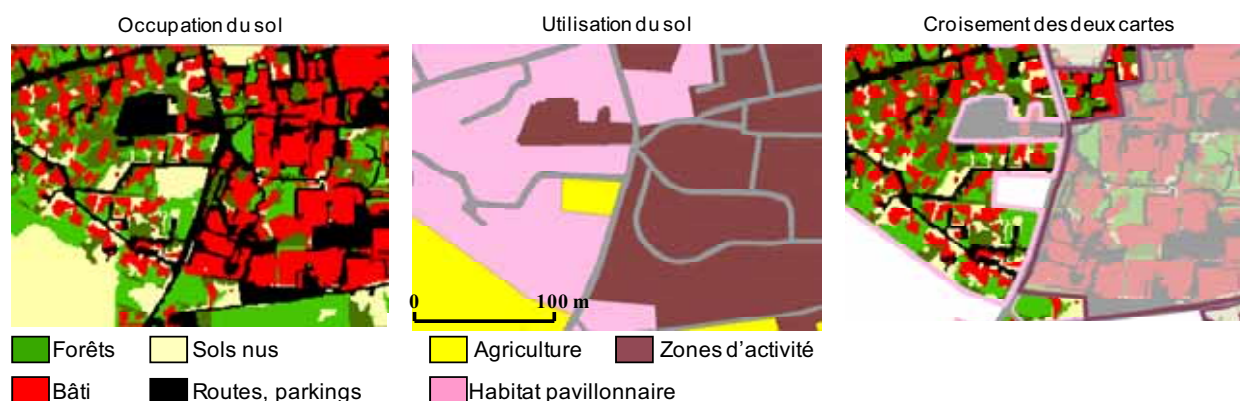


Figure 4 : Répartition des surfaces imperméables (bâti, voirie) dans deux types de surfaces artificialisées (habitat pavillonnaire, zone d'activité) : croisement de la carte de l'occupation du sol extraite de l'image satellite Quickbird et de la carte de l'utilisation du sol (commune de Marcy l'Etoile)

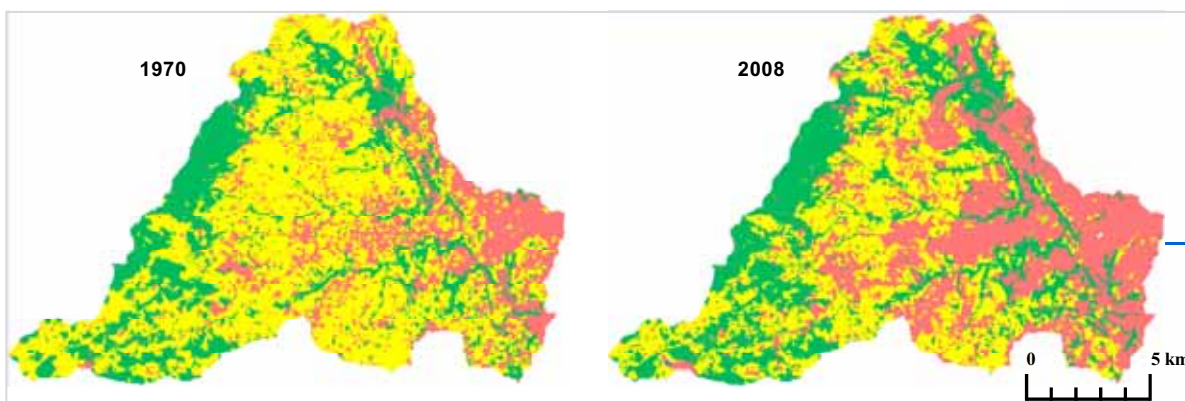


Figure 5: Cartographie de l'utilisation du sol en 1970 et 2008 à l'aide de photographies aériennes IGN (en vert: forêt - en jaune: terres agricoles - en rose: surfaces artificialisées)

Utilisations du sol (cartographie manuelle sur photographies aériennes) en pourcentages				Occupations du sol (cartographie automatisée sur images satellites Spot) en pourcentages			
	1970	1990	2008		1990	1999	2008
Forêt, bois	22.38	25.18	26.67	Végétation arborée	24.3	23.9	35
Parcelles agricoles en végétation ou en labour	56.21	41.8	36.58	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
Surfaces artificialisées (zones d'habitat, d'équipements et d'activités)	21.37	32.85	36.58	Bâti, routes et parkings	15.2	18.2	22.6

Tableau 1: Évolutions des superficies des principales utilisations et occupations des sols mesurées à partir de la cartographie manuelle sur photographies aériennes et de la cartographie automatisée à partir des images Spot

■ Cadre d'utilisation

Les méthodes de cartographie développées dans cette étude peuvent être utilisées pour l'obtention et/ou l'actualisation d'une information spatialisée sur l'occupation du sol. Les méthodes de traitement d'images automatisées sont reproductibles sur de larges superficies. Par rapport aux bases de données existantes, cette étude comporte l'avantage de fournir une information en adéquation avec les besoins d'une application ciblée. L'utilisation du cadastre numérique permettant de repérer facilement les surfaces bâties constitue également une aide appréciable pour compléter les traitements présentés sur cette fiche.

