



**HAL**  
open science

**Assessing the Vulnerability of PeriUrban Rivers.  
Rapport scientifique final du projet AVuPUR  
(ANR-07-VULN-01)**

Isabelle Braud, F. Branger, Katia Chancibault, C. Jacqueminet, Pascal Breil,  
B. Chocat, S. Debionne, C. Dodane, A. Honegger, T. Joliveau, et al.

► **To cite this version:**

Isabelle Braud, F. Branger, Katia Chancibault, C. Jacqueminet, Pascal Breil, et al.. Assessing the Vulnerability of PeriUrban Rivers. Rapport scientifique final du projet AVuPUR (ANR-07-VULN-01). [Rapport de recherche] irstea. 2011, pp.96. hal-02596619

**HAL Id: hal-02596619**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02596619v1>**

Submitted on 15 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## **AVuPUR (Assessing the Vulnerability of Peri-Urban Rivers) : rapport scientifique final du projet ANR-07-VULN-01**

Auteurs : I. Braud (Coordination), F. Branger, K. Chancibault, C. Jacqueminet, P. Breil, B. Chocat, S. Debionne, C. Dodane, A. Honegger, T. Joliveau, S. Kermadi, E. Leblois, G. Lipeme Kouyi, K. Michel, M.L. Mosini, F. Renard, F. Rodriguez, B. Sarrazin, L. Schmitt, H. Andrieu, E. Bocher, J. Comby, P. Viallet

Contribution au projet : D. Béal, H. Boutaghane, F. Dorval, J. Dehotin, G. Dramais, C. Furusho, L. M. Gagnage, E. Gonzalez-Sosa, L. Grosprêtre, S. Jankowfsky, M. Lagouy, L. Lassabatère, L. Letellier, E. Marceau, J.Y. Martin, P.O. Mazagol, N. Molines, S. Palma-Lopes, C. Puech, J.M. Rouault, F. Thollet  
et 31 étudiants de niveau M1, M2 ou ingénieur

Diffusion du document : Publique





Liste des tableaux .....	5
Liste des figures.....	6
1. Remerciements.....	11
2. Résumé en français et en anglais.....	13
2.1. Résumé en français.....	13
2.2. English summary.....	13
3. Contexte et objectifs du projet. Méthodologie suivie.....	14
3.1. Rappel du contexte et des objectifs du projet .....	14
3.2. Méthodologie suivie.....	15
3.3. Présentation du rapport.....	17
4. WP1 : Collecte des données hydrologiques et SIG.....	17
4.1. Rappel du contexte et des objectifs du WP1.....	17
4.2. Tâche A : Collecte des données géographiques et SIG existantes (Cemagref,IRSTV, UMR EVS) .....	18
4.3. Tâche B : Collecte et analyse critique des données hydrologiques (Cemagref,IRSTV) .....	19
4.4. Tâche C : Documentation de la variabilité des profondeurs de sol et des propriétés hydrodynamiques des sols (Cemagref,IRSTV) .....	24
4.5. Tâche D : Documentation des réseaux hydrographiques éphémères (ISARA, Cemagref) .....	27
4.6. Synthèse et conclusions du WP1.....	30
5. WP2 : Modélisation hydrologique détaillée de petits bassins versants en incluant les chemins de l'eau naturels et artificiels .....	31
5.1. Rappel du contexte et des objectifs du WP2.....	31
5.2. Tâche A : Dérivation des réseaux de drainage des bassins et caractérisation fine de l'occupation des sols (IRSTV, Cemagref, UMR EVS) .....	32
5.3. Tâche B : Modélisation des transferts d'eau (Hydrowide, Cemagref,IRSTV) .....	35
5.4. Tâche C : Application et vérification de l'approche de modélisation (Cemagref, Hydrowide).....	38
5.5. Synthèse et conclusions du WP2.....	40
6. WP3 : Evaluation et amélioration de représentations simplifiées des bassins périurbains ..	41
6.1. Rappel du contexte et des objectifs du WP3.....	41
6.2. Tâche A : Définition et caractérisation des unités de modélisation (Cemagref, UMR EVS) .....	42
6.3. Tâche B : Développement d'approches simplifiées pour les bassins plus grands (IRSTV, INSAVALOR, Cemagref) .....	46
6.4. Tâche C : Intercomparaison des approches (IRSTV, Cemagref, INSAVALOR) .....	52
6.5. Synthèse et conclusions du WP3.....	55
7. WP4 : Tests de sensibilité, scénarios et indicateurs de vulnérabilité .....	57
7.1. Rappel du contexte et des objectifs du WP4.....	57
7.2. Tâche A : Obtention des données climatiques et pluviométriques pour la simulation hydrologique sur l'Yzeron (UMR EVS, INSAVALOR, Cemagref).....	57
7.3. Tâche B : Reconstitution de l'occupation des sols passée (UMR EVS) .....	62
7.4. Tâche C : Etude prospective pour la définition de scénario futurs pour l'occupation des sols de l'Yzeron (UMR EVS).....	70
7.5. Impacts sur la géomorphologie des cours d'eau (UMR EVS, Cemagref).....	75
7.6. Tâche E : Simulation de l'évolution du régime hydrologique et impact sur le risque d'incision en 2030 (INSAVALOR, UMR EVS, Cemagref) .....	80
7.7. Synthèse et conclusions du WP4.....	88

8. Discussions et conclusions .....	89
9. Références.....	91

## Liste des tableaux

Tableau 5.1: Caractéristiques des images optiques THR et méthodes et logiciels de traitements d'image employés.....	43
Tableau 5.2: Critères statistiques (Nash et biais) calculés pour les débits simulés par ISBA-TOPMODEL sur la période 2002-2008.....	54
Tableau 5.3 : Critères statistiques (Nash et biais) calculés pour les débits simulés par J2000 sur la période 2002-2008.....	54
Tableau 6.4: Superficies des grands types d'usages et d'occupation (en %) calculées à partir des photographies aériennes de 1970 à 2008 et des images satellites de 1990 à 2008.....	69
Tableau 6.5 : Statistiques annuelles moyennes de dépassement des débits critiques de mise en mouvement.....	79
Tableau 6.6 : valeurs des paramètres hydrologiques des surfaces perméables en fonction de la nature de l'occupation des sols et de la saison.....	84
Tableau 6.7: Statistiques des écarts relatifs (en %) des débits de pointe prédits par les modèles QDF et CANOE. ....	87

## Liste des figures

Figure 2.1 : Organigramme du projet AVuPUR.....	17
Figure 3.2 (a) Bassin versant de l'Yzeron : réseau naturel (bleu) et d'assainissement (jaune) ainsi que les points de liaison entre eux via les déversoirs d'orage (points verts), Dehotin (2009b). (b) Exemple d'informations collectées sur la Chézine : en bleu foncé le réseau hydrographique naturel, en gris les zones bâties et la voirie, en rouge le réseau d'eau usées, en bleu clair le réseau d'eau pluviale et en vert le réseau unitaire. Les triangles jaunes sont les stations de débit et les triangles jaunes inversés, les stations pluviométriques.....	18
Figure 3.3 : Carte des stations pluviographiques et débitométriques du bassin de l'Yzeron.....	20
Figure 3.4: Carte des stations pluviographiques et débitométriques du bassin de l'Yzeron.....	21
Figure 3.5 : Hydrogramme de crue médian issu d'un échantillonnage à 4 crues par an pour les stations de l'Yzeron. Chaque hydrogramme a été normé par son débit maximum. (a) Sur l'ensemble des stations, on constate que les stations les plus impactées par l'artificialisation (Taffignon, La Léchère) possèdent des décrues beaucoup plus rapides que les sous-bassins moins impactés (Craponne, Pollionnay, Amont Déversoir d'Orage). (b) On compare les hydrogrammes médian à la station de Craponne pour les séries observées (Total) et filtrées de l'impact du DO (Rural). Le DO entraîne une montée de crue et une décrue plus rapides. D'après Braud et al. (2011a).....	22
Figure 3.6: coefficient d'écoulement en fonction du débit de base de 487 événements extraits de la période de 2001 à 2009 (Furusho, 2011).....	23
Figure 3.7: Comparaison, pour un état initial sec (à gauche), et un état initial humide (à droite) des fonctions géomorphologiques construites à partir des hypothèses de fonctionnement avec les fonctions de transfert de référence (DPFT) déduites des observations (Furusho, 2011).....	23
Figure 3.8: Un transect de résistivité électrique transversal au ruisseau du Mercier. Les zones B à E constituent des sols superficiels d'épaisseur de 0 à 6m où on peut aussi identifier une zone boisée (E), un champ peu humide (B et C) et une zone plus humide de part et d'autre du ruisseau (D). La zone F est une zone intermédiaire entre les sols superficiels et le socle de gneiss (zones G et H) localisé entre 7 et 12m de profondeur (d'après Goutaland, 2009).....	25
Figure 3.9: Dispositif d'infiltrométrie. (a) Infiltromètres à disque ; (b) Préparation du sol avec sable de contact ; (c) Essais Beerkan (Lassabatère et al., 2010).....	26
Figure 3.10. Cartographie proposée pour la spatialisation de l'occupation des sols selon 7 classes dont la signification est donnée sur les colonnes de droite. D'après Gonzalez-Sosa et al. (2010).....	27
Figure 3.11 (a) Comparaison entre la distribution cumulée des longueurs de brins artificiels observés et extraits par la méthode D8 d'un MNT lidar à 1m de résolution pour deux seuils de surface seuil pour l'initiation du réseau hydrographique (Sarrazin et al., 2011). (b) Comparaison entre la distribution cumulée des longueurs de brins non-chenalisés observés et extraits d'un algorithme D8 pour différentes valeurs d'un index de stabilité variant de 20 à 70% (Sarrazin et al., 2011).....	28
Figure 3.12: Synthèse de l'analyse des réponses des différents capteurs à partir d'une série d'une trentaine d'épisodes pluvieux. Répartition (%) des 3 modalités de propagation de crue observées sur 15 stations limnimétriques dans le réseau hydrographique du Mercier (Sarrazin, 2012).....	29
Figure 4.13: Réseau de drainage et frontière du bassin versant de la Chézine amont déterminés avec les différentes approches (a) MNT, (b) OBJET et (c) TIN. L'exutoire de ce bassin est représenté avec une étoile, et la rivière principale est en bleu. La limite du bassin déterminé avec l'approche MNT est reportée sur chaque figure en vert (Rodriguez et al., 2011).....	32

Figure 4.14: Détermination des sous bassins ruraux et urbains sur le bassin versant de la Chaudanne. Les zones pour lesquelles on indique un pourcentage d'écoulement <100% correspondent à des aires drainées en temps normal vers la station d'épuration par le réseau unitaire, mais qui débordent dans le cours d'eau principal en cas de débordement au niveau des déversoirs d'orage (Jankowfsky et al., 2011a).....	33
Figure 4.15: Cartographie de l'occupation du sol à l'échelle des sous-bassins versants du Mercier et de la Chaudane à l'aide de la (BD-Ortho®IGN) et du cadastre (UMR EVS, 2010). .....	34
Figure 4.16: Schéma conceptuel du modèle PUMMA représentant les modules qui constituent le modèle et leurs couplages : les modules en jaune ont été spécifiquement développés pour PUMMA. Les modules encadrés en traits pleins correspondent à des modules de processus; alors que les modules encadrés en pointillés sont des modules d'échanges de flux entre modules de processus (Jankowfsky, 2011).....	36
Figure 4.17: Schéma de principe du module de transferts d'eau en zone urbaine URBS, d'après Rodriguez et al. (2008).....	36
Figure 4.18: Schémas de principe de deux modules spécifiquement développés pour PUMMA : module de bassin de rétention SISTBA (gauche) et module de déversoir d'orage TDSO (droite) (Jankowfsky, 2011).....	37
Figure 4.19: Topologies entre les différents éléments du paysage prises en compte par LIQUID®. (a) Connexions bidirectionnelles entre polygones. (b) Connexions entre polygones et un brin de linéaire.....	37
Figure 4.20: Application du modèle PUMMA sur le bassin versant de la Chaudanne au Pont de la Barge (2.7 km <sup>2</sup> ). Le maillage du modèle est constitué de 1910 unités de modélisation d'une surface moyenne de 1400 m <sup>2</sup> environ, (Jankowfsky et al., 2011b).....	39
Figure 4.21: Débits mesurés et simulés pour l'année 2008 pour les stations du Pont de la Barge (haut), dans le réseau d'assainissement (milieu) et dans le déversoir d'orage (bas), (Jankowfsky et al., 2011b).....	39
Figure 4.22: Sensibilité du paramètre LinkCoefficient du module URBS (connectivité au réseau du ruissellement issu des parties bâtie et en voirie) pour l'événement du 1er août 2008 (Jankowfsky et al., 2011b).....	40
Figure 5.23: a) Délimitation en sous-bassins sur l'Yzeron en distinguant les sous-bassins ruraux (drainés par le réseau hydrographique) et urbains (drainés par le réseau d'assainissement). Les points de rejets sont les points de contact entre le réseau d'assainissement et le réseau naturel (déversoirs d'orage). b) Caractérisation simplifiée de l'occupation du sol sur les sous-bassins de l'Yzeron pour la carte « Synthèse 2008 ».....	42
Figure 5.24: Cartes d'occupation du sol extraites par traitement semi-automatisé à partir de l'image aérienne de la BD-Ortho®IGN (0.50 m), des images satellites Quickbird (2.44 m) et Spot (2.50 m) et carte de synthèse (d'après Jacqueminet et al., 2011b).....	44
Figure 5.25: Pourcentages de pixels classés par type d'occupation du sol sur les trois cartes extraites de la BD-Ortho®IGN du 5/05/2008, de l'image satellite Quickbird du 31/08/2008 et de l'image satellite Spot du 22/09/2008, (d'après Jacqueminet et al., 2011b).....	45
Figure 5.26: Taux d'imperméabilisation des surfaces en pourcentage par sous bassin versant à partir des trois cartes d'occupation du sol extraites de la BD-Ortho®IGN, de l'image satellite Quickbird et de l'image satellite Spot et de la carte de synthèse des trois classifications (Jacqueminet et al., 2011b).....	46
Figure 5.27: Modèle CANOE complet du bassin de l'Yzeron. Ce modèle représente le réseau hydrographique naturel et le réseau d'assainissement structurant ainsi que les connexions principales entre ces deux réseaux (environ 50 déversoirs d'orage).....	47



Figure 5.28: Schéma de la structure d'Hydrobox, les processus clé et les interactions entre les compartiments pour le concept multi-exutoires appliqué au bassin versant d'Ecully près de Lyon (Dorval, 2011). .....	48
Figure 5.29: Débits observés (en bleu) et simulés (en rouge) par J2000 à Taffignon pour l'année hydrologique 2003-2004. Le débit de base observé et simulé selon le même code de couleurs apparaît dans le coin en haut à gauche.....	49
Figure 5.30: Comparaison des débits simulés et des composantes du débit total : ruissellement rapide, de sub-surface et écoulement de base lorsque 4 cartographies de l'occupation des sols différentes sont utilisées (voir Figure 5.4).....	49
Figure 5.31: Débits simulés selon différents taux d'imperméabilisation sur le bassin de la Chézine. En noir avec la configuration actuelle, en vert une configuration sans imperméabilisation et en rouge une configuration urbaine avec un taux homogène de 30%. La comparaison des débits en modes périurbain et rural indique de plus forts débits en mode rural en période humide qui pourrait montrer l'effet seuil de l'impact de l'urbanisation. Des analyses supplémentaires sont nécessaires pour confirmer les processus mis en jeu. ....	50
Figure 5.32: a) Comparaison des courbes de quantiles des modèles QdF sur l'Yzeron (69) avec les valeurs de débit (points symboles) extraites des chroniques mesurées. b) Comparaison des courbes de quantiles des modèles QdF à Rezé (44) avec les quantiles de débits extraits sur les durées d= 0, 8, 15 et 30 mn.....	52
Figure 5.33: Représentation du réseau unitaire de Grézieu la Varenne (69) sous le modèle CANOE. On distingue le réseau (trait noir) et les points de raccordement des sous bassins drainés. On note les deux exutoires sous forme de carrés, l'un coulant vers le réseau aval (n93) et l'autre vers le cours d'eau (déversoir).....	53
Figure 5.34: Comparaison des courbes de quantiles des modèles QdF à Grézieu (69) et Ecully (69) avec les valeurs de débit (points symboles) extraites de 2 chroniques de rejets urbains de temps de pluie de l'étude AVUPUR.....	53
Figure 5.35: Comparaison des débits observés (points noirs) et simulés (trait rouge) pour l'année 2003-2004 pour laquelle les critères statistiques sont les meilleurs (Nash=0.61 et biais=16%). Les plus petits pics sont généralement surestimés à cause de la non-prise en compte du réseau unitaire qui exporte l'eau drainée en dehors du bassin.....	55
Figure 6.36: Exemple de champs pluviométriques interpolés uniquement à l'aide des pluviographes (gauche) et à l'aide de données radar corrigées par les pluviomètres (droite). 58	58
Figure 6.37: Reconstitutions de la pluie horaire relative à l'événement de décembre 2003. Ici, moyenne horaire de bassin, 13 membres. CV du cumul de l'événement 0.2.....	60
Figure 6.38: Coefficient de dispersion des pluies journalières reconstituées sur le bassin de l'Yzeron, en fonction du temps.....	61
Figure 6.39 : Photo-interprétation des usages du sol de 1970 à 2008 à partir de photographies aériennes IGN (UMR EVS, 2010).....	64
Figure 6.40: Carte de l'occupation du sol de l'année 1999 et part de chaque classe dans le BV (Kermadi et al., 2010).....	65
Figure 6.41: Evolution des grandes entités spatiales (1990 – 1999 – 2008)(UMR EVS, 2010) .....	66
Figure 6.42: Evolution non corrigée de la superficie des grandes entités spatiales (1990 à 2008)(UMR EVS, 2010).....	66
Figure 6.43: Evolution corrigée de la superficie des grandes entités spatiales (1990 à 2008) (UMR EVS, 2010).....	67
Figure 6.44: Evolution spatio-temporelle des grandes entités spatiales (1990-1999-2008) (UMR EVS 2010).....	68

Figure 6.45: Part des évolutions des grandes entités spatiales entre 1990 et 2008 (UMR EVS, 2010).....	68
Figure 6.46: Evolution de la population des communes du bassin versant (1962 – 2006) (Kermadi et al., 2011).....	69
Figure 6.47: Les quatre temps de la démarche de géoprospective mise en œuvre. Combiner prospective territoriale et simulation spatiale.....	71
Figure 6.48: Un schéma des composantes explicatives pour comprendre les évolutions de l'occupation du sol future (schéma heuristique réalisé avec le logiciel libre Freemind). Exemple d'une question traitée : l'agriculture.....	71
Figure 6.49: Des scénarios prospectifs pour piloter des simulations spatiales.....	72
Figure 6.50: 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 (d'après Joliveau et al., 2011).....	73
Figure 6.51 : Débits unitaires théoriques de mise en mouvement sur les cinq transects du tronçon suivi de la Chaudanne.....	76
Figure 6.52: Illustration de l'utilisation de galets peints pour l'estimation du débit critique des sédiments grossiers. A gauche : avant la crue, à droite, après la crue.....	77
Figure 6.53: Résultats de l'approche expérimentale menée sur la Chaudanne : pourcentage de particules grossières mises en mouvement en fonction du débit unitaire. Le débit critique de mise en mouvement correspond à la nette inflexion sur la courbe et est indiqué par la ligne verticale en rouge (thèse L. Grosprêtre, 2011).....	78
Figure 6.54: Illustration du filtrage de la série de débits à la station de la Chaudanne à La Léchère. Les débits mesurés (avec impact des RUTPs) apparaissent en bleu. La série en verte est la série reconstituée s'il n'y avait pas ces RUTPs.....	79
Figure 6.55: (gauche) Distribution des QPB périurbains pour les bassins à cours d'eau incisé (rond blanc) et non incisé (losange noir). La courbe représente le modèle de référence ajusté par les moindres carrés des stations non incisées. (droite) La déviation du QPB est calculée par différence au modèle.....	81
Figure 6.56: Distribution du rapport QPBpériurbain / QPB rural en 2008 (gauche) et 2030 (droite). Stations des cours d'eau incisés avec urbanisation (ronds blancs) et sans urbanisation (carrés blancs), stations non incisées (losanges bleus).....	82
Figure 6.57 : Localisation des différents sous-bassins modélisés avec le modèle CANOE pour évaluer l'évolution 2008-2030 du régime hydrologique en crue et le risque d'incision en 2030.....	83
Figure 6.58 : Evolution 2008-2030 des fréquences mensuelles de dépassement des débits critiques des 44 sous-bassins. ....	85
Figure 6.59: Distribution de l'écart relatif entre les débits de pointe T=2ans (a), 5ans (b) et 10ans (c) calculés par les modèles QDF et CANOE, état sol 2008 et 2030, en fonction du % d'imperméabilisation des bassins.....	86
Figure 6.60. Distribution du % d'imperméabilisation des 45 sous bassins en fonction de la surface totale, en 2008 et 2030. ....	87



## 1. Remerciements

Le projet AVuPUR a été soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) via le contrat n° ANR-07-VULN-01.

Le CCVL (Communauté de Communes des Vallons du Lyonnais), l'IGN, le Grand Lyon, Météo-France, Nantes Métropole, le SAGYRC (Syndicat d'Aménagement et de Gestion de l'Yzeron et du Ratier), le SIAVHY (Syndicat Intercommunal Assainissement Haute Vallée Yzeron), Sol-Info Rhône-Alpes ont fourni une partie des données utilisées dans le projet. Les images SPOT ont été acquises grâce à un projet ISIS du CNES.

Le projet a aussi bénéficié des soutiens du GRAIE (Groupe de Recherche Rhône-Alpes sur les Infrastructures et l'Eau), du Grand Lyon, de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée & Corse, de la Région Rhône-Alpes, du CERTU pour l'organisation de la conférence de restitution (1<sup>ère</sup> conférence OTHU) du 9 Juin 2011.

Les bassins étudiés font partie des observatoires OTHU (Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine) et ONEVU (Observatoire Nantais de l'Environnement Urbain).

Plus d'une trentaine d'étudiants de niveaux master 1, master 2 ou ingénieur ont contribué au projet AVuPUR.



## 2. Résumé en français et en anglais

### 2.1. Résumé en français

Le projet AVuPUR avait pour objectif de produire des connaissances et des outils de simulations sur l'hydrologie des bassins versants périurbains. Ces bassins constituent des milieux particulièrement intéressants, du fait de la juxtaposition de zones rurales naturelles ou agricoles, de zones urbaines artificialisées et de la multiplicité des réseaux. Ils avaient, de fait, été peu étudiés auparavant. Outre des connaissances fondamentales sur ces bassins, le projet a permis de dégager des éléments d'aide à la décision pour les gestionnaires de ces bassins.

Le projet s'est appuyé sur deux bassins versants pilote, faisant partie d'observatoires de long terme : le bassin versant de l'Yzeron (150 km<sup>2</sup>), en périphérie de Lyon, appartenant à l'OTHU<sup>1</sup>, et le bassin de la Chézine (34 km<sup>2</sup>) dans la banlieue de Nantes, qui fait partie de l'ONEVU<sup>2</sup>.

Nous avons d'abord cherché à décrire et comprendre les systèmes étudiés. Pour cela, nous avons i) collecté et analysé les données géographiques (couches de Systèmes d'Informations Géographiques, SIG) et hydrologiques existantes ; ii) mis en place des expérimentations dédiées pour mieux comprendre la réponse hydrologique des zones rurales ; iii) développé et comparé différentes méthodes de cartographie de l'occupation des sols avec une attention particulière à la quantification de l'imperméabilisation et des divers couverts végétaux.

En parallèle, nous avons développé et évalué des outils de simulation du cycle hydrologique dans ces bassins. A fine échelle, des modèles originaux décrivant les différents objets du paysage ont été proposés afin de mieux comprendre le fonctionnement du système et hiérarchiser les objets/processus importants. Pour les bassins plus grands, nous avons cherché à adapter des modèles existants à la complexité des bassins périurbains. Les modèles ont été évalués à l'aide d'indicateurs caractérisant le régime hydrologique en milieu artificialisé, dérivés de l'analyse des données. Ces indicateurs permettent aussi de quantifier la vulnérabilité des bassins à l'urbanisation.

Enfin, nous avons étudié les perspectives d'évolution du bassin de l'Yzeron à l'échéance 2030. Un atelier de prospective territoriale a permis de construire une vision, partagée par les acteurs, des évolutions possibles sur ce bassin. Les scénarii ainsi développés ont été introduits dans les modèles hydrologiques pour quantifier quel pourrait être l'impact sur l'hydrologie et le risque d'incision.

### 2.2. English summary

The aim of the AVuPUR project was to produce pieces of knowledge and simulation tools about the hydrology of periurban catchments. These catchments are particularly complex due to the juxtaposition of natural or cultivated areas, urban areas and various anthropogenic networks such as roads, sewer networks. For this reason, these catchments had been poorly studied before. In addition to fundamental understanding of the behaviour of those catchments, the project allowed the derivation of elements useful for decision makers.

<sup>1</sup> Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine <http://www.graie.org/othu/>

<sup>2</sup> Observatoire Nantais des Environnements Urbains + [http://irstv.fr/index.php?option=com\\_content&view=article&id=32%3Asap&catid=5%3Asecteur-atelier-pluridisciplinaire&Itemid=29&lang=fr](http://irstv.fr/index.php?option=com_content&view=article&id=32%3Asap&catid=5%3Asecteur-atelier-pluridisciplinaire&Itemid=29&lang=fr)

Two pilot catchments, belonging to long term research observatories, were considered within the AVuPUR project: the Yzeron catchment (150 km<sup>2</sup>), in the vicinity of Lyon, France, belonging to OTHU, and the Chézine catchment (34 km<sup>2</sup>), in the suburbs of Nantes, belonging to ONEVU.

The first step was the description and understanding of the functioning of the catchments under study. For this purpose, we i) collected and analysed existing geographical (Geographical Information System, GIS) layers and hydrological data; ii) deployed in situ experiments to better understand the hydrological response, in particular in rural areas; iii) developed and compared various land use mapping methods, focusing on the determination of the impervious fraction and the distinction of various vegetation covers.

In parallel, we developed and assessed various numerical models, simulating the hydrology of those catchments. At small scale, we proposed a new model, describing each object in the landscape. The aim is a better understanding of their functioning and the derivation of a hierarchy of the dominant objects/processes. For larger catchments, we tried to adapt existing models in order to take into account periurban catchments specificity. Model performance was assessed using indicators allowing the characterization of the impact of land use artificialisation on the water cycle, derived from data analysis. Those indicators are also relevant to quantify the vulnerability of the hydrology of those catchments to urbanization.

Prospective meetings gathering the various actors on the Yzeron catchment were organised. They allowed the derivation of possible land use change scenarios in 2030. Those scenarios were introduced in hydrological models to quantify the impact on the hydrological regime and the riverbed erosion risk.

### **3. Contexte et objectifs du projet. Méthodologie suivie**

#### *3.1. Rappel du contexte et des objectifs du projet*

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

En parallèle, des outils réglementaires, visant, d'une part, à maintenir une qualité écologique dans les rivières (Directive Cadre sur l'Eau) et, d'autre part, à limiter le risque d'inondation (Directive européenne sur les Inondations) ont émergé. Pour atteindre les objectifs fixés par ces lois, il devient alors nécessaire de repenser la gestion des eaux pluviales. Pour aider les

gestionnaires dans cette tâche, des outils et méthodes permettant de quantifier l'impact de l'artificialisation des milieux sur le régime hydrologique et géomorphologique des rivières et étudier différentes alternatives de gestion apportent des informations intéressantes pour le processus de décision.

Les bassins versants périurbains sont particulièrement concernés. Ils constituent un milieu difficile à caractériser du fait de sa complexité : juxtaposition et imbrication de zones plus ou moins urbanisées et de zones rurales plus ou moins naturelles ; forte anthropisation du milieu liée aux zones urbaines elles-mêmes mais aussi aux réseaux associés : réseau routier, réseaux d'eau potable, d'eaux usées, d'eaux pluviales. Tout ceci modifie les chemins naturels de l'eau qui ne sont plus uniquement pilotés par la topographie. En terme d'hydrologie, les temps de réponse associés aux zones urbaines ou rurales sont très différents, avec des variations spatio-temporelles marquées, qui rendent complexe l'appréhension de la réponse à l'échelle de l'ensemble du bassin versant. Du fait de cette complexité, au démarrage du projet, ces bassins n'avaient été que peu étudiés, bien que les connaissances respectives sur les bassins urbains d'une part, et ruraux d'autre part, aient été assez développées.

C'était donc l'enjeu du projet AVuPUR (Assessing the Vulnerability of Peri-Urban Rivers) de contribuer à la meilleure caractérisation et connaissance de ces bassins versants. Le projet visait aussi à proposer des outils de simulation pour quantifier l'impact de l'artificialisation des bassins versants sur leur hydrologie et la modification des chemins de l'eau associée. Il s'agissait à la fois de comprendre les processus et de les hiérarchiser, mais aussi d'essayer de dériver des outils qui puissent être utiles aux opérationnels. Le projet s'est appuyé sur deux sites pilotes instrumentés dans le cadre d'observatoires : le bassin versant de l'Yzeron (148 km<sup>2</sup>) en périphérie lyonnaise (OTHU) et le bassin de la Chézine (34 km<sup>2</sup>) en banlieue nantaise (ONEVU). Un autre site expérimental nantais (Rezé, 0.18 km<sup>2</sup>) dédié au suivi du ruissellement urbain a aussi été inclus dans les travaux.

### *3.2. Méthodologie suivie*

Nous avons tout d'abord cherché à **décrire et comprendre les systèmes étudiés**. Pour cela, nous avons collecté l'ensemble des données disponibles sur les bassins versants: données climatiques, pluviométriques et hydrologiques d'une part, et données cartographiques et/ou SIG décrivant la topographie, les sols, l'occupation des sols, les réseaux (routes, chemins, eaux usées, eaux pluviales), etc, d'autre part. Cette phase a été longue et laborieuse du fait de la multiplicité des interlocuteurs. Les résultats du projet montrent cependant que l'ensemble de ces informations sont nécessaires à l'appréhension complète du fonctionnement des bassins versants. Ils montrent aussi l'intérêt de disposer de chroniques longues d'observations hydrologiques.

Les informations existantes ont été complétées par l'acquisition de nouvelles données pour mieux documenter la réponse hydrologique à différentes échelles (mesure des débits pour des bassins emboîtés), caractériser l'impact des réseaux de fossés, en général non cartographiés ; et comprendre la réponse hydrologique des zones rurales : caractérisation de la capacité d'infiltration, description des profondeurs de sol par mesures géophysiques, étude de la réponse hydrologique à l'aide d'analyses de topographie haute résolution (Lidar) et d'un réseau dense de limnigraphes, caractérisation des débits seuil de mise en mouvement des sédiments pour quantifier les tendances évolutives à l'incision.

Un effort important du projet a aussi porté sur le développement et l'évaluation de méthodes pour la description et la cartographie de l'occupation des sols présente et passée à l'aide de



photos aériennes ou d'images satellitaires. L'effort méthodologique a en particulier porté sur la documentation de l'imperméabilisation et de l'artificialisation des milieux et la discrimination des différents types de végétation.

En parallèle, nous avons travaillé sur **le développement d'outils de modélisation en continu à deux échelles spatiales distinctes**. A l'échelle de bassins de quelques km<sup>2</sup>, nous avons développé une modélisation en continu originale, permettant de comprendre le fonctionnement des bassins versants périurbains et s'appuyant sur une modélisation détaillée des différents objets du paysage : parcelles agricoles, urbaines, réseaux hydrographique, de fossés, d'assainissement, bassins de rétention, déversoirs d'orage, etc (modèle PUMMA, Jankowsky, 2011). L'exploitation de cet outil permet de tester des hypothèses de fonctionnement de ces objets et de hiérarchiser leur importance sur la réponse finale. A l'échelle de bassins plus grands, nous avons travaillé sur l'adaptation de modèles existants pour la simulation en continu de l'hydrologie qui puissent répondre aux enjeux de gestion des bassins versants périurbains de l'ordre de la centaine de km<sup>2</sup> : adaptation du modèle urbain CANOE (Dorval, 2011) et des modèles ruraux ISBA-Topmodel (Furusho et al., 2011b) et J2000 (Krause et al., 2006 ; Labbas, 2011). Un outil de modélisation statistique des quantiles de débit a aussi été adapté aux bassins périurbains.

Pour faire le lien entre ces deux volets, des indicateurs caractérisant le fonctionnement hydrologique et géomorphologique du système ont été proposés. Ils s'appuient essentiellement sur l'analyse des données de débits que l'on a cherché à synthétiser pour en extraire des grandeurs caractérisant l'évolution temporelle du régime moyen, des basses eaux, des crues, mais aussi des seuils de débit déclenchant le processus d'incision. Ces indicateurs permettent d'une part d'évaluer la pertinence des modèles développés. D'autre part, ils nous fournissent des grandeurs pour caractériser l'impact de modifications futures ou passées de l'occupation des sols sur l'hydrologie et de ce fait quantifier la vulnérabilité de ces bassins aux changements d'occupation des sols.

Enfin, un atelier de prospective territoriale a permis de construire une vision, partagée par les acteurs, des évolutions possibles de l'occupation des sols sur le bassin de l'Yzeron à échéance 2030. Les scénarii ainsi développés ont été introduits dans les modèles hydrologiques pour quantifier quel pourrait être l'impact sur l'hydrologie et le risque d'incision.

### 3.3. Présentation du rapport

Le projet était organisé en 5 workpackages dont l'articulation est rappelée sur la Figure 2.1 (voir Braud et al., 2010 pour une présentation générale du projet).

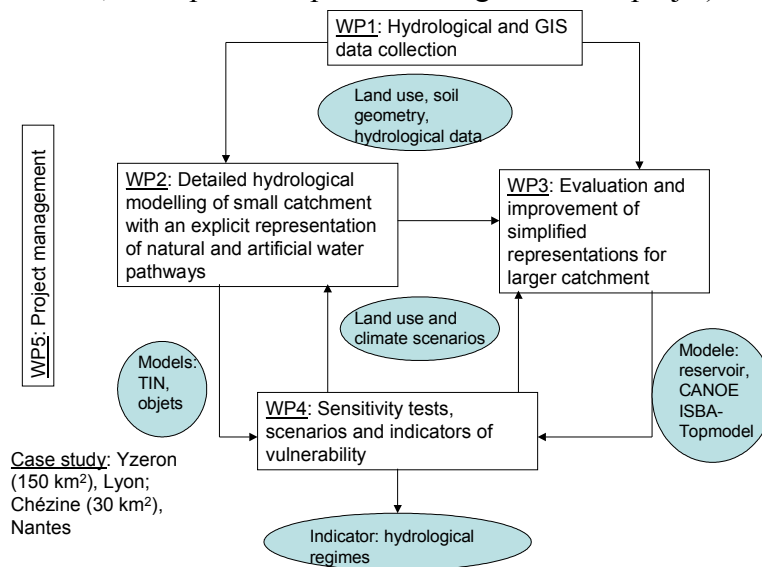


Figure 2.1 : Organigramme du projet AVuPUR

Ce rapport scientifique reprend les différents workpackages et tâches proposés initialement dans le projet et fournit une synthèse en 1-6 pages par tâche des résultats principaux obtenus sur chacune, afin de donner une vision complète des travaux réalisés dans le projet.

## 4. WP1 : Collecte des données hydrologiques et SIG

### 4.1. Rappel du contexte et des objectifs du WP1

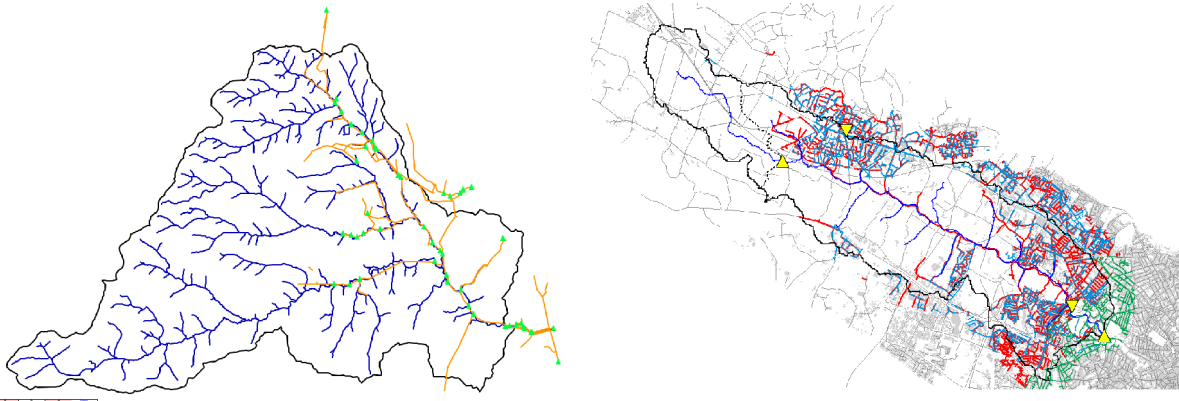
Le WP1 avait un double objectif. Le premier était de collecter et d'organiser l'ensemble des données cartographiques (Tâche A) et hydrométéorologiques (Tâche B) nécessaires au développement du projet, tant sur le bassin de l'Yzeron que sur celui de la Chézine. La collecte s'est en particulier focalisée sur les données permettant de décrire les chemins de l'eau et de mettre en œuvre et valider les modèles. Un travail important de mise en cohérence et d'exploitation conjointe des données SIG a été nécessaire pour dériver une cartographie cohérente des chemins de l'eau sur les deux bassins versants (Tâche A, voir aussi WP2, Tâche A, section 4.2). Les données hydrométéorologiques ont fait l'objet d'un travail d'analyse approfondi (Tâche B) en vue notamment de définir des indicateurs et/ou des métriques pertinents pour mettre en évidence l'impact de l'artificialisation des milieux sur l'hydrologie. Ce sont ces indicateurs qui ont ensuite été utilisés pour définir la vulnérabilité des milieux aux modifications d'occupation des sols dans l'analyse des scénarii.

Le second objectif de ce WP était d'acquérir de nouvelles données, nécessaires à une amélioration de la compréhension des processus hydrologiques actifs sur les bassins périurbains, notamment en zone rurale. Ceci a conduit à la mise en place, sur les deux bassins, de campagne d'essais d'infiltration et de prospection géophysique (Tâche C) et à l'évaluation

de nouveaux dispositifs de mesures : réseau dense de limnimètres combiné à l'analyse de données lidar très haute résolution pour la description des chemins de l'eau et la compréhension des processus actifs lorsque les cours d'eau sont intermittents (Tâche D).