Les cartes multi-temporelles peuvent alimenter des réflexions sur le devenir d'un bassin versant, à propos de thématiques telles que l'évolution de l'urbanisation, la progression de l'imperméabilisation des surfaces, les modifications des pratiques agricoles... Ces cartes peuvent servir de support à l'élaboration de scénarios d'évolution (cf fiche technique OTHU n°25).

■ Développements futurs

Le pourcentage de surface imperméable constitue une donnée essentielle aux gestionnaires pour évaluer les débits produits par les bassins versants péri-urbains. Beaucoup d'opérateurs ont ainsi établi des relations simples entre le coefficient de ruissellement et le pourcentage de surface imperméable. La cartographie automatique constitue donc une aide puissante à la modélisation hydrologique.

Cependant, depuis plusieurs années une évolution importante de la gestion des eaux pluviales urbaines se développe. Les techniques alternatives visant à remplacer l'évacuation rapide des eaux par du stockage et / ou de l'infiltration sont de plus en plus souvent mises en œuvre. Les coefficients de ruissellement ne sont plus aussi simplement reliés aux pourcentages de surface imperméable. Cette évolution impose aujourd'hui de compléter les techniques de cartographie automatique par des enquêtes in situ pour connaître le pourcentage de surfaces imperméables effectivement raccordées au réseau et/ou à la rivière.

La mise en place de bases de données recensant les parcelles faisant l'objet de ce type de traitement permettrait de compléter efficacement les traitements présentés dans cette fiche et faciliterait encore plus le travail de modélisation.

■ Quelques documents publiés sur le thème

- GONZALEZ-SOSA E., BRAUD I., DEHOTIN J., LASSABATERE L., ANGULO-JARAMILLO R., LAGOUY M., BRANGER F., JACQUEMINET C., KERMADI S., MICHEL K., 2010. Impact of land use on the hydraulic properties of the topsoil in a small French catchment, *Hydrological Processes*, 24(17), 2382-2399, DOI: 10.1002/hyp.7640.
- BEAL D., GAGNAGE M., JACQUEMINET C., KERMADI S., MICHEL C., JANKOWFSKY S., BRANGER F., BRAUD I., 2009. Cartographie de l'occupation du sol pour la modélisation hydrologique spatialisée du cycle de l'eau en zone péri-urbaine, *Proceedings 2ème atelier SIDE 2009, Systèmes d'Informations et de Décision pour l'Environnement*, Biramonte S., Miralles, A., Pinet, F. (Eds), Toulouse, France, May 26 2009, 23-32. *Proceedings available at* <http://eric.univ-lyon2.fr/~sbimonte/side2009.html>
- KERMADI S., RENARD F., JACQUEMINET C., MICHEL K., 2010. Inondations et occupation du sol dans un bassin versant périurbain : l'Yzeron (Ouest lyonnais), *XXIIIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Rennes, 1-4 septembre 2010, Publications de l'Association Internationale de Climatologie, n°23, Rennes, pp. 313-318
- JACQUEMINET C., KERMADI S., MICHEL C., JANKOWFSKY S., BRAUD I., BRANGER F., BEAL D., GAGNAGE M., 2009. 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.

Méthodes de prospective territoriale pour simuler les évolutions de l'occupation future du sol, appliquées à un bassin versant périurbain



Résumé :

Les démarches de prospective territoriale sont anciennes et bien conceptualisées. Leur application à des problématiques d'aménagement du territoire ou environnementales a été envisagée depuis longtemps. Depuis quelques années, les collectivités locales sont de plus en plus nombreuses à se livrer à des exercices de ce genre. Récemment, la DATAR a contribué à relancer une réflexion d'ensemble sur cette question. Du côté de la recherche, c'est le terme de géoprospective qui tend à émerger. C'est dans ce cadre que s'inscrit la mise en œuvre d'un Atelier de prospective territoriale dans le bassin-versant de l'Yzeron. Cet Atelier a réuni un groupe d'experts thématiques et de l'aménagement du territoire d'une quinzaine de personnes. Il relève d'une démarche de géoprospective, qui consiste à combiner prospective territoriale et simulation spatiale. 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 produits collectivement. 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 pourront être utilisées par les hydrologues afin d'intégrer l'évolution de l'imperméabilisation des sols urbanisés à long terme dans la modélisation des flux d'eau dans un bassin versant périurbain.

■ Cadre Général :

Les bassins versants situés en périphérie des agglomérations sont soumis à une forte pression de l'urbanisation, souvent depuis plusieurs décennies. Le développement des sols imperméabilisés qui en résulte, couplé à des épisodes pluvieux parfois intenses, entraîne des rejets d'eaux de ruissellement polluées et des inondations à l'aval, au cœur de la zone urbaine. Les changements d'occupation du sol ne concernent pas uniquement les espaces agricoles et urbanisés. L'étalement urbain peut aussi engendrer un développement des espaces boisés sur d'anciens terrains agricoles en pente, actuellement non constructibles.

Pour étudier et modéliser l'impact de l'urbanisation et de l'anthropisation passée et future des bassins versants périurbains sur les flux d'eau, il importe de pouvoir apprécier les évolutions de l'occupation du sol à long terme au moyen de simulations spatiales. Pour simuler les évolutions de l'occupation future du sol, il est nécessaire d'améliorer la compréhension et la prise en compte des facteurs à l'origine des changements de l'occupation du sol dans un bassin versant.

La prospective est une manière originale de regarder sur une longue période et avec un horizon différent une situation déterminée. C'est avant tout une attitude de l'esprit qui inverse le changement traditionnel, en partant de futurs possibles ou souhaitables pour revenir au présent. Les tendances passées et présentes sont utilisées comme support à la réflexion et non comme un carcan qui conditionne (ou qui contraint) le futur dans les limites du présent. La prospective constitue un va-et-vient entre le présent et le futur, non pas pour prédire celui-ci mais plutôt pour aider une société à se construire un avenir désiré. Elle a véritablement émergé en France à partir des années 1950.

Cette connaissance est notamment détenue par des experts thématiques (eau, agriculture, forêt, environnement, urbanisme, planification) et des acteurs qui œuvrent dans ce territoire. Leur mobilisation en Atelier de prospective territoriale rend possible l'élaboration collective de scénarios d'évolution de l'occupation du sol à horizon 2030 qui viendront alimenter les simulations spatiales réalisées.

■ Objectifs :

L'objectif est de réfléchir sur les évolutions possibles de l'occupation du sol du bassin versant dans le futur, en réfléchissant sur les évolutions passées et les facteurs de maintien ou de changement de dynamique dans l'avenir. La production de scénarios d'évolution de l'occupation du sol future et le paramétrage de simulations spatiales de l'occupation du sol à long terme permettent d'enrichir la connaissance générale du système territorial. Une fois l'accord obtenu dans l'Atelier sur une panoplie de scénarios pertinents, ces derniers peuvent être utiles à la fois aux hydrologues et aux acteurs du territoire, pour mettre à l'épreuve leurs outils d'anticipation. Les cartes d'usages du sol en 2030 permettent ainsi de calculer un pourcentage d'imperméabilisation des sols à l'échelle des sous-bassins versants, intégrant donc de possibles changements d'occupation du sol et leurs impacts sur les flux d'eau (incision des cours d'eau, risque inondation, etc.). En mobilisant les connaissances des experts thématiques et de l'aménagement du territoire, l'objectif est aussi de pouvoir disposer à terme d'un outil d'aide à la décision qui permette de débattre de l'efficacité des outils de la planification territoriale.

■ Contacts :

Thierry Joliveau, ⁽¹⁾ Université de Lyon, UMR 5600 Environnement, Ville, Société, 18 rue Chevreuil, 69362 LYON Cedex 07, France. Tél : 04.77.42.19.25., Fax : 04.77.42.19.24. E-mail : thierry.joliveau@univ-st-etienne.fr

Clément Dodane ⁽¹⁾ E-mail : clement.dodane@ens-lyon.fr - Anne Honegger ⁽¹⁾ E-mail : honegger@club-internet.fr.

■ Les avancées de l'OTHU : Principaux résultats

Dans le cadre d'un Atelier de prospective territoriale, une analyse collective des problèmes actuels, des tendances et des facteurs de changement de l'occupation du sol a été construite. À partir de ces matériaux, des scénarios d'évolution de l'occupation du sol à long terme dans un bassin versant périurbain ont été élaborés. Les scénarios produits s'appuient sur des travaux conduits en Atelier, réunissant un groupe d'experts thématiques et de l'aménagement du territoire. Les simulations des évolutions de l'occupation du sol future intègrent les différents scénarios élaborés avec les acteurs du territoire. Les résultats obtenus sont des cartes des usages du sol en 2030. Ces cartes peuvent être utilisées par les hydrologues afin d'intégrer l'évolution de l'imperméabilisation des sols urbanisés à l'échelle d'un bassin versant.