#### 4.2. Tâche A : Collecte des données géographiques et SIG existantes (Cemagref, IRSTV, UMR EVS)

Cette tâche a permis de collecter les couches SIG nécessaires à la description des deux bassins versants (Yzeron et Chézine). Les différentes couches SIG ont été géoréférencées dans un même système de coordonnées (Lambert II étendu) et les méta-données décrites dans un fichier Excel reprenant les champs principaux issus de la norme ISO 19115 (Dehotin, 2009a). Les couches collectées permettent de décrire : la topographie (modèle numérique de terrain), l'occupation des sols (Corine Land Cover, BPTopo<sup>®</sup> et BDOrtho<sup>®</sup> IGN), les réseaux hydrographiques (BD Carthage), les sols (cartes géologiques et pédologiques), le cadastre, les réseaux d'assainissement (pluvial, séparatif et unitaire). Pour la description des réseaux d'eau pluviale ou des réseaux de fossés agricoles, un travail de collecte de données terrain a été nécessaire car ces éléments n'étaient pas toujours documentés dans les bases de données existantes. Ce travail n'a pas pu être réalisé de manière exhaustive sur les deux bassins, mais a été réalisé sur l'amont du bassin de la Chézine pour les fossés de drainage agricole et les sous-bassins de la Chaudanne et du Mercier sur l'Yzeron pour le réseau d'eaux pluviales et les fossés.



**Figure 3.2** (a) Bassin versant de l'Yzeron : réseau naturel (bleu) et d'assainissement (jaune) ainsi que les points de liaison entre eux via les déversoirs d'orage (points verts), Dehotin (2009b). (b) Exemple d'informations collectées sur la Chézine : en bleu foncé le réseau hydrographique naturel, en gris les zones bâties et la voirie, en rouge le réseau d'eau usées, en bleu clair le réseau d'eau pluviale et en vert le réseau unitaire. Les triangles jaunes sont les stations de débit et les triangles jaunes inversés, les stations pluviométriques.

Cette tâche de collecte et de mise en forme des données, indispensable au projet, a été longue et laborieuse du fait de la multiplicité des sources de données (une douzaine de conventions de mise à disposition de données a été signée dans le cadre d'AVuPUR). Un gros travail de remise en forme de ces données a été nécessaire pour les rendre inter-opérables, du fait des formats et systèmes de coordonnées multiples des données d'origine. Un exemple du résultat de ces traitements apparaît sur la Figure 3.2a qui présente un réseau hydrographique combiné au réseau d'assainissement (en majorité unitaire) unifié sur le bassin de l'Yzeron. Les eaux de ruissellement sur ces zones sont drainées vers la station d'épuration, sauf en cas de surverse au niveau des déversoirs d'orage (DOs). Ces DOs constituent les points de rejets permettant la

connexion entre réseaux d'assainissement et réseau naturel et apparaissent aussi sur la Figure 3.2a (Dehotin, 2009b). La Figure 3.2b illustre les informations collectées sur la Chézine.

#### *4.3. Tâche B : Collecte et analyse critique des données hydrologiques (Cemagref,IRSTV)*

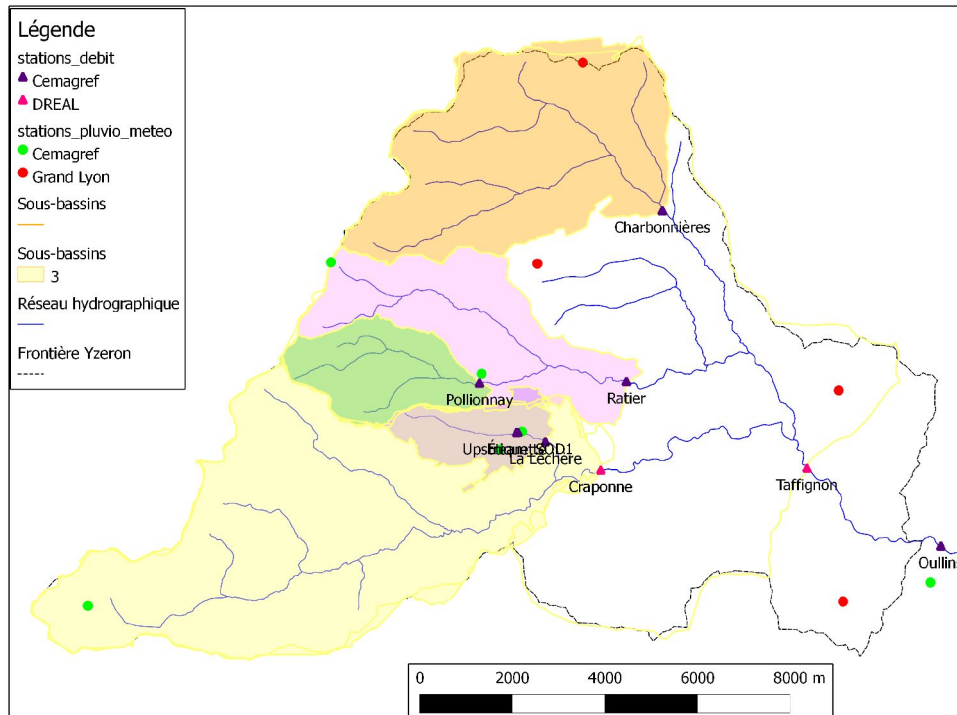
Les données hydrométéorologiques (pluie et débit) ont été collectées sur les deux bassins auprès des producteurs des données (Grand Lyon, DREAL Rhône-Alpes, Nantes Métropole, Météo-France) sur les durées disponibles. Compte tenu des modélisations envisagées (WP2 et WP3) s'appuyant sur des approches distribuées dans l'espace, les réseaux de stations hydrométriques ont été complétés dans le cadre du projet selon une logique de bassins emboîtés échantillonnant des occupations des sols différentes, et afin de documenter l'évolution des régimes hydrologiques en fonction des échelles d'observation. Sur la Chézine, ceci a conduit à l'installation d'un nouveau pluviographe et d'une nouvelle station de mesure du débit drainant une zone plutôt rurale à l'amont du bassin. Sur le bassin de l'Yzeron, une station météorologique a été installée sur l'ouest du bassin où l'information pluviométrique était lacunaire. Deux nouvelles stations débitométriques ont été installées sur des bassins de taille intermédiaire (une vingtaine de km<sup>2</sup>), ce qui permet d'échantillonner un continuum d'échelles, les stations existantes drainant des sous-bassins de quelques km<sup>2</sup> ou des bassins de 50 à 130 km<sup>2</sup>. La Figure 3.2b montre la localisation des stations sur la Chézine et la Figure 3.3 celle des stations du bassin de l'Yzeron.

Concernant la qualification des mesures de débit, une méthode permettant de quantifier l'incertitude sur les courbes de tarage a été développée et appliquée aux stations de l'Yzeron (Branger et al., 2011b). Cette analyse a permis de montrer le manque de fiabilité des stations Pollionnay et Amont\_DO pour les faibles débits, ce qui peut impacter grandement la fiabilité des bilans hydrologiques calculés. Une solution pour améliorer les mesures a été proposée et consiste en l'adjonction d'un déversoir triangulaire à la section de mesure qui permet d'améliorer les bas débits (Diribarne, 2008). Elle sera mise en place sur les stations existantes et a été utilisée pour les nouvelles stations (Ratier, Charbonnières).

Pour la description du climat et en l'absence de stations météorologiques, nous nous sommes appuyés sur la base de données SAFRAN de Météo-France (Quintana-Ségui et al., 2008). Ces données ont notamment été utilisées pour le calcul d'une évapotranspiration potentielle (ETP) (Vannier et Braud, 2010).

Les données hydrométéorologiques ont fait l'objet d'une analyse critique via des travaux de stages (Guilbaud, 2007; Palaccio, 2008; Furusho, 2008; Gautron, 2009; Michel, 2009; Chapuis, 2010), la publication d'annuaires (Thollet, 2007; Thollet et Branger, 2008; Lagouy, 2010) ou des rapports de recherche (Braud, 2008; Mosini et al., 2011). Cette étape de critique était nécessaire pour aborder leur exploitation en terme d'analyse du fonctionnement hydrologique.

L'analyse du fonctionnement hydrologique a considéré différentes échelles de temps avec l'établissement de bilans annuels et mensuels, et une étude à l'échelle des épisodes pluvieux. Nous avons aussi analysé les basses eaux, les crues et la décomposition des hydrogrammes en débit de base, de subsurface et rapide à l'aide d'un outil développé par Willems (2009). Sur la Chézine, la synthèse des résultats a été faite par Mosini et al. (2011). Sur l'Yzeron, pour les stations ayant une chronique suffisante (40 ans), des analyses statistiques de recherche de tendances/ruptures dans les chroniques ont aussi été réalisées. Ce type d'analyse a porté à la fois sur les pluies, l'ETP et les débits.



*Figure 3.3 : Carte des stations pluviographiques et débitométriques du bassin de l'Yzeron.*

L'exploration et l'évaluation de différents indicateurs du fonctionnement hydrologique des cours d'eau avait pour but de déterminer ceux qui étaient pertinents pour caractériser l'impact des modifications anthropiques du milieu sur l'hydrologie. Il s'est aussi avéré nécessaire de développer des outils spécifiques pour mettre en évidence, notamment sur l'Yzeron, l'impact des déversoirs d'orage ou des réseaux d'assainissement, sur l'hydrologie des cours d'eau. Ces outils sont essentiellement des algorithmes de filtrage qui permettent d'isoler la contribution des déversoirs d'orage et donc de déduire une série de débits non impactée par ce déversoir.

Une application spécifique aux données de débit enregistrées à pas de temps variable a été développée pour isoler les différentes composantes de débit mesurées dans un réseau d'assainissement unitaire (projet FAST-MUROEI, P.Breil, 2011). Elle s'inspire d'une méthode développée dans les années 90 (Breil et al. 1993). L'hypothèse est que le débit nocturne minimum est nul sur un petit réseau d'assainissement dont la vidange est de l'ordre de l'heure. Le pas de temps variable concentre l'information sur les variations rapides du débit et rend donc plus précis le filtrage de cette partie du signal. La Figure 3.4. représente la démarche appliquée aux débits mesurés sur les petits bassins versants en réseau d'assainissement unitaire (eaux usées + eaux de pluie) dans le cadre du projet AVUPUR (Braud et al., 2011a).

- Etape 1 : Le débit minimum nocturne (CW, courbe rouge) est recherché par un algorithme de minimum glissant. Par hypothèse ce débit est constitué d'eau de nappe ou de source en période de temps sec. Il peut aussi s'agir d'eau d'exhaure des parking souterrains dans les zones urbaines denses. En période de temps de pluie (wet period) ce débit résiduel (courbe rouge) comprend en plus la participation du ruissellement pluvial et des eaux claires parasites qui rejoignent rapidement toutes les tranchées de pose de canalisation (Breil et al. 1993).

- Etape 2 : La soustraction du débit minimum nocturne (CW) au débit total (CS) permet d'extraire la composante eaux usées en période de temps sec.

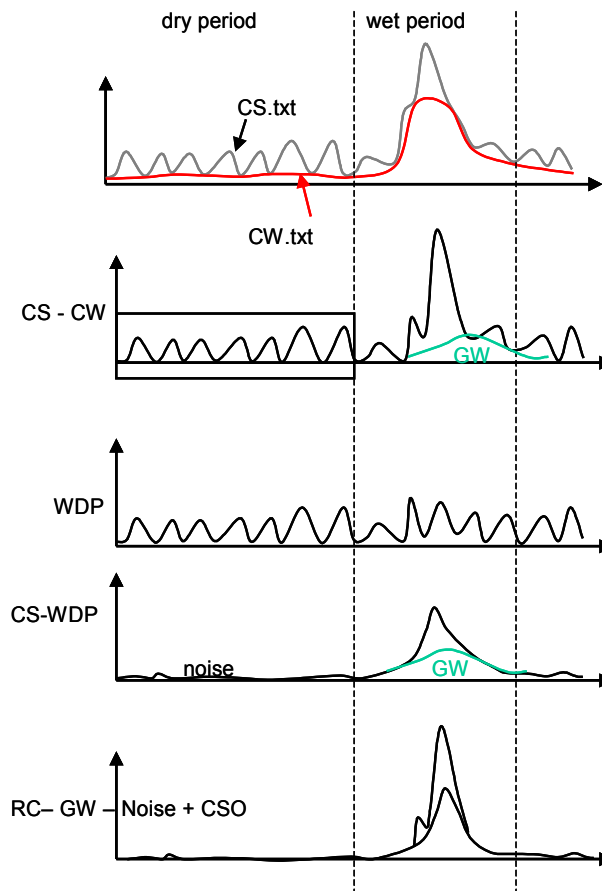
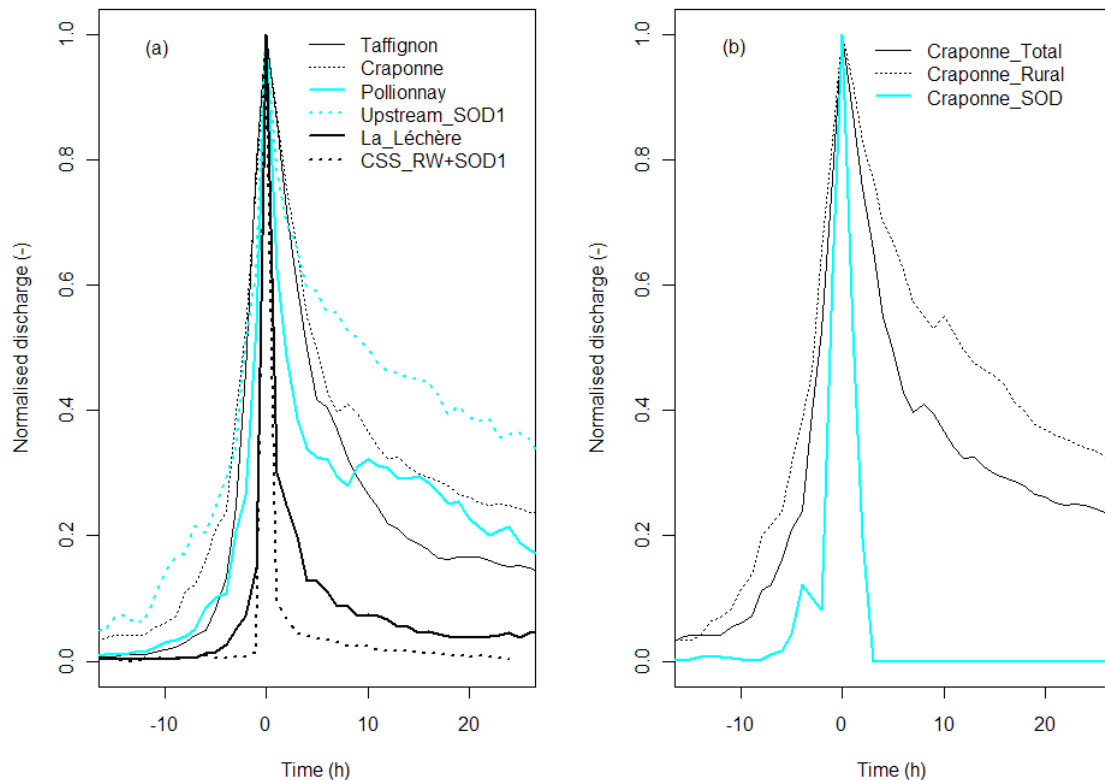


Figure 3.4: Carte des stations pluviométriques et débitométriques du bassin de l'Yzeron.

- Etape 3 : Une analyse statistique des débits d'eau usées est réalisée sur un cycle hebdomadaire (WPD) sur les périodes de temps sec (dry period). Tous les jours de la semaine ont une signature différenciée, en particulier les mercredi, vendredi, samedi et dimanche. L'extraction d'un cycle moyen (WDP) représentatif nécessite au moins une année d'observation.
- Etape 4 : La soustraction des débits du cycle moyen (WPD) au débit total (CS) conduit à une chronique de débit résiduel composé d'eau de nappe et source (GW) en temps sec (dry weather) auquel s'ajoutent les débits de ruissellement urbain en temps de pluie (wet period).
- Etape 5 : L'algorithme de minimum glissant est appliqué cette fois à la chronique de débit résiduel. Il permet par hypothèse d'extraire les débits d'eau claire parasite (ecp, courbe verte). La soustraction des débits d'ecp à la chronique des débits résiduels permet d'extraire les débits de ruissellement pluvial urbain en temps de pluie. Par temps sec, le débit obtenu est par hypothèse nul mais c'est en réalité un bruit positif ou négatif qui doit être aussi faible que possible par rapport au débit de temps sec. Dans le cas où des surverses d'orage existent en amont du point de mesure, il convient de rajouter les débits correspondant pour évaluer le ruissellement total de l'aire urbaine drainée par le réseau unitaire.

La même logique de filtrage a aussi permis de décomposer le signal mesuré en réseau d'assainissement en eaux usées, eaux d'infiltration parasite dans le réseau et eaux de

ruissellement (Dorval et al., 2010). Les indicateurs analysés, les principes des méthodes de filtrage et la synthèse des résultats sont présentée dans Braud et al. (2011a) pour le bassin de l'Yzeron. Ces résultats montrent le fort impact de l'infiltration dans les réseaux d'assainissement qui atteignent 30% du débit total du réseau. Sur la station de la Chaudanne, on note aussi un cycle annuel marqué de cette infiltration avec une augmentation en période humide et des valeurs proches de zéro en période sèche. Cette eau infiltrée est drainée vers la station d'épuration, plutôt que vers les cours d'eau. Ceci a aussi un impact sur la fréquence des assecs. L'impact de l'infiltration se traduit aussi par une diminution des écoulements annuels et un débit de base moindre de l'amont vers l'aval entre les stations de Craponne et Taffignon. Pour confirmer cette hypothèse, l'étude des débits nocturnes dans le grand collecteur d'assainissement situé à proximité de l'exutoire du bassin de l'Yzeron (130 km<sup>2</sup>) a révélé l'importance des eaux de nappe qui sont dérivées du cours d'eau (Breil et al. 2010). La quantité d'eau écoulee dans une année représente 37% de celle qui passe dans la rivière Yzeron, connexe au collecteur. La part d'eaux usées correspond essentiellement à des eaux d'adduction externes au bassin versant (90%). La part restante représente ce qui est soustrait à l'écoulement naturel de l'Yzeron, à raison de 14% pour la pluie et 42% pour les eaux claires. C'est ainsi 20% de l'écoulement naturel qui échappe au cours d'eau du fait du réseau d'assainissement. Dans ce bilan, la part des surverses du réseau vers le cours d'eau par temps de pluie reste marginale (<2%).



**Figure 3.5 :** Hydrogramme de crue médian issu d'un échantillonnage à 4 crues par an pour les stations de l'Yzeron. Chaque hydrogramme a été normé par son débit maximum. (a) Sur l'ensemble des stations, on constate que les stations les plus impactées par l'artificialisation (Taffignon, La Léchère) possèdent des décrues beaucoup plus rapides que les sous-bassins moins impactés (Craponne, Pollionnay, Amont Déversoir d'Orage). (b) On compare les hydrogrammes médian à la station de Craponne pour les séries observées (Total) et filtrées

de l'impact du DO (Rural). Le DO entraîne une montée de crue et une décrue plus rapides. D'après Braud et al. (2011a)

L'analyse de tendance sur la station de Craponne entre 1970 et 2010 montre une baisse significative des débits de base ( $p=0.02$ ) et une hausse significative ( $p=0.001$ ) des ruissellements rapides, accompagnant une augmentation des surfaces artificialisées de 9 à 18% sur la période (Braud et al., 2011a).

En terme de crues, la comparaison d'hydrogrammes type de crues montre un impact net de l'artificialisation sur la décrue qui est beaucoup plus rapide lorsque les mesures sont impactées par un déversoir d'orage (Figure 3.5). Une analyse débit-durée-fréquence (QdF) (Galéa et Prudhomme, 1997) montre aussi que les crues les plus impactées par l'artificialisation sont les crues fréquentes, alors que les crues majeures sont essentiellement liées à une réponse des zones rurales.

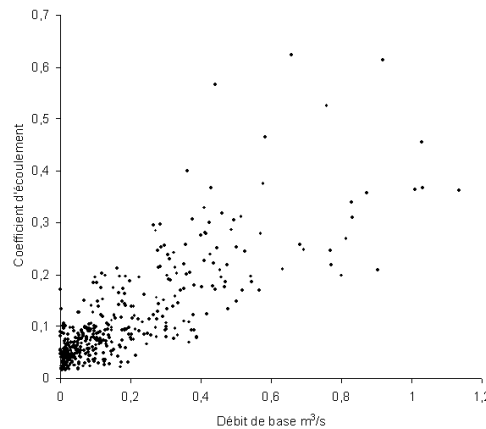


Figure 3.6: coefficient d'écoulement en fonction du débit de base de 487 événements extraits de la période de 2001 à 2009 (Furusho, 2011).

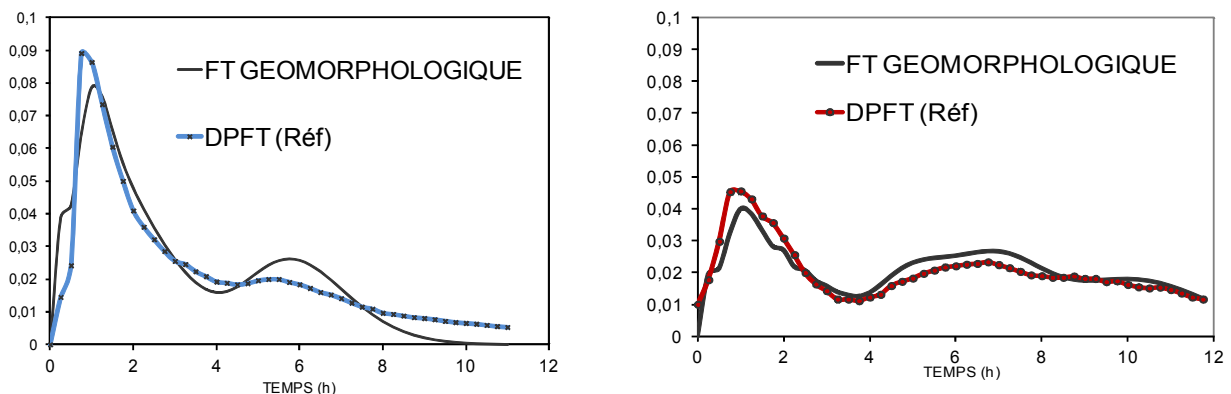


Figure 3.7: Comparaison, pour un état initial sec (à gauche), et un état initial humide (à droite) des fonctions géomorphologiques construites à partir des hypothèses de fonctionnement avec les fonctions de transfert de référence (DPFT) déduites des observations (Furusho, 2011).



L'analyse des épisodes de crue met aussi en évidence des différences de réponse selon les conditions d'humidité des bassins versants. Ceci est notamment mis en évidence sur le bassin de la Chézine (Furusho, 2011 ; Furusho et al., 2011a) où les réseaux d'eaux pluviales sont directement connectés au réseau naturel. L'analyse des événements extraits sur la période 2001-2009 montre que le coefficient d'écoulement événementiel est fortement corrélé au débit de base (Figure 3.6). Une analyse plus poussée sur une série d'une trentaine d'épisodes de crue entre 2001 et 2007 a permis de séparer les épisodes en deux groupes. Dans le premier groupe, caractérisé par des épisodes à faible coefficient d'écoulement et faible débit de base, les événements se produisent en conditions d'humidité des sols sèche et la réponse hydrologique est essentiellement urbaine avec des temps de réponse de l'ordre de l'heure. Pour le second groupe où les coefficients d'écoulement sont élevés et le débit de base plus fort que pour le groupe 1, les épisodes se produisent en conditions humides et les zones rurales saturées ont une contribution significative à l'écoulement, qui s'ajoute à celle des zones urbaines. Ces hypothèses de fonctionnement ont été validées en comparant pour chaque groupe la fonction de transfert géomorphologique, permettant de localiser les zones du bassin contribuant à l'écoulement, à la fonction de transfert déduite de la méthode DPFT (Différence Première de la Fonction de Transfert, Duband et al., 1993) estimée à partir des seules données pluie et débit observées pour chaque groupe (Figure 3.7)

Sur le bassin de l'Yzeron, l'analyse des épisodes a aussi montré, pour les sous-bassins ruraux, une liaison entre débit de base et coefficient d'écoulement (Sarrazin, 2012). Les coefficients d'écoulement des épisodes sont aussi beaucoup plus faibles que sur la Chézine. On observe aussi des formes différentes des fonctions de transfert identifiées par la méthode DPFT selon que le bassin soit plus ou moins urbanisé.

L'ensemble des résultats de cette analyse de données a permis de guider les travaux de modélisation en mettant en évidence les éléments importants du fonctionnement hydrologique des bassins qu'il convenait de prendre en compte dans les modèles (cf WP2 et WP3)

#### *4.4. Tâche C : Documentation de la variabilité des profondeurs de sol et des propriétés hydrodynamiques des sols (Cemagref,IRSTV)*

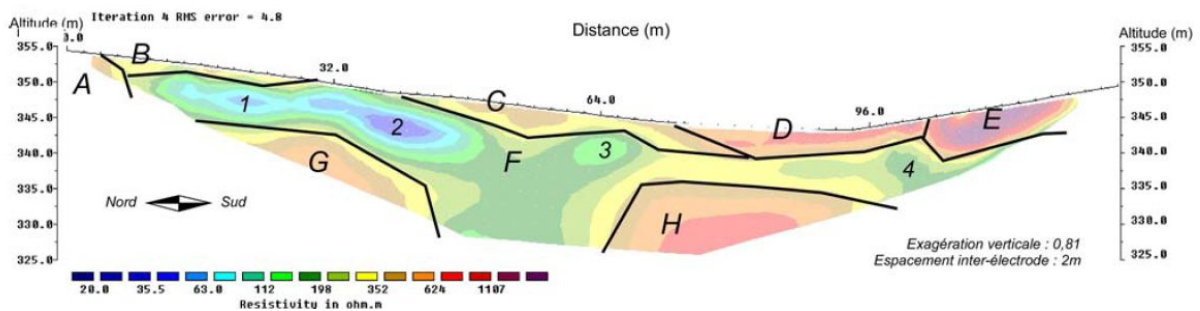
Sur le bassin de l'Yzeron, des études antérieures (Gnouma, 2006) avaient montré qu'un fonctionnement hydrologique par zones saturées contributives était certainement actif sur le bassin lorsque ce dernier était humide, mais que la formation de ruissellement de surface par refus d'infiltration était aussi possible durant les épisodes d'orages en été. Sur la Chézine, l'impact de zones saturées était aussi suspecté. Pour mieux caractériser le sous-sol et notamment les profondeurs de sol, nous avons testé des méthodes de prospection géophysique. Des campagnes d'essais d'infiltration à la surface du sol ont par ailleurs été menées sur les deux bassins pour documenter les propriétés hydrodynamiques des sols en surface.

##### Prospection géophysique

Sur les deux bassins, nous avons donc évalué le potentiel des méthodes géophysiques pour caractériser les profondeurs de sol et l'hétérogénéité du sous-sol. Sur la Chézine, différentes techniques (radar géologique, Slingram, transects de résistivité électrique (TRE)) ont été comparées sur un site. Les résultats montrent que la résistivité électrique est la méthode la mieux adaptée au sol de la Chézine, trop argileux et/ou trop saturé pour la méthode radar.

Quant au Slingram il n'était pas adapté à la profondeur de sol étudié (supérieur à 1.5m de profondeur). La méthode TRE a donc été appliquée sur 5 autres sites et couplée parfois à des relevés terrain. Cette étude prospective sur la Chézine a permis d'identifier les forces et faiblesses des 3 méthodes géophysiques pour la caractérisation des sols. Palma Lopes et al. (2011) ont ainsi émis des recommandations sur l'utilisation de ces méthodes et leur complémentarité en fonction des objectifs d'étude. Sur les sites étudiés, il apparaît que le sol a une structure géologique 3D, nécessitant un protocole de mesures différent (transects parallèles et perpendiculaires, suivi temporel, approche géologique associée).

La méthode de la TRE a aussi été utilisée sur le sous-bassin du Mercier (bassin de l'Yzeron) où trois transects ont été réalisés : l'un sur une pente en zone de forêt, les deux autres de part et d'autre d'un ruisseau. Sous forêt, des problèmes de contact entre le sol et les électrodes n'ont pas permis d'obtenir des résultats très fiables. Sur les deux autres transects, les résultats montrent que les sols du Mercier sont peu profonds (quelques mètres), mais que les fonds de talwegs peuvent être remplis de roches altérées sur des épaisseurs de 10 à 20m (Goutaland, 2009, Figure 3.8).



*Figure 3.8: Un transect de résistivité électrique transversal au ruisseau du Mercier. Les zones B à E constituent des sols superficiels d'épaisseur de 0 à 6m où on peut aussi identifier une zone boisée (E), un champ peu humide (B et C) et une zone plus humide de part et d'autre du ruisseau (D). La zone F est une zone intermédiaire entre les sols superficiels et le socle de gneiss (zones G et H) localisé entre 7 et 12m de profondeur (d'après Goutaland, 2009)*

Ces résultats sont confortés par des travaux en géomorphologie sur la reconstruction de l'évolution géomorphologique du bassin de l'Yzeron sur les deux derniers siècles (datation carbone 14, OSL (Preusser et al., 2010), reconstruction de l'occupation des sols à partir du cadastre napoléonien (Privolt, 2009). Ces résultats suggèrent une érosion importante des versants sur la période passée, conduisant à l'accumulation de colluvions dans les talwegs. Cette érosion a régressé sur les cinquante dernières années du fait de l'abandon des cultures au profit de la forêt. L'ensemble de ces résultats permettent de conclure à l'existence de capacités de stockage de l'eau importantes dans les talwegs, mais localisées et fortement hétérogènes. Ceci est important à prendre en compte dans la modélisation hydrologique de ces zones.

### Campagnes d'infiltration

Les campagnes d'infiltration ont ciblé des combinaisons pédologie/occupation des sols type afin de documenter la variabilité spatiale des situations rencontrées. Ces campagnes ont été menées sur le haut-bassin de la Chézine et un sous-bassin de l'Yzeron de 7 km<sup>2</sup>, le Mercier, représentatif de la zone rurale de l'Yzeron. Nous avons combiné des mesures

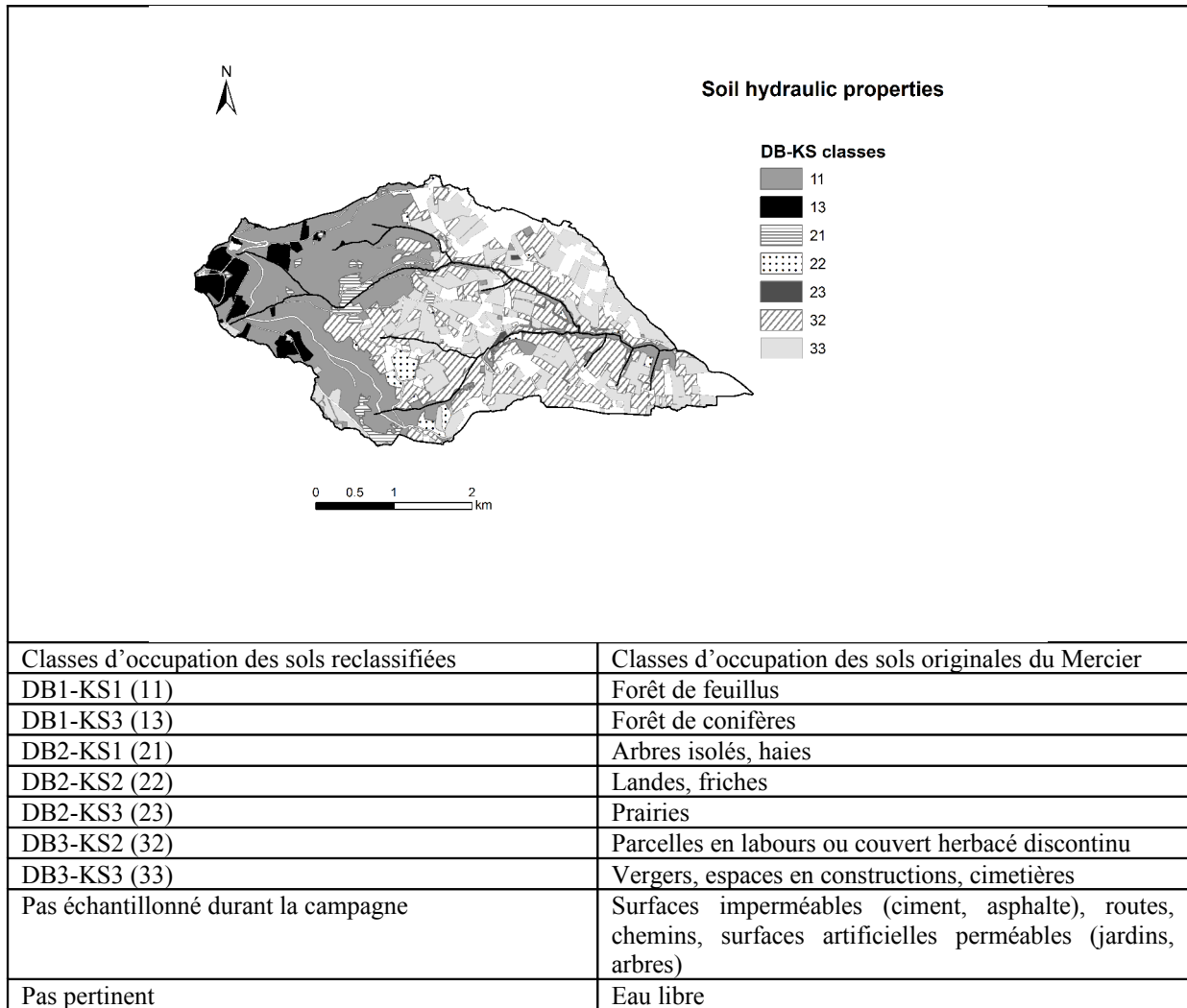
granulométriques, de masse volumique sèche du sol et des essais d'infiltration sous charge (méthode *Beerkan*) et sous succion (mini-infiltromètres à disques) pour évaluer les capacités d'infiltration du sol (Figure 3.9).

L'analyse des résultats a été conduite avec la méthode proposée par Lassabatère et al. (2006), qui a aussi été améliorée dans le cadre du projet (Lassabatère et al., 2009). Les résultats montrent que, sur le bassin du Mercier où la texture du sol était assez homogène, l'occupation des sols (forêt de feuillus, ou de conifères, prairies, cultures) avait un impact prédominant sur les caractéristiques du sol (Gonzalez et al., 2010). Sur la Chézine, c'est un effet de la pédologie et dans une moindre mesure de l'occupation des sols qui a été mis en évidence (Lassabatère et al., 2010). Ceci est important pour la modélisation hydrologique ou, traditionnellement, seule la texture est prise en compte pour la spécification des propriétés hydrodynamiques des sols. Gonzalez et al. (2010) ont ainsi proposé une première approche de spatialisation des propriétés hydrodynamiques sur le sous-bassin du Mercier s'appuyant sur la carte d'occupation des sols détaillées décrite en 4.2 (Figure 3.10).



*Figure 3.9: Dispositif d'infiltrométrie. (a) Infiltromètres à disque ; (b) Préparation du sol avec sable de contact ; (c) Essais Beerkan (Lassabatère et al., 2010)*

Comme pour l'analyse des données hydrologiques, les données et informations collectées dans cette tâche ont été utilisées pour la paramétrisation des modèles mis en œuvre dans les WP2 et WP3.



*Figure 3.10. Cartographie proposée pour la spatialisation de l'occupation des sols selon 7 classes dont la signification est donnée sur les colonnes de droite. D'après Gonzalez-Sosa et al. (2010)*

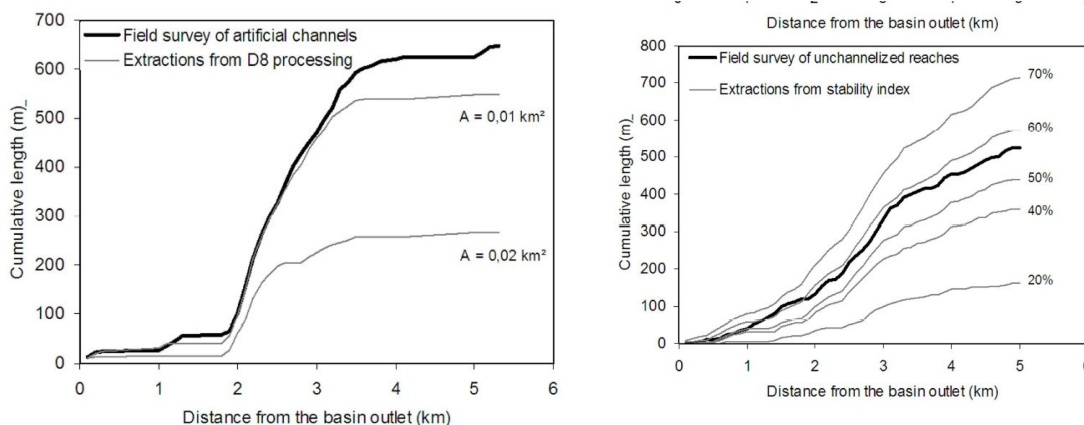
#### 4.5. Tâche D : Documentation des réseaux hydrographiques éphémères (ISARA, Cemagref)

Sur le bassin versant de l'Yzeron, les cours d'eau peuvent être à sec une partie de l'année. Le fonctionnement hydrologique de bassins versants avec un tel régime intermittent à l'échelle de quelques km<sup>2</sup> est complexe et encore mal compris car de nombreux processus affectent le cheminement des eaux de surface. Il en résulte une variabilité de la densité de drainage et de la dynamique de l'écoulement au sein du réseau hydrographique qui peut expliquer des différences observées dans la réponse hydrologique, notamment en terme de zones de production connectées ou pas au réseau (on parle alors de connectivité hydrologique). Ce fonctionnement est peu pris en considération du fait des difficultés d'ordres techniques et économiques pour suffisamment observer les mouvements de l'eau. Or, c'est une information essentielle pour décrire la connectivité hydrologique du bassin qui représente la distribution spatiale et temporelle des surfaces contributives à l'écoulement par leur connexion au réseau hydrographique. De telles connaissances seraient utiles pour traiter la question de la

séparation entre production et transfert effectuée dans les modèles hydrologiques, avec la perspective de proposer des simulations plus justes physiquement. Le travail réalisé dans cette tâche était donc très prospectif et visait à évaluer la pertinence de nouveaux dispositifs de mesures (un réseau dense de limnigraphes) et de sources de données à très haute résolution (THR) pour la compréhension des processus hydrologiques sur de petits bassins versants intermittents. L'objectif à terme est de pouvoir injecter ces nouvelles connaissances dans les modèles hydrologiques, mais il dépassait largement le cadre du projet AVuPUR.