Terrain d'étude

L'étude, réalisée dans le cadre du projet de recherche ANR AVuPUR (étude de la vulnérabilité des rivières périurbaines), s'applique au bassin versant de l'Yzeron (150 km²), situé dans l'ouest de l'agglomération lyonnaise. Il s'étend sur plus de 20 communes, des Monts du Lyonnais à l'est jusqu'au Rhône à l'ouest, aux portes de l'hypercentre de l'agglomération lyonnaise. Ce bassin versant est soumis à une forte augmentation de l'urbanisation depuis les années 1970. Ce constat est issu de l'analyse diachronique des évolutions des espaces urbanisés cartographiés à partir des photographies aériennes de l'IGN en 1945, 1970, 1990 et 2008. Entre 1990 et 2008, un peu plus de 4% de la surface du bassin versant de l'Yzeron a été urbanisée, soit un accroissement de près de 12%. Depuis 2002, un contrat de rivière a été mis en place. Il est porté par le Syndicat d'Aménagement et de Gestion de l'Yzeron, du Ratier et du Charbonnières. La partie Est du bassin est intégrée au Grand Lyon et relève du Schéma de cohérence territoriale de l'agglomération lyonnaise tandis que la partie ouest, plus rurale, relève d'un autre Scot, celui du Syndicat de l'Ouest Lyonnais. La zone est soumise à un mouvement d'urbanisation très important. Elle est aussi le théâtre de grands projets d'infrastructures autoroutières (A89, A45, Contournement Ouest de Lyon, Tronçon Ouest du Périphérique) qui en font un lieu d'enjeux forts pour l'aménagement du territoire, au côté de la limitation de l'étalement urbain et du maintien d'une agriculture viable.

LE DISPOSITIF : combiner prospective territoriale et simulation spatiale

a) L'Atelier de prospective territoriale

L'Atelier de prospective territoriale a réuni une quinzaine d'experts issus du corps technique des différentes collectivités territoriales et des organismes ayant en charge la gestion des principales composantes du territoire : eau, agriculture, forêt environnement, urbanisme et aménagement du territoire (SAGYRC, CCVL, ACCOLADE, SOL, Grand Lyon, DDT, Agence d'urbanisme, Chambre d'agriculture, Fédération de chasse, SAFER, CRPF, FRAPNA)¹. Il s'est déroulé en mai et juin 2010 (3 matinées) à Grézieu-la-Varenne.

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. Ces cartes permettent d'insister sur l'importance de l'étalement urbain au cours de la période (près de 600 hectares urbanisés).

Au moyen d'un système simple de schéma heuristique vidéoprojeté, l'équipe a animé les échanges entre experts afin de déterminer les thématiques importantes à aborder, les problématiques prioritaires liées à ces thématiques et les facteurs explicatifs des changements de l'occupation du sol à prendre en compte. Il a ainsi été possible d'élaborer par discussion collective une arborescence décrivant les principales questions liées à la configuration future du territoire, en brossant les différentes thématiques : forêt, agriculture, risque, environnement, habitat, transports, activités économiques, etc. (Fig. 1) Ce travail de diagnostic collaboratif très fouillé a produit un document qualitatif de type prospectif rassemblant les différents points de vue du collectif. Il a permis à l'équipe de collecter et d'organiser les données nécessaires à la représentation de différentes thématiques. Il a aussi permis 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 a servi 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 (séance 1) (Fig. 2).

La troisième séance a été consacrée à la présentation et à la discussion de simulations spatiales informatisées produites entre temps par l'équipe de recherche. À l'issue de l'Atelier, une enquête auprès des participants a permis d'avoir à la fois une idée de leur satisfaction par rapport au travail réalisé collectivement et leur perception de ces outils en tant que planificateurs.

Selon les participants à la démarche de géoprospective, elle apparaît comme « une émulsion collective » à même de faire émerger « un regard enrichi du bassin versant de l'Yzeron ».

Des questions méthodologiques restent en suspens :

- quelle est l'échelle optimale pour utiliser la méthode ?
- comment traduire la complexité d'un système territorial en variables cartographiques ?
- comment améliorer la gouvernance des données ?

Même si les méthodes doivent être améliorées, la simulation spatiale est un outil qui « permet de visualiser de façon simple l'interactivité d'enjeux territoriaux ».

Les participants expriment leur envie d'aller plus loin dans l'utilisation de la démarche et de l'outil proposés pour « aider les élus à prendre conscience de l'impact des politiques d'aménagement sur lesquelles ils réfléchissent ».

Enfin, une séance de restitution ouverte, début juillet 2010, a permis de présenter les résultats de l'Atelier à un collectif plus large de techniciens et de chercheurs intéressés, afin de recueillir leurs points de vue sur la démarche initiée et les premiers résultats obtenus.

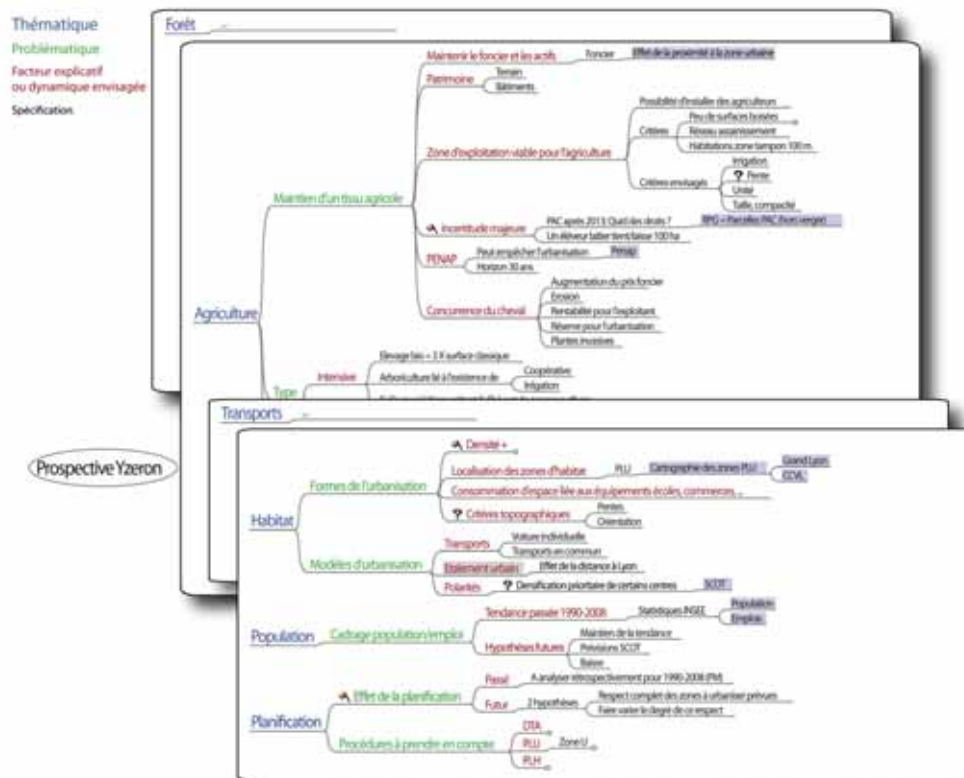


Figure 1 : Un schéma des composantes explicatives pour comprendre les évolutions de l'occupation du sol future (schéma heuristique réalisé avec le logiciel libre Freemind)

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	S1Aa : densification minimale (tendanciel), sans contraintes réglementaires de la planification et sans effet.
		Effet déprise agricole	S1Ac : densification minimale (tendanciel), sans contrainte réglementaire, mais avec effet de déprise agricole.
	Contraintes réglementaires	Sans effet	S1Ba : densification minimale (tendanciel), avec contraintes réglementaires de la planification, mais sans effet.
		Effet polarité	S1Bb : densification minimale (tendanciel), avec contraintes réglementaires de la planification et effet de polarité SCOT.
S2 Ralentissement étalement urbain	Contraintes réglementaires	Sans effet	S2Ba : densification accrue, avec contraintes réglementaires de la planification, mais sans effet de polarité.
S3 Accélération déprise agricole	Pas de contrainte réglementaire	Sans effet	S3Aa : accélération de la déprise agricole (enrichissement), sans contrainte réglementaire et sans effet.

Figure 2 : Des scénarios prospectifs pour piloter des simulations spatiales



Image 1 : Restitution des premiers résultats d'un Atelier alliant prospective territoriale et simulation spatiale (Grézieu-la-Varenne, 8 juillet 2010. © A. Honegger)

[1]: Organismes et collectivités de rattachement des participants à l'Atelier de prospective territoriale « Quelle utilisation du sol dans le bassin versant de l'Yzeron en 2030 ? » : Syndicat d'Aménagement et de Gestion de l'Yzeron, du Ratier et du Charbonnières, Communauté de Communes des Vallons du Lyonnais, Assemblée des Communautés de Communes de l'Ouest Lyonnais pour l'Aménagement et le Développement, Syndicat de l'Ouest Lyonnais, Grand Lyon, Direction Départementale des Territoires du Rhône, Agence d'urbanisme pour le développement de l'agglomération lyonnaise, Chambre d'agriculture du Rhône, Fédération des chasseurs du Rhône, Société d'Aménagement Foncier et d'Établissement Rural, Centre Régional de la Propriété Forestière, Fédération Rhône-Alpes de Protection de la Nature.

b) 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). Il a fallu trouver une manière de rendre compte de la dynamique d'urbanisation d'une grande agglomération française. Pour cela, les évolutions de l'occupation du sol passée entre 1990 et 2008 ont été modélisées à partir de facteurs géographiques. 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 (voir fiche OTHU n° Jacqueminet, Michel et Kermadi).

La première difficulté est de pouvoir construire des modèles des transitions passées statistiquement valides. La construction de chaque modèle passe par la recherche des variables qui peuvent expliquer un type de transition passée de l'occupation du sol. Certains modèles peuvent regrouper plusieurs types de transitions. Par exemple le modèle d'urbanisation peut prendre en compte l'évolution d'un usage du sol agricole ou d'un sol boisé vers un usage du sol urbain. D'autres peuvent s'appliquer à un seul type de transition comme le boisement d'un sol agricole. Ce travail se fait de manière empirique en testant les variables plausibles et leur combinaison jusqu'à obtenir des modèles de qualité satisfaisante. Les principales variables explicatives du modèle de développement de l'urbanisation dans le bassin versant de l'Yzeron entre 1990 et 2008 sont la distance à la zone urbaine la plus proche, les pentes et la distance d'accès à Lyon.