Le travail réalisé dans cette tâche constitue le travail de thèse de Sarrazin (2012). Il s'agissait de proposer des approches spatiales pour mieux intégrer le comportement dynamique du réseau de drainage dans le bassin versant du Mercier (7 km<sup>2</sup>) situé en tête du bassin versant de l'Yzeron (150 km<sup>2</sup>) localisé à l'ouest de l'agglomération lyonnaise. Ce bassin rural sur socle cristallin est composé essentiellement de surfaces agricoles et de forêts. Son fonctionnement hydrologique est affecté par l'existence de zones saturées mais aussi par un réseau anthropique de routes et de fossés important. Les méthodes développées relèvent de deux approches :

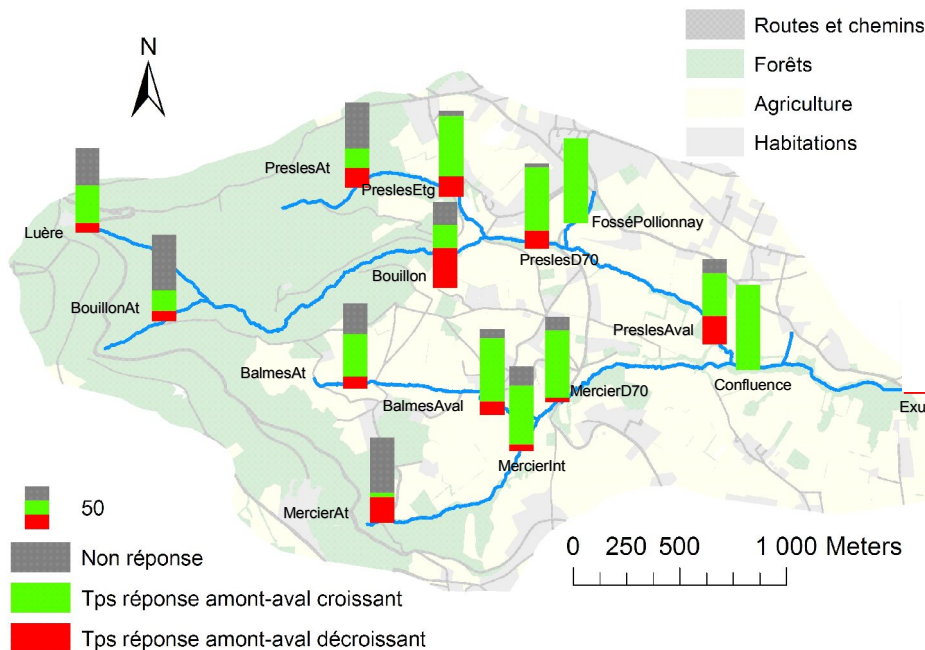
i) Les cheminements de l'eau ont été décrits à l'aide d'un modèle numérique de terrain (MNT) à haute résolution (1 m) issu d'un levé LiDAR (Light Detection and Ranging). Il a été montré que la microtopographie permet d'identifier des extensions préférentielles du réseau de drainage d'une part à partir des linéaires artificiels, avec un apport minimal de données externes, et d'autre part à partir des talwegs naturels en distinguant la présence ou l'absence d'un chenal d'écoulement, signe d'un ruissellement concentré. Les résultats montrent (Figure 3.11) qu'un seuil de surface petit (0.01 km<sup>2</sup>) pour l'extraction du réseau hydrographique à partir d'une méthode traditionnelle (D8) permet de bien identifier les brins artificiels. Un index de stabilité de l'extraction du réseau a été proposé en s'appuyant sur des simulations de Monte-Carlo qui bruitent le signal altitude issu du lidar. Pour un seuil de cet index compris entre 50% et 60%, on montre qu'on est capable d'identifier correctement les brins de réseau qualifiés de non chenalisés c'est-à-dire possédant une section en travers mal définie, donc peu propice à un écoulement concentré (Sarrazin et al., 2011)



**Figure 3.11** (a) Comparaison entre la distribution cumulée des longueurs de brins artificiels observés et extraits par la méthode D8 d'un MNT lidar à 1m de résolution pour deux seuils de surface seuil pour l'initiation du réseau hydrographique (Sarrazin et al., 2011). (b) Comparaison entre la distribution cumulée des longueurs de brins non-chenalisés observés et extraits d'un algorithme D8 pour différentes valeurs d'un index de stabilité variant de 20 à 70% (Sarrazin et al., 2011)

ii) Un dispositif de 18 capteurs limnimétriques a été mis en œuvre pour assurer un suivi permanent de la réponse hydrologique dans le réseau hydrographique. Cette observation « multi-locale » permet de mesurer l'évolution de la densité de drainage, de caractériser différentes formes de réponse hydrologique ainsi que différentes dynamiques de crue dans la topologie du réseau hydrographique. La Figure 3.12 illustre le résultat de l'analyse des réponses des limnimètres pour un ensemble d'une trentaine d'épisodes. On note que les zones à l'ouest du bassin, plutôt recouvertes de forêts, ont une tendance à répondre moins fréquemment que les stations drainant plutôt des surfaces agricoles. On note aussi une proportion importante de réponse retardée par rapport à une logique de propagation amont-aval (Sarrazin, 2012). Ces résultats confirment l'intérêt de la notion de connectivité hydrologique qui permet de décrire la manière dont des zones de production peuvent se connecter ou pas au réseau hydrographique. Ils montrent aussi que cette connectivité au réseau est variable dans le temps.

Les résultats des approches géomatiques et hydrologiques sur les extensions préférentielles du réseau de drainage sont globalement convergents. Ils permettent notamment de mieux comprendre les interrelations entre occupation du sol et processus hydrologiques au sein du bassin versant du Mercier. Ils valident l'intérêt du capteur LiDAR et d'un dispositif distribué souple et adaptable pour décrire et observer le réseau de drainage en limitant le recours au terrain. Enfin, à partir des connaissances acquises, des simulations hydrologiques à l'aide de courbes isochrones calculées sur la base des cheminements fournis par un MNT, constituent une ébauche pour tester l'intégration d'un schéma de drainage variable dans une fonction de transfert (Sarrazin, 2012).



*Figure 3.12: Synthèse de l'analyse des réponses des différents capteurs à partir d'une série d'une trentaine d'épisodes pluvieux. Répartition (%) des 3 modalités de propagation de crue observées sur 15 stations limnimétriques dans le réseau hydrographique du Mercier (Sarrazin, 2012).*

Le travail réalisé a montré l'intérêt de la combinaison des deux types d'information et la richesse de cette dernière pour progresser dans la compréhension des processus hydrologiques. Le dispositif de limnigraphes a cependant été assez lourd à maintenir. Une nouvelle génération de capteurs plus fiables pourrait permettre de limiter cet effort. Par ailleurs, en dépit d'un suivi de près de 3 ans, le nombre d'épisodes exploitables reste encore trop faible pour une analyse statistique robuste, ce qui plaiderait pour le maintien d'un tel dispositif sur une durée plus importante.

Mentionnons enfin que le dispositif mis en place sur le bassin du Mercier a été valorisé et complété dans le cadre d'une autre étude sur la cartographie du risque de ruissellement (Dehotin et Breil, 2011). Des capteurs supplémentaires (humidité de surface du sol, pièges à eau) ont été installés pour identifier la nature des ruissellements produits (de type refus d'infiltration ou surfaces saturées). L'analyse des résultats montre que les deux types de ruissellement sont présents sur le bassin, avec une prédominance du ruissellement par excès d'infiltration. Une instrumentation en différents points sur une pente a aussi confirmé une humidité du sol plus importante en bas de versant, cohérente avec une tendance à accumuler l'eau et à se saturer (de Lavenne, 2010 ; Dehotin et al., 2011)

#### *4.6. Synthèse et conclusions du WP1*

Les travaux réalisés dans le cadre du WP1 ont permis de collecter un ensemble riche de données à la fois cartographiques et hydrométéorologiques, documentant les bassins d'étude et utile à la modélisation tant pour la spécification des paramètres que pour la formalisation des processus hydrologiques importants. L'analyse des données de débits a permis à la fois de mieux comprendre le fonctionnement des bassins versants et les paramètres influents (état hydrique initial, distribution spatiale des zones imperméabilisées) et de dégager un certain nombre d'indicateurs pertinents pour quantifier l'impact de l'artificialisation sur le régime hydrologique des cours d'eau périurbains qui sont aussi pertinents pour évaluer la vulnérabilité de ces milieux. Ces résultats permettent de mieux définir le cahier des charges pour les outils utiles à la modélisation des bassins versants périurbains. De plus, ces indicateurs sont aussi utiles pour évaluer, sur l'ensemble du cycle hydrologique, les performances des modèles développés dans les WP2 et WP3.

L'évaluation de nouveaux dispositifs de mesures a montré leur intérêt pour la compréhension des processus actifs sur les bassins étudiés. La prospection géophysique fournit des informations pertinentes sur les profondeurs de sol et la nature des réservoirs où l'eau peut être stockée. Une cartographie plus détaillée de l'ensemble des bassins étudiés apporterait des informations tout à fait utiles à la modélisation et complémentaires des bases de données sol existantes qui ne documentent que les premiers mètres de sol. Les campagnes d'essais d'infiltration ont montré l'impact de l'occupation des sols ou du type de sol sur les propriétés hydrodynamiques des sols en surface. Cet aspect est souvent peu pris en compte dans les modélisations existantes, mais fournit une piste intéressante en terme de maillage/discrétisation pour la modélisation qui a été exploitée dans la suite des travaux présentés.

Enfin les travaux menés sur un petit bassin de quelques km<sup>2</sup> ont confirmé l'intérêt des données lidar très haute résolution pour la description des chemins de l'eau, mais cette source de données doit être exploitée en lien avec des observations de terrain si on veut correctement décrire la connectivité hydrologique. Un réseau dense de capteurs limnimétriques fournissant en continu des hauteurs d'eau de manière spatialisée apporte aussi des informations pertinentes pour la compréhension des processus de génération et propagation du

ruissellement. L'intégration dans la modélisation, des connaissances apportées par ce réseau, en combinaison du MNT lidar reste encore à construire, d'autant plus que les résultats obtenus questionnent les manières traditionnelles de représenter les processus hydrologiques. En effet, ils montrent l'intérêt de raisonner en terme de connectivité hydrologique entre zones de production et réseau, mais ces notions sont encore très peu utilisées en modélisation.

## **5. WP2 : Modélisation hydrologique détaillée de petits bassins versants en incluant les chemins de l'eau naturels et artificiels**

### *5.1. Rappel du contexte et des objectifs du WP2*

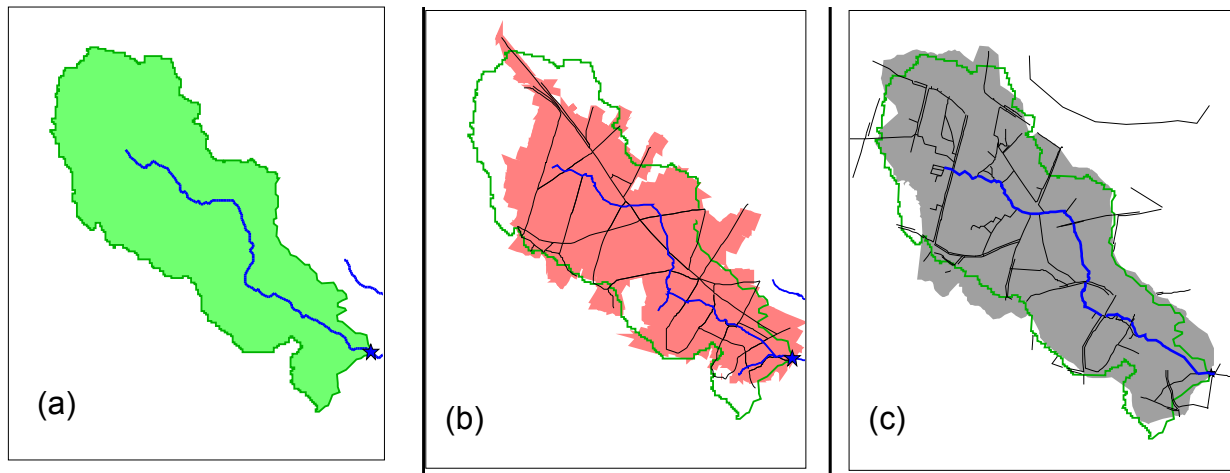
Dans ce Workpackage, l'objectif était de développer une modélisation détaillée des bassins versants périurbains, prenant explicitement en compte l'hétérogénéité des surfaces et les différents objets du paysage, en particulier les éléments susceptibles de modifier les chemins de l'eau. L'intérêt d'un tel outil est de pouvoir tester l'impact de différentes hypothèses de fonctionnement sur la réponse hydrologique et les composantes formant le débit (ruissellement de surface, de subsurface, infiltration dans les réseaux) ou l'origine de l'eau (zones agricoles, forêts ou zones urbaines). La représentation explicite d'éléments comme les haies ou les zones ripariennes permet aussi de mesurer leur impact sur les transferts d'eau. La mise en œuvre d'une telle modélisation nécessite une réflexion approfondie sur la manière de discrétiser l'espace, sur les propriétés des éléments identifiés (par exemple caractère perméable ou imperméable, nature du couvert végétal) ; mais aussi sur la manière de connecter les différents éléments entre eux (Tâche A). Les développements présentés dans cette partie ont donc concerné tout d'abord la discrétisation de l'espace et l'analyse des informations pertinentes pour l'hydrologie qui peuvent être extraites des banques de données urbaines (cadastre, réseaux d'assainissement, etc..) et des images très haute résolution qui donnent accès à l'occupation des sols et aux propriétés des surfaces.

La modélisation proposée (modèle PUMMA – PeriUrban Models for landscape Management) a été mise en œuvre dans une plateforme de modélisation hydrologique modulaire (plateforme LIQUID<sup>®</sup>, développée par le partenaire Hydrowide) qui permet i) de développer des modules représentant la réponse hydrologique des différents éléments du paysage avec un pas de temps adapté à la dynamique de chacun ; ii) de combiner ces modules via l'échange de variables ou de flux pour former un modèle de bassin versant ; iii) de gérer les couplages spatiaux et temporels entre tous ces modules. La construction du modèle PUMMA a nécessité des améliorations des concepts de la plateforme et le développement de nouveaux modules (Tâche B). Le défi avec le modèle PUMMA était particulièrement important compte tenu des différences de tailles entre objets représentatifs des parcelles urbaines et rurales et de leurs temps de réponse très différents. La modélisation devait aussi permettre de gérer différents réseaux (réseau naturel, réseau d'assainissement) connectés uniquement de manière épisodique (déversements au niveau des déversoirs d'orage). Les résultats obtenus montrent que la plateforme a été tout à fait capable de répondre à ces enjeux (Tâche C).



## 5.2. Tâche A : Dérivation des réseaux de drainage des bassins et caractérisation fine de l'occupation des sols (IRSTV, Cemagref, UMR EVS)

La modélisation hydrologique distribuée s'appuie sur une description détaillée des caractéristiques morphologiques des bassins versants. L'attention a été portée sur le réseau hydrographique des bassins périurbains d'une part, et sur l'occupation du sol d'autre part. Le réseau de drainage est le vecteur de l'écoulement généré par les surfaces naturelles ou urbaines; il est constitué des tronçons de rivières, des fossés et des réseaux d'assainissement artificiels (réseaux séparatifs eaux usées et pluviales ou réseaux unitaires). La détermination du réseau de drainage et sa sensibilité à la donnée géographique source a constitué un axe de travail sur les deux sites expérimentaux, avec dans les deux cas, un travail de terrain destiné à recenser les écoulements dans les fossés.



*Figure 4.13: Réseau de drainage et frontière du bassin versant de la Chézine amont déterminés avec les différentes approches (a) MNT, (b) OBJET et (c) TIN. L'exutoire de ce bassin est représenté avec une étoile, et la rivière principale est en bleu. La limite du bassin déterminé avec l'approche MNT est reportée sur chaque figure en vert (Rodriguez et al., 2011).*

Sur le bassin versant de la Chézine, trois stratégies de détermination du réseau ont été mises en œuvre; la première (MNT) est basée sur le traitement traditionnel de la topographie à travers les Modèles Numériques de Terrain (MNT); la seconde (OBJET) utilise les objets géographiques vectoriels issus des banques de données géographiques urbaines ou nationales (cadastre, réseau d'assainissement, réseau hydrographique BDCartage, topographie BDTopo<sup>®</sup>) (Rodriguez et al., 2003); la troisième (TIN) est basée sur une triangulation de Delaunay de la surface du sol, à partir de la topographie, et modifiée en fonction de contraintes anthropiques comme les haies, les fossés (Tanato, Bocher 2005). Cette dernière approche a été enrichie dans le cadre du projet AVuPUR pour intégrer les contraintes liées aux routes et aux réseaux d'assainissement (Bocher et Martin, 2009) et intégrés au SIG OrbisGIS (TANATO<sup>3</sup>).

<sup>3</sup> <http://geosysin.iict.ch/irstv-trac/wiki/research/avupur/tanato>

La comparaison des trois approches a montré que la délimitation du bassin versant était affectée de façon significative par l'approche utilisée, l'écart entre les surfaces des bassins déterminées par les méthodes est de 10 % pour le bassin périurbain de la Chézine (30 km<sup>2</sup>) et de 20% pour la partie rurale de ce bassin (5 km<sup>2</sup>). L'approche OBJET semble sous-estimer le bassin sur les parties rurales (Figure 4.13), en raison d'une discrétisation trop lâche des altitudes de la voirie (simplement représentée par les extrémités des segments reliant 2 carrefours du réseau routier). En revanche, l'impact des routes et des fossés n'est pas du tout pris en compte dans l'approche MNT, alors que l'approche TIN semble la plus appropriée pour leur prise en compte (Rodriguez et al., 2011).



*Figure 4.14: Détermination des sous bassins ruraux et urbains sur le bassin versant de la Chaudanne. Les zones pour lesquelles on indique un pourcentage d'écoulement <100% correspondent à des aires drainées en temps normal vers la station d'épuration par le réseau unitaire, mais qui débordent dans le cours d'eau principal en cas de débordement au niveau des déversoirs d'orage (Jankowsky et al., 2011a).*

Sur le bassin versant de l'Yzeron, la détermination du réseau de drainage est apparue plus problématique en raison du rôle des déversoirs d'orage du réseau d'assainissement unitaire. Dans ce cadre, une méthodologie de détermination du réseau de drainage et du bassin versant a été développée pour les bassins versants pour lesquels l'anthropisation est telle que les écoulements sont largement modifiés par rapport à des écoulements déterminés uniquement par la topographie (Figure 4.14). Cette méthodologie associe des traitements SIG pour exploiter les données géographiques (MNT, occupation du sol, réseau hydrographique naturel et réseaux d'assainissement) et un travail de terrain destiné à collecter des informations relatives aux fossés, aux rejets des réseaux d'eaux pluviales à la rivière et des observations spécifiques sur les frontières du bassin versant topographique (Jankowsky et al., 2010 ; 2011a).

La connaissance de l'occupation du sol est un élément clé de la représentation du fonctionnement hydrologique des bassins versants : la production du ruissellement est en effet fortement liée aux types de surfaces rencontrés sur la zone considérée (couverts forestiers, surfaces imperméabilisées). La forte variabilité des modes d'occupation en milieu périurbain nécessite de les cartographier à une échelle fine, adaptée aux outils de modélisation détaillés développés dans le cadre du projet (WP2 Tâche B, section 4.3). Dans le bassin versant de l'Yzeron, cette modélisation (PUMMA) (Jankowsky, 2011), présentée dans la section suivante, a été conduite sur deux sous bassins versants pilotes, le Mercier et la Chaudanne. Le maillage de base du modèle hydrologique est la parcelle cadastrale, ce qui a nécessité une cartographie de l'occupation du sol à grande échelle.

A cette échelle, la cartographie de l'occupation du sol est conduite à l'aide de l'imagerie aérienne de la BD-Ortho®IGN à la résolution de 0.50 m et le cadastre au format vectoriel. L'information sur l'occupation du sol est collectée sur la base du cadastre : la donnée cadastre est directement superposable à la couverture aérienne orthorectifiée et guide la délimitation des objets hydrologiques (parcelles, routes...). La méthode de cartographie repose sur une photo-interprétation manuelle.

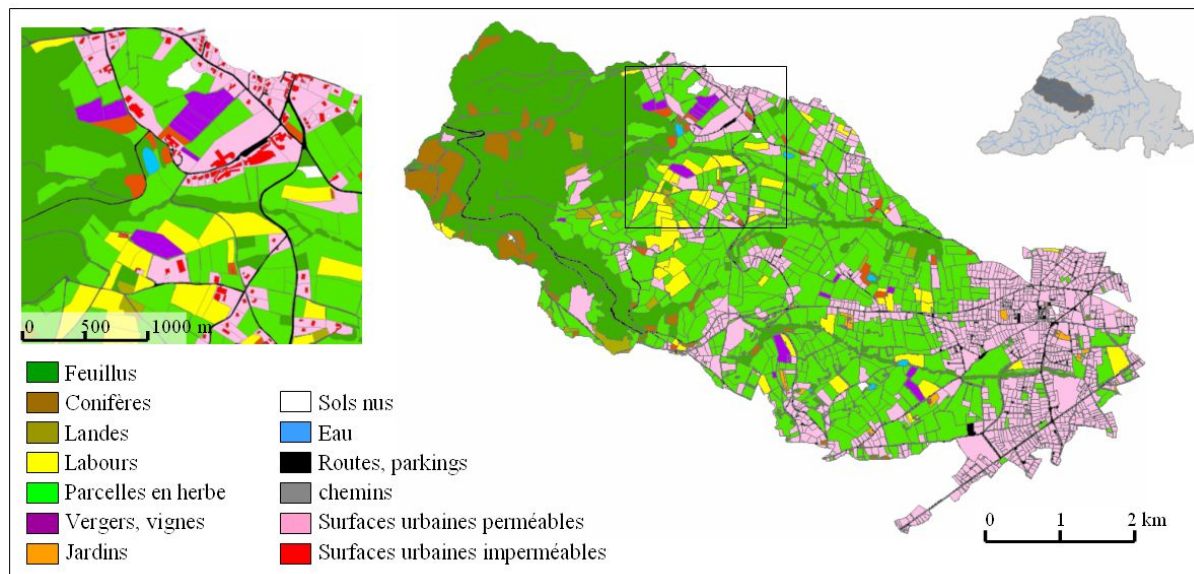


Figure 4.15: Cartographie de l'occupation du sol à l'échelle des sous-bassins versants du Mercier et de la Chaudanne à l'aide de la (BD-Ortho®IGN) et du cadastre (UMR EVS, 2010).

La nature des objets cartographiés varie entre les parcelles urbaines et les parcelles rurales. Dans les parcelles bâties, nous avons distingué deux types d'objets : les surfaces perméables (végétation, sols nus) et les surfaces imperméables (bâtiments, parkings, terrasses, routes). Dans les zones rurales, nous avons délimité et identifié les parcelles agricoles selon leur état de surface à la date d'enregistrement de l'image aérienne : en labour ou couvert de végétation herbacée ou végétation ligneuse (vergers, petits fruits). Trois types de végétation forestière ou ligneuse ont été cartographiés : les feuillus, les conifères et les landes (Figure 4.15).

Les acquis de la méthode de cartographie sont les suivants :

- La photographie aérienne présente une résolution adéquate pour une cartographie à cette échelle. Elle est compatible avec l'échelle du cadastre, malgré des problèmes de mauvais recalage géographique localement entre les deux données.

- La méthode développée à l'aide d'une digitalisation manuelle offre l'avantage de pouvoir identifier de nombreux objets grâce à l'analyse visuelle, de mettre en évidence l'hétérogénéité et les discontinuités de l'occupation du sol. Mais elle est très coûteuse en temps de travail et ne peut être reproduite sur des superficies étendues.
- La reconnaissance visuelle des surfaces perméables des surfaces imperméables n'est pas toujours aisée en raison de couleurs et textures très proches entre les divers matériaux et toutes les informations utiles à la modélisation hydrologique n'ont pu être cartographiées car non visibles sur image aérienne (fossés, réseaux souterrains, buses).
- L'intégration de l'information « occupation du sol » sous forme vectorielle dans le modèle hydrologique, pose des contraintes qu'il convient de prendre en compte lors de la digitalisation (pas de superposition ni emboîtement entre objets, taille minimale d'objets à distinguer pour ne pas allonger démesurément le temps de calcul du modèle...) (Branger et al., 2011a)
- L'utilisation de cette cartographie dans les outils de modélisation hydrologique a également montré certaines limites pour les surfaces imperméabilisées, liées à l'évolution actuelle des pratiques de gestion des eaux pluviales : de plus en plus de surfaces imperméabilisées sont déconnectées du réseau d'assainissement pour favoriser la rétention et l'infiltration du ruissellement produit par ces surfaces, information non détectable par des images aériennes.

Ce travail a permis de confronter les informations nécessaires dans les modèles hydrologiques « modernes » et les possibilités offertes par le traitement des données géographiques, qu'elles soient issues des collectivités locales ou nationales (données vectorielles des banques de données urbaines ou données IGN) ou issues de la télédétection (photographies aériennes). La haute résolution spatiale permet de reconnaître au sein des surfaces artificialisées, les surfaces imperméables et perméables et de discriminer des couverts végétaux. Toutefois, la reconnaissance sur le terrain reste un passage indispensable pour réduire l'incertitude sur la représentation de l'hydrologie dans les outils de simulation, en particulier vis-à-vis de la connaissance des fossés ruraux et de la connexion des surfaces imperméabilisées au réseau d'assainissement.

### *5.3. Tâche B : Modélisation des transferts d'eau (Hydrowide, Cemagref,IRSTV)*

La modélisation détaillée des transferts d'eau sur les petits bassins versants périurbains s'est appuyée sur des travaux précédents réalisés en milieu rural (Branger et al., 2008) et capitalisés autour de la plate-forme de modélisation hydrologique LIQUID® (Viallet et al, 2006 ; Branger et al., 2010). Il s'agit du modèle PUMMA (PeriUrban Model for landscape Management), développé dans le cadre de la thèse de S. Jankowfsky (Jankowfsky et al., 2011b; Jankowfsky, 2011). Le modèle PUMMA s'appuie sur un maillage irrégulier en HRUs (Hydrological Response Units) dans les zones rurales et en UHE (Urban Hydrological Elements) en zone urbanisée, de manière à tenir compte explicitement des éléments du paysage importants pour l'hydrologie (occupation des sols et réseaux de drainage notamment). Pour la prise en compte explicite des objets et aménagements urbains, plusieurs nouveaux modules ont été intégrés à la plate-forme LIQUID® ou développés (voir Figure 4.16).

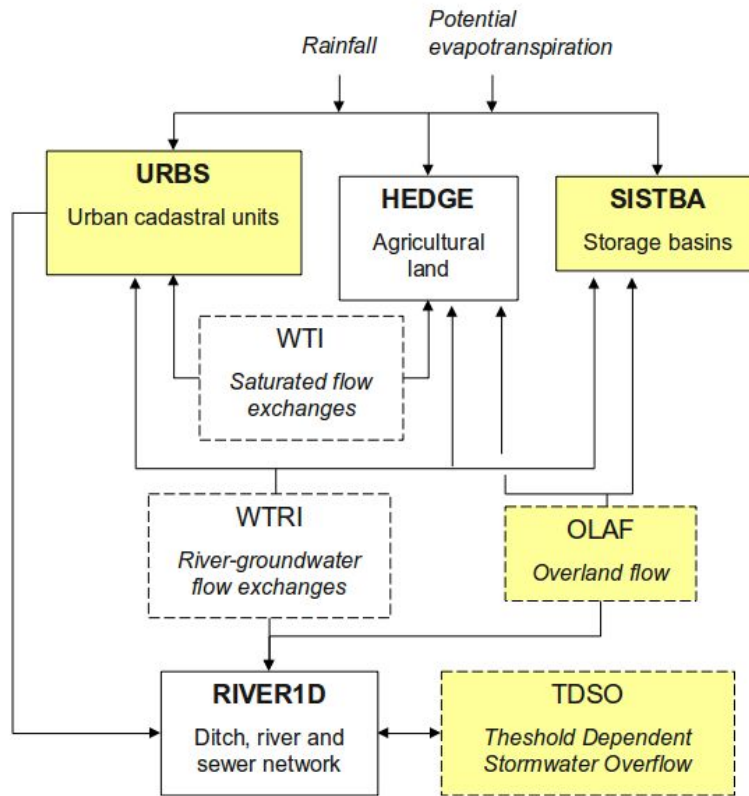


Figure 4.16: Schéma conceptuel du modèle PUMMA représentant les modules qui constituent le modèle et leurs couplages : les modules en jaune ont été spécifiquement développés pour PUMMA. Les modules encadrés en traits pleins correspondent à des modules de processus; alors que les modules encadrés en pointillés sont des modules d'échanges de flux entre modules de processus (Jankowfsky, 2011).

Ainsi la partie production du modèle URBS (Rodriguez et al., 2008), représentant le fonctionnement d'un UHE, c'est-à-dire la parcelle cadastrale urbaine en distinguant les zones de bâti, jardin, et voirie, a été intégrée à la plate-forme LIQUID<sup>®</sup> (Figure 4.17).

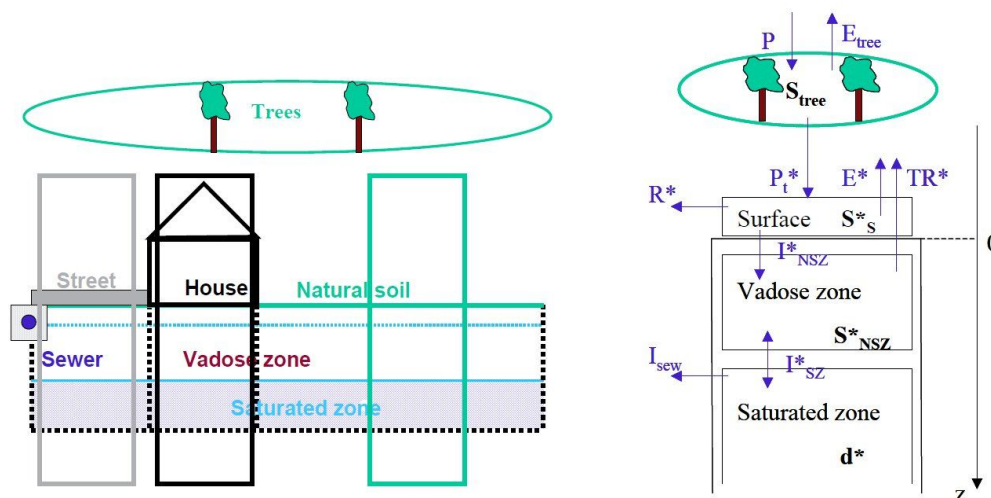


Figure 4.17: Schéma de principe du module de transferts d'eau en zone urbaine URBS, d'après Rodriguez et al. (2008)

Des modules ont également été développés pour représenter d'autres objets typiques de l'environnement urbain, tels que les déversoirs d'orage (points de contact entre le réseau d'assainissement et le réseau hydrographique naturel) et les bassins de rétention, souvent placés à l'exutoire des réseaux d'assainissement pluvial (voir Figure 4.18).

En zone rurale et sur les zones naturelles des UHE, le module OLAF permet la transformation du refus d'infiltration en ruissellement de surface et son routage de proche en proche selon la pente topographique jusqu'au réseau hydrographique.

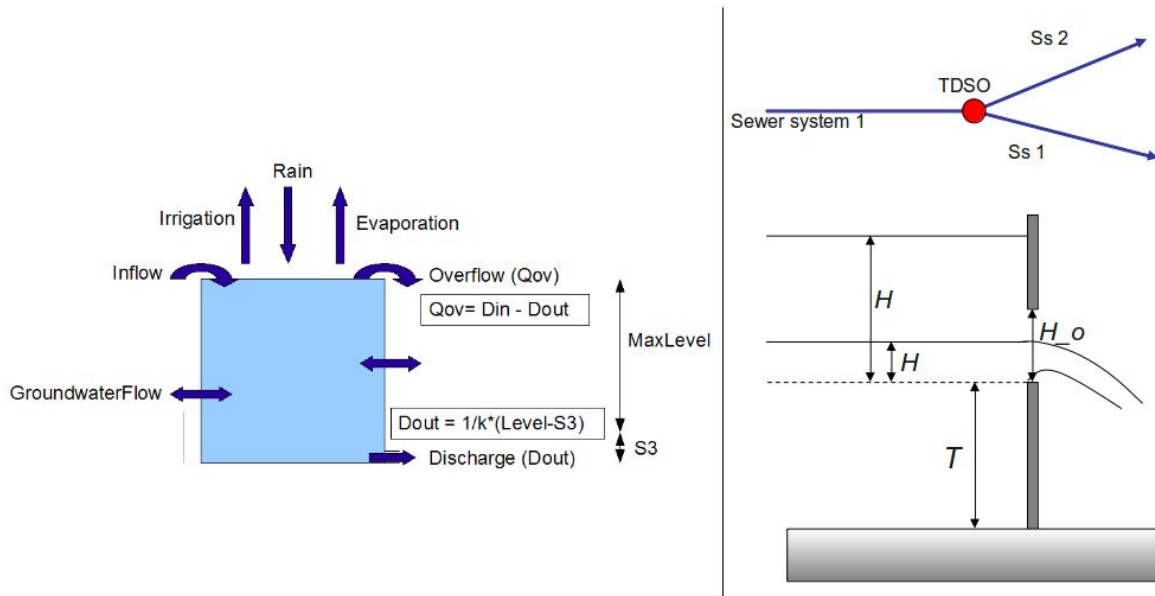


Figure 4.18: Schémas de principe de deux modules spécifiquement développés pour PUMMA : module de bassin de rétention SISTBA (gauche) et module de déversoir d'orage TDSO (droite) (Jankowfsky, 2011).

En matière de routage des flux, PUMMA permet de représenter à la fois le réseau naturel et les réseaux d'assainissement, ainsi que leurs points d'interaction via les déversoirs d'orage, ce qui en fait un modèle multi-exutoires. Le chevelu du réseau est basé sur les données SIG et extrapolé pour relier chaque UHE au brin de réseau le plus proche (WP2 Tâche A, section 4.2).

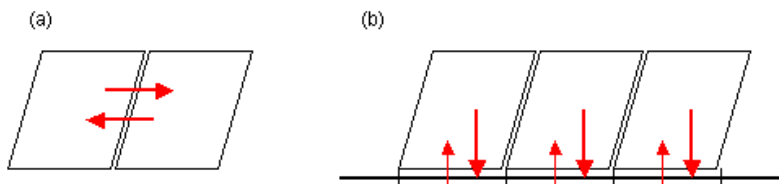


Figure 4.19: Topologies entre les différents éléments du paysage prises en compte par LIQUID®. (a) Connexions bidirectionnelles entre polygones. (b) Connexions entre polygones et un brin de linéaire.

En milieu rural, on représente les processus d'infiltration verticale et d'évapotranspiration sur chaque HRU, et le transfert des flux latéraux jusqu'au réseau hydrographique se fait de proche en proche en subsurface et en surface, avec une modélisation par la loi de Darcy dans le

premier cas (interfaces WTI/WTRI) et en suivant la formule du Manning dans le second (interfaces OLAF).

En termes informatiques, la plate-forme LIQUID® a évolué pour permettre de prendre en compte de nouvelles topologies (connexions spatiales entre modules, voir Figure 4.19) et garantir des performances acceptables sur le cas d'application visé. Le développement de PUMMA s'est également accompagné de développements importants de prétraitements des données géographiques pour la préparation automatique du maillage du modèle et des connexions spatiales entre modules (Paillé, 2010 ; Brossard, 2011 ; Sanzana, 2011 ; Jankowsky, 2011).

#### *5.4. Tâche C : Application et vérification de l'approche de modélisation (Cemagref, Hydrowide)*

La modélisation PUMMA a été appliquée sur le bassin péri-urbain de la Chaudanne (Jankowsky et al., 2011b). La Figure 4.20 présente le maillage du modèle obtenu pour le bassin de la Chaudanne à la station du Pont de la Barge.

Le modèle a été paramétré autant que faire se peut à partir de données de terrain et/ou cartographiques, récupérées dans le cadre du projet. Un certain nombre de paramètres ayant trait aux caractéristiques physiques (altitude, pente) ou à l'occupation des sols (% de zones bâties, naturelles, en voirie sur les UHE) ont été calculés de manière automatique grâce aux prétraitements développés dans la tâche précédente en s'appuyant sur la cartographie détaillée de l'occupation des sols présentée dans la section 4.2 (WP2 Tâche A). De plus, les données issues des essais d'infiltration réalisés sur le bassin versant voisin du Mercier ont permis de paramétrer les propriétés des couches supérieures du sol (voir WP1, Tâche C, section 3.4). Des reconnaissances de terrain spécifiques ont été menées pour la paramétrisation du réseau hydrographique du modèle (largeur du lit, estimation de la rugosité).

La démarche de modélisation a consisté à comparer les résultats obtenus aux données mesurées et aux connaissances déjà capitalisées sur le fonctionnement hydrologique du bassin, sans réaliser de calage de façon à conserver le lien direct entre les données de terrain et les résultats de la modélisation. On n'a donc pas cherché à « coller » le plus possible aux hydrogrammes mesurés. Ainsi le modèle PUMMA a pu être utilisé comme outil de formalisation et test de connaissances sur les principaux processus hydrologiques en œuvre sur les petits bassins versants périurbains.

La performance raisonnable obtenue en temps de calcul (6 heures de calcul pour simuler une période de 3 ans sur un ordinateur de bureau) a permis de réaliser plusieurs simulations, testant notamment la sensibilité des paramètres et l'impact de plusieurs hypothèses sur le fonctionnement hydrologique du bassin, aussi bien sur de longues et courtes échelles temporelles (année ; événement pluvieux). Quelques résultats emblématiques sont représentés Figure 4.21 et Figure 4.22.

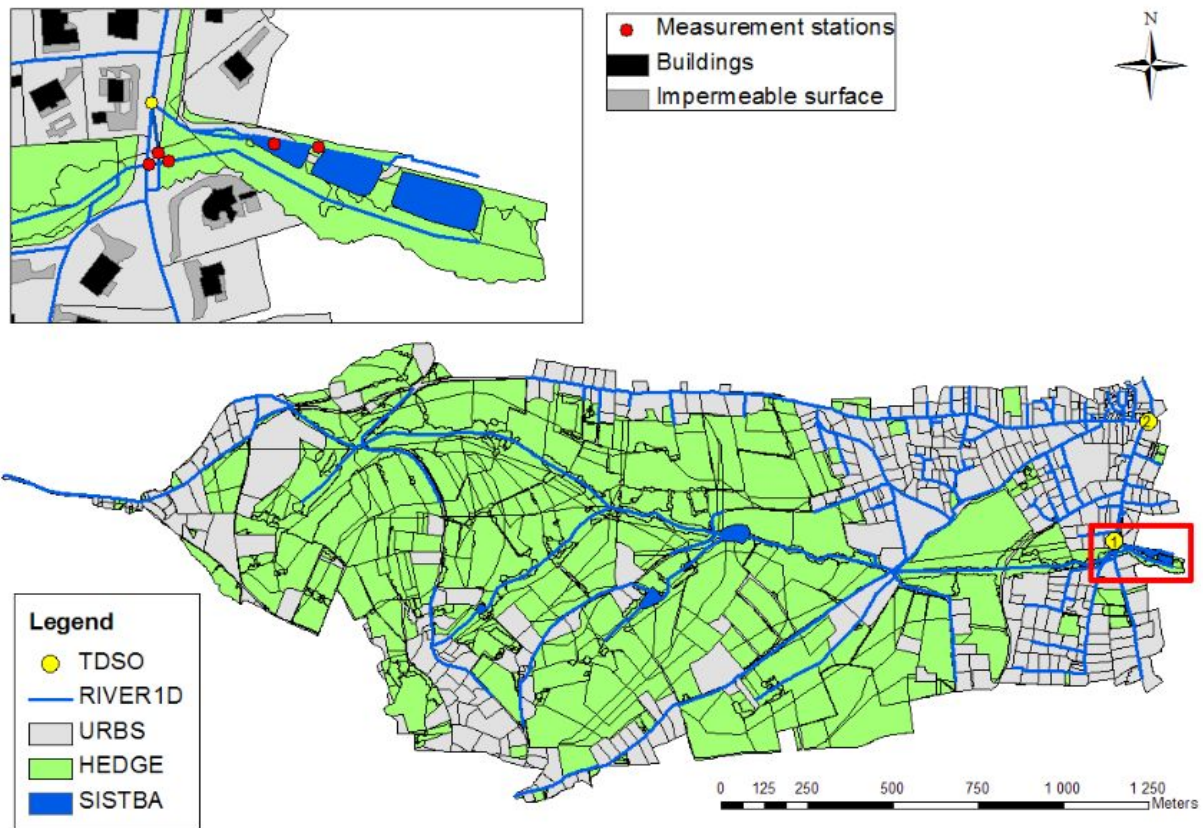


Figure 4.20: Application du modèle PUMMA sur le bassin versant de la Chaudanne au Pont de la Barge (2.7 km<sup>2</sup>). Le maillage du modèle est constitué de 1910 unités de modélisation d'une surface moyenne de 1400 m<sup>2</sup> environ, (Jankowsky et al., 2011b).