Dans la matrice de transition d'un usage du sol à un autre, les valeurs varient entre 0 et 1 (Fig. 3). Une valeur de 0 indique que la transition n'a aucune chance de se produire. Une valeur de 1, qu'elle est certaine. Sur la diagonale, se trouve ainsi le plus souvent des valeurs fortes, qui traduisent une tendance au maintien en l'état de l'occupation du sol. Les espaces boisés ont 96% de chance de rester boisés et les espaces urbanisés quasiment 100% de chance de le rester (les quelques évolutions possibles correspondent à des variations de détail dans la délimitation des entités aux deux dates). En revanche, on constate que les landes et friches et les vergers et vignes ont une probabilité plus grande de muter.

Figure 3 : Matrice de transition permettant d'établir la probabilité de transition d'une occupation du sol vers une autre (entre 1990 et 2008 dans le bassin versant de l'Yzeron)

	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

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 deux paramètres disponibles dans l'outil cartographique.

Premièrement, la matrice de transition permet de fixer le rythme de chacune des transitions d'occupation du sol. La matrice de transition permet, par exemple, de paramétrer le rythme de croissance de l'espace urbanisé futur et donc de simuler une densification en fonction de l'accroissement de la population et du développement des activités.

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. Dans la simulation, ces zonages permettent de contraindre ou d'inciter chaque modèle de transition à localiser préférentiellement telle ou telle évolution de l'occupation du sol, dans le respect par exemple des documents de planification. Ainsi, 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 (un des outils de planification des Schéma de cohérence territoriale), l'instauration d'une gare ou d'un échangeur routier, l'hypothèse d'un effondrement de l'agriculture traditionnelle dans le territoire lié entre autres à la fragilité des marchés et aux incertitudes réglementaires (réforme de la Politique Agricole Commune).

C'est par l'intermédiaire de variantes sur des scénarios s'appuyant sur un rythme de développement urbain variable, liées à des zonages règlementaires et à des effets à prendre en compte ou non, que les discussions de l'Atelier de prospective territoriale ont été traduites en simulations spatiales à horizon 2030 (Fig. 4).