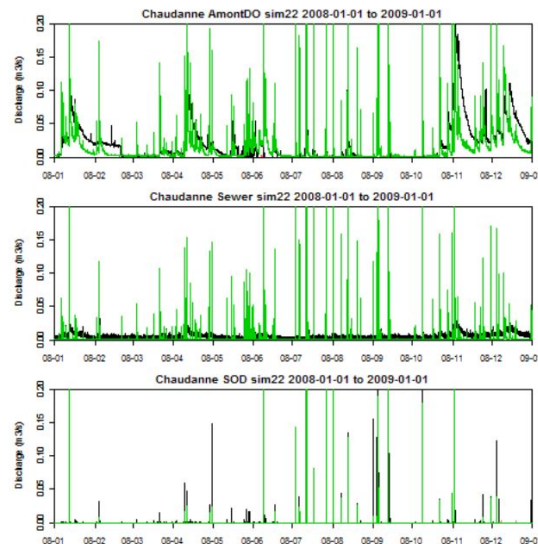


Figure 4.21: Débits mesurés et simulés pour l'année 2008 pour les stations du Pont de la Barge (haut), dans le réseau d'assainissement (milieu) et dans le déversoir d'orage (bas), (Jankowsky et al., 2011b).

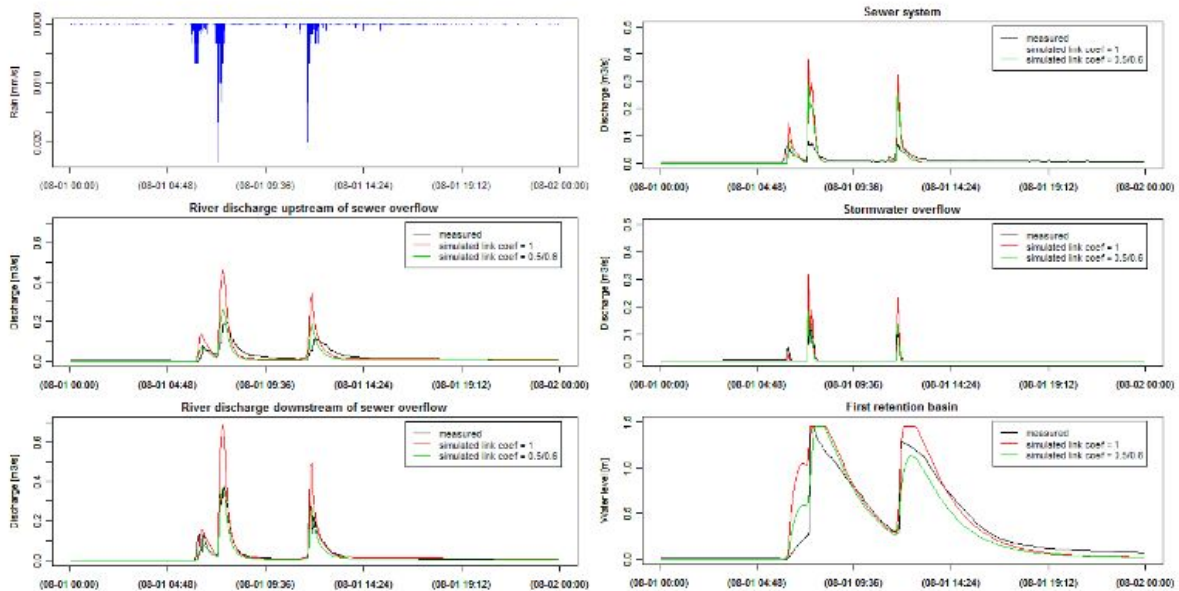
La Figure 4.21 présente les débits simulés et mesurés à trois stations « exutoire » du bassin, dans le cours d'eau, le réseau d'assainissement et un déversoir d'orage, pour la paramétrisation par défaut du bassin. On peut observer que, sans aucun calage, le modèle est capable de



reproduire la dynamique saisonnière observée (assèchement de la rivière en été, débit de base important et récessions lentes en hiver), ainsi que la dynamique temporelle des événements (déclenchement du déversoir d'orage). Par contre, le modèle a tendance à surestimer les valeurs de débits maximaux, notamment dans le cours d'eau et le réseau d'assainissement.

La Figure 4.22 présente les résultats d'un des tests de sensibilité sur un évènement pluvieux d'été. Elle montre qu'avec une valeur inférieure à 1 du LinkCoefficient –qui traduit le degré de connexion entre le ruissellement issu des parcelles urbaines et le réseau- sur les parcelles urbaines, on observe une baisse du débit de pointe simulé, essentiellement dans le cours d'eau. Les résultats du modèle se rapprochent alors plus des mesures. Cela semble indiquer que la connectivité au réseau hydrographique des zones bâtie et en voirie est partielle, surtout sur la partie amont du bassin où l'habitat dispersé a été représenté par des UHE URBS. La localisation des parcelles bâties (en agglomération / hors agglomération) semble donc être un facteur important pour la modélisation.

D'autres tests de sensibilité ont porté sur la profondeur des sols, la conductivité hydraulique d'interface pour les flux latéraux qui ont aussi un impact certain sur les hydrogrammes simulés (Jankowsky, 2011).



*Figure 4.22: Sensibilité du paramètre LinkCoefficient du module URBS (connectivité au réseau du ruissellement issu des parties bâtie et en voirie) pour l'évènement du 1<sup>er</sup> août 2008 (Jankowsky et al., 2011b).*

### 5.5. Synthèse et conclusions du WP2

Ce travail a tout d'abord permis de confronter les informations nécessaires dans les modèles hydrologiques « modernes » et les possibilités offertes par le traitement des données géographiques, qu'elles soient issues des collectivités locales ou nationales (données vectorielles des banques de données urbaines ou données IGN) ou issues de la télédétection (photographies aériennes ou images satellites). La haute résolution spatiale et spectrale permet d'améliorer la discrimination des surfaces artificialisées (voirie, bâti) et la connaissance des couverts végétaux. Toutefois, la reconnaissance sur le terrain reste un passage indispensable pour réduire l'incertitude sur la représentation de l'hydrologie dans les outils de simulation,

en particulier vis-à-vis de la connaissance des fossés ruraux et de la connexion des surfaces imperméabilisées au réseau d'assainissement.

Au niveau de la modélisation, le développement et l'application du modèle PUMMA ont permis de valider la pertinence de l'approche de modélisation détaillée envisagée. Notamment, le travail a montré la pertinence de l'approche mixte urbain / rurale et du découpage spatial irrégulier en HRUs / UHE, ainsi que l'intérêt de travailler dans une plateforme de modélisation telle que LIQUID®.

D'un point de vue méthodologique, les principaux résultats montrent l'importance des connexions / non-connexions au réseau des surfaces de production des écoulements. La détermination des réseaux de drainage naturel et artificiel (Tâche A) est donc particulièrement importante, de même que les traitements SIG indispensables à la détermination du maillage et à la paramétrisation des modèles hydrologiques détaillés.

Au niveau des résultats sur les processus hydrologiques, l'approche choisie de non calage et analyse de sensibilité s'est également trouvée validée. On peut d'ores et déjà tirer des conclusions sur le fonctionnement du bassin de la Chaudanne : ainsi, il s'agit d'un bassin de faible capacité de stockage et à dynamique rapide (subsurface= sols peu profonds et conductivités à saturation élevées). Les processus de ruissellement, représentés pour le moment par surface saturée dans le modèle, se sont révélés limitants pour un bassin qui fonctionne aussi en ruissellement hortonien. Mais un autre module, déjà présent dans la plateforme permettrait de simuler à la fois ces deux types de ruissellement. Il n'a pas pu être utilisé dans le cadre du projet pour des raisons de limitation en temps. Pour les zones artificialisées comprenant bâti et voirie, on a pu mettre en évidence des fonctionnements différents hors agglomération et en agglomération, ce qui montre là encore l'importance de la connectivité au réseau.

## **6. WP3 : Evaluation et amélioration de représentations simplifiées des bassins périurbains**

### *6.1. Rappel du contexte et des objectifs du WP3*

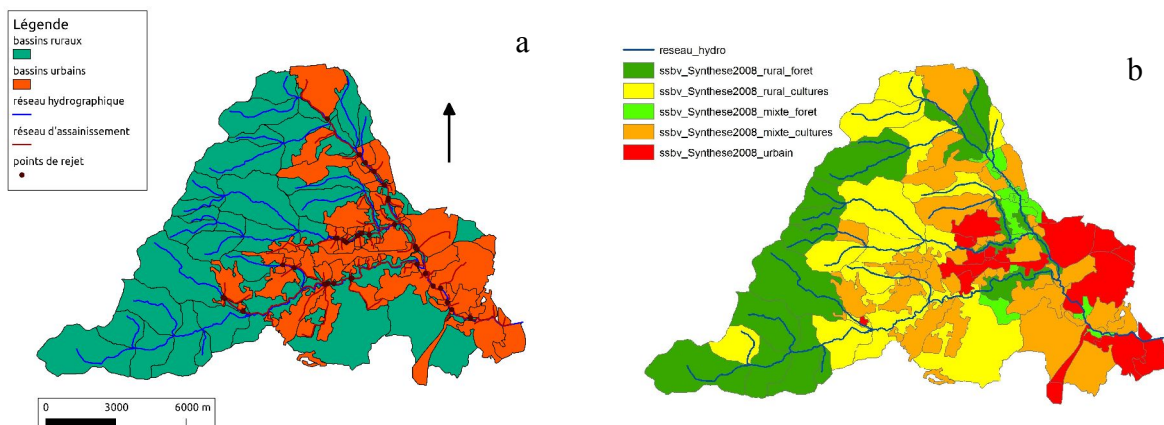
Les bassins versants périurbains sont des milieux complexes avec une juxtaposition de zones plus ou moins rurales et de zones plus ou moins urbanisées, qui plus est en évolution rapide. Hydrologiquement, ces surfaces réagissent différemment. De plus, en milieu urbain, les eaux de ruissellement sont récoltées et transférées via le réseau d'assainissement. Le milieu est donc complexe mais de nombreuses sources de données sont maintenant disponibles pour le décrire. On peut mentionner des bases de données nationales ou internationales (ECOCLIMAP, Corine Land Cover, BDTOPO®IGN), les banques de données urbaines des grandes villes. Différentes techniques d'imagerie peuvent aussi être utilisées (satellite, aéroportée, ...).

En modélisation hydrologique, deux communautés distinctes se sont naturellement formées : urbaine et rurale. La modélisation hydrologique des bassins versants périurbains nécessite de prendre en compte les caractéristiques des deux milieux. Ainsi, pour reproduire le comportement hydrologique d'un bassin versant périurbain, un modèle hydrologique doit tout d'abord représenter la variabilité des occupations du sol avec des couverts naturels divers et des surfaces imperméabilisées. Il doit aussi prendre en compte le réseau hydrographique mixte constitué des cours d'eau naturels et du réseau d'assainissement. Enfin, le sol doit être aussi bien représenté en milieu naturel qu'en milieu urbain (Berthier et al., 2004). Le développement d'un modèle hydrologique adapté au milieu périurbain peut se faire de

différentes façons. Nous avons illustré dans le WP2 le développement de nouveaux outils, adaptés à l'étude des processus sur de petits bassins versants de quelques km<sup>2</sup>. Mais cette approche n'est plus possible pour des bassins de quelques dizaines à quelques centaines de km<sup>2</sup>. Pour cette gamme de bassins versants, trois approches ont été explorées dans le WP3 du projet. Il s'agit d'une part de développer un tout nouveau modèle adapté aux bassins périurbains. D'autre part, on peut aussi essayer d'adapter des modèles existants à ce milieu, soit en ajoutant la prise en compte des surfaces urbaines à un modèle hydrologique des rivières « naturelles », soit en ajoutant la prise en compte du sol et de la végétation pour un modèle hydrologique initialement dédié au milieu urbain. Ces trois approches ont été explorées dans ce WP (Tâches B et C). Une modélisation des débits de crue, à base purement statistique a aussi été proposée. En parallèle, l'exploitation de la cartographie de l'occupation du sol à partir d'images à très haute résolution, pour la caractérisation de certains des paramètres nécessaires à ces modélisations hydrologiques, a été testée et évaluée (Tâche A).

## 6.2. Tâche A : Définition et caractérisation des unités de modélisation (Cemagref, UMR EVS)

### Détermination du maillage hydrologique



*Figure 5.23: a) Délimitation en sous-bassins sur l'Yzeron en distinguant les sous-bassins ruraux (drainés par le réseau hydrographique) et urbains (drainés par le réseau d'assainissement). Les points de rejets sont les points de contact entre le réseau d'assainissement et le réseau naturel (déversoirs d'orage). b) Caractérisation simplifiée de l'occupation du sol sur les sous-bassins de l'Yzeron pour la carte « Synthèse 2008 ».*

Sur le bassin versant de l'Yzeron, les unités de modélisation choisies pour la modélisation simplifiée ont été les sous-bassins. La difficulté spécifique aux bassins périurbains est la présence de réseaux artificiels qui drainent une partie des eaux pluviales et donc créent des sous-bassins indépendamment de la topographie. La méthodologie développée dans le projet (Dehotin, 2009b) a consisté à juxtaposer des sous-bassins dits « ruraux » c'est à dire drainés par le réseau hydrographique naturel selon la topographie, et les sous-bassins « urbains » drainés par le réseau d'assainissement (voir Figure 5.23a). Pour cela les sous-bassins ruraux ont été délimités à l'aide du modèle numérique de terrain et d'une carte du linéaire du réseau hydrographique simplifié (BD Carthage). Les bassins urbains ont été digitalisés manuellement à l'aide des plans des principaux collecteurs des réseaux d'assainissement et des points de rejet, et des photographies aériennes. Les deux couches ont ensuite été fusionnées pour obtenir, après nettoyage topologique, une seule couche de sous-bassins mixtes.

La méthodologie de paramétrisation du modèle hydrologique à l'échelle de ces unités de modélisation a consisté à prendre des valeurs moyennées sur les surfaces (typiquement pente, altitude etc). Un travail plus approfondi a été réalisé pour les données plus spécifiques, et notamment pour les cartes d'occupation des sols. Pour ces dernières, le pourcentage de chaque classe d'occupation des sols définie (dépendant des cartes) a été calculé sur chaque sous-bassin. Puis, un regroupement de ces classes a été réalisé pour n'obtenir que 3 classes principales : urbain, cultures et forêt. Les sous-bassins ont ensuite été reclassés selon leurs occupations du sol dominantes (Labbas, 2011). Au total on aboutit à 5 classes (voir Figure 5.23b).

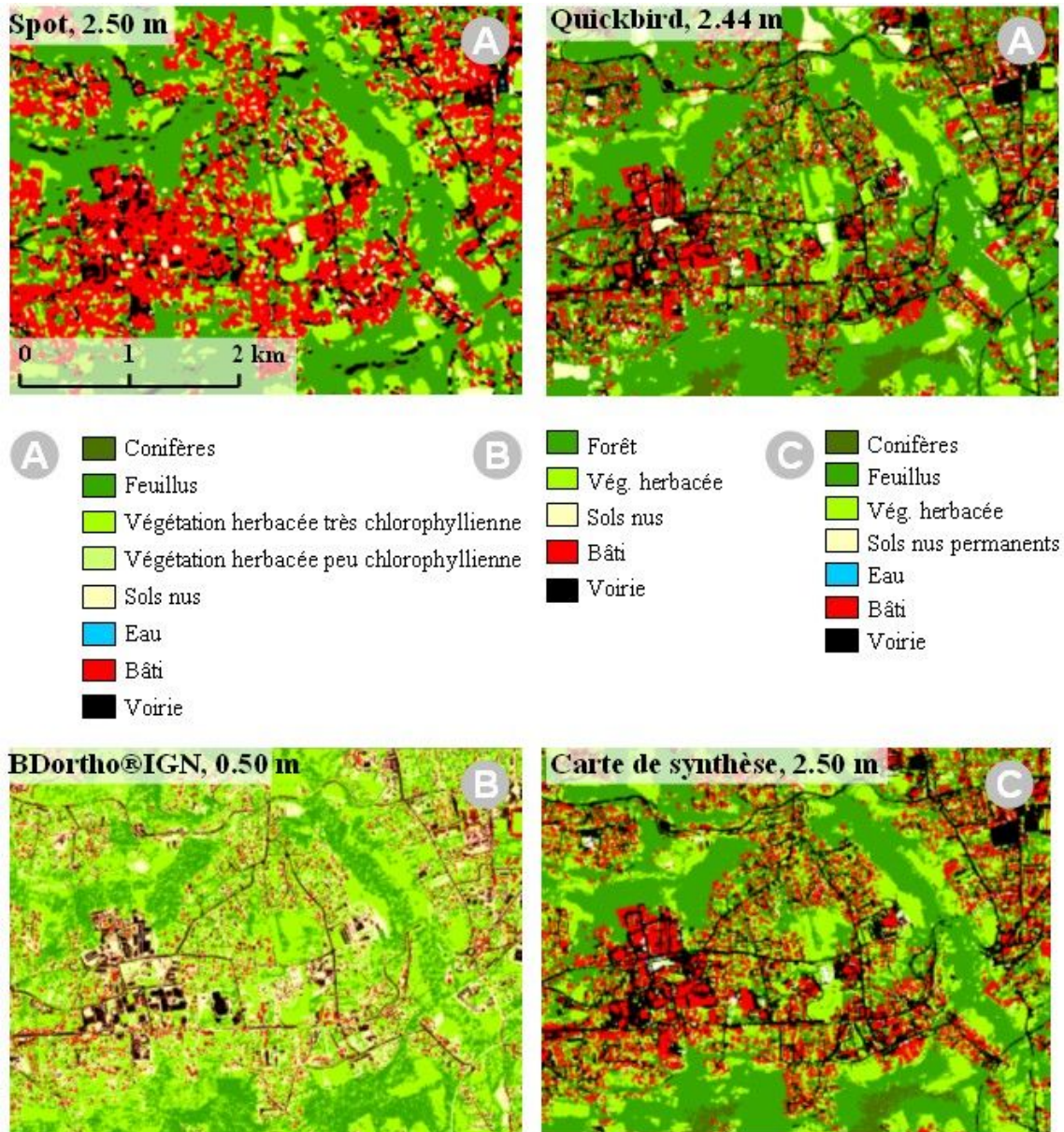
### Cartographie de l'occupation des sols et détermination de grandeurs utiles à la modélisation hydrologique

La caractérisation de l'occupation du sol dominante (urbain, cultures et forêt) des unités de modélisation sur l'ensemble du bassin versant, telle qu'elle est restituée ci-dessus (Figure 5.23b), est issue d'un travail de cartographie de l'occupation du sol à grande échelle. L'objectif initial était de déterminer le type d'images à très haute résolution le plus approprié pour restituer la diversité et la fragmentation de l'occupation du sol à cette échelle. Nous avons sélectionné trois images optiques à très haute résolution, à partir desquelles nous avons exploré différentes méthodes de traitements d'image. On distingue deux familles de classification en télédétection : l'approche pixellaire (AP) qui opère sur le pixel et l'approche orientée objet (AOO) qui classe des groupes connexes de pixels issus d'une segmentation. Nous avons confronté ces deux méthodes à l'aide de logiciels différents sur les 3 images acquises (Tableau 5.1, Figure 5.24).

*Tableau 5.1: Caractéristiques des images optiques THR et méthodes et logiciels de traitements d'image employés*

	<b>BDortho® IGN</b>	<b>Quickbird</b>	<b>Spot</b>
Type d'image	Aérienne	Satellite	Satellite
Résolution en mètre	0.50	2.44	2.50
Date d'enregistrement	5/05/2008	31/08/2008	22/08/2008
Information spectrale	Visible	Visible et proche infrarouge	Visible et proche infrarouge
Méthode de classification	Approche orientée objet	Approche orientée objet	Approche pixellaire
Logiciel	Matlab	Definiens Developer	ENVI

L'information spectrale des images traitées à l'aide des méthodes semi-automatisées apporte une information sur les caractéristiques physiques des surfaces (espèces dominantes de la végétation, biomasse chlorophyllienne, surfaces minérales, eau, surfaces bâties ...) auxquelles on peut associer directement des propriétés pertinentes pour l'hydrologie.

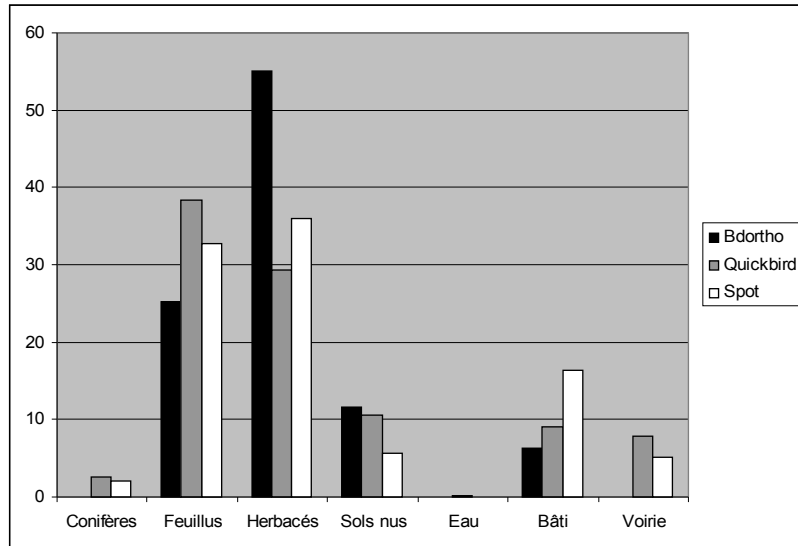


*Figure 5.24: Cartes d'occupation du sol extraites par traitement semi-automatisé à partir de l'image aérienne de la BD-Ortho®IGN (0.50 m), des images satellites Quickbird (2.44 m) et Spot (2.50 m) et carte de synthèse (d'après Jacqueminet et al., 2011b)*

L'observation visuelle des cartes réalisées (Figure 5.24) et le calcul du pourcentage de pixels affectés à chaque classe pour chaque classification (Figure 5.25) montrent des différences dans la restitution de l'occupation du sol selon l'image traitée. Plusieurs paramètres interviennent :

- la richesse de l'information spectrale de base qui détermine les possibilités de discrimination des types d'occupation du sol. De la BDortho® IGN, dont l'information est limitée au visible, nous n'avons pu extraire que 5 types d'occupation du sol alors que 8 types ont été distingués à partir des images satellites comportant une information dans le visible et le proche infrarouge (Figure 5.24) ;
- la date d'enregistrement de l'image joue un rôle important sur l'état du couvert végétal et les possibilités de reconnaissance de différents types de couverts végétaux. Cette date influe

fortement sur la représentation des sols nus qui correspondent en grande partie aux parcelles agricoles en labour ;  
 enfin, selon la méthode de classification employée, les surfaces artificialisées, notamment, apparaissent plus ou moins étendues (Figure 5.24). L'approche orientée objet qui prend en compte les caractéristiques morphologiques des objets s'avère plus appropriée pour cartographier l'occupation du sol fragmentée des zones périurbaines.



*Figure 5.25: Pourcentages de pixels classés par type d'occupation du sol sur les trois cartes extraites de la BD-Ortho®IGN du 5/05/2008, de l'image satellite Quickbird du 31/08/2008 et de l'image satellite Spot du 22/09/2008, (d'après Jacqueminet et al., 2011b).*

Afin de valider l'information apportée par chacune des trois cartes, nous avons réalisé une carte de synthèse qui combine les trois classifications (Figure 5.24). Cette carte a servi de base à la caractérisation de l'occupation du sol dominante des sous bassins versants (Figure 5.23b). Cette cartographie multiple à l'aide de divers capteurs et méthodes ouvre la perspective de pouvoir évaluer l'impact des différentes formes de restitutions cartographiques de l'occupation du sol dans les procédures de modélisation hydrologique. Le calcul d'un indice : l'imperméabilisation des surfaces, en offre un premier aperçu (Figure 5.26). Les types d'occupation du sol ont été classés en deux catégories : les surfaces perméables et les surfaces imperméables. Le pourcentage de surfaces imperméables a été mesuré pour chaque sous bassin versant. D'une carte à l'autre, le pourcentage de surfaces imperméables par sous bassin versant varie (Figure 5.26). Si les pourcentages calculés à partir de la carte de synthèse sont très proches de ceux calculés à partir des classifications extraites des images satellites (Spot et QuickBird) quasi semblables en résolution spatiale et richesse spectrale ; ils sont très éloignés de ceux calculés à partir de la classification extraite de la BD-Ortho®IGN. Les taux les plus importants, pour cette dernière, ne dépassent pas les 25% pour les sous bassins les plus urbanisés. La faible représentativité des surfaces imperméables sur la carte extraite de la BD-Ortho®IGN s'explique par la très haute résolution spatiale qui contribue à une restitution plus précise et moins étendue des surfaces bâties.

Cette variation des pourcentages de surfaces imperméables par sous bassin versant d'une carte à l'autre impose une grande prudence dans leur interprétation en terme de valeurs absolues d'une part. D'autre part, l'intégration de ces taux d'imperméabilité dans les modèles

hydrologiques impose une utilisation prudente de ces différentes cartes et peut conduire à une calibration adaptée selon le type de carte utilisée.

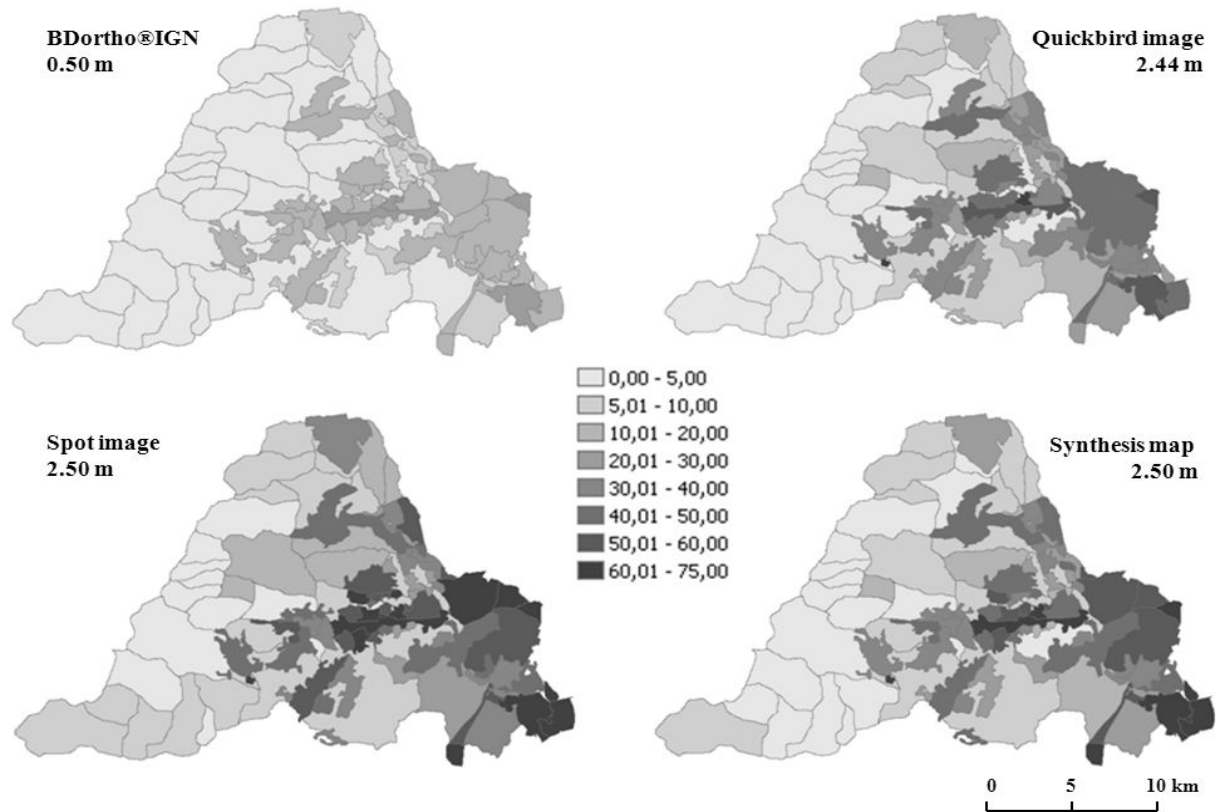


Figure 5.26: Taux d'imperméabilisation des surfaces en pourcentage par sous bassin versant à partir des trois cartes d'occupation du sol extraites de la BD-Ortho@IGN, de l'image satellite Quickbird et de l'image satellite Spot et de la carte de synthèse des trois classifications (Jacqueminet et al., 2011b)

### 6.3. Tâche B : Développement d'approches simplifiées pour les bassins plus grands (IRSTV, INSAVALOR, Cemagref)

Quatre approches ont été développées : le développement d'un nouveau modèle hydrologique adapté au milieu périurbain, l'adaptation d'un modèle hydrologique dédié à l'origine aux bassins versants urbains et l'adaptation de deux modèles hydrologiques dédiés à l'origine aux bassins « naturels ». L'adaptation d'un modèle statistique des quantiles de crue (QdF) aux bassins périurbains a aussi été proposée.

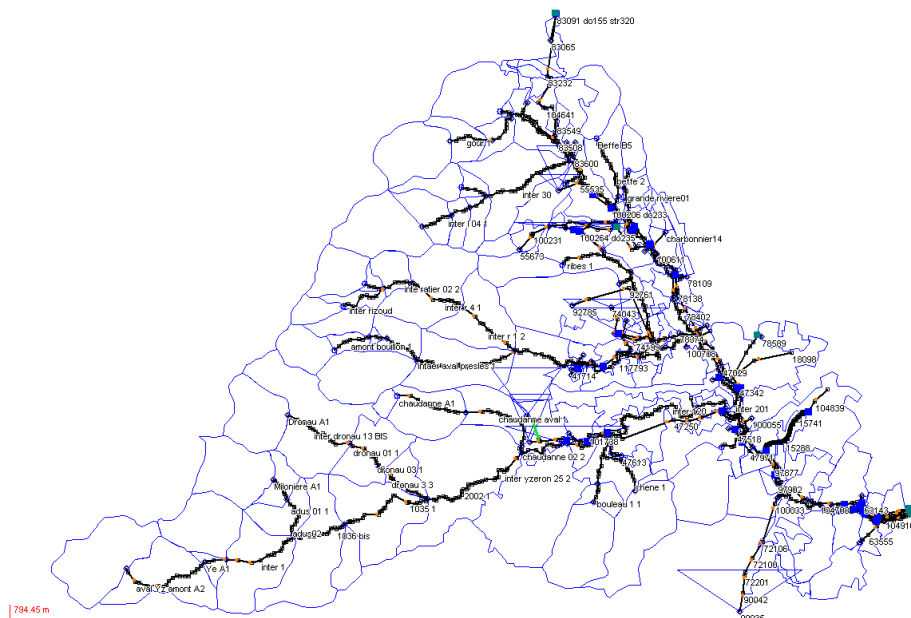
#### Adaptation d'un modèle hydrologique urbain aux bassins périurbains.

Le modèle CANOE (Sogreah et Insavalor, 2005) s'appuie sur un découpage de l'espace en sous-bassins versants. Il avait été complété pour prendre en compte des sous-bassins plutôt ruraux (Radojevic, 2002 ; Radojevic et al., 2010). Il a été appliqué sur l'Yzeron en représentant le réseau hydrographique complet : réseau naturel et réseau d'assainissement ainsi que leurs interconnexions (plus de 50 déversoirs d'orage) (Figure 5.27).

Les sous bassins versants (environ 150 dans le modèle) ont pour exutoire soit un ruisseau soit un réseau souterrain (certains sous bassins versants peuvent se superposer). Le modèle

CANOE peut être utilisé soit avec des chroniques de pluie, soit avec des pluies de projet artificielles construites à partir d'une analyse fréquentielle de ces chroniques. Il permet la simulation en continu de l'ensemble du système hydrologique en tenant compte de l'hydraulique des écoulements, simulée en utilisant les équations complètes de Barré de Saint Venant. Ce modèle permet donc de représenter correctement les interactions entre les écoulements très rapides sur les bassins versants urbanisés (écoulements dans des réseaux d'assainissement et rejets par les déversoirs d'orage) et les ruissellements plus lents sur les bassins versants ruraux. Sa principale faiblesse est la prise en compte très simplifiée des écoulements retardés et des écoulements permanents qui sont simplement représentés dans le modèle comme des apports corrélés à la hauteur totale de pluie ou à la saison. Si le modèle permet globalement de bien reproduire les statistiques des crues et les hydrogrammes produits lors des crues très fortes, il représente souvent assez mal les petites crues. Son calage a été effectué sur les points de mesure de Craponne et de Taffignon, c'est-à-dire à l'aval du bassin. Les paramètres moyens optimum identifiés sur ces points de calage ont ensuite été considérés comme identiques sur l'ensemble des sous-bassins versants, ce qui ne permet pas de prendre en compte leur variabilité spatiale naturelle. Les résultats simulés à l'amont sont donc à utiliser avec beaucoup de précautions.

Les temps de calcul sont assez longs (environ 48 heures pour simuler 20 ans de pluies) sur un PC ordinaire. Une autre limite de CANOE est qu'il ne permet pas de décomposer le débit à l'exutoire en contributions rurale/urbaine ou lente/rapide. En effet, l'information sur l'origine de l'eau qui transite en un point donné du réseau est perdue. De plus, le découpage en sous bassins versants est compliqué puisqu'il y a 2 exutoires possibles (le réseau et la rivière) pour chaque élément de surface. Ces deux difficultés ont justifié le développement de la plateforme Hydrobox présentée ci-dessous.

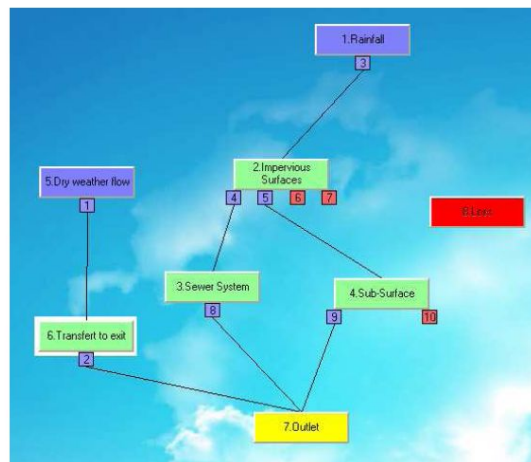


*Figure 5.27: Modèle CANOE complet du bassin de l'Yzeron. Ce modèle représente le réseau hydrographique naturel et le réseau d'assainissement structurant ainsi que les connexions principales entre ces deux réseaux (environ 50 déversoirs d'orage).*

Développement d'une nouvelle modélisation.



Une plate-forme de modélisation hydrologique originale a été développée (Hydrobox) (Dorval, 2011, Dorval et al., 2011). Elle permet de représenter des sous-bassins versants avec différents exutoires et de représenter et visualiser l'état et le fonctionnement de tous les compartiments de l'hydrosystème. Ainsi, les surfaces imperméables peuvent être directement connectées au réseau d'assainissement (SICRA), ou directement connectées à la rivière (SICRIV). Quant aux surfaces perméables (SP) elles sont connectées à la rivière et au sous-sol (SSSP) puis à la nappe (NSP) (voir Figure 5.28). Ce modèle a pour le moment été évalué sur le bassin d'Ecully (OTHU, Lyon) (Dorval, 2011). Cette plateforme permet de créer des modèles dits de production, adaptés aux sous-bassins étudiés. Dans le cadre du projet, le couplage avec le module de routage du modèle CANOE (Sogreah et Insavalor, 2005) n'a pas pu être réalisé. Cette nouvelle version n'a donc pu être utilisée dans le projet que partiellement.



*Figure 5.28: Schéma de la structure d'Hydrobox, les processus clé et les interactions entre les compartiments pour le concept multi-exutoires appliqué au bassin versant d'Ecully près de Lyon (Dorval, 2011).*

#### Adaptation de modèles ruraux aux bassins périurbains.

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

Afin de représenter l'urbanisation dans J2000, le maillage irrégulier utilisé est celui présenté dans la tâche A (Figure 5.23b) selon cinq classes d'occupation du sol. Pour chaque classe, un jeu de paramètres dans le modèle a été spécifié (coefficient d'imperméabilisation, utilisé dans la partition infiltration / ruissellement, et végétation, qui joue sur l'interception et l'évapotranspiration). Ce modèle présente l'avantage d'avoir des paramètres correspondants à des grandeurs physiques et aux données disponibles : cela permet de travailler sans calage, et donc d'avoir une approche utilisable sur des bassins non jaugés. En revanche, le modèle travaille pour le moment sur de grandes mailles (sous-bassins) et avec un pas de temps journalier, ce qui en fait une approche adaptée pour de grands bassins et pour faire des simulations longues durées centrées sur les bilans hydrologiques. Le pas de temps est néanmoins trop grand pour faire de l'événementiel (crues rapides).

La simulation du bassin de l'Yzeron sur une période de dix ans montre des résultats encourageants : la dynamique du bassin est bien reproduite à l'échelle de la chronique annuelle : le critère statistique de Nash pour toute la période de simulation est moyen (0.46), mais certaines années sont simulées avec une bonne qualité (chronique 2002-2003,

Nash=0.72). Le modèle offre aussi la possibilité de connaître le débit de manière distribuée sur tout le bassin. Il permet aussi de calculer la contribution des sous-bassins au débit pour les différentes fractions du débit (écoulements rapides ou lents) (Figure 5.29).