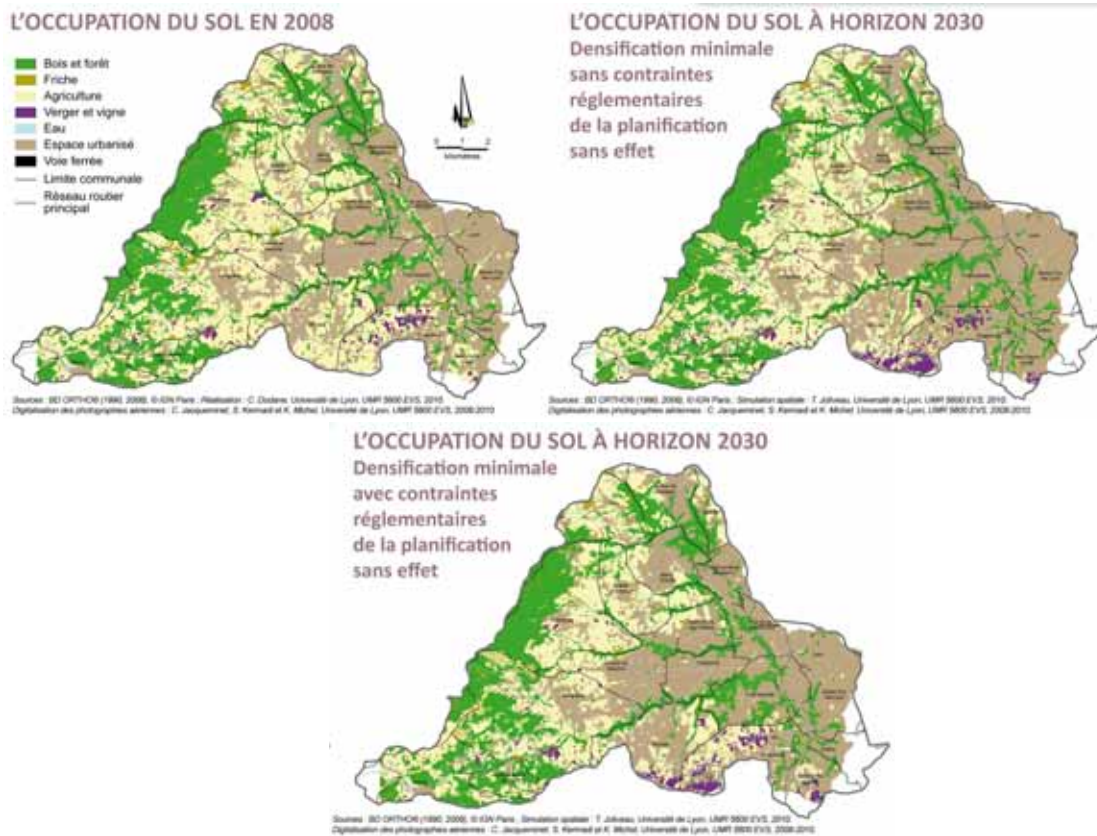


Figure 4 : Des simulations spatiales des usages du sol à horizon 2030 dans le bassin versant de l'Yzeron pour discuter de l'efficacité des outils de planification

Les résultats des simulations spatiales ont été soumis aux experts de la zone afin de collecter leurs avis. Une partie de ce travail a été réalisée durant l'Atelier. Enfin, l'ensemble des résultats cartographiques des simulations spatiales a été mis en accès sur le Web afin de permettre aux participants de l'Atelier de visualiser, de commenter et de s'appropriier les cartes des usages du sol en 2030 grâce à un outil de comparaison des variantes deux à deux, en basculant d'une carte à l'autre. 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 un tel atelier. Il est difficile de répondre à cette question à partir de cette démarche expérimentale, qui avait pour objectif de concevoir la méthodologie de la démarche. Si l'on met de côté 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 peut se dérouler sur 4 à 6 mois. Ce temps intègre à la fois la mise en forme, la vérification et l'exploration du jeu de données par un petit groupe d'experts en charge de l'animation de la démarche, et la réalisation de l'Atelier sous forme de 4 réunions espacées de 15 jours avec le groupe complet d'experts territoriaux.

■ Le cadre d'utilisation

Les résultats obtenus peuvent être utilisés de plusieurs façons :

La base permettant de construire des scénarios ayant été élaborée, elle peut maintenant servir à construire des simulations en fonction des divers intérêts. Il est possible de faire varier les matrices de transition en augmentant par exemple le niveau de densification souhaité à 20 %. On peut tester des changements dans les localisations des zonages de la planification (Périmètres de protection des espaces agricoles et naturels périurbains, zones à urbaniser) et observer les conséquences sur le report de l'urbanisation. On peut aussi bien sûr tester d'autres effets que celui des polarités, par exemple ceux liés aux infrastructures de transport routières ou ferroviaires. On obtient donc un outil qui permet de faire jouer et de jouer avec les outils de la planification en envisageant les conséquences sur le territoire de telle ou telle option.

L'objectif de ces jeux de simulation n'est pas de prédire une situation future mais de stimuler la réflexion sur la planification d'un territoire dynamique. Ces outils, s'ils viennent en complément des méthodes traditionnelles de planification et s'ils accompagnent une réflexion prospective de type plus qualitatif, intensifient les échanges, peuvent conduire à co-construire des hypothèses et enrichissent les connaissances produites par les experts.

■ **Développements futurs**

Les premiers résultats obtenus montrent l'intérêt de continuer à développer des recherches sur la géoprospective, qui peut être considérée comme une volonté d'associer aux démarches prospectives de type territoriale des outils numériques d'analyse, de modélisation et de simulation spatiale.

La méthode d'élaboration de scénarios en Atelier de prospective territoriale devra être formalisée pour construire une méthode potentiellement reproductible sur d'autres territoires (ce travail est en cours, il devrait aboutir à l'automne 2011). Ce dispositif pourra être approfondi au service des collectivités et des acteurs du territoire.

Il importe de continuer à améliorer les recherches sur la simulation des évolutions de l'occupation du sol à long terme, notamment pour mieux appréhender les questions relatives à la densification du tissu urbain et celles liées au maintien de l'agriculture, pour planifier une urbanisation plus durable.

Enfin, dans la continuité du projet de recherche ANR AVuPUR, il serait intéressant d'examiner les pistes de recherche potentielles entre simulation des évolutions des usages du sol à long terme et modélisation des impacts de l'urbanisation et de l'anthropisation des bassins versants périurbains sur les flux d'eau. Une finalisation complète devrait permettre de boucler la démarche en permettant aux acteurs territoriaux de réagir à une présentation de l'impact hydrologique des différents scénarios, de manière à les intégrer dans leur réflexion.

■ **Quelques documents publiés sur le thème**

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.

BIBLIOGRAPHIE INDICATIVE

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

MERMET L., 2005. Étudier des écologies futures : un chantier ouvert pour les recherches prospectives environnementales. Bruxelles : P.I.E.-Peter Lang, 411 p.

DELAMARRE A., 2002. La prospective territoriale. Paris : La Documentation Française- DATAR, 110 p.

HOUET T., HUBERT-MOY L. et TYSSOT C., 2008. Modélisation prospective spatialisée à l'échelle locale : approche méthodologique. Revue Internationale de Géomatique, Vol. 18/3, pp. 345-373.