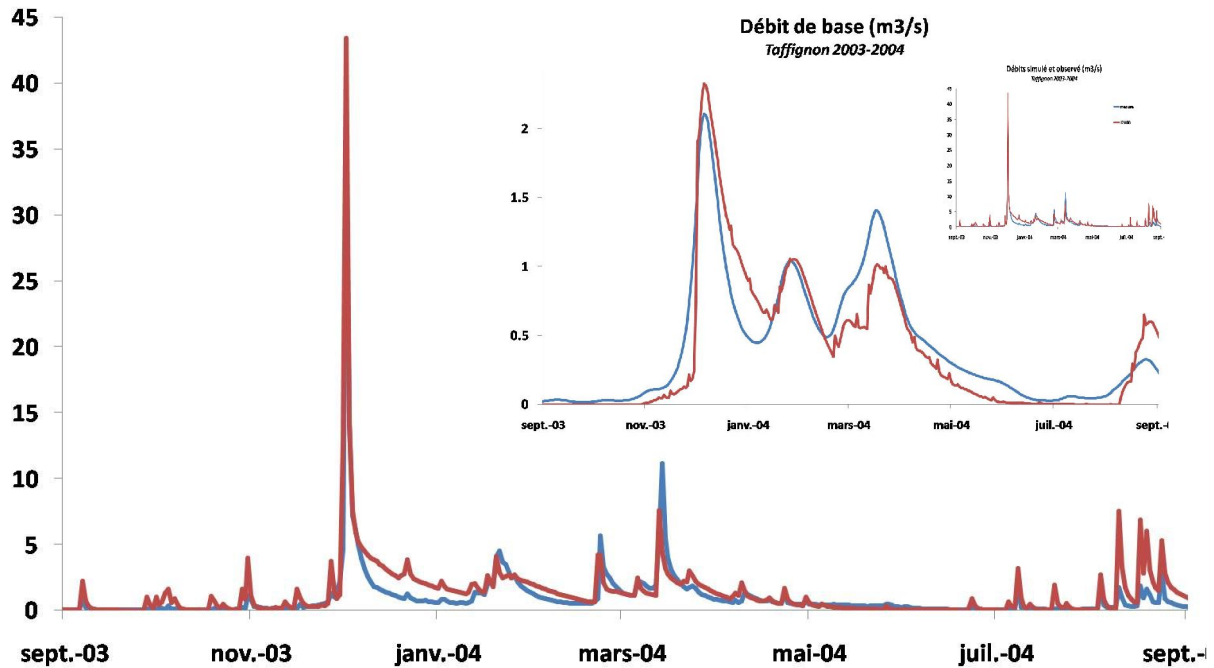


Figure 5.29: Débits observés (en bleu) et simulés (en rouge) par J2000 à Taffignon pour l'année hydrologique 2003-2004. Le débit de base observé et simulé selon le même code de couleurs apparaît dans le coin en haut à gauche.

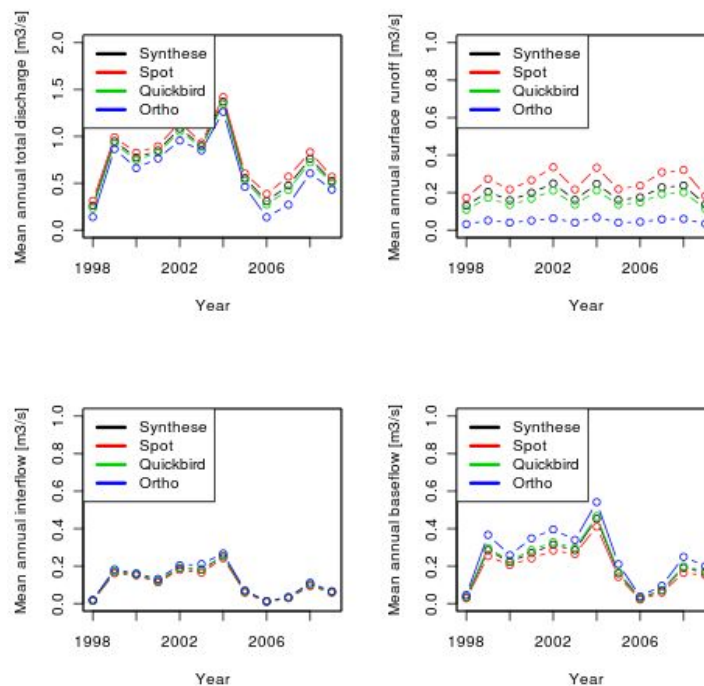
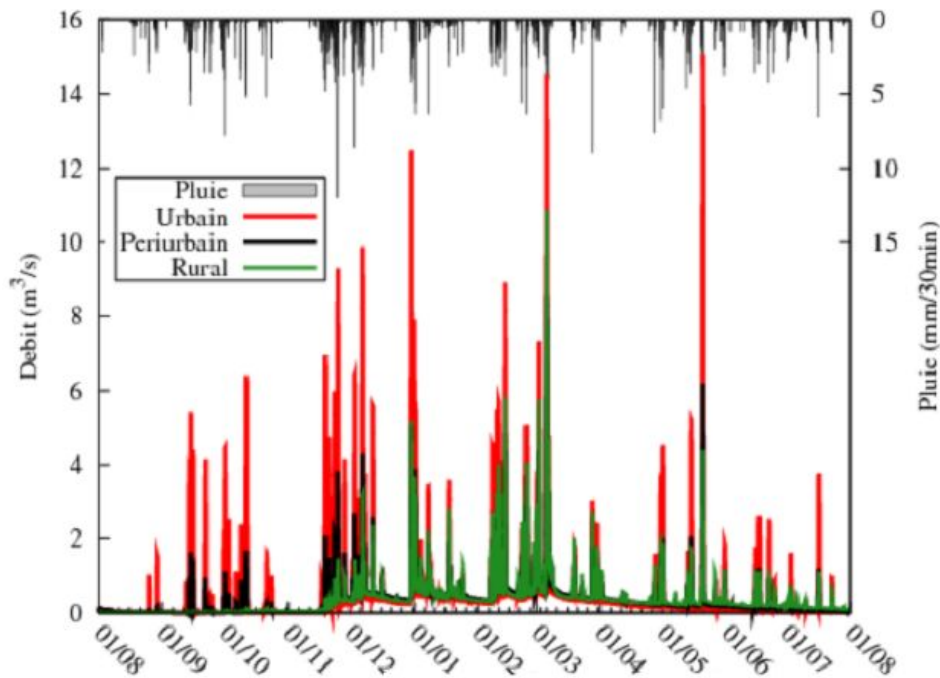


Figure 5.30: Comparaison des débits simulés et des composantes du débit total : ruissellement rapide, de sub-surface et écoulement de base lorsque 4 cartographies de l'occupation des sols différentes sont utilisées (voir Figure 5.4)

Nous avons aussi évalué la sensibilité de la modélisation à la carte d'occupation des sols utilisée. Les quatre cartes présentées dans la Figure 5.26 ont ainsi été utilisées en entrée du modèle J2000, en ne modifiant que les paramètres correspondant aux différentes occupations des sols. Les résultats (Figure 5.30) montrent que le débit total est modifié entre les différentes images et surtout, que la répartition des composantes de ce débit entre ruissellement rapide, ruissellement de sub-surface et écoulement de nappe est modifiée. Ceci aura un impact sur la qualité de l'eau qui rejoindra les cours d'eau.

ISBA-TOPMODEL (Bouilloud et al, 2009), initialement développé pour les bassins du sud-est, soumis aux crues-éclair, a été adapté au milieu périurbain par une modification des codes source. A l'origine, ce modèle représente le sol suivant trois couches sur une grille à mailles carrées (résolution : 100m à 10km) et fonctionne avec un pas de temps à déterminer en fonction des processus étudiés (5min). Les écoulements latéraux de surface et de subsurface sont résolus à l'échelle d'une grille issue des données topographiques (20m), selon le concept des surfaces contributives. Le routage est aussi réalisé à cette échelle. Le pas de temps à cette échelle est variable et s'adapte selon le temps de réponse du bassin versant étudié.

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



*Figure 5.31: Débits simulés selon différents taux d'imperméabilisation sur le bassin de la Chézine. En noir avec la configuration actuelle, en vert une configuration sans imperméabilisation et en rouge une configuration urbaine avec un taux homogène de 30%. La comparaison des débits en modes périurbain et rural indique de plus forts débits en mode*

rural en période humide qui pourrait montrer l'effet seuil de l'impact de l'urbanisation. Des analyses supplémentaires sont nécessaires pour confirmer les processus mis en jeu.

Le modèle a été évalué sur le bassin de la Chézine, sur une période de dix ans (données fournies par Nantes Métropole) (Furusho et al, 2011b). Le calage a été effectué sur les trois premières années (2002-2005). Les cinq années suivantes (2005-2010) ont permis d'évaluer les capacités du modèle à reproduire le débit observé. Le modèle montre une aptitude à reproduire la dynamique du bassin, à l'échelle de la chronique annuelle : pour toute la période d'évaluation  $Nash=0.52$ , mais est variable d'une année à l'autre (compris entre 0.49 et 0.72). Il apparaît que le modèle a tendance à surestimer le débit en période humide et à le sous-estimer en période sèche. Le modèle permet aussi de connaître la contribution des différentes surfaces au débit (urbain/rural) et la part des écoulements lents ou rapides. Enfin, le modèle permet de simuler différentes occupations du sol. Des simulations avec différents taux d'urbanisation ont été produites (Figure 5.31): i) 'périurbain' : configuration actuelle avec un taux moyen de 10% distribué sur deux zones au taux de 30%, ii) 'rural' où le taux est de 0% et iii) 'urbain' où le bassin est imperméabilisé de façon homogène avec un taux de 30%.

#### Approche statistique pour la détermination des débits de crue d'un bassin périurbain.

Dans les bassins versants périurbains, les rejets urbains de temps de pluie (Rutp), issus de réseaux unitaires mélangeant des eaux usées et des eaux de pluie, permettent d'éviter les problèmes de surcharge des réseaux, mais ils amènent des eaux fortement polluées dans les cours d'eau. En milieu périurbain, l'accroissement souvent rapide des surfaces imperméables connectées au réseau entraîne une augmentation de la fréquence de ces surverses. Ceci a un impact écologique important sur la qualité des cours d'eau (incisions, pollution). La modélisation numérique du système hydrologique de ces bassins devient alors un complément indispensable pour prédéterminer les volumes et débits rejetés au milieu naturel en dehors des sites mesurés et pour appréhender le fonctionnement global du système (Certu, 2003). La modélisation peut également aider à choisir les sites à instrumenter en considérant l'impact probable des rejets. Pour ce faire, des modèles robustes et peu gourmands en données sont privilégiés, ce qui conduit à se tourner vers des approches purement statistiques au dépend de modélisations physiques telles que celles que nous avons décrites jusqu'à présent.

Le modèle QdF (débit-durée-fréquence) de représentation des quantiles de crue et d'étiage a fait la preuve de sa capacité de prévision dans ses applications aux cours d'eau des bassins versants ruraux (Galéa et Prudhomme 1997). Sa version adaptée aux écoulements rapides pourrait servir à prévoir les débits de ruissellement urbains et donc les rejets de temps de pluie. Le cas échéant, la comparaison des quantiles ruraux et des rutp fournirait un premier critère d'impact. Le modèle QdF, développé par le Cemagref de Lyon, est un modèle probabiliste connu pour sa capacité à prévoir des quantiles de débit (débit associé à une probabilité) sur des bassins ruraux. Il a cependant été adapté par la suite aux petits bassins versants de vignobles à fortes pentes dont la réactivité se rapproche des surfaces imperméabilisées (Galéa et Ramez 1995). C'est cette version qui a été utilisée pour simuler les quantiles de ruissellement urbain.

Le modèle a fait l'objet d'un calage à partir des données de pluie et débit disponibles à Lyon et à Nantes. Les débits des cours d'eau de l'Yzeron (69) et de la Divatte (44) ont servi de références naturelles pour choisir le jeu de paramètres (1 parmi 3) du modèle QdF près de Lyon et de Nantes. On vérifie que le modèle QdF peut correctement représenter les quantiles des grandes crues rurales dans les cours d'eau principaux du bassin de l'Yzeron (Figure 5.32) et de la Divatte. Par la suite, seuls les paramètres de production et de transferts sont ensuite

recalculés pour la version « écoulements rapides ». Ces paramètres sont directement obtenus à partir de la surface imperméable drainée.

Pour le site Nantais la comparaison a porté sur les débits mesurés à l'exutoire d'un réseau pluvial (Figure 5.32b). On observe une nouvelle fois une bonne prévision du modèle, en particulier pour les crues fréquentes ( $T=0.5$  à 2 ans) et les durées inférieures (ou égales) à 15 minutes. Pour les périodes de retour plus importantes il est noté une sous-estimation que l'on attribuera au caractère encore « rural » du modèle QdF. Les ordres de grandeur restent toutefois satisfaisants.

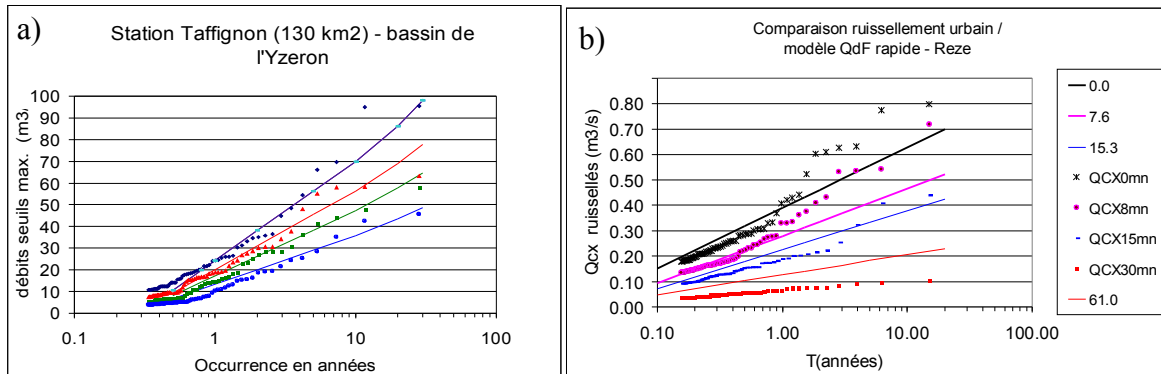


Figure 5.32: a) Comparaison des courbes de quantiles des modèles QdF sur l'Yzeron (69) avec les valeurs de débit (points symboles) extraites des chroniques mesurées. b) Comparaison des courbes de quantiles des modèles QdF à Reze (44) avec les quantiles de débits extraits sur les durées  $d=0, 8, 15$  et  $30$  mn.

#### 6.4. Tâche C : Intercomparaison des approches (IRSTV, Cemagref, INSAVALOR)

Dans le cadre du projet AVUPUR, deux méthodes de modélisation ont pu être comparées aux données de débit disponibles à la fois dans les zones périurbaines de Nantes et de Lyon.

##### Comparaison du modèle CANOE et de la méthode statistique QdF sur le sous-bassin de la Chaudanne.

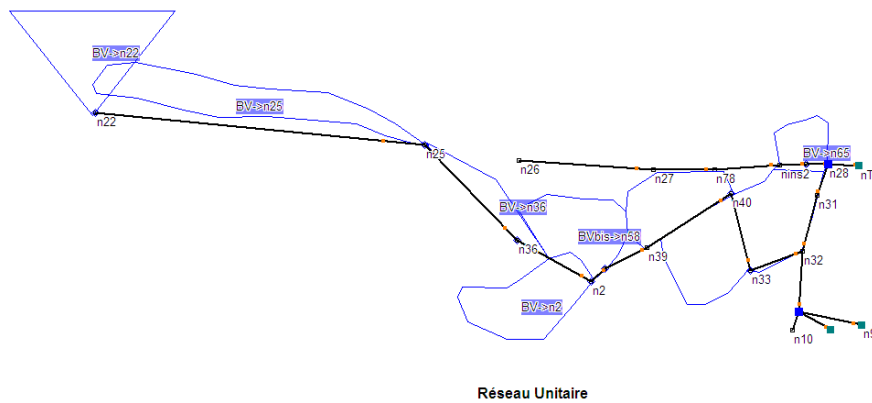
Le premier modèle, CANOE, présenté ci-dessus, représente de manière détaillée le réseau d'assainissement sur lequel sont connectées des fonctions de production et transfert adaptées à la typologie des sous bassins drainés. Le transfert dans le réseau relève d'un modèle mécaniste (Barré de St-Venant) (voir Figure 5.33 pour le réseau de Grézieu la Varenne sur le sous-bassin de la Chaudanne, Yzeron).

Les deux modèles ont fait l'objet d'un calage à partir des données de pluie et débit disponibles. Chaque modèle a utilisé par ailleurs les surfaces raccordées et le pourcentage d'imperméabilisation de ces surfaces comme paramètres d'entrée.

Le modèle CANOE nécessite d'avoir une description précise de la géométrie du réseau pour transférer le ruissellement urbain. Il utilise des chroniques de pluie ou plus facilement des événements pluvieux ainsi que des pluies de projet qui servent en principe au dimensionnement des réseaux.

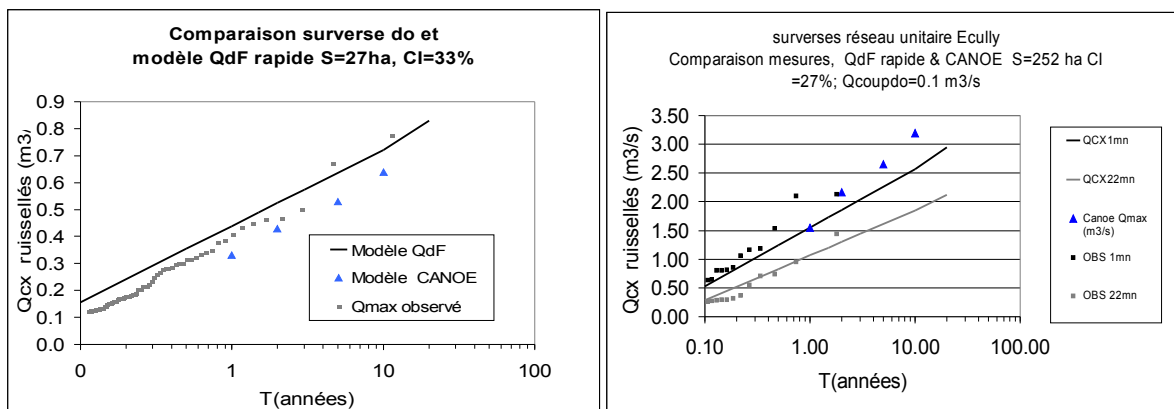
La capacité prévisionniste des modèles a été évaluée par comparaison des débits calculés avec les débits observés. Les débits de crue sont calculés par chacun des deux modèles pour les périodes de retour  $T=1, 2, 5$  et  $10$  ans. Les débits de même période de retour sont aussi

extraits des données mesurées à l'aide d'une procédure d'échantillonnage basée sur l'indépendance des événements. Les événements sont ensuite classés et affectés chacun d'une fréquence empirique (exprimée en période de retour). La comparaison est réalisée uniquement sur les débits de pointe entre CANOE et la méthode QdF présentée précédemment, car il s'agit de comparer des débits de même fréquence. C'est la raison pour laquelle il est utilisé une pluie de projet de période de retour fixée en entrée de CANOE. Il est alors fait l'hypothèse que la période de retour de la pointe du débit simulé est la même que celle de la pluie. Le modèle QdF fournit par ailleurs aussi les débits dépassés sur différentes durées pour une période de retour donnée. Cela offre une possibilité supplémentaire de valider le modèle avec les données.



**Figure 5.33:** Représentation du réseau unitaire de Grézieu la Varenne (69) sous le modèle CANOE. On distingue le réseau (trait noir) et les points de raccordement des sous bassins drainés. On note les deux exutoires sous forme de carrés, l'un coulant vers le réseau aval (n93) et l'autre vers le cours d'eau (déversoir).

Les débits de pointes des crues ont été échantillonnés dans les chroniques de débits mesurées au niveau de deux déversoirs du bassin de la Chaudanne. Ces débits ont été simulés par les deux modèles. On peut observer dans la Figure 5.34 les valeurs de débits calculées par CANOE (triangles) et QdF (courbes), ainsi que les valeurs observées représentées par les points.



**Figure 5.34:** Comparaison des courbes de quantiles des modèles QdF à Grézieu (69) et Ecully (69) avec les valeurs de débit (points symboles) extraites de 2 chroniques de rejets urbains de temps de pluie de l'étude AVUPUR.

Pour la station de Grézieu (Figure 5.34, gauche) il est noté la bonne prévision des deux modèles pour les périodes de retour de 1 à 10 ans qui se manifeste par une pente de progression identique à celle des données. Pour la station d'Ecully (droite), le modèle QdF pour les pointes de débit ( $d=1\text{min}$ ) semble moins performant que CANOE mais confirme sa robustesse pour les débits dépassés sur  $d=22\text{min}$ .

Les rejets urbains de temps de pluie sont aussi connus pour leurs effets sur la géomorphologie des rivières et en particulier l'augmentation de gabarit des petits cours d'eau. Dans le cadre du projet AVUPUR les débits de pointe ruraux et urbains (Rutp) ont été additionnés en faisant l'hypothèse que pour des bassins de petite taille (moins de 5 km<sup>2</sup>) les pointes de crues des deux réseaux étaient concomitantes. La comparaison des quantiles composés de période de retour 2 ans (période de retour moyenne admise pour le débit juste débordant d'un cours d'eau) avec les débits à plein bord générés par la mesure directe sur environ 30 stations montre une bonne prévision ( $R^2=80\%$ ) (Navratil et al., 2011). La contribution urbaine pouvant être significative, cela confirme une nouvelle fois l'intérêt du modèle QdF pour prévoir le ruissellement urbain.

#### Comparaison des modèles ISBA-TOPMODEL et J2000 sur l'Yzeron

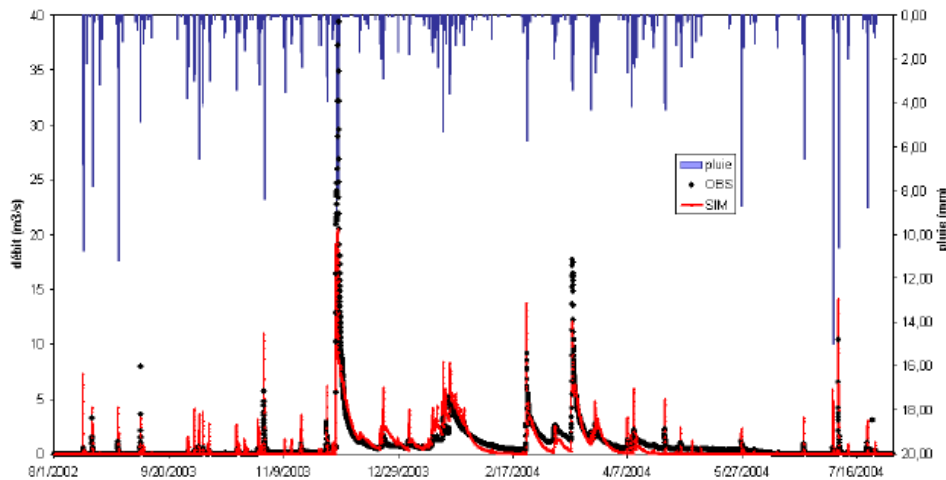
La comparaison des modèles ISBA-TOPMODEL et J2000 est en cours. Le modèle ISBA-TOPMODEL a été appliqué sur l'Yzeron à Taffignon, qui présente plusieurs différences notables avec la Chézine : le bassin est 4 fois plus étendu avec un relief plus marqué, les champs de pluie sont plus hétérogènes spatialement, l'urbanisation est plus présente (41% contre 10%) et l'aire drainée par un réseau unitaire est non négligeable. Dans une première application sans calage (en utilisant les données de la bibliographie, ou les valeurs des paramètres urbains appliqués sur la Chézine), la simulation des débits sur la période 2002-2008 est satisfaisante (Nash=0.50 et biais=17%) selon les critères de Moriasi et al. (2007), avec des résultats très variables d'une année à l'autre (Tableau 5.2). La non prise en compte de la variation de l'aire drainée du bassin liée à la présence du réseau unitaire conduit à de nombreuses surestimations des plus faibles pics (Figure 5.35). De plus, la variabilité spatiale de la pluie qui pour un bassin de cette taille est fréquente, n'a pas été prise en compte alors que le modèle le permet. Ces premiers résultats sont donc encourageants.

*Tableau 5.2: Critères statistiques (Nash et biais) calculés pour les débits simulés par ISBA-TOPMODEL sur la période 2002-2008.*

Année	02-03	03-04	04-05	05-06	06-07	07-08	<b>02-08</b>
NSE	0.57	0.61	0.55	0.21	0.24	0.38	<b>0.50</b>
PBIAS (%)	-38.0	15.8	34.6	73.2	31.6	54.1	<b>13.3</b>

*Tableau 5.3 : Critères statistiques (Nash et biais) calculés pour les débits simulés par J2000 sur la période 2002-2008.*

Année	02-03	03-04	04-05	05-06	06-07	07-08	<b>02-08</b>
NSE	0.60	0.79	0.39	0.23	-0.08	-0.23	<b>0.52</b>
PBIAS (%)	55.6	45.1	16.7	-28.2	15.6	-22.7	<b>21.0</b>



*Figure 5.35: Comparaison des débits observés (points noirs) et simulés (trait rouge) pour l'année 2003-2004 pour laquelle les critères statistiques sont les meilleurs (Nash=0.61 et biais=16%). Les plus petits pics sont généralement surestimés à cause de la non-prise en compte du réseau unitaire qui exporte l'eau drainée en dehors du bassin.*

La comparaison des critères statistiques obtenus par les deux modèles J2000 et ISBA-TOPMODEL (Tableau 5.1 et Tableau 5.3) indique la performance des modèles, tous deux sans calage, est assez similaire sur l'ensemble de la période (Nash = 0.52 et 0.50 pour J2000 et ISBA-TOPMODEL respectivement). On peut noter une plus grande variabilité des valeurs pour le modèle J2000, avec des simulations très bonnes pour les deux premières années, mais franchement plus mauvaises pour les deux dernières. La relative meilleure performance de J2000 peut peut-être être expliquée par une prise en compte de la répartition spatiale des pluies (non effective dans ISBA-TOPMODEL pour cette application). Pour les deux dernières années, les mauvaises valeurs du Nash correspondent à une surestimation des débits par le modèle dans deux années assez pluvieuses, mais sans événements ni pics de débit majeurs. Les explications sont sans doute à chercher du côté de la non prise en compte du réseau d'assainissement par le modèle, ainsi que peut-être une simulation encore déficiente des stockages dans le sol.

### 6.5. Synthèse et conclusions du WP3

Différentes approches ont été explorées pour développer des outils de modélisation hydrologique adaptés au milieu périurbain pour les bassins de quelques dizaines à quelques centaines de km<sup>2</sup>. Deux modèles, J2000 et ISBA-TOPMODEL, initialement développés pour la modélisation hydrologique en milieu naturel ont été adaptés en prenant en compte les particularités du milieu urbain. Pour J2000, les paramètres physiques pilotant par exemple l'infiltration ont été modifiés, le découpage du bassin a pris en compte l'occupation du sol selon 5 classes (urbain, mixte agriculture, mixte forêt, rural agriculture, rural forêt). La classification a pu être produite à l'aide d'une analyse cartographique d'images optiques à très haute résolution. Différentes méthodes (pixelaire, approche objets) ont été comparées. Les taux d'imperméabilisation qui en résultent peuvent être très différents selon la résolution de l'image utilisée, ce qui met en évidence la prudence nécessaire pour l'utilisation de ce paramètre pour la modélisation hydrologique car les simulations dépendent de l'information



utilisée. Des adaptations sont encore nécessaires pour mieux prendre en compte les spécificités des milieux périurbains, en particulier l'intégration de plusieurs réseaux, mais les résultats obtenus, sans calage a priori laissent entrevoir un potentiel de cet outil pour transposer les connaissances acquises à d'autres bassins.

L'adaptation d'ISBA-TOPMODEL a consisté à implémenter dans le code original les processus urbains (infiltration très faible, pertes initiales, ruissellement, infiltrations parasites). L'évaluation des deux modèles sur les sites d'étude indique des résultats encourageants.

Deux autres approches ont été étudiées pour le développement d'outils hydrologiques adaptés au milieu périurbain: l'adaptation d'un modèle hydrologique initialement dédié au milieu urbain (CANOE) et le développement d'une nouvelle plate-forme (HydroBox). L'application de CANOE à l'Yzeron a consisté à découper le bassin versant selon le réseau hydrographique complet constitué du réseau naturel et du réseau d'assainissement avec les connexions entre les deux. Les résultats ont été satisfaisants pour reproduire les statistiques des crues et la forme des hydrogrammes pour les crues extrêmes mais assez décevants sur les crues les plus faibles. De plus l'intérêt de distinguer les différents types d'apports (ruissellements urbains, eaux usées rejetées par les déversoirs d'orage, ruissellements ruraux, écoulements permanents, etc..) n'est pas exploité, puisqu'il n'est pas possible de retrouver ces différentes composantes dans l'hydrogramme résultant. Enfin, la manipulation du modèle pour représenter l'évolution de l'urbanisation s'est avérée très compliquée. En effet, du fait du double système de drainage pris en compte (réseau artificiel et réseau naturel), les mêmes surfaces peuvent contribuer aux écoulements vers deux exutoires différents. Toute modification de l'urbanisation nécessite un redécoupage en sous bassins versants avec le risque permanent d'oublier des surfaces ou de prendre en compte plusieurs fois les mêmes.

Ces limites ont conduit à développer la plate-forme Hydrobox qui permet de représenter explicitement un sous-bassin versant comme une juxtaposition de surfaces de natures différentes susceptibles d'alimenter des lignes d'écoulements multiples qui peuvent elles-mêmes être en interaction. Il est alors possible de connaître à tout instant la contribution de chaque surface au débit simulé en tout point. Les premiers résultats sont extrêmement encourageants, mais le travail n'a cependant pas pu être mené à son terme. Hydrobox reste pour l'instant un prototype de recherche. Son intégration dans le logiciel CANOE est prévue pour 2012.

Enfin, une approche statistique de prédétermination des débits de crue (méthode QdF) a été adaptée au milieu périurbain. Elle permet des estimations rapides, s'appuyant sur moins de données que les modélisations physiques, des quantiles de crue, ce qui peut en faire un outil utile pour les études d'aménagement sur les petits bassins périurbains.

La comparaison des différentes approches n'a été menée que partiellement, mais elle a permis de dégager des pistes intéressantes de travail. Les données étant maintenant disponibles, cette intercomparaison devrait être poursuivie pour inclure l'ensemble des modèles et définir les approches les plus adaptées en fonction des contextes hydroclimatiques ou d'urbanisation.

## 7. WP4 : Tests de sensibilité, scénarios et indicateurs de vulnérabilité

### 7.1. Rappel du contexte et des objectifs du WP4

L'objectif du WP4 était de fournir les éléments nécessaires à l'analyse de l'impact de scénarii d'occupation des sols passée et future sur la vulnérabilité des rivières périurbaines. Les travaux ont surtout concerné le bassin de l'Yzeron pour lequel l'information était plus riche. Le WP4 a permis d'aborder plusieurs aspects complémentaires nécessaires pour réaliser les simulations correspondantes :

- la définition des séries pluviométriques pertinentes à l'échelle des unités de modélisation et une ébauche de la quantification de l'incertitude associée (Tâche A)
- la cartographie de l'occupation des sols passée sur le bassin de l'Yzeron (Tâche B)
- la production de scénarii plausibles pour l'occupation future du bassin versant en s'appuyant sur les évolutions passées et un atelier de prospective territoriale (Tâche C)
- la réalisation de simulations de long terme à l'aide des scénarii futurs et la quantification de l'impact sur le régime hydrologique et le risque d'incision des cours d'eau (Tâches D et E).

### 7.2. Tâche A : Obtention des données climatiques et pluviométriques pour la simulation hydrologique sur l'Yzeron (UMR EVS, INSAVALOR, Cemagref)

Les précipitations sont le facteur primaire de la formation des écoulements et sont caractérisées par leur extrême variabilité dans le temps et dans l'espace. En conséquence, dans un projet scientifique où l'on veut suivre ou prédire le devenir d'un bassin versant évoluant dans sa structure et dans son occupation du sol, il est impératif de contrôler l'incertitude majeure que peut représenter une connaissance imparfaite des pluies et d'en analyser les caractéristiques principales en terme de variabilité spatiale et temporelle.

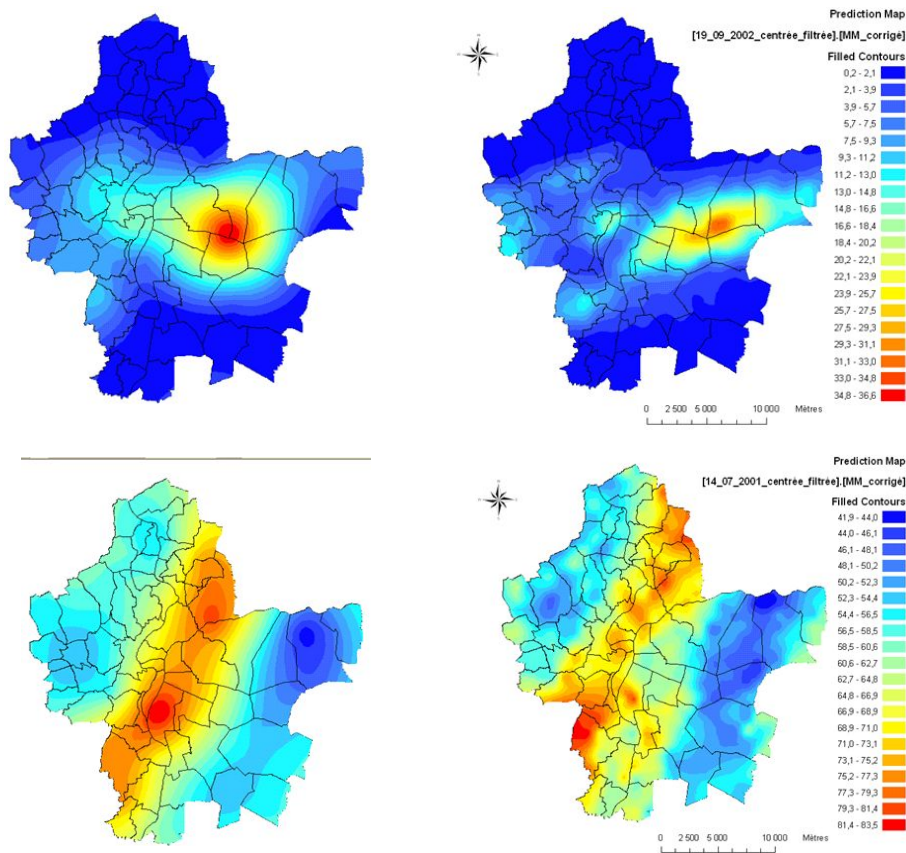
L'objectif de cette tâche était donc de fournir les entrées climatiques et pluviométriques à une échelle d'espace et de temps pertinente pour l'hydrologie des bassins périurbains (typiquement de l'ordre du 1 km<sup>2</sup> et de 6 mn pour les pluies). L'effort s'est concentré sur la représentation des pluies. Pour les autres variables climatiques, la base de données SAFRAN à 8x8 km<sup>2</sup> a été utilisée.

Pour l'analyse des pluies, deux pistes ont été abordées :

- la qualification de la donnée radar pour la simulation de l'hydrologie d'un bassin versant périurbain comme l'Yzeron
- l'utilisation d'un simulateur spatio-temporel des pluies, pour lequel, dans le cadre, du projet, on a développé une procédure de conditionnement par les séries observées, de champs spatio-temporels simulés par une approche géostatistique. Ceci permet de générer un ensemble de champs pluviométriques plausibles, respectant les observations, tout en fournissant une idée de l'incertitude associée.

Le premier axe a consisté à valoriser les estimations de pluie par mesure radar (Renard, 2010). Depuis 2001, le radar météorologique de Météo-France a été déplacé de Bron, où l'altitude était trop faible pour bien appréhender la pluie sur les reliefs, à St-Nizier d'Azergues au Nord-Ouest de Lyon dans les Monts du Lyonnais. Ceci permet de donner une meilleure visibilité radar sur le bassin de l'Yzeron en particulier. Les mesures radar sont relativement récentes, et à la fois assez imprécises et spatialement exhaustives. Elles offrent à cet égard un regard très complémentaire aux pluviomètres, réputés fournir des données de référence, avec une antériorité plus longue, mais une couverture spatiale très fragmentaire. Les données radar sur

le Grand Lyon et le bassin de l'Yzeron ont été acquises auprès de Météo-France de 2001 à 2011.



**Interpolation pluviomètres Grand Lyon      Données radar corrigées par les pluviomètres**

*Figure 6.36: Exemple de champs pluviométriques interpolés uniquement à l'aide des pluviographes (gauche) et à l'aide de données radar corrigées par les pluviomètres (droite).*

Les travaux effectués ont tout d'abord confirmé la pertinence de la mesure radar grâce à une comparaison entre la donnée radar et des données au sol. On note aussi une bien meilleure qualité de la donnée quantitative du radar depuis 2006 où Météo-France effectue des corrections des échos de sol (Renard et Comby, 2010). Les travaux confirment aussi que la plus value essentielle de la mesure radar est dans le repérage de l'existence et la localisation des intensités fortes (Figure 6.36).

Une méthode pour corriger les champs de pluie radar à l'aide des données de pluviométrie au sol (environ 28 pluviographes au sol à résolution de 6 mn sur le territoire du Grand Lyon) a aussi été proposée (Chocat et al., 2010). Alors que le raccord entre la mesure quantitative radar et la pluviométrie observée par les pluviomètres est usuellement faite par l'adoption d'une correction des intensités en valeur moyenne (revenant à une règle de trois), une correction en distribution, également appelée quantile-quantile, est beaucoup plus efficace. Associé à une réflexion sur la représentativité spatiale des mesures, elle est appelée à permettre une bonne exploitation quantitative aux échelles urbaines et péri-urbaines. Des analyses de sensibilité à l'aide du modèle CANOE ont confirmé la pertinence de cette méthode pour améliorer les simulations hydrologiques (Chocat et al., 2010)

Sur le deuxième axe, le projet a été l'occasion d'une avancée significative sur un point précis : la simulation conditionnée des pluies passées, permettant de solliciter les modèles (distribués ou pas) avec des champs réputés exhaustifs dont la dispersion permet une première approche de l'incertitude relative aux pluies. On présentera en premier lieu les résultats de méthode, puis quelques exemples de résultats pratiques obtenus.

#### Résultats de méthode.

Nous partions d'un simulateur géostatistique à bandes tournantes présentant les caractéristiques suivantes (Leblois et Creutin, en préparation ; Lepioufle et al., en préparation): 1/ simulation tridimensionnelle ayant spécialisée deux dimensions comme représentant l'espace et une dimension comme axe temporel ; 2/ simulation séparée d'un champ d'intermittence (obtenu par le seuillage d'un champ gaussien à une valeur seuil fonction de la fraction non nulle attendue) et d'un champ dit « de pluies non-nulles », les deux étant indépendants et multipliés pour obtenir le champ composite final. 3/ prise en compte de la distribution des pluies (à valeur dans  $R^+$ , asymétrique à droite) par anamorphose (d'autres possibilités existent, notamment la simulation d'une advection, mais qui n'ont pas été sollicitées dans le présent projet) (Lepioufle, 2009).

L'obtention d'une simulation conditionnée mise en place dans AVuPUR comprend deux phases.

#### Phase d'analyse des données, spécification d'un modèle de variabilité

1/ choix d'un pas de temps de travail résolvant la dynamique du bassin : 1 heure.

2/ choix d'un pas de temps de classification de la situation pluviométrique : 3 heures.

3/ choix de descripteurs permettant de classer les différents pas de temps. On a retenu, dans une perspective hydrologique, (a) la valeur moyenne des pluies observées (indicateur de l'espérance de la lame d'eau et donc essentiellement de la ressource en eau), (b) la valeur moyenne des pluies non-nulles (indicateur plutôt de l'intensité des pluies et visant l'aléa hydrologique à l'échelle urbaine ou de l'aléa érosif) et enfin (c) la fraction des pluviomètres présentant une pluie non-nulle (indicateur de couverture). Ces indicateurs ont été évalués pour les pluies horaires comprises dans chaque pas de temps tri-horaire.

4/ classification de l'ensemble des pas de temps du calendrier sur la base de ces descripteurs, créant une famille de types de pluie, et un calendrier d'occurrence de ces types. On a adopté la classification non supervisée de Kohonen (également appelée S.O.M. pour Self-Organizing Map), en raison de la lisibilité des classes restituées par cet algorithme, qui privilégie la ressemblance entre classes contiguës au sein d'un espace de représentation prédéfini. Nous avons adopté 25 classes, organisées en un damier 5x5 rendu cyclique de façon à éviter les effets de bordure.

5/ examen de la distribution ponctuelle et de la variographie spatiale et temporelle des pluies horaires, considérées comme homogènes à l'intérieur de chaque type.

Dès lors on dispose, à chaque instant, de valeurs observées, et d'un modèle descriptif des pluies, calé sur l'ensemble des pluies de mêmes caractéristiques.

#### Phase de simulation conditionnelle.

En géostatistique gaussienne, il est un résultat connu qu'une simulation conditionnée s'obtient en effectuant une simulation libre et en ajoutant un krigeage des écarts aux valeurs observées. La simulation libre et le krigeage d'écart doivent être effectués avec la même structure spatio-temporelle, celle qui fut ajustée lors de l'analyse préalable des données.

Dans les cas des pluies non-nulles, il faut veiller à transformer les observations en leur équivalent gaussien (anamorphose). Le champ gaussien sous-jacent est conditionné à ces équivalents, puis dénormé (anamorphose inverse), restituant des valeurs dans la distribution du monde utilisateur.

A partir des données d'indicatrice (le fait qu'il pleuve ou pas), le schéma de simulation conditionnée est informé que le champ gaussien qu'il doit simuler puis seuiller doit être en dessous ou au-dessus du seuil de seuillage, mais on n'en sait a priori pas plus. Il est alors nécessaire de choisir, pour pouvoir effectuer un krigeage conditionnant concret, un ensemble de valeurs de ces gaussiennes sous-jacentes respectant ces contraintes ; le choix doit être compatible avec la variabilité attendue de l'indicatrice. Cette étape a d'abord été réalisée à l'aide de l'algorithme de Gibbs. L'algorithme de Metropolis-Hastings a été implémenté ultérieurement. Les deux algorithmes produisent dans notre cas particulier des résultats totalement similaires, avec un avantage à l'algorithme de Metropolis-Hastings dont la complexité est moindre, son temps de calcul augmentant moins avec le nombre de points de conditionnement, ce qui permet de prendre en charge des voisinages plus importants.

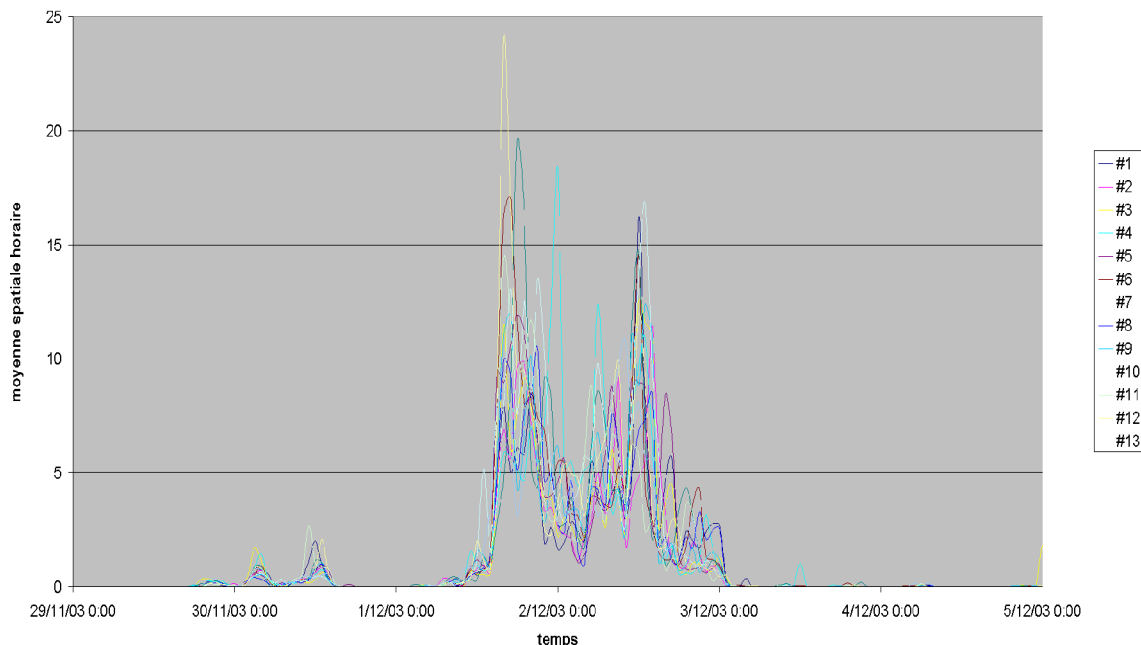
Ces développements, réalisés dans le cadre du projet AVuPUR, étaient nécessaires pour une simulation conditionnelle effective. Ils ont permis l'obtention des résultats pratiques qui suivent.

### Résultats pratiques.

Dans le cadre du projet Avupur, il a été ciblé de procéder à une reconstitution par simulation conditionnée des champs de pluie relatifs à la période récente instrumentée.

64 reconstructions sur la période 1985-2008 ont été effectués, à  $dx=dy=1km$ ,  $dt=1h$  ; ces reconstructions ont été informées par l'ensemble des données pluviométriques observées sur le bassin versant de l'Yzeron et autour (et notamment sur le Grand Lyon).

reconstitution de la pluie sur le secteur Yzeron - extrait

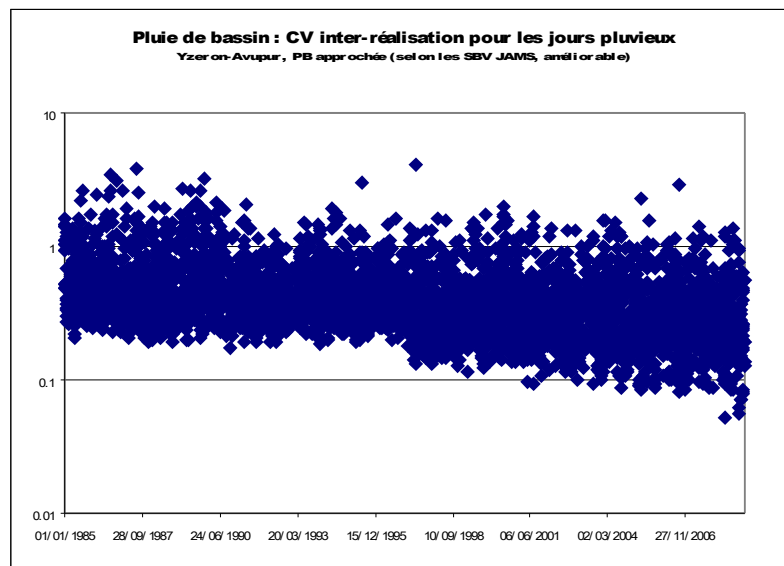


*Figure 6.37: Reconstitutions de la pluie horaire relative à l'événement de décembre 2003. Ici, moyenne horaire de bassin, 13 membres. CV du cumul de l'événement 0.2*

Les objectifs essentiels initiaux ont été partiellement acquis (algorithmique du conditionnement, y compris en présence d'intermittence, et livraison d'ensembles de champs reconstruits dont la dispersion peut être considérée comme estimateur d'incertitude).

Par la réplication, on aboutit à une incertitude quantifiée de connaissance des pluies. (Figure 6.37). Dans une perspective Bayésienne, cette quantification d'incertitude pourra servir d'incertitude a priori sur les pluies (Renard et al., 2011). Ayant une même sémantique que des vraies pluies, les champs reconstitués peuvent aussi être simplement « routés » pour obtenir tous dérivés hydrologiques utiles.

Le resserrement progressif de la dispersion des simulations conditionnées au fil de la séquence historique est un indicateur de la valeur de l'instrumentation locale (Figure 6.38).



*Figure 6.38: Coefficient de dispersion des pluies journalières reconstituées sur le bassin de l'Yzeron, en fonction du temps*

La dispersion reste en pratique forte. Dans le cas de l'Yzeron la simulation conditionnelle ne semble devoir permettre d'améliorer les simulations hydrologiques (relativement aux pratiques usuelles d'interpolation entre postes) que sur la période récente où les données locales ont été enrichies du fait de l'effort météorologique spécifique récent (sur les périodes antérieures, la simulation n'est tenue que par les pluies observées sur le Grand Lyon).

#### Questions qui restent à résoudre et perspectives de développement :

Les travaux réalisés ont permis d'identifier quelques verrous qui restent encore à résoudre au niveau de la simulation de pluie pour améliorer son utilisation en hydrologie périurbaine.

1) Le principal, dans une perspective d'hydrologie périurbaine, est que la résolution temporelle demeure insuffisante. Le problème paraît sérieux pour au moins une raison : du fait des basculement d'augets, le signal des pluviomètres se dégrade nettement en deçà d'une heure d'accumulation et son analyse variographique devient illusoire. Nous envisageons de proposer ultérieurement un modèle de désagrégation des statistiques des pluies horaires en statistiques de pluies plus courtes correspondant, en croisant la théorie élaborée par le travail de thèse de Lepioufle (2009), et les analyses de lame d'eau radar effectuées par Emmanuel (2011). On notera bien que le problème est dans l'élaboration du modèle de variabilité des pluies à 6 minutes. Le conditionnement de simulations à 6 minutes à des cumuls horaires peut

quant à lui être approché relativement raisonnablement et a déjà tourné en prototype. Ces développements ouvrent des perspectives pour coupler les travaux réalisés sur la donnée radar et le simulateur stochastique de pluie.

2) L'attribution catégorique de chaque pas de temps historique à une classe de pluie et une seule ne peut être qu'une première étape. Il convient logiquement de probabiliser l'appartenance d'un pas de temps à l'une ou l'autre classe, d'autant plus que ces classes de pluies ont le caractère d'intermédiaires de travail appelés à s'effacer des résultats finaux. Ceci pourra se faire conjointement à la poursuite de la réflexion sur la classification, qui pourrait être menée selon une maximisation de vraisemblance permettant de prendre en considération la structure spatiale des pluies dès la phase de classification.

3) L'hypothèse d'homogénéité spatiale des pluies est une hypothèse forte, qui n'est guère satisfaisante dans un secteur présentant de fortes dénivelées. En pratique le conditionnement force le respect des valeurs observées, et par effet induit sur le voisinage ceci réintroduit les dérives spatiales absentes du modèle. Ceci n'empêche pas de voir dans les écarts significatifs des champs conditionnés au modèle homogène sous-jacent à la simulation une indication climatologique qui pourrait être valorisée dans une modélisation des pluies plus élaborée. On note que les types de pluies les plus intenses paraissent les moins clairement liées à l'altitude, ce qui est conforme aux constatations usuelles.

4) Enfin quelques tentatives de simulation libre climatologiques ont été effectuées, sur la base d'un modèle de séquençement en Markov Caché saisonnalisé ajusté au calendrier estimé des types de pluie. Les premiers résultats sont prometteurs (respect des espérances annuelles et saisonnières, des pluies extrêmes) mais suggèrent la nécessité d'approfondissements sur les occurrences de pluies fortes aux durées intermédiaires (nécessité d'un séquençement de type semi-Markov).

En résumé, quelles que soient les difficultés techniques rencontrées lors du codage d'algorithmes parfois un peu ardu, les vrais problèmes sont avant tout de spécification scientifique du modèle (formulation, calage, validation).

### *7.3. Tâche B : Reconstitution de l'occupation des sols passée (UMR EVS)*

La reconstitution de l'occupation des sols passée a donné lieu au développement de deux ensembles de travaux pour les raisons suivantes :

1/ Deux types de données images permettent de reconstituer l'occupation des sols passée : les photographies aériennes et les images satellites. La couverture aérienne de l'IGN en France est disponible depuis les années 1945. Les photographies aériennes anciennes sont en noir et blanc et les méthodes de traitements d'images automatisées sont actuellement peu opérationnelles pour les exploiter. Les images satellites à haute résolution autorisant la cartographie de l'occupation du sol existent depuis les années 1980-1990 selon leur disponibilité sur les terrains étudiés. Leur traitement peut être automatisé.

2/ Cette reconstitution de l'occupation des sols passée répondait à deux objectifs au sein du projet AVuPUR : observer les changements des usages des sols pour alimenter les scénarios de prospective et analyser les processus qui régissent le développement de l'urbanisation et ses conséquences sur l'agriculture et la forêt - et - également suivre l'impact des mutations de ces usages sur l'occupation physique des surfaces pour évaluer leurs conséquences sur le fonctionnement hydrologique du bassin.

En raison des caractéristiques des images disponibles, des méthodes de cartographie applicables et de la nature de l'information demandée sur l'occupation des sols, deux démarches de cartographie de l'évolution de l'occupation des sols ont été développées. L'information spectrale des images satellites renseigne sur les caractéristiques bio-physiques

des surfaces mais peu sur leurs usages. Leur traitement automatisé permet l'extraction de cartes d'occupation du sol de manière relativement rapide par comparaison avec la photo-interprétation manuelle. Inversement, cette dernière méthode grâce à l'analyse visuelle permet de reconnaître les usages. Pour les données les plus anciennes (photographies aériennes), elle est l'unique méthode viable. Mais elle est très coûteuse en temps de travail. Il est apparu intéressant d'explorer ces deux démarches, même si elles ne permettent pas d'obtenir la même information. En matière d'usages des sols, la photo-interprétation est la méthode appropriée par contre en raison de sa reproductibilité, le traitement automatisé des images satellites représente une alternative intéressante.

### La cartographie de l'évolution des usages du sol de 1945 à 2008 à partir de photographies aériennes

La cartographie des usages du sol a été menée avec un pas de temps de 20 ans en 1945, 1970, 1990 et 2008. Les photographies aériennes utilisées de 1945 à 1990 sont des clichés analogiques qu'il a tout d'abord fallu scanner, géo-référencer et mosaïquer pour couvrir l'ensemble du bassin. En 2008, nous avons utilisé la BDOrtho® IGN déjà orthorectifiée.

La première étape a consisté à établir une nomenclature des usages, en collaboration avec l'équipe travaillant sur l'élaboration des scénarios et les hydrologues. Cette nomenclature comporte en tout 14 thèmes sur les thématiques de la forêt, l'agriculture et des surfaces artificialisées, thématiques habituellement retenues dans les cartes d'occupation du sol (Figure 6.39). Deux thèmes spécifiques ont été sélectionnés, eut égard à la connaissance des processus propres à la zone étudiée, il s'agit des grandes propriétés et des jardins, ces deux types de surfaces étant suspectés d'être particulièrement vulnérables à l'avancée de l'urbanisation.

La méthode repose sur une photo-interprétation rétroactive : une première carte est réalisée à la date la plus récente pour laquelle la couverture aérienne est de bonne qualité et pour laquelle nous pouvons également disposer d'informations annexes pour renseigner sur les usages des sols. Clément Dodane a réalisé à l'aide de Google street et d'autres informations annexes un travail de vérification de la cartographie des usages des zones bâties. La reconnaissance des bâtiments à vocation industrielle, commerciale ou d'équipement, uniquement par leur visualisation sur photographies aériennes s'est avérée limitée. Cette carte au format vectoriel, une fois réalisée, est ensuite superposée à la couverture aérienne de la date précédente. Les changements d'usages des sols y sont reportés. Cette opération est renouvelée jusqu'à la date la plus ancienne. Cette méthode a été privilégiée à la réalisation indépendante de 4 cartes, pour éviter lors des opérations de comparaisons des cartes entre elles, de voir apparaître des changements de limites liés à la digitalisation ou aux variations de géoréférencement des couvertures aériennes sans réalité sur le terrain.

L'application de la méthode a révélé des limites :

- La nomenclature établie initialement a dû être simplifiée lors de la photo-interprétation des clichés anciens. Leur facture en noir et blanc et leur qualité inégale n'ont pas permis de distinguer dans les formations ligneuses, les conifères et les feuillus. La délimitation précise des aires de landes s'est également révélée impossible à certaines dates ou localement sur des clichés de mauvaise qualité. Ces trois formations ont été rassemblées sous le thème de la forêt. La distinction des prairies permanentes et des cultures temporaires, dont on aurait pu extraire des informations intéressantes sur l'évolution des pratiques agricoles, n'a pu être faite en raison de l'impossibilité de percevoir à une seule date la rotation des cultures annuelles. Les surfaces artificialisées se sont développées au dépend des surfaces agricoles et forestières. Leur nature s'est également diversifiée à la date récente où leurs usages ont



pu être reconnu. A propos de ces surfaces, la méthode rétroactive nous conduisait à retrouver l'occupation initiale qui était agricole ou forestière ce qui ne comportait pas de difficultés. Néanmoins les bâtiments agricoles, reconnaissables à leur architecture, ont souvent été reconvertis en habitat résidentiel. Cette évolution, dans la mesure où l'architecture était maintenue, est difficile à reconnaître.

- La BDortho@IGN a servi de référentiel pour le géoréférencement des photographies aériennes anciennes. Certaines de ces photographies comportaient des distorsions géométriques importantes et malgré le soin apporté à leur correction, la superposition de la carte vectorielle d'une année sur la couverture aérienne de l'année précédente a montré des décalages importants qui ont rendu l'évaluation et/ou le report de nouvelles limites difficiles.
- Enfin, la photo-interprétation est un exercice lent et extrêmement subjectif, dépendant de l'appréciation de chaque photo-interprète (choix des limites, compréhension et intérêt inégal porté à chaque thème, style de dessin...).

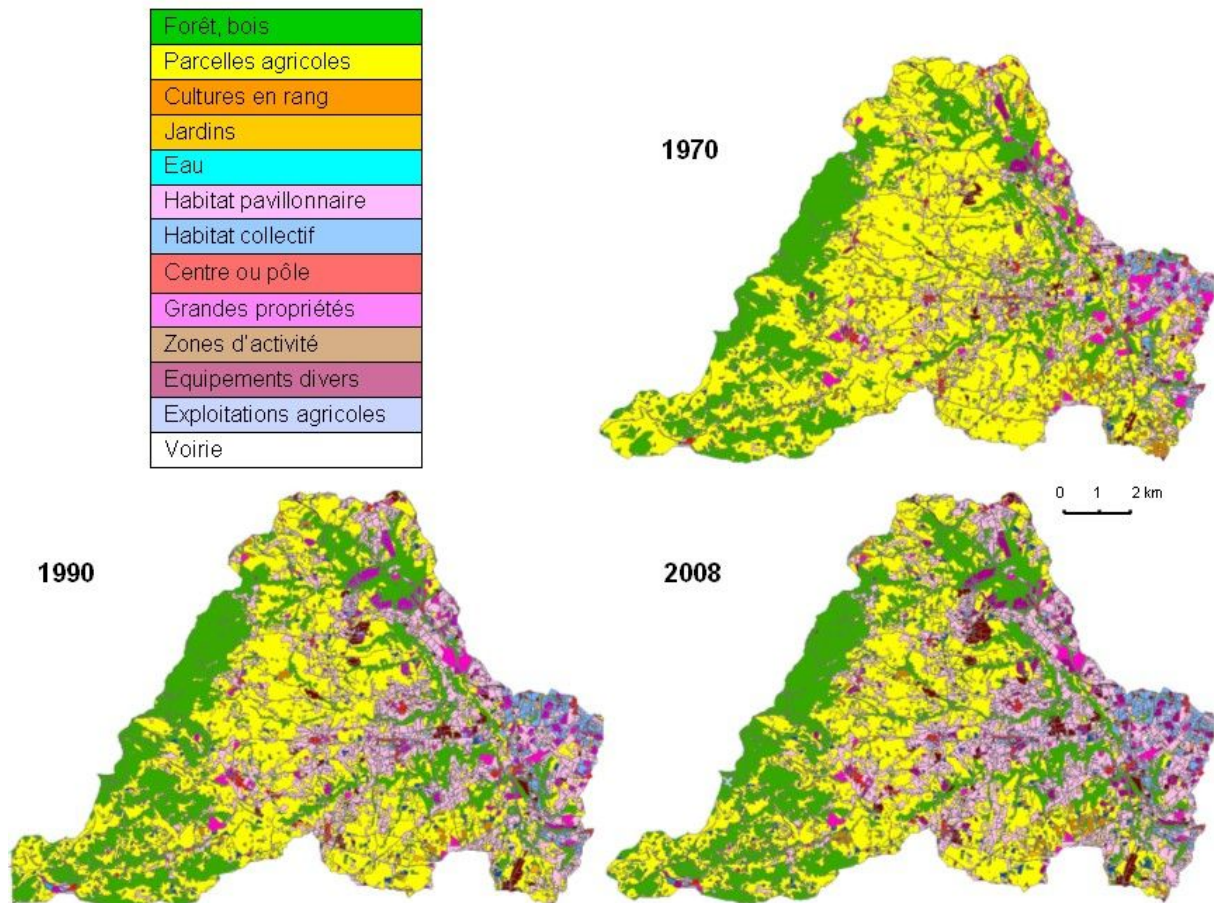


Figure 6.39 : Photo-interprétation des usages du sol de 1970 à 2008 à partir de photographies aériennes IGN (UMR EVS, 2010)

### La cartographie de l'évolution de l'occupation des sols de 1990 à 2008 à l'aide des images satellites

La cartographie de l'occupation des sols a été menée avec un pas de temps de 10 ans à partir d'images Spot acquises en 1990, 1999 et 2008.

Plusieurs traitements leur ont été appliqués pour les rendre homogènes. Ces images de différentes résolutions (2.5 à 20 m) ont été ré-échantillonnées à 10 m.

Ensuite, pour rehausser la réponse des surfaces minérales ou de la végétation, ou encore pour distinguer les sols nus du bâti plusieurs indices ont été créés : indice de brillance, NDVI et indice de texture (Kermadi et al, 2010).

Se basant sur ces nouveaux canaux et sur des parcelles témoins, des classifications dirigées ont permis la réalisation d'une carte d'occupation du sol pour les trois dates. La Figure 6.40 présente la classification synthétique de trois saisons (printemps, été et automne) de l'année 1999.

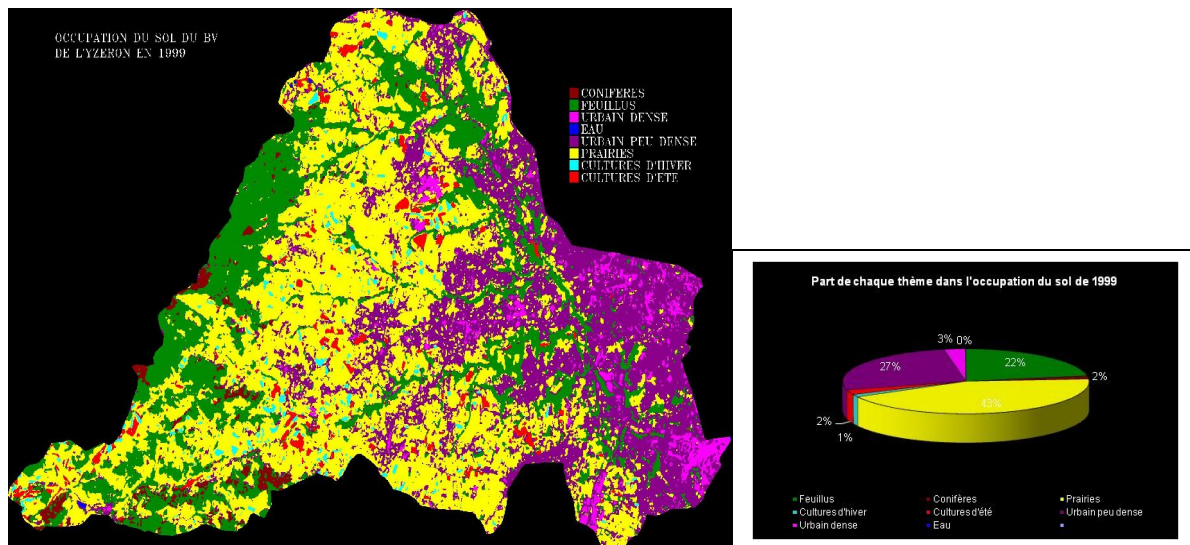


Figure 6.40: Carte de l'occupation du sol de l'année 1999 et part de chaque classe dans le BV (Kermadi et al., 2010)

La carte de l'année 1999 met en évidence la prédominance de la végétation basse (prairies, culture d'hiver, culture d'été) ; 45% de la superficie du bassin versant. Viennent ensuite les surfaces artificialisées (bâti, voiries), avec à peu près le tiers du bassin. Quant aux surfaces forestières (feuillus, résineux), elles occupent près du quart du bassin de l'Yzeron.

Si les classes prairies, culture d'été et culture d'hiver ont été facilement discriminées dans la classification de cette année, elles l'étaient moins pour les autres dates, notamment pour l'année 2008 possédant une seule image, celle du 22 septembre. Ainsi, pour suivre l'évolution de l'occupation du sol du bassin, nous avons regroupé nos huit classes en quatre : eau, végétation arborée (feuillus, résineux) et végétation non arborée (prairie, cultures, sols nus) (Figure 6.41)

La cartographie multitemporelle de l'occupation du sol est réalisée à partir de méthodes automatisées. Cependant, il importe de prendre en compte les saisons et le nombre d'image par année (printemps, été pour 1990, automne en plus pour 1999 et seulement automne pour 2008) ainsi que les différentes résolutions spatiales des images. 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. C'est ainsi que la classe des surfaces artificielles est surévaluée dans les images à résolution de 20 m (1990 et 1999) ; 25 et 30% contre 22.5% pour 2008. La végétation (arborée) est, par contre, sous-estimée, notamment lorsqu'elle a une présence ponctuelle par rapport à une classe minérale

dominante ; 22 et 24% pour les deux premières dates contre 35% pour 2008 (Figure 6.42).

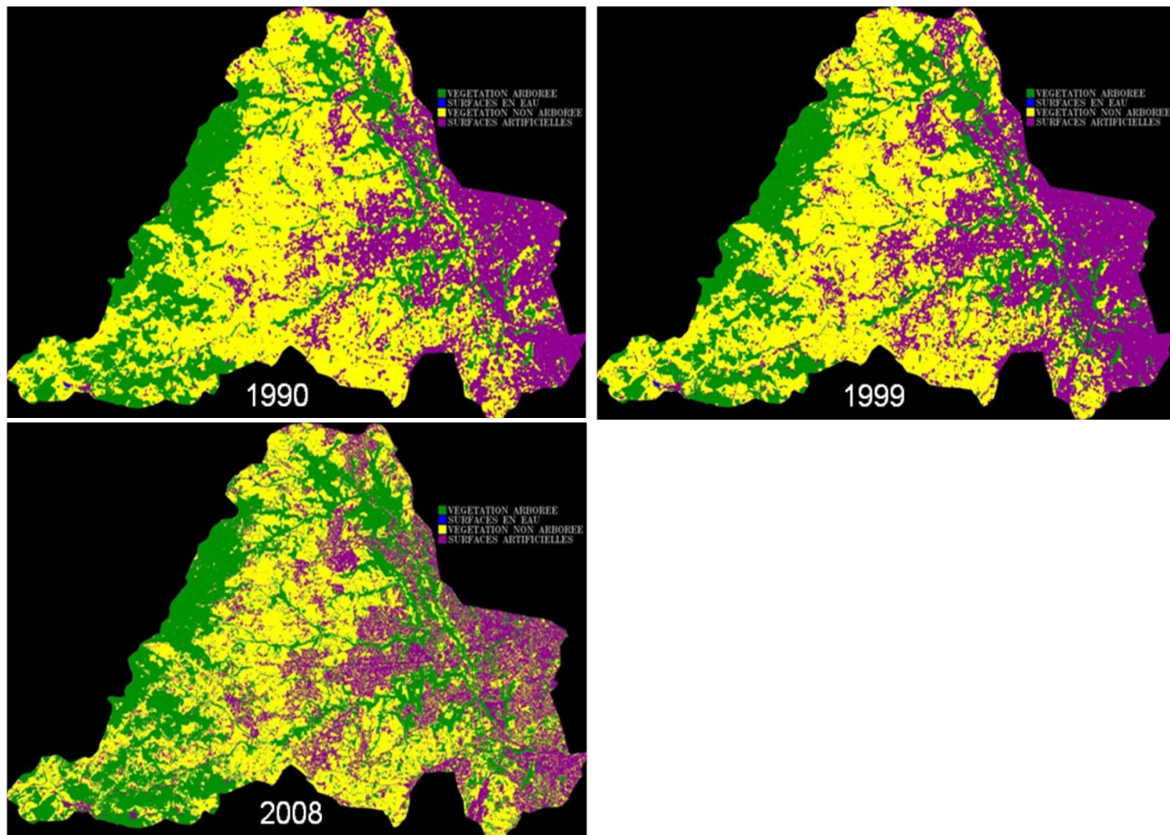


Figure 6.41: Evolution des grandes entités spatiales (1990 – 1999 – 2008)(UMR EVS, 2010)

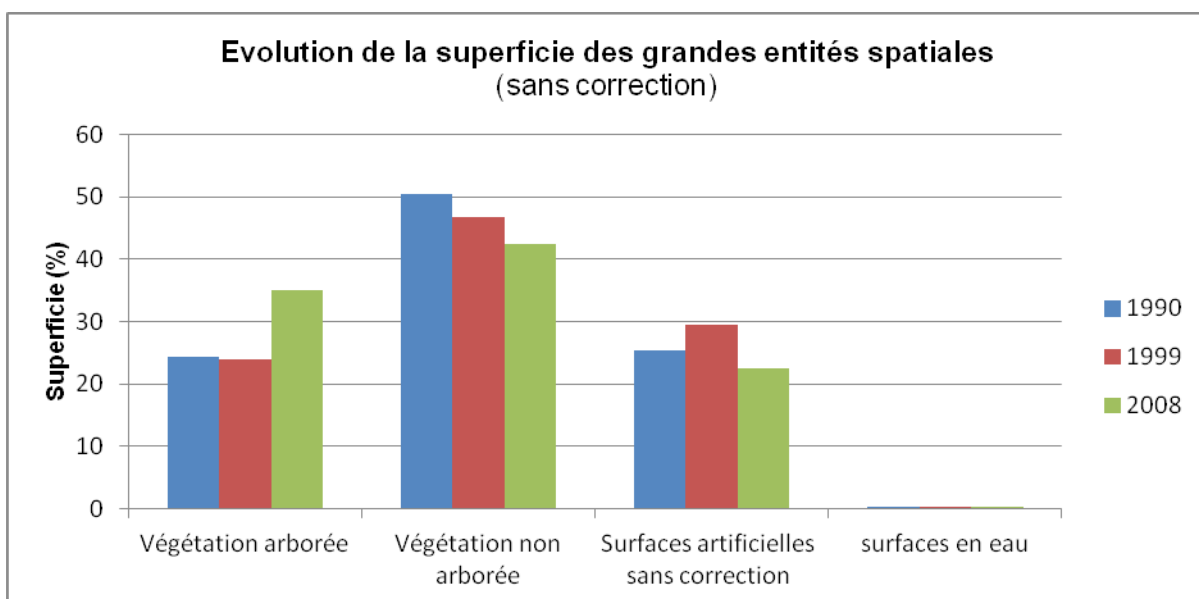


Figure 6.42: Evolution non corrigée de la superficie des grandes entités spatiales (1990 à 2008)(UMR EVS, 2010)

Pour remédier à ce problème de confusion et reconstituer l'évolution de l'occupation du sol entre les trois dates nous nous sommes aidés d'une classification basée sur un arbre décisionnel, en prenant comme référence la classification de 2008. Sa très haute résolution (2.50 m), permettant une classification plus précise, a servi de base pour reconstituer l'évolution de l'occupation du sol du passé tout en apportant des corrections sur les surestimations des surfaces artificielles et les sous-estimations de la végétation arborée de 1990 et de 1999 (Kermadi et al, 2011).

Les documents cartographiques ci-dessous (Figure 6.43, Figure 6.44 et Figure 6.45) présentent la reconstitution spatiale et temporelle corrigée de l'occupation du sol. Les classes ayant subi un grand changement sont :

- La superficie de la végétation arborée, sous évaluée avec la résolution des années 90, a augmenté de 11% en 2008. Ce gain est représenté par la mise en évidence de cette classe soit dans les espaces hétérogènes (espaces urbains) soit les espaces délimitant des parcelles homogènes ; haies des parcelles agricoles.
- La superficie des surfaces artificielles surévaluée dans les années 90 a baissé de 10 à 15 % selon les années (1990, 1999). Cette perte est liée notamment à la résolution fine de 2008 permettant une meilleure distinction des différents composants des espaces hétérogènes et homogènes.

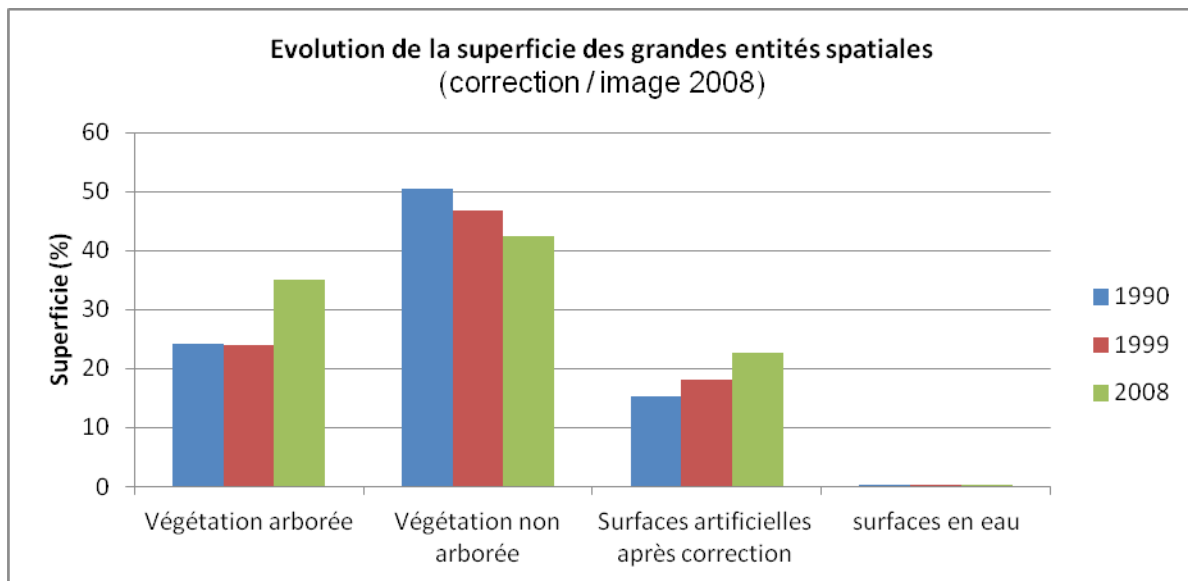


Figure 6.43: Evolution corrigée de la superficie des grandes entités spatiales (1990 à 2008) (UMR EVS, 2010)

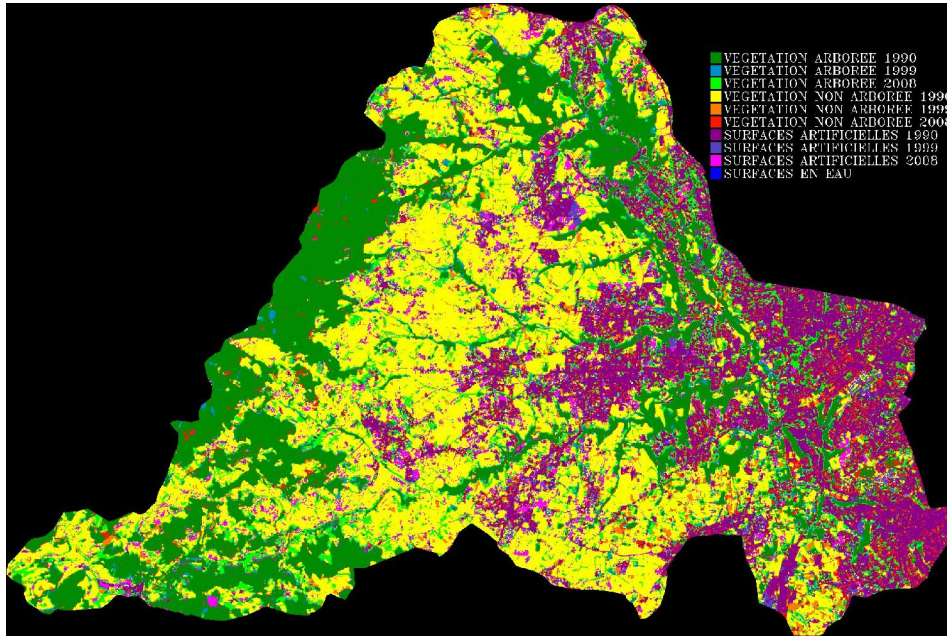


Figure 6.44: Evolution spatio-temporelle des grandes entités spatiales (1990-1999-2008) (UMR EVS 2010)

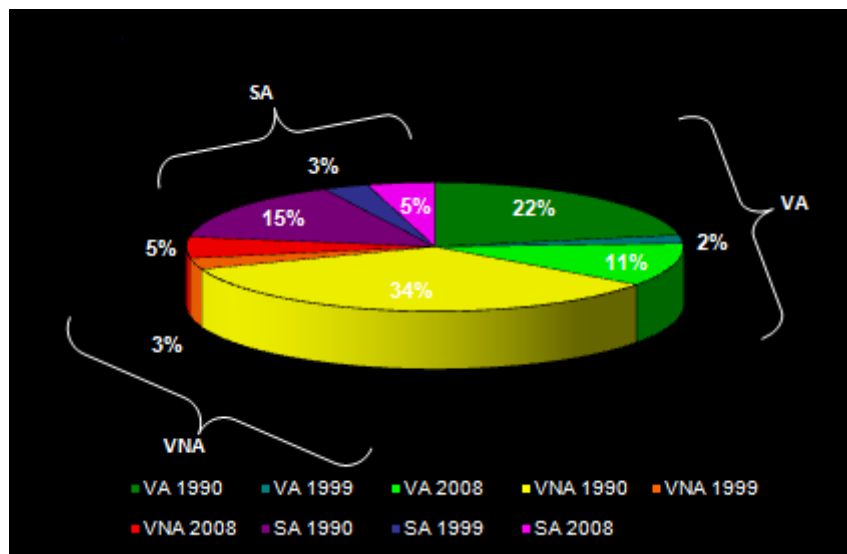


Figure 6.45: Part des évolutions des grandes entités spatiales entre 1990 et 2008 (UMR EVS, 2010)

Si le changement dans la classe végétation arborée correspond plus à une mise en valeur de cette classe confondue dans les années 90 avec d'autres classes, la classe des surfaces artificielles a connu une grande évolution. Le graphique de l'évolution de l'occupation du sol corrigé (Figure 6.43) montre que cette classe est passée de 15% à presque 23% (estimation issue de l'image Spot). L'augmentation de cet ensemble est confirmée par l'évolution de la population du bassin versant qui est passée de 144 000 à 164 000 habitants entre 1990 et 2006. L'augmentation des surfaces artificialisées s'est faite essentiellement au détriment des surfaces agricoles. L'accroissement urbain a concerné notamment les communes de la première et la deuxième couronne du Grand Lyon : Francheville, Saint Génis Les Ollières, Chaponost, Marcy-L'Etoile, Saint-Génis-Laval... (Figure 6.46)

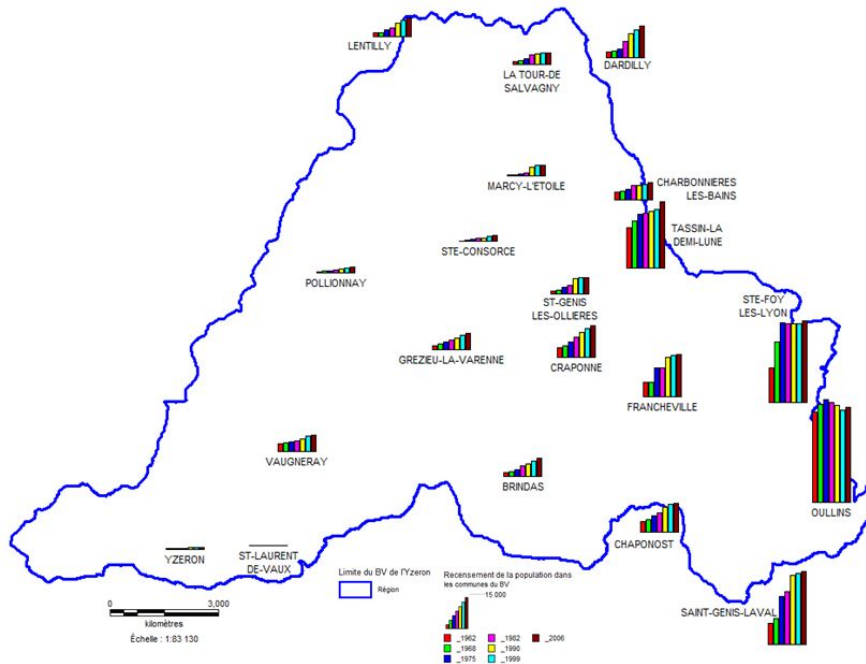


Figure 6.46: Evolution de la population des communes du bassin versant (1962 – 2006) (Kermadi et al., 2011)

Bilan de la cartographie de l’occupation des sols passée :

La cartographie automatisée à l’aide d’images satellites présente l’avantage de permettre le suivi périodique de la couverture bio-physique d’un bassin versant périurbain sur des superficies étendues, avec une grande liberté dans le choix des dates d’observation puisque l’acquisition des images est continue. La cartographie par photo-interprétation demande un temps de réalisation plus long et est plus coûteuse. Cependant, pour l’obtention d’une information sur les usages des sols, cette dernière méthode est encore aujourd’hui incontournable. De nombreuses bases de données géographiques du type CORINE Land Cover sont actuellement réalisées par photo-interprétation.