EQUIPES MEMBRES ET CORRESPONDANTS DE L'OTHU

- **INSA – Laboratoire de Génie Civil et d'Ingénierie de l'Environnement (LGCIE)**
(EA 4126)
Bât. J.C.A. Coulomb
34 avenue des arts, 69621 Villeurbanne cedex
Équipe Émissions et transferts des polluants d'origines urbaine et industrielle
Sylvie BARRAUD (Directeur de l'OTHU)
E-mail : sylvie.barraud@insa-lyon.fr

Jean-Luc BERTRAND-KRAJEWSKI,
Bernard CHOCAT , Rémy GOURDON
E-mail : jean-luc.bertrand-krajewski@insa-lyon.fr
bernard.chocat@insa-lyon.fr,
remy.gourdon@insa-lyon.fr
- **Équipe Couplages et interactions entre géomatériaux et infrastructures**
Iринi DJERAN-MAIGRE
E-mail: irini.djeran-maigre@insa-lyon.fr
- **INSA – EVS ITUS**
Laboratoire Environnement Ville et Société – Équipe Ingénieries, Techniques, Urbanisations, Sociétés
Bât. FREYSSINET
8 rue des Sports, 69621 Villeurbanne cedex
Jean-Yves TOUSSAINT
E-mail: jean-yves.toussaint@insa-lyon.fr
- **BRGM - Service géologique**
151 bd Stalingrad, 69 626 Villeurbanne Cedex
Blandine CLOZEL
E-mail: b.clozel@brgm.fr
- **CEMAGREF – UR HH**
UR Hydrologie-Hydraulique
3, bis quai Chauveau, CP 220
69336 Lyon cedex 09
Isabelle BRAUD, Flora BRANGER, Pascal BREIL
E-mail : isabelle.braud@cemagref.fr ;
flora.branger@cemagref.fr ;
pascal.breil@cemagref.fr
- **CEMAGREF – UR MALY**
U.R. Milieux Aquatiques Écologie et Pollutions
3, bis quai Chauveau, CP 220,
69336 Lyon cedex 09
Pascal BOISTARD
E-mail : pascal.boistard@cemagref.fr
- **Université Lyon 3 – LCRE**
Laboratoire de climatologie, risques, environnement (UMR CNRS 5600)
Division Climatologie
18 rue Chevreul 69 362 Lyon cedex 07
Jacques COMBY
E-Mail : comby@univ-lyon3.fr
- **ECOLE CENTRALE – LMFA**
Fluides Complexes et Transferts
36, Avenue Guy de Collongue, 69134 Ecully
Nicolas RIVIERE, Richard PERKINS
E-mail : nicolas.riviere@insa-lyon.fr ;
perkins@mecaflu.ec-lyon.fr
- **ENTPE - LEHNA IPE**
Laboratoire d'Écologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés UMR CNRS 5023 – Équipe Impact des Polluants sur les Écosystèmes
rue Maurice Audin, 69518 Vaulx en Velin cedex
Yves PERRODIN, Thierry WINIARSKI
E-mail: perrodin@entpe.fr; thierry.winiarski@entpe.fr
- **Université Lyon 1 - LEHNA E3S :**
Laboratoire d'Écologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés UMR CNRS 5023 – Équipe Écologie, Évolution, Écosystèmes Souterrains
Bât 403 – DARWIN
43 Bd du 11 novembre 1918, 69622 Villeurbanne cedex
Pierre MARMONIER
E-mail : pierre.marmonier@univ-lyon1.fr
- **Université Lyon 1 - L.S.A**
Laboratoire des Sciences Analytiques
43 Bd du 11 novembre 1918, 69622 Villeurbanne cedex
Philippe NAMOUR , Nicole JAFFREZIC
E-mail: philippe.namour@cemagref.fr ;
nicole.jaffrezic@univ-lyon1.fr
- **Université Lyon 1 /VetAgro Sup - BPOE**
UMR 5557 Écologie Microbienne - Équipe Bactéries Pathogènes Opportunistes et Environnement
43 Bd du 11 novembre 1918, 69622 Villeurbanne cedex
Benoit COURNOYER
E-mail: benoit.cournoyer@univ-lyon1.fr
- **VetAgro Sup - BPOE**
UMR 5557 Écologie Microbienne – Équipe Bactéries Pathogènes Opportunistes et Environnement
1, Bd Bourgelat – 69280 MARCY L'ETOILE
Yves RICHARD
E-mail: y.richard@vet-lyon.fr
- **Université Lyon 2 – LRGE**
Laboratoire Environnement Ville et Société - Laboratoire rhodanien de géographie de l'Environnement (UMR CNRS 5600)
5, av. Pierre Mendès-France
69676 BRON cedex
Laurent SCHMITT
E-mail: Laurent.Schmitt@univ-lyon2.fr