Tableau 6.4: Superficies des grands types d’usages et d’occupation (en %) calculées à partir des photographies aériennes de 1970 à 2008 et des images satellites de 1990 à 2008

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

Chaque méthode de cartographie apporte une information différente sur les surfaces. Le Tableau 6.4 montre une évaluation chiffrée de l’évolution des quatre grands types d’usages et occupations du sol du bassin versant de l’Yzeron. Les pourcentages mesurés varient pour des thèmes dont la signification est proche. Les objets : bâti, voirie, extraits automatiquement sont différents de l’entité « surfaces artificialisées », reconnues par photo-interprétation qui

rassemble dans ses limites, le bâti, la voirie mais également des éléments de végétation arborée et herbacée (Jacqueminet et al., fiche OTHU n° 24, 2011a).

#### 7.4. Tâche C : Etude prospective pour la définition de scénario futurs pour l'occupation des sols de l'Yzeron (UMR EVS)

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

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 (Delamarre, 2002 ; DATAR, 2010). Du côté de la recherche, c'est le terme de géoprospective qui tend à émerger (Voiron-Canicio, 2006 ; Houet et al., 2008).

Dans le cadre du projet de recherche AVuPUR, un atelier de prospective territoriale a été mis en place dans le bassin versant de l'Yzeron. Cet atelier relève d'une démarche de géoprospective, qui consiste à combiner prospective territoriale et simulation spatiale (Figure 6.47).

La mise en œuvre de cette démarche constitue le principal développement méthodologique de ces travaux (Dodane et al., 2010, 2011 ; Joliveau et al., 2010). À l'issue du projet de recherche, ce dispositif pourra être approfondi au service des collectivités territoriales et de leurs partenaires institutionnels.

#### Objectifs

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

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

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

Les résultats obtenus sont des cartes des usages du sol en 2030 (Joliveau et al., 2010). Elles peuvent être utilisées pour intégrer l'évolution de l'imperméabilisation des sols urbanisés à long terme dans la modélisation des flux d'eau dans un bassin versant périurbain.

#### La démarche

##### *L'atelier de prospective territoriale*

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

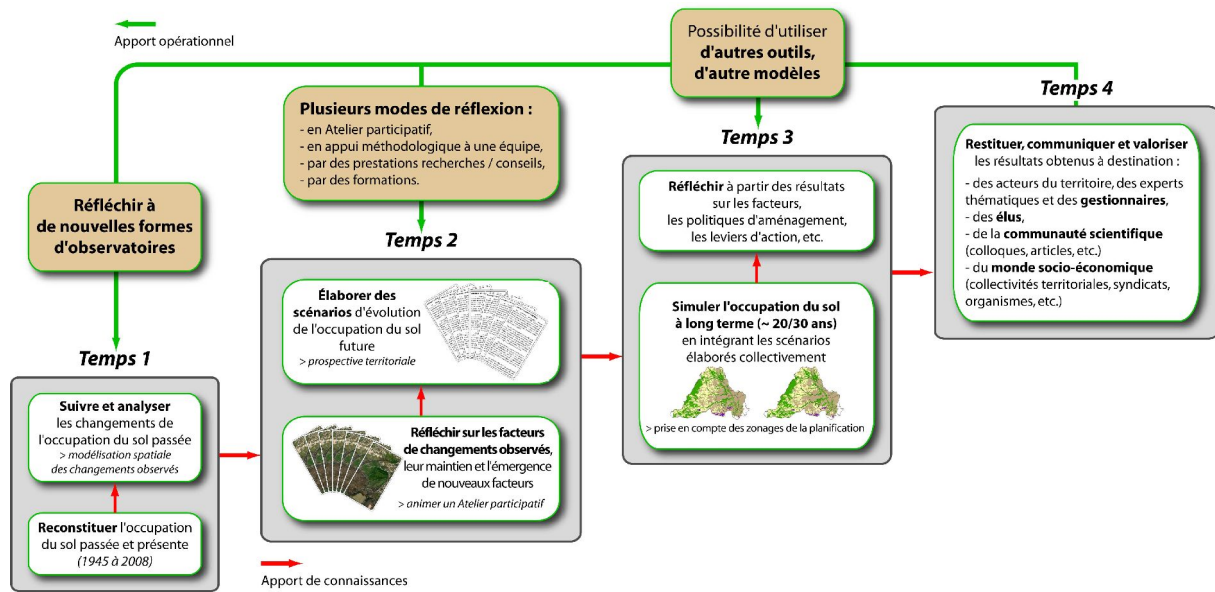


Figure 6.47: Les quatre temps de la démarche de géopropective mise en œuvre. Combiner prospective territoriale et simulation spatiale.

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.

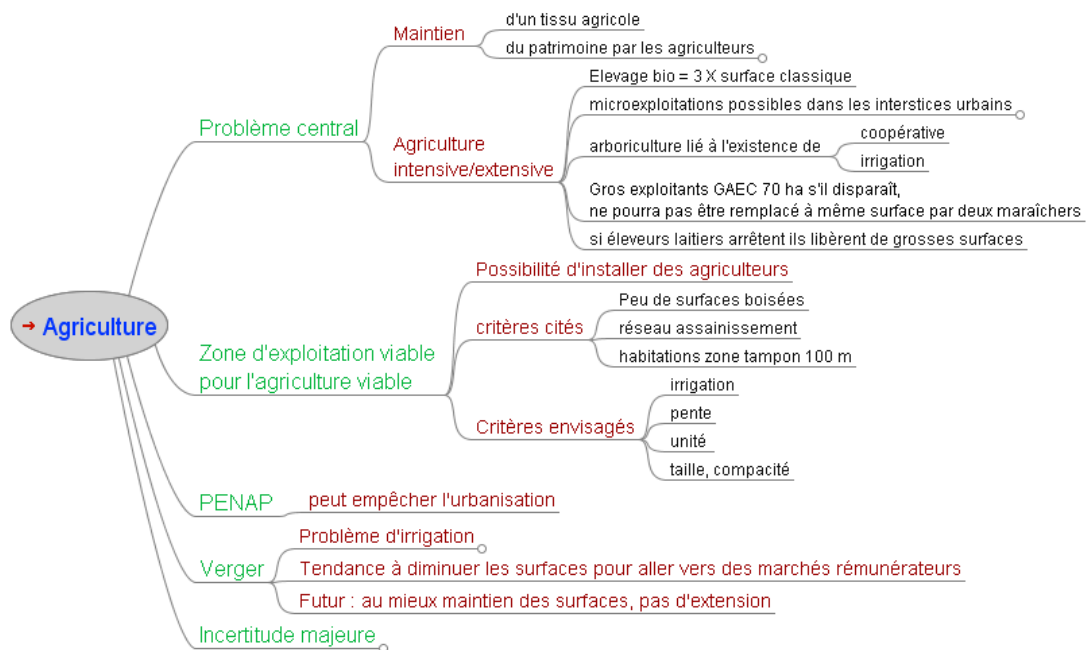


Figure 6.48: Un schéma des composantes explicatives pour comprendre les évolutions de l'occupation du sol future (schéma heuristique réalisé avec le logiciel libre Freemind). Exemple d'une question traitée : l'agriculture.

Ce travail de diagnostic collaboratif très fouillé produit un document qualitatif de type prospectif rassemblant les différents points de vue du collectif (Figure 6.48). Il permet



d'organiser les données nécessaires à la représentation de différentes thématiques, ainsi que de réfléchir sur les facteurs ayant déterminé les changements de l'occupation du sol dans le passé et de construire des schémas explicatifs pour le futur.

La deuxième séance est dédiée principalement à l'écriture de scénarios prospectifs d'évolution de l'occupation du sol à partir de l'analyse partagée des problèmes actuels, des tendances et des facteurs de changement de l'occupation du sol (Figure 6.49).

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

	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 (enrichement), sans contrainte réglementaire et sans effet.

Figure 6.49: Des scénarios prospectifs pour piloter des simulations spatiales

#### Modélisation et simulation

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

Les données utilisées proviennent d'une cartographie de l'occupation du sol en 1990 et 2008, réalisée à partir de la digitalisation manuelle de photographies aériennes de l'IGN (Jacqueminet et al., 2010a, 2010b, voir WP4 Tâche B, section 6.3).

Les évolutions de l'occupation du sol passée entre 1990 et 2008 ont été modélisées à partir de facteurs géographiques. La première difficulté est de pouvoir construire des modèles des transitions passées statistiquement valides. La seconde difficulté est de construire des simulations tenant compte des éléments issus de la réflexion prospective. Pour cela, il est possible de jouer sur les paramètres disponibles dans l'outil cartographique. Premièrement, la matrice de transition permet de fixer le rythme de chacune des transitions d'occupation du sol (par exemple pour simuler une densification). Deuxièmement, le paramétrage des zonages et des effets offre la possibilité de freiner ou d'accélérer une ou plusieurs transitions dans

certaines zones ou à une certaine distance d'un lieu. Il est possible d'intégrer dans la simulation les zonages des Plans d'occupation des sols et des Plans locaux d'urbanisme, notamment en prenant en compte les futures zones à urbaniser ou bien en respectant les zonages agricoles et naturels qui limitent ou interdisent les nouvelles constructions. Les effets sont liés à des projets ou à des situations et dépendent plus ou moins directement de réalités sociétales : l'affirmation d'une polarité accrue dans un centre urbain donné, l'instauration d'une gare ou d'un échangeur routier, etc.

C'est par l'intermédiaire de variantes sur un scénario tendanciel que les discussions de l'atelier de prospective territoriale sont traduites en simulations spatiales à l'horizon 2030 (Figure 6.50).

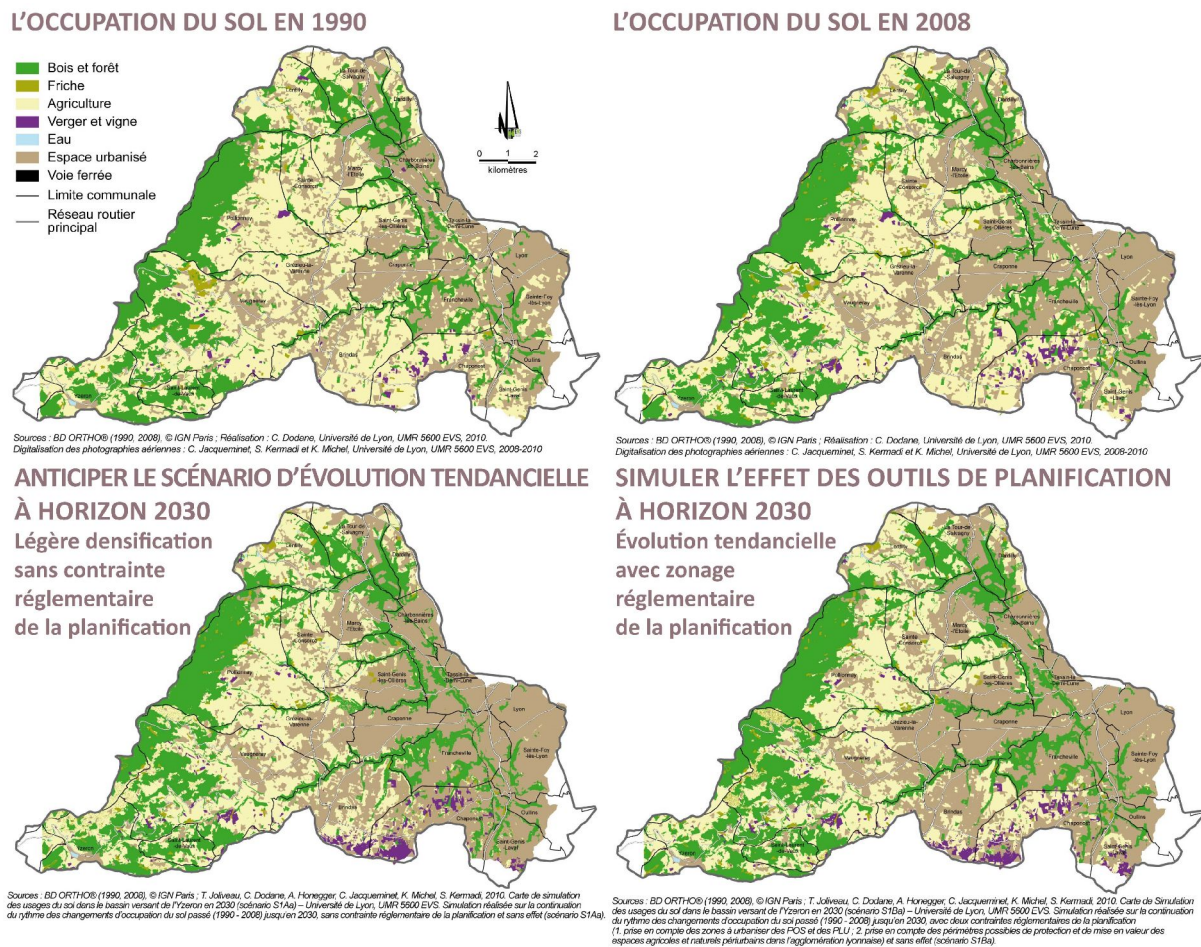


Figure 6.50: Des simulations spatiales des usages du sol à horizon 2030 dans le bassin versant de l'Yzeron pour discuter de l'efficacité des outils de planification (d'après Joliveau et al., 2011)

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

Il ne faut pas sous-estimer le temps nécessaire pour conduire une telle démarche prospective, surtout dans un cadre expérimental qui avait pour objectif de concevoir quasiment *ex nihilo* la

méthodologie de la démarche (atelier de prospective territoriale, modélisation et simulation). Sans comptabiliser ce temps de conception, et sous réserve de la disponibilité de données sur deux dates d'occupation du sol, il semble raisonnable de penser que la démarche prospective peut se dérouler sur 4 à 6 mois.

### Les résultats obtenus et les perspectives

#### *Résultats d'un point de vue opérationnel*

- Une opération menée à bien dans le temps imparti. L'exercice de réflexion prospective a été mené au bout, des informations nouvelles ont été collectés lors de travaux d'étudiants de qualité (Rossignol, 2011 ; Toulan, 2011), des simulations d'évolution de l'occupation du sol à 30 ans ont été conçues, réalisées et discutées en atelier.
- La mise au point d'un dispositif de recherche qui a intégré un protocole de suivi de la recherche et de validation (réunions d'évaluation, questionnaire de satisfaction...).
- Des partenaires opérationnels à la fois satisfaits de la démarche, des résultats obtenus et prêts – au moins sur le principe – à aider à diffuser la méthode.

#### *Perspectives à visée opérationnelle*

- Pour planifier un développement territorial plus durable, 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 et évaluer les impacts des changements d'occupation du sol à horizon de 20 à 30 ans, sur la densification du tissu urbain, sur le maintien de l'agriculture, la préservation de la biodiversité et sur les flux d'eau.
- Le suivi et l'analyse de la consommation d'espace (1945 - 2010), tels qu'ils ont été réalisés dans le cadre de ces travaux de recherche montrent un grand intérêt. Ils permettent d'apporter des éléments objectifs sur l'étalement urbain, la déprise agricole, la reforestation et plus généralement sur les dynamiques et les processus à l'œuvre dans les changements d'occupation du sol. Ces données peuvent directement servir dans le cadre du développement de dispositifs d'observation, tels que les observatoires de la consommation du foncier agricole mis en place par la loi d'orientation agricole de 2010.
- Dans la continuité du projet de recherche 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.

#### *Résultats d'un point de vue recherche*

- Des résultats méthodologiques sur l'usage (intérêts et limites) d'un modèle statistique de simulation de l'occupation du sol comme LCM.
- Une fenêtre d'observation très originale et rare sur la réflexion d'experts territoriaux confrontés à de nouveaux objets et à une arène originale.
- Une innovation méthodologique dans la manière de mobiliser un Atelier d'experts autour des questions de prospective et des simulations spatiales d'occupation du sol (méthodes d'animation, de collecte des avis et de communication des résultats.).
- Des scénarios qui ont pu être utilisés par les hydrologues dans le cadre du projet.

### *Perspectives de recherche*

- Poursuivre la réflexion sur la dimension prospective / géoprospective. 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 (Mas et al., 2011).
- Comprendre les logiques d'acteurs à partir de l'analyse des discours à partir du corpus réuni (retranscription des débats en Atelier, des entretiens individuels et des séances de restitution). Le questionnaire d'évaluation soumis aux participants de l'Atelier de prospective territoriale Yzeron 2010 montre que la démarche de géoprospective apparaît comme « **une émulsion collective** » à même de faire émerger « **un regard enrichi du bassin versant de l'Yzeron** ». L'Atelier revêt finalement pour eux un statut particulier, celui d'une respiration vécue comme un luxe.
- 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** ».
- Évaluer la place de la carte et des représentations spatiales dans les réflexions des acteurs.
- L'analyse et le bilan critique de l'usage d'un outil de simulation de l'occupation du sol dans un Atelier est à approfondir. Le critère de la transparence (Godet, 1991) de l'approche est questionnable : modèle complexe, à base statistique avec réseau de neurones, peu facile à expliquer... La traduction des idées de scénarios issues de l'Atelier en simulations informatiques n'est pas non plus facilement explicitable. Comment mettre les modèles développés par les scientifiques à l'épreuve des acteurs ?

### *7.5. Impacts sur la géomorphologie des cours d'eau (UMR EVS, Cemagref)*

Les travaux réalisés en termes d'impact de l'artificialisation des milieux, et notamment des rejets urbains de temps de pluie (RUTP) sur la géomorphologie des cours d'eau, ont visé plusieurs objectifs complémentaires les uns par rapport aux autres. Le premier visait à proposer une méthodologie d'estimation des débits critiques ( $Q_c$ ) de mise en mouvement des sédiments des cours d'eau, en considérant qu'une augmentation de la fréquence, de la durée de dépassement et/ou de l'intensité de ces  $Q_c$  pouvait être responsable d'incisions liées aux RUTP. Le deuxième objectif visait à l'évaluation des impacts hydrologiques de l'urbanisation sur les  $Q_c$ . Enfin le troisième objectif, qui constitue l'objectif final et qui s'appuie sur les résultats des premiers objectifs et sur des modélisations hydrologiques, a consisté à élaborer une carte du risque d'incision en 2030 sur 46 sous-bassins représentatifs de la diversité physiographique du bassin de de l'Yzeron (voir section 6.6). Deux publications dans des revues internationales sont prévues pour valoriser les résultats obtenus.

Deux cours d'eau ont été instrumentés pour identifier les meilleures équations de débits critiques et établir les liens statistiques avec les données hydrologiques disponibles : le

ruisseau de la Chaudanne (milieu périurbain), et le ruisseau du Presles (milieu rural). Les résultats obtenus sur ces deux tronçons sont détaillés dans ce qui suit :

### Estimation des $Q_c$ sur la Chaudanne

L'approche est tout d'abord fondée sur l'utilisation et la comparaison des résultats de 12 équations de détermination des débits critiques (approche théorique). Si l'on considère la situation la plus optimiste vis-à-vis de la mobilité des particules (les débits critiques les plus faibles), la mise en mouvement significative de toutes les particules ou des particules supérieures ou égales au diamètre médian nécessiterait un débit unitaire  $\approx 0,11-0,19 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  (Figure 6.51).

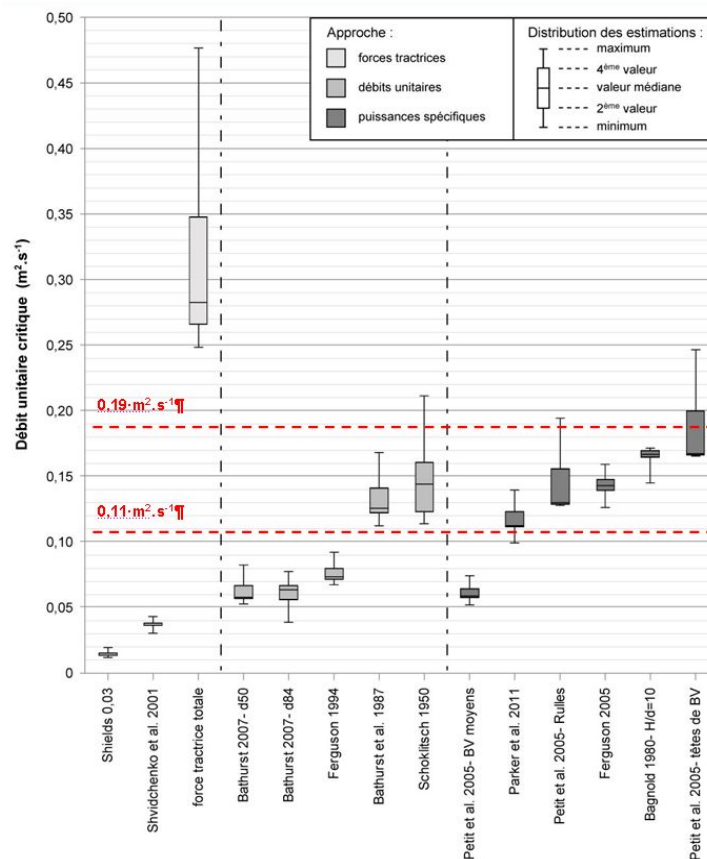


Figure 6.51 : Débits unitaires théoriques de mise en mouvement sur les cinq transects du tronçon suivi de la Chaudanne.

Ces résultats ont été confrontés par la suite aux résultats d'expérimentations *in situ* pour étayer et discuter les résultats théoriques. Cette approche expérimentale a reposé sur la mesure de déplacements de galets peints (Figure 6.52) pour différentes intensités de crues (14 événements), et dans une moindre mesure sur celui de sédiments fins (suivi de la turbidité, des concentrations en MES et de la granulométrie des MES).



*Figure 6.52: Illustration de l'utilisation de galets peints pour l'estimation du débit critique des sédiments grossiers. A gauche : avant la crue, à droite, après la crue.*

Le suivi sur le terrain du transport des particules grossières a permis de déterminer le nombre/pourcentage des particules mises en mouvement. Le nombre de particules mobilisées montre une nette inflexion entre  $0,11$  et  $0,19 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  (Figure 6.53), ce qui consolide les résultats de l'approche théorique. Au-delà de ces valeurs de débit unitaire une part importante (plus de 20 %) des particules grossières est mise en mouvement. Etant donné le biais méthodologique lié à la mise en place des traceurs qui entraîne leur surexposition et donc une sous-estimation des conditions critiques de mise en mouvement, il est possible de considérer que les débits unitaires morphogènes sont vraisemblablement supérieurs à  $0,11 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ .

Par ailleurs, les particules sableuses semblent être mises en mouvement sur la Chaudanne pour des écoulements légèrement plus faibles, lorsque les premières particules grossières du lit sont mises en mouvement (environ 10% des traceurs). Pour autant, cela ne s'accompagne pas d'une augmentation de la charge en suspension, et il est impossible d'interpréter ces observations du point de vue de la stabilité du lit, d'autant plus que le nombre d'observations est très limité.

Le passage des débits unitaires en débits en  $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$  a été réalisé pour une largeur à pleins bords de 2,4 m. Il s'agit d'une valeur intermédiaire entre la largeur à pleins bords moyenne du tronçon situé en amont de l'incision (2,5 m) et la largeur à pleins bords théorique moyenne estimée à partir de relations de géométrie hydraulique aval et de la superficie du bassin versant (2,3 m).

Nous retenons 3 seuils pour l'analyse de l'évolution des conditions hydrologiques de mise en mouvement : un seuil minimal, un seuil maximal correspondant à l'intervalle précédemment défini ( $0,11$ - $0,19 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ), ainsi qu'une valeur médiane ( $0,15 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Sur la Chaudanne cela conduit donc aux débits critiques suivants : 264, 360 et  $456 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

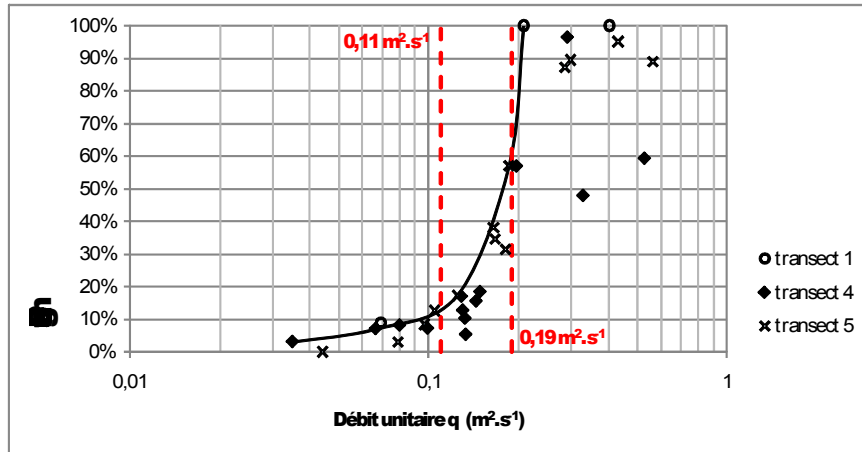


Figure 6.53: Résultats de l'approche expérimentale menée sur la Chaudanne : pourcentage de particules grossières mises en mouvement en fonction du débit unitaire. Le débit critique de mise en mouvement correspond à la nette inflexion sur la courbe et est indiqué par la ligne verticale en rouge (thèse L. Grosprêtre, 2011).

#### Estimation des $Q_c$ sur le Presles

D'importants problèmes métrologiques (pannes, calage du seuil de prélèvement d'eau, etc.) n'ont permis de suivre qu'un faible nombre de crues (3). Par ailleurs, les problèmes de détarage et d'enregistrement des hauteurs d'eau rendent les données relatives aux MES quasi-inexploitables. De plus, aucune particule grossière n'ayant été mobilisée pendant toute la campagne de mesure, quasiment aucune information utile n'a pu en être déduite (thèse L. Grosprêtre).

#### Indicateurs hydrologiques pertinents pour caractériser la mise en mouvement des sédiments

Sur le tronçon de la Chaudanne où l'estimation du débit critique de mise en mouvement des sédiments avait été possible et où les écoulements fluviaux sont impactés par la présence de déversoirs d'orages, il a été possible d'évaluer l'impact de ces derniers sur les débits critiques. Pour ce faire, les techniques de filtrage présentées en section 3.3 (WP1, Tâche B) ont été utilisées pour déterminer le débit dans la Chaudanne à La Léchère avec ou sans impact des RUTPs (Figure 6.54). Le Tableau 6.5 illustre l'augmentation de la durée de dépassement des  $Q_c$  (durée totale et durée moyenne), de la fréquence de dépassement de ces valeurs, des volumes de dépassement et de l'augmentation des débits de pointe supérieurs à  $Q_c$  entre la série « naturelle » reconstituée et la série observée, impactée par les RUTPs. Les résultats sont présentés pour la valeur du débit critique retenue et les bornes de l'intervalle d'incertitude sur cette valeur, déterminées par la méthode Baratin (cf section 3.2). Les résultats illustrent le fait que les RUTPs conduisent à des crues plus courtes, plus intenses, et surtout plus fréquentes. Ces trois évolutions peuvent contribuer aux incisions. On notera cependant que la durée moyenne de dépassement du seuil diminue avec un nombre d'événements plus importants mais de durée plus courte, ce qui est cohérent avec les débits de surverse urbains. C'est clairement la fréquence de dépassement des  $Q_c$  qui est l'indicateur montrant la plus forte augmentation avec l'urbanisation. Il est cependant difficile à ce stade de trancher sur l'indicateur le plus pertinent pour expliquer et prédire les incisions.

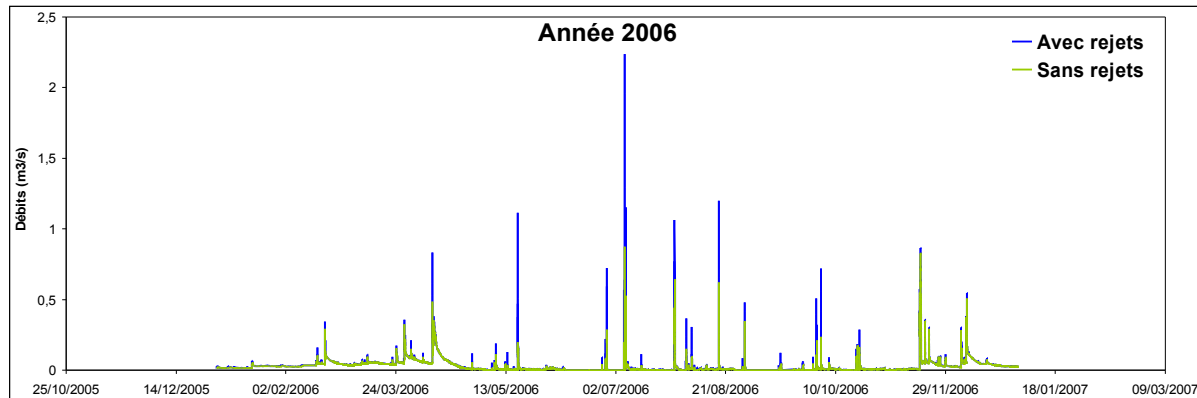


Figure 6.54: Illustration du filtrage de la série de débits à la station de la Chaudanne à La Léchère. Les débits mesurés (avec impact des RUTPs) apparaissent en bleu. La série en verte est la série reconstituée s'il n'y avait pas ces RUTPs.

Tableau 6.5 : Statistiques annuelles moyennes de dépassement des débits critiques de mise en mouvement

	Débit (L s <sup>-1</sup> )	Fréquence (an <sup>-1</sup> )	Durée cumulée (h an <sup>-1</sup> )	Durée moyenne (min)	Volumes sur- critiques <sup>a</sup> (dam <sup>3</sup> an <sup>-1</sup> )	Rapport moyen des débits de pointe	
Presles	Débit mesuré	123	1-9	3,5-54	210-360	Nr	
	Débit mesuré (QTM)	264	31,5	74,0	141	101	
		360	20,9	45,7	131	82	
Chaudanne	Débit naturel reconstitué (QNR)	456	16,2	33,0	123	68	
	Débit naturel reconstitué (QNR)	264	26,7	67,0	151	92	
		360	17,3	41,4	143	74	
Evolution (QTM-QNR)		456	12,6	29,9	139	62	
		<b>264</b>	<b>4,8 (+18%)</b>	<b>7,0 (+11%)</b>	<b>- 9 (-6%)</b>	<b>9,4 (+10%)</b>	<b>1,30</b>
		<b>360</b>	<b>3,6 (+21%)</b>	<b>4,3 (+10%)</b>	<b>-12 (-8%)</b>	<b>7,6 (+10%)</b>	<b>1,39</b>
	<b>456</b>	<b>3,6 (+28%)</b>	<b>3,1 (+10%)</b>	<b>-16 (-12%)</b>	<b>6,3 (+10%)</b>	<b>1,43</b>	

<sup>a</sup> correspond à la surface moyenne de l'hydrogramme annuel située au-dessus des débits critiques, exprimée en décamètre cube par an (10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> an<sup>-1</sup>). QTM : débit total mesuré (avec des RUTPs) ; QNR : débit naturel reconstitué.

Les trois indicateurs suivants ont donc été retenus pour l'évaluation du risque d'incision en 2030.

- le rapport fréquence de dépassement de  $Q_c$  avec impact urbain / fréquence de dépassement de  $Q_c$  sans impact urbain
- le rapport durée de dépassement de  $Q_c$  avec impact urbain / durée de dépassement de  $Q_c$  sans impact urbain
- le rapport pic de crue supérieur à  $Q_c$  avec impact urbain / pic de crue supérieurs à  $Q_c$  sans impact urbain



## 7.6. Tâche E : Simulation de l'évolution du régime hydrologique et impact sur le risque d'incision en 2030 (INSAVALOR, UMR EVS, Cemagref)

Les travaux présentés dans cette partie permettent une première synthèse de différentes approches développées dans le projet pour proposer un premier diagnostic sur l'impact possible des modifications d'occupation des sols en 2030 sur le régime hydrologique et le risque d'incision dans le bassin de l'Yzeron.

Ce travail exploite des scénarios d'évolution de l'occupation du sol en 2030 présentés dans la section 6.3, des développements en termes d'outils de modélisation présentés en section 5.3, ainsi que les résultats présentés en 6.5 sur la compréhension des processus géomorphologiques et de l'impact des RUTPs sur la mise en mouvement de sédiments.

Afin d'illustrer la méthode proposée et son potentiel, 45 sous-bassins versants ont été sélectionnés. L'échantillon a été composé par l'équipe de géographie de l'UMR 5600 afin de couvrir toute la gamme d'occupation du sol de la forêt aux prairies, et cultures avec une surface urbaine sensible et la présence ou non d'incisions des cours d'eau. Ils sont aussi représentatifs des situations d'évolution prévues pour l'occupation du sol en 2030 dans la tâche C du WP4 (section 6.4). Les modèles CANOE et QdF ont été utilisés pour prédire les débits de crue attendus en 2030 en ces 45 points.

Les débits ont été simulés à l'aide du modèle CANOE (Sogreah et INSAVALOR, 2005) au pas de temps de 15 mn pour 88 événements pluvieux complexes ou simples sélectionnés dans la période 1988-2006 (soit 19 années) et en considérant l'état du sol 2008. La même chronique de pluie a été utilisée sur les 45 sous-bassins selon un scénario d'évolution du sol probable à l'horizon 2030 (UMR5600, voir WP4 Tâche C, section 6.4).

Pour chacun des bassins il a été fourni un débit critique (maximum et minimum) de mise en mouvement du substrat (Thèse L. Grosprêtre, 2011) à partir de relevés de terrain. L'analyse a consisté à extraire à l'aide d'une routine automatisée (Cemagref) les fréquences de dépassement des débits critiques pour chacun des sous-bassins, ainsi que les durées de dépassement et les débits maximum atteints durant les phases de dépassement.

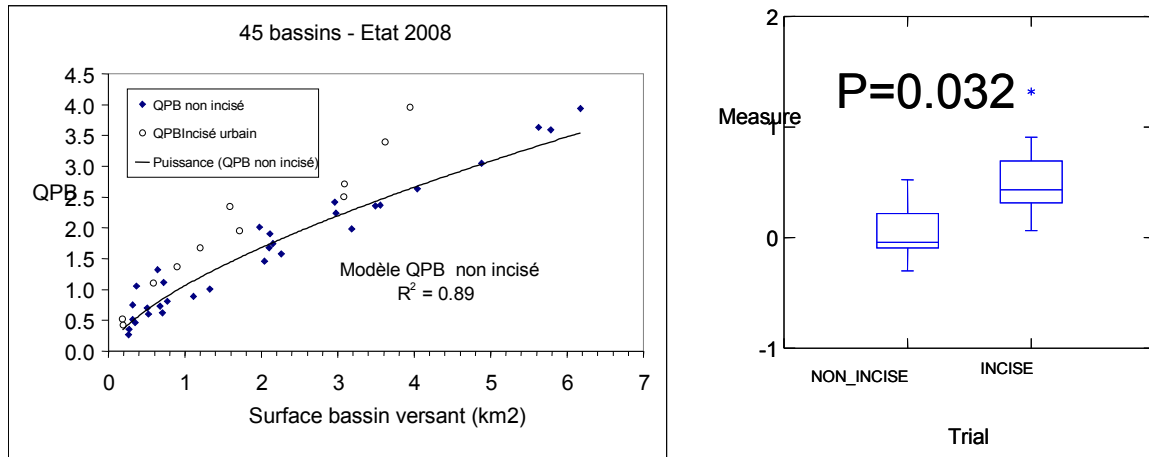
### Résultats pour le modèle QdF (décrit en section 5.3) en terme de risque d'incision en 2030

Le débit de pointe de la crue de période de retour 2 ans (QIXA2) a été retenu comme variable d'intérêt dans la modélisation QdF. Ce débit est statistiquement proche du débit de plein bord QPB des cours d'eau de plaine. Il a par ailleurs été validé sur 19 autres stations du bassin versant de l'Yzeron (Navratil et al. 2011, soumis) où des mesures du débit de plein bord étaient disponibles. Il a aussi été constaté (voir 6.5) un lien entre le pourcentage de rejets directs aux cours d'eau (présence de buses de surverses de déversoir d'orage et rejet pluvial) et la présence d'incision dans les cours d'eau pour les bassins versants de moins de 4 km<sup>2</sup>. Ces rejets directs proviennent dans leur grande majorité du ruissellement pluvial urbain. Pour les 45 sous-bassins sélectionnés nous tentons donc d'évaluer la probabilité d'augmentation de l'incision des cours d'eau avec le développement urbain.

L'hypothèse de travail initiale était de comparer le débit de plein bord ( $Q_{PB}$ ) au débit critique ( $Q_c$ ) en calculant la différence relative :  $DR = (Q_{PB} - Q_c) / Q_c$ . Un rapport faible ou négatif devait montrer une plus grande facilité du bassin à atteindre ou dépasser le  $Q_c$  et donc se traduire par la présence d'une incision. Un rapport positif fort aurait été peu favorable à la présence d'une incision. Cependant, aucune relation consistante n'est apparue entre  $DR$  et  $Q_{PB}$  (ou même les débits de pointe de période moyenne de retour 5 et 10 ans). Ce résultat n'est pas inconsistant en ce sens que les débits critiques sont liés aux caractéristiques géomorphologiques des cours

d'eau qui diffèrent selon les types hydro-géomorphologiques (Schmitt et al., 2004) alors que les débits de plein bord sont une expression quantitative de la débitance du cours d'eau.

La deuxième hypothèse de travail s'est concentrée sur l'évolution du *QPB* entre bassin incisés et non incisés. La première étape consiste à vérifier que le *QPB* est une variable discriminante entre les sous-bassins incisés et ceux qui ne présentent pas d'incision (observations de 2008).



*Figure 6.55: (gauche) Distribution des QPB périurbains pour les bassins à cours d'eau incisé (rond blanc) et non incisé (losange noir). La courbe représente le modèle de référence ajusté par les moindres carrés des stations non incisées. (droite) La déviation du QPB est calculée par différence au modèle.*

Compte tenu des éléments de validation présentés dans la tâche B du WP3 (section 5.3) pour le modèle QdF (approche probabiliste) le *QIXA2* périurbain est calculé comme la somme du *QIXA2* rural (modèle QdF rural) et du *QIXA2* urbain (modèle QdF à ruissellement rapide). La Figure 6.55 présente l'évolution du *QPB* en fonction de la surface du bassin, en distinguant les bassins incisés et ceux qui ne le sont pas (gauche). La Figure 6.55 (droite) compare les distributions des écarts à un modèle ajusté sur les bassins non incisés pour le sous-échantillon des bassins incisés et ceux qui ne le sont pas.

La Figure 6.55 (droite) compare les distributions statistiques des écarts ainsi constitués. On constate que le *QPB* est bien une variable statistiquement discriminante ( $p=0.03$ ) entre les cours d'eau incisés et non incisés. L'incision est une réponse géomorphologique au surcroît de débit généré par le ruissellement urbain mais aussi au déficit de matériaux qui le caractérise par rapport à un débit équivalent dans le cours d'eau. Par ailleurs le *QPB* est un reflet de l'adaptation du gabarit du cours d'eau à une fréquence de débit de crue plus importante.

La condition de variable discriminante étant vérifiée, il a été recherché la probabilité d'occurrence des cours d'eau incisés en fonction de l'importance du développement urbain. On s'attend en effet à une réponse variable des cours d'eau en fonction de leur caractéristiques granulométriques propres, liées aux pentes et aux types de substrats érodés dans les versants et les colluvions. On observe ainsi 3 stations « naturellement » incisées et qui traduisent le manque d'apport sédimentaire (stations 5, 8 et 22). Les bassins et corridors sont alors très boisés.

Le rapport du  $QPB$  périurbain au  $QPB$  rural a permis d'identifier que, à partir et au-dessus d'un rapport de 1.3, 50% les cours d'eau étaient incisés (Figure 6.56, gauche). Le  $QPB$  a été recalculé pour les 45 stations en utilisant le scénario d'évolution des usages du sol en 2030. L'augmentation des surfaces urbaines génère plus de ruissellement, ce qui se manifeste par l'augmentation de l'amplitude du  $QPB$  et un nombre plus important de stations (11 en 2008 et 16 en 2030) qui passent au-dessus du rapport de 1.3 (Figure 6.56, droite). On peut considérer que c'est une estimation basse et que la réalité devrait se situer au-delà de 16.

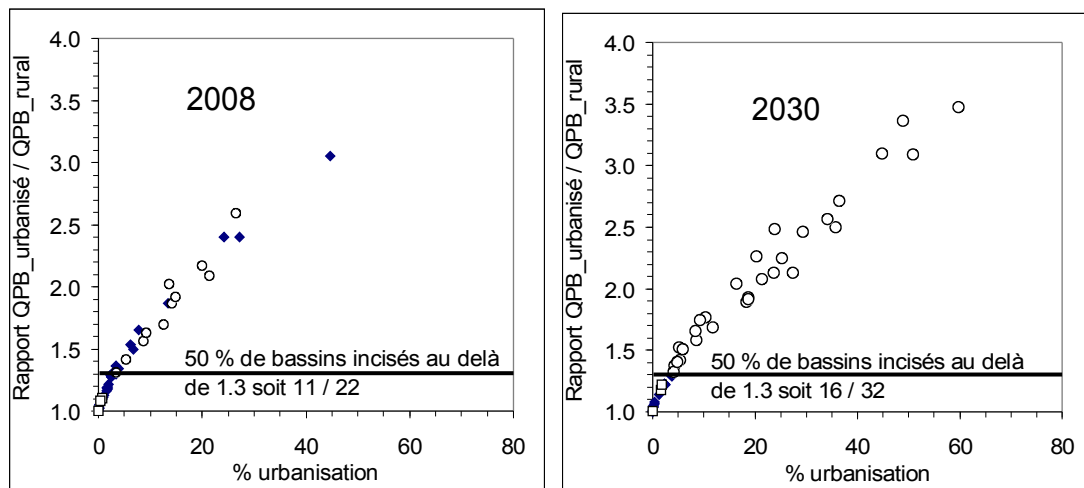


Figure 6.56: Distribution du rapport  $QPB_{\text{périurbain}} / QPB_{\text{rural}}$  en 2008 (gauche) et 2030 (droite). Stations des cours d'eau incisés avec urbanisation (ronds blancs) et sans urbanisation (carrés blancs), stations non incisées (losanges bleus).

### Mise en œuvre du modèle CANOE (décrit en section 5.3) pour évaluer le risque d'incision en 2030

Dans cette application, afin de limiter les temps de calcul, le modèle complet de l'Yzeron a été simplifié, ce qui permet de ne conserver que les parties amont correspondant à 44 sous-bassins versants (n°2 à n°45) pré-identifiés (Figure 6.57). L'intérêt d'utiliser CANOE est ici limité puisque le rôle des écoulements dans le système hydrographique est ici réduit par rapport aux processus purement hydrologiques. Il faut cependant noter que sur certains sous bassins versants (par exemple Chaudanne aval ou Ratier aval), et pour des pluies courtes et intenses, les temps de transit dans le réseau conduisent à une non superposition des pointes de débit entre le débit observé et le débit simulé.

Du fait des pentes très importantes dans les ruisseaux et de l'absence d'influence aval, les calculs hydrauliques ont été faits avec le modèle Muskingum et non avec le modèle Barré de Saint-Venant.

En termes de modélisation hydrologique, les hypothèses suivantes ont été retenues. Chaque sous-bassin versant a été simulé dans CANOE avec le modèle « mixte type B ». Ce modèle distingue les surfaces imperméables directement connectées au réseau, les autres surfaces imperméables et les surfaces perméables. Il prend en compte des pertes initiales et un coefficient de ruissellement fonction de la hauteur de pluie en deux heures pour les surfaces imperméables, des pertes initiales et le modèle de Horton avec un ajustement des paramètres par saison pour les surfaces perméables.

Les paramètres affectés aux différents sous bassins versants ont été calculés automatiquement à partir des données 2008 et 2030 en utilisant les règles suivantes :

- Surface, longueur du plus long parcours de l'eau, pente du plus long parcours de l'eau : données physiques mesurées
- Pourcentage de surface imperméable directement connectée au réseau et pourcentage de surface imperméable total : calculés à partir de l'analyse des cartes d'occupation des sols
- Pertes initiales sur les surfaces imperméables : 2 mm
- Pertes continues sur les surfaces imperméables : 3 mm hr<sup>-1</sup>
- Calcul du coefficient de ruissellement à partir des surfaces imperméables
  - Pour la part de pluie inférieure à 25 mm :
    - C = 0.8 sur les surfaces imperméables directement connectées
    - C = 0.1 sur les autres surfaces imperméables
  - Pour la part de pluie comprise entre 25 mm et 50 mm :
    - C = 0.9 sur les surfaces imperméables directement connectées
    - C = 0.2 sur les autres surfaces imperméables
  - Pour la part de pluie supérieure à 50 mm :
    - C = 1 sur les surfaces imperméables directement connectées
    - C = 0.3 sur les autres surfaces imperméables
- Coefficients de Horton pour les surfaces perméables ( $F0$ ,  $Fc$ ) et pertes initiales sur les surfaces perméables  $PI$  : calculés en fonction de la saison, comme moyenne pondérée des surfaces boisées et des autres surfaces perméables (Tableau 6.6). Le temps de saturation est pris constant pour tous les SBV et égal à 1 heure.  $PI$  par saison est ensuite corrigé en fonction de la pente moyenne du SBV et des saisons.

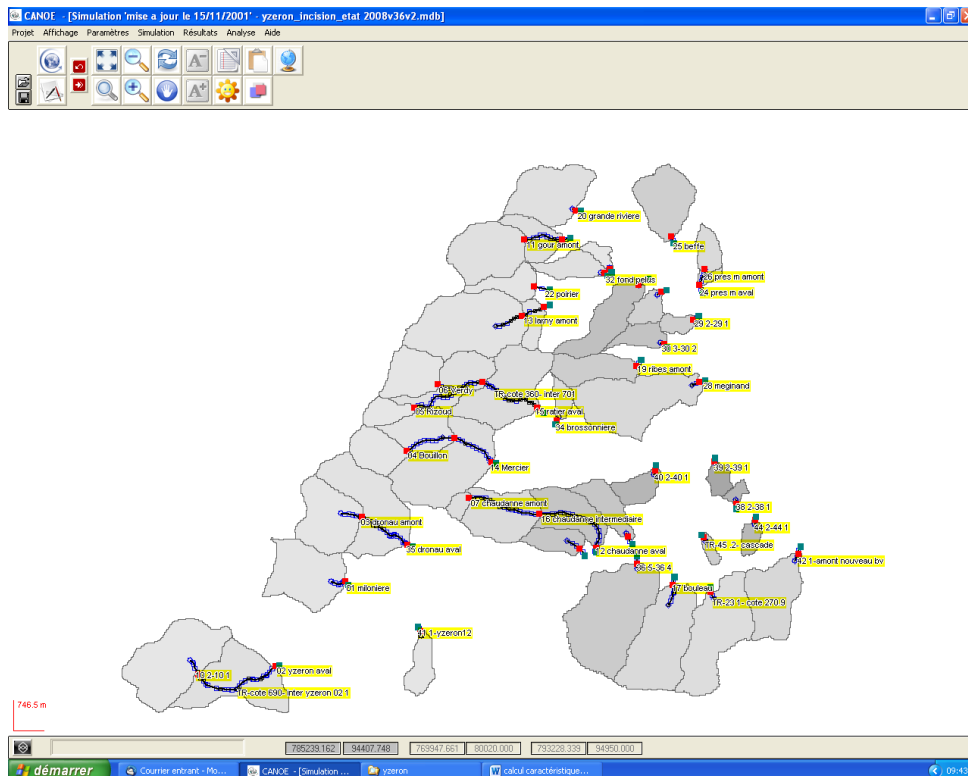


Figure 6.57 : Localisation des différents sous-bassins modélisés avec le modèle CANOE pour évaluer l'évolution 2008-2030 du régime hydrologique en crue et le risque d'incision en 2030

Pour les débits permanents ou quasi permanents (sources) deux simulations ont été effectuées

- Dans un premier temps les débits ont été calculés avec la fonction « eau parasite » en prenant en compte des apports saisonniers (une valeur par mois) et des apports événementiels (croissance linéaire pendant la pluie - décroissance linéaire après les pluies). L'ajustement a été fait sur Craponne et sur Taffignon. La répartition par SBV a été supposée proportionnelle aux surfaces. Cette simulation a conduit à des formes d'hydrogrammes peu réalistes.
- Une deuxième simulation a donc été effectuée en ne prenant en compte aucun apport permanent ou semi-permanent. C'est cette simulation qui a été retenue pour l'analyse des résultats.

*Tableau 6.6 : valeurs des paramètres hydrologiques des surfaces perméables en fonction de la nature de l'occupation des sols et de la saison*

	automne	hiver	printemps	été
	P11	P12	P13	P14
bois	18	18	20	30
autres surfaces	4	4	14	24
	F01	F02	F03	F04
bois	20	20	21	21
autres surfaces	10	10	12	12
	Fc1	Fc2	Fc3	Fc4
bois	5	5	5	7
autres surfaces	2	2	2	4

Ce modèle permet la simulation pluie-débit sur la base d'événements de pluie. Ainsi 88 pluies ont été sélectionnées à partir d'un seuil de cumul ou d'intensité moyenne en 18mn minimum par événement sur la période de 1985 –2006, soit 21 ans. Les simulations ont été réalisées pour les 44 bassins versants (n°2 à n°45) pré-identifiés. La variable d'intérêt est ici le débit critique de mise en mouvement du sédiment. L'augmentation du dépassement en fréquence et durée de ce débit peut expliquer le processus d'incision. Ces débits ont été calculés en fonction de données locales sur des parties de cours d'eau non incisées. Nous avons aussi examiné les quantiles de crue et leur évolution en 2030 en les comparant avec ceux estimés par le modèle QdF.

#### Résultats pour le modèle CANOE en terme de risque d'incision en 2030

Le premier objectif est de vérifier une liaison entre les statistiques réalisées sur la période 85-06 et les stations qui présentent une incision.

Le deuxième objectif est d'évaluer l'évolution du nombre de stations avec incision sous le scénario d'occupation du sol en 2030.

Les chroniques sont traitées par un module de calcul développé spécifiquement pour extraire les informations suivantes lors de chaque crue : (i) la durée de dépassement du seuil de débit critique ; (ii) la fréquence moyenne de dépassement ; (iii) le rapport du débit maximum de la crue au débit critique.

Les premiers résultats, en termes d'évolution 2008-2030 des fréquences mensuelles des dépassements des  $Q_c$ , sont donnés à titre d'exemple dans la Figure 6.58. Ils permettent clairement d'identifier les sous-bassins où le risque d'incision d'ici 2030 est le plus élevé, ce

qui pourra aussi être traduit cartographiquement. Des résultats similaires ont été obtenus pour les durées de dépassement des  $Q_c$ . Ces résultats rejoignent dans les grandes lignes ceux obtenus à partir des modèles QdF présentés plus haut, mais cela doit encore être approfondi.

Les résultats présentés dans cette section constituent une première application de la méthodologie proposée, combinant modélisation hydrologique, géomorphologie, exploitation de scénarii futurs d'occupation des sols. Ils illustrent le potentiel de la méthode mais doivent être consolidés par des études et une validation plus approfondies des hypothèses qui la sous-tendent avant que les estimations proposées puissent être exploitées à des fins de gestion.

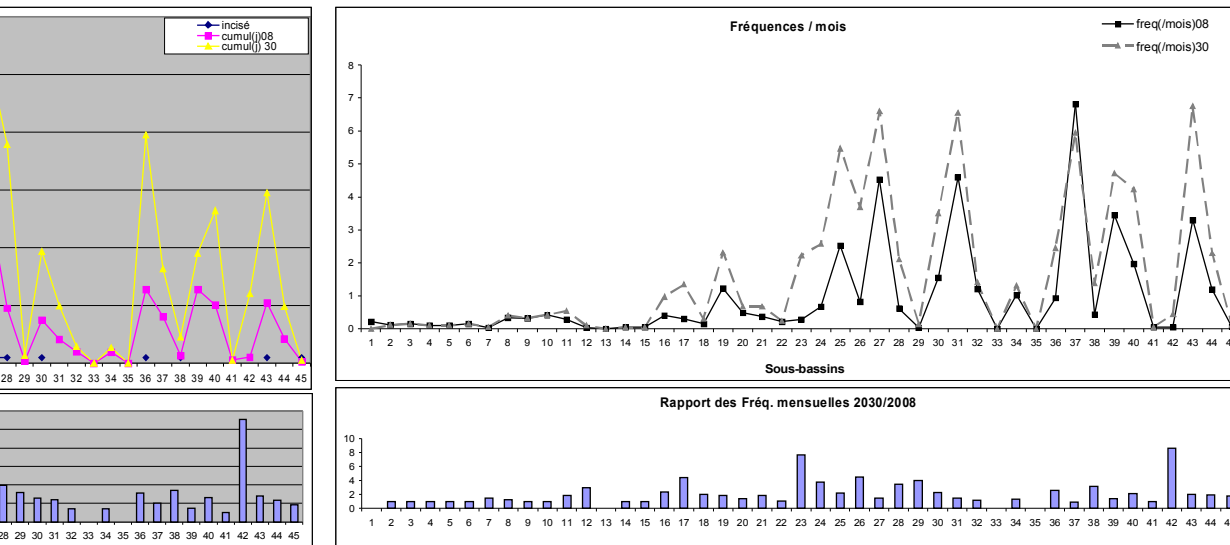


Figure 6.58 : Evolution 2008-2030 des fréquences mensuelles de dépassement des débits critiques des 44 sous-bassins.

Comparaison des quantiles de débit prédits par CANOE et QdF en période actuelle et en 2030  
 Pour le modèle QdF, les débits de pointe ruraux et urbains (rutp) ont été additionnés en faisant l'hypothèse que pour des bassins de petite taille (moins de 5 km<sup>2</sup>) les pointes de crues des deux réseaux étaient concomitantes (cf 5.4, Tâche C).

Pour le modèle CANOE qui distingue les dynamiques des écoulements urbains et ruraux, il faut noter que sur certains sous bassins versants (par exemple Chaudanne aval ou Ratier aval), et pour des pluies courtes et intenses, les temps de transit dans le réseau conduisent à une non superposition des pointes de débit.

Cela tendrait à invalider l'hypothèse de travail faite dans le modèle QdF. Cette dernière est cependant validée par ailleurs sur le bassin de l'Yzeron (Navratil et al. 2011, soumis). De plus CANOE utilise des événements isolés de pluie pour lesquels le débit de base avant la pluie est estimé. Enfin l'hypothèse de la concomitance est une hypothèse pessimiste sachant que la superposition des crues rurale et urbaine sera le plus souvent partielle.

Nous comparons ici les débits de pointe des périodes de retour 2, 5 et 10 ans générés par les modèles QdF et CANOE. Les quantiles de débits ont été extraits des chroniques simulées par CANOE à l'aide du programme spécifique développé au Cemagref.

La comparaison des débits prédits est réalisée en calculant l'écart relatif entre les modèles QdF et CANOE.

$$\text{Ecart relatif} = (QDF - CANOE) / QDF * 100$$

Les résultats sont reportés dans les graphiques de la Figure 6.59. L'écart relatif est représenté en fonction du % d'imperméabilisation du bassin. Les valeurs nulles indiquent une parfaite convergence entre les deux modèles. Les valeurs positives indiquent que le modèle QDF prédit des débits plus grands que CANOE. Les valeurs négatives indiquent le contraire.

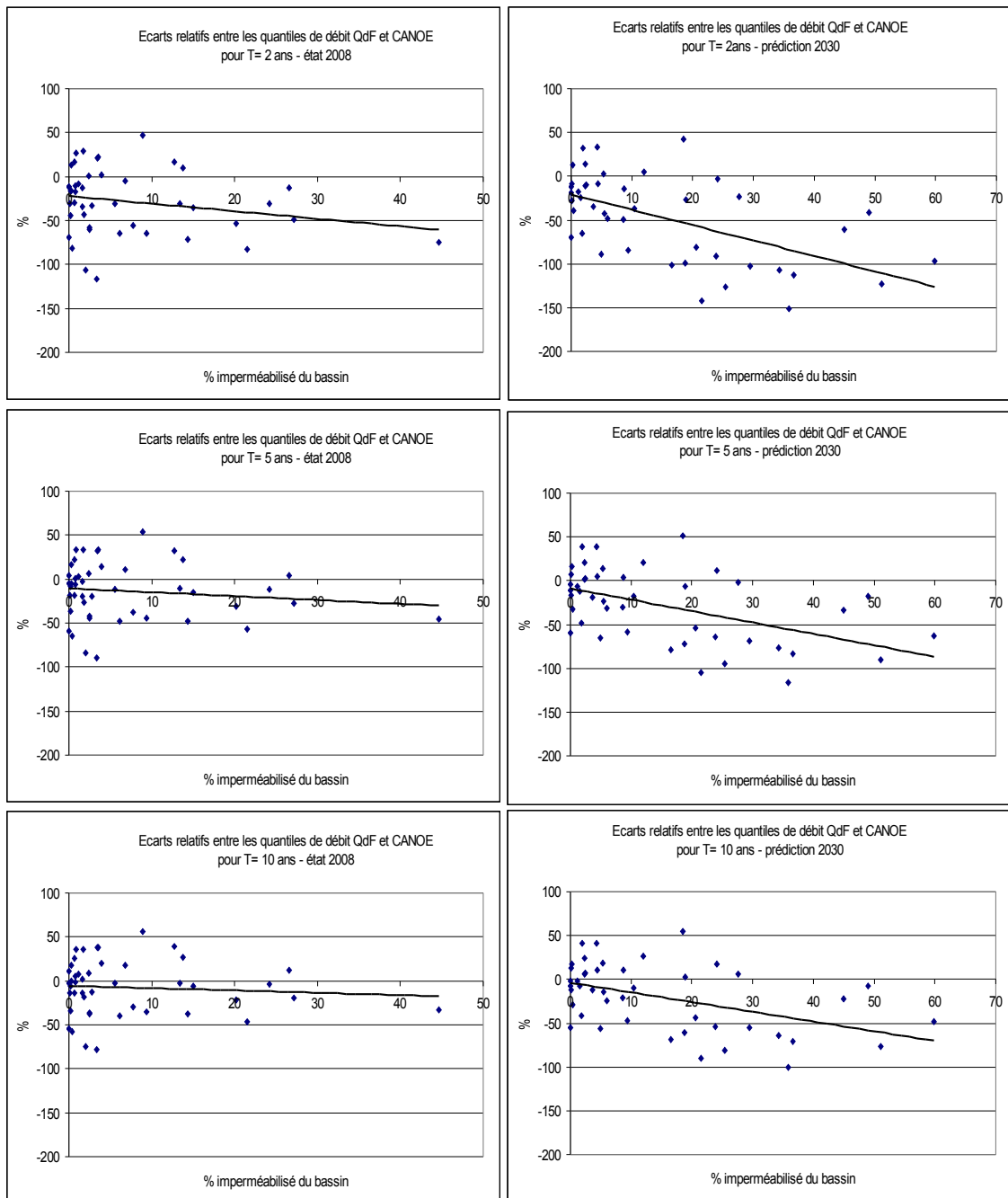


Figure 6.59: Distribution de l'écart relatif entre les débits de pointe  $T=2$ ans (a), 5ans (b) et 10ans (c) calculés par les modèles QDF et CANOE, état sol 2008 et 2030, en fonction du % d'imperméabilisation des bassins.

On observe une tendance générale négative (pente des droites des régressions linéaires) de l'écart relatif avec le % d'imperméabilisation. Cela montre que les débits prédits par CANOE sont supérieurs à ceux prédits par QDF quand le % d'imperméabilisation augmente. Cette

tendance est moins prononcée en 2008 qu'en 2030. On constate dans la Figure 6.60. que ce sont les petits sous bassins qui présentent les plus forts % d'imperméabilisation. Cette tendance s'accroît en 2030. Globalement CANOE prédit des débits plus importants que QdF pour les petits bassins versants les plus urbanisés. L'hypothèse de concomitance utilisée dans le modèle QdF n'amène donc pas une surestimation par rapport à CANOE des débits sur les petits bassins versants en particulier quand le % d'imperméabilisation augmente.

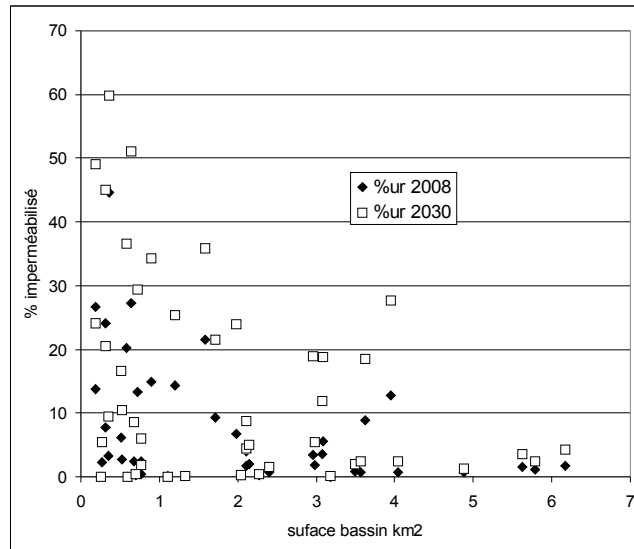


Figure 6.60. Distribution du % d'imperméabilisation des 45 sous bassins en fonction de la surface totale, en 2008 et 2030.

Pour les bassins situés sous 10% d'imperméabilisation, la dispersion de l'écart relatif est grande, comprise entre +50 et -100%. Elle diminue au delà de 10% pour les simulation 2008. Ce n'est pas le cas pour 2030 où le % d'imperméabilisation augmente aussi pour des bassins plus grands (Figure 6.60). Les composantes rurale et urbaine sont censées être plus décalées pour ces bassins. Ici encore, on s'attendrait à voir le modèle QdF prédire des débits plus forts que CANOE du fait de l'hypothèse de concomitance. Or CANOE prédit des débits plus importants.

Au global (Tableau 6.7) on constate que l'écart relatif moyen est toujours négatif, qu'il diminue avec la période de retour croissante mais avec un coefficient de variation croissant. Il est plus prononcé en 2030, marquant une divergence des deux modèles soulignée par l'écart type et le coefficient de variation.

Ces résultat ne préjuge pas de la plus grande validité de l'un ou l'autre des modèles mais montre que l'on atteint facilement +/- 30% d'écart entre les deux modèles et que la divergence s'amplifie avec la taille des bassins versants concernés par l'urbanisation.

Tableau 6.7: Statistiques des écarts relatifs (en %) des débits de pointe prédits par les modèles QdF et CANOE.

	2008			2010		
	T=2ans	T=5ans	T=10 ans	T=2ans	T=5ans	T=10 ans
moyenne	-28.3	-13.6	-7.5	-46.9	-28.0	-20.3
écart type	37.2	32.8	31.2	49.6	41.4	38.3
coef. Variation	-1.3	-2.4	-4.1	-1.1	-1.5	-1.9



## 7.7. Synthèse et conclusions du WP4

Les travaux réalisés dans ce workpackage ont permis de produire les informations nécessaires aux entrées des modèles hydrologiques en terme de pluviométrie et de cartographie de l'occupation des sols tant passée que future pour l'analyse de l'impact des modifications de l'occupation des sols sur l'hydrologie et la géomorphologie des bassins versants périurbains étudiés.

Mais les résultats obtenus ont permis des avancées scientifiques et méthodologiques importantes qui vont au-delà des seuls livrables attendus :

- Les développements réalisés sur le simulateur spatio-temporel de pluie sont significatifs : possibilité de simulations en continu à partir de la classification de Kohonen en classes de pluie homogènes, module de conditionnement à des données observées. L'intérêt pour caractériser et quantifier les incertitudes en terme d'hydrologie liées à l'incertitude sur les entrées est indéniable. Le projet a aussi montré le besoin de nouveaux développements, notamment pour simuler des champs de pluie à pas de temps fin (5-6 minutes), nécessaires à la simulation de l'hydrologie des bassins périurbains
- La cartographie diachronique de l'occupation des sols a été réalisée à l'aide de deux méthodes qui se sont révélées complémentaires : une digitalisation manuelle de photos aériennes et une cartographie automatique à partir d'images satellitales. Dans les deux cas, des méthodes originales ont été proposées pour prendre en compte les différences de résolution et de qualité des images qui se dégrade au fur et à mesure que l'on remonte dans le temps. On a pu montrer que les deux méthodes produisent des informations de natures différentes : la première sur les usages du sol, ce qui permet de distinguer plusieurs sortes d'artificialisation des milieux et de distinguer les différentes formes de bâti, information qui s'est révélée très importante pour les ateliers de prospective territoriale ; la seconde est plus orientée sur les propriétés physiques des surfaces et plus directement exploitable pour la modélisation hydrologique.
- La méthodologie des ateliers de prospective territoriale a été entièrement conçue et évaluée dans le cadre du projet. Appuyer les discussions en atelier sur des cartographies obtenues à l'aide d'un logiciel de simulation de l'évolution de l'occupation des sols, s'est révélé un outil tout à fait efficace pour faire dialoguer des acteurs agissant sur un même territoire, mais qui n'ont pas nécessairement l'occasion de se rencontrer ou de discuter. L'intérêt suscité par la démarche montre bien qu'elle dépasse largement le cadre initialement défini.
- Les travaux sur la géomorphologie ont permis des avancées sur la détermination des débits de critique de mise en mouvement des sédiments grossiers par une approche combinant utilisation/évaluation de formules théoriques et observations in situ. L'utilisation des techniques de filtrage des composantes urbaines dans les séries débitométriques a permis de montrer que les rejets urbains de temps de pluie avaient tendance à augmenter l'amplitude, la durée et la fréquence de dépassement du seuil de débit critique de mise en mouvement des sédiments, le critère fréquence étant celui qui est le plus impacté.

Afin de quantifier l'impact de l'évolution de l'occupation des sols et de l'urbanisation sur l'hydrologie et le risque d'incision futur, une première utilisation des scénarios d'occupation des sols en 2030 a pu être réalisée à l'aide du modèle physique CANOE et du modèle statistique QdF adapté aux bassins périurbains, sur 45 sous-bassins représentatifs. L'utilisation du modèle QdF conduit à une augmentation du nombre de sous-bassins au cours d'eau incisé, ce qui va grossièrement dans le sens des résultats obtenus à l'aide des simulations CANOE. Ces résultats ne sont qu'indicatifs car, comme mentionné précédemment, ils doivent être consolidés par des études et une validation plus approfondies

des hypothèses qui la sous-tendent avant que les estimations proposées puissent être exploitées à des fins de gestion.

## 8. Discussions et conclusions

Globalement, on peut considérer que la plupart des objectifs affichés dans le projet initial ont pu être atteints. Tous les livrables sauf un ont pu être fournis et le projet a produit bien d'autres résultats intéressants, tant en termes de logiciels, de cartes que de méthodologies.

Une des clés de la réussite du projet a été la phase de collecte et de production des données nécessaires au projet. Pour les données existantes, cette phase a été longue et laborieuse du fait de la multiplicité des interlocuteurs, des formats de données et de restrictions parfois apportées sur leur utilisation ou leur diffusion. Les résultats du projet montrent que l'ensemble de ces informations était néanmoins nécessaire à l'appréhension complète du fonctionnement des bassins versants. Un accès plus aisé à l'ensemble des informations disponibles serait donc souhaitable pour faciliter l'étude des bassins versants périurbains. Le projet a aussi permis la production de nouvelles informations cartographiques, notamment sur l'occupation des sols à différentes dates et selon différentes méthodes.

Le projet AVuPUR a permis de tester différentes techniques, pour certaines innovantes, pour comprendre les processus hydrologiques des zones rurales. Les travaux ont confirmé l'intérêt d'un concept qui émerge en hydrologie : le concept de connectivité hydrologique qui permet de décrire de manière dynamique la façon dont les zones de production de ruissellement se connectent au réseau hydrographique. Les techniques mises en œuvre : utilisation de MNT Lidar très haute résolution, réseaux dense de limnimètres, campagnes de caractérisation des sols sont prometteuses et nous recommandons leur généralisation dans d'autres études hydrologiques. Différentes formules de détermination des débits critiques de mise en mouvement des sédiments ont été évaluées et des recommandations ont été faites sur les formules les plus pertinentes, après comparaison à des données in situ.

La partie cartographie de l'occupation des sols, notamment manuelle a été très coûteuse en temps et ne peut donc pas être généralisée à de nombreux bassins. Les méthodes automatiques testées ont permis de montrer que seule l'exploitation combinée de différentes sources d'informations, traitées avec des méthodes adéquates était capable de produire une cartographie de qualité, répondant aux objectifs et contraintes de la modélisation hydrologique. Les travaux ont aussi montré qu'il importe de bien définir les objectifs et les besoins en termes de cartographie pour que le résultat corresponde aux attentes. Ceci n'a pu être atteint dans le projet que grâce à un dialogue permanent et de nombreux aller-retour entre hydrologues et géographes, avec un bénéfice certain pour les deux communautés qui ont ainsi progressé dans une connaissance mutuelle.

Les travaux réalisés sur l'exploitation des données du radar météorologique ont montré l'intérêt de ces données pour la gestion opérationnelle des eaux pluviales par les collectivités. Des développements de services autour de ces activités sont à attendre dans les années à venir.

Les travaux réalisés autour de la simulation continue et à pas de temps fin de la pluie sont aussi porteurs. Des pistes de recherche sont d'ores et déjà ouvertes pour contribuer à la construction d'un simulateur de temps avec des équipes norvégiennes. Ceci présente un

intérêt aussi pour la désagrégation des scénarios de changement climatique aux échelles de l'hydrologie.

Le projet a permis des avancées significatives sur la description des bassins périurbains et la description des réseaux de drainage associés. Des résultats d'ores et déjà transposables aux opérationnels en ont émergé (cf fiche technique sur la délimitation des bassins périurbains), ou des outils diffusables à la communauté hydrologique (logiciel TANATO2, pré-traitements SIG). Les résultats obtenus sont aussi importants pour les modélisations hydrologiques futures. En particulier, le potentiel d'un outil détaillé comme le modèle PUMMA, développé dans la plate-forme LIQUID<sup>®</sup>, est indéniable et devrait être approfondi dans les années qui viennent. Un tel outil, même s'il est difficile à mettre en œuvre, permet ensuite de tester assez aisément l'impact de différents choix de gestion des eaux pluviales, ce qui intéresse les opérationnels, à l'heure où de nouvelles méthodes de gestion sont promues (techniques dites alternatives).

Une méthodologie, permettant d'évaluer la vulnérabilité des hydrosystèmes (régime hydrologique et géomorphologie) à l'occupation des sols a été proposée. Elle a été illustrée sur un cas d'étude et sa validation doit encore être approfondie et complétée sur d'autres cas d'études. Cette méthodologie, pleinement interdisciplinaire illustre néanmoins le potentiel d'un travail commun entre disciplines autour d'une même question scientifique.

A l'échelle des bassins plus grands, les modélisations évaluées restent, au dire des opérationnels, encore trop complexes pour les usages qu'ils voudraient en faire. De nouveaux travaux seraient nécessaires pour aller au bout de l'intercomparaison des approches, qui n'a pas pu être complètement finalisée dans le temps imparti au projet, tester leur robustesse et la manière dont elles peuvent être transposées à des bassins versants moins instrumentés que ceux étudiés dans AVuPUR. Enfin, les opérationnels seraient demandeurs d'outils plus simples à mettre en œuvre. L'adaptation de la méthode statistique d'estimation des quantiles de crue (QdF) aux bassins périurbains, peut en partie répondre à ces objectifs. Ces éléments ouvrent des perspectives de développements et de valorisation économique des résultats. Les ateliers de prospective territoriale, qui ont permis à des personnes travaillant sur un même territoire de se rencontrer et de partager leur vision de ce territoire, ont été appréciés. La démarche a suscité beaucoup d'intérêt, moins pour les cartes produites que pour la réflexion qu'elles suscitent et l'équipe concernée a reçu plusieurs sollicitations pour organiser de nouveaux ateliers sur d'autres bassins.

En conclusion, le projet AVuPUR était un projet ambitieux et novateur. Il abordait un sujet, l'hydrologie des bassins périurbains, relativement peu étudié auparavant. Les résultats obtenus par le projet sont conséquents et dépassent largement ce que nous avons espéré au départ. Une des clés de ce succès est certainement à chercher dans un travail réellement interdisciplinaire où les différentes équipes ont vraiment travaillé ensemble pour avancer vers un objectif commun. Les nombreuses discussions ont été enrichissantes pour tous et ont contribué à améliorer le dialogue entre disciplines autour de l'occupation des sols et des besoins de l'hydrologie, les méthodes d'analyse des données, la modélisation.

Le projet confirme aussi l'intérêt des plates-formes de modélisation hydrologiques adaptatives pour aborder la simulation de bassins complexes où les réseaux linéaires jouent un rôle prépondérant. Ces travaux ouvrent des perspectives de progrès importants pour l'hydrologie.

## 9. Références

- Berthier, E., Andrieu, H., Creutin, J.D., 2004. The role of soil in the generation of urban runoff: development and evaluation of a 2D model. *Journal of Hydrology, Urban Hydrology*, 299(3-4): 252-266.
- Bocher, E., 2005. Impact des activités humaines sur le parcours des écoulements de surface dans un bassin versant bocager: essai de modélisation spatiale. Application au bassin versant de Jaudy-Guindy-Bizien (22), Université de Rennes 2- Haute Bretagne, Rennes, France,, 312 pp.
- Bocher, E., Martin, J.Y., 2009. TANATO: an approach to evaluate the impact of natural and anthropogenic artefacts with a TIN-Based model, International OpenSource Geospatial Research Symposium OGRS 2009, Nantes, France, 8-10 July 2009, Abstracts Proceedings, presentation available at <http://www.ogrs2009.org/doku.php?id=research>
- Bouilloud, L., K Chancibault, B Vincendon, V Ducrocq, F Habets, GM Saulnier, S Anquetin, E Martin et J Noilhan, 2009 : An advanced coupling between the ISBA land surface model and the TOPMODEL hydrological model for Mediterranean flash-flood forecasting: Description, calibration and validation. *Journal of Hydrometeorology*, 11(2), 315-333.
- Branger, F., Braud, I., Debionne, S., Viallet, P., Dehotin, J., Hénine, H., Nédélec, Y., Anquetin, S., 2010. Towards multi-scale integrated hydrological models using the LIQUID framework. Overview of the concepts and first application examples, *Environmental Modeling & Software*, 25, 1672-1681
- Branger, F., Braud, I., Viallet, P. and Debionne, S., 2008. Modelling the influence of landscape management practices on the hydrology of a small agricultural catchment, 8<sup>th</sup> International Conference on Hydro-Sciences and Engineering (ICHE-2008), 8-12 September 2008, Nagoya, Japon, 9 pp.
- Branger, F., Jankowfsky, S., Vannier, O., Viallet, P., Debionne, S., Braud, I., 2011a. Use of open-source GIS and data base software for the pre-processing of distributed hydrological models, Geospatial free and open source software in the 21st century, Bocher, E., Neteler, M. (Eds), Lecture notes in Geoinformation and Cartography, 12 pp. (parution prévue en Novembre 2011)
- Branger, F., Renard, B., Le Coz, J., Bonnifait, L., 2011b. Assessment of uncertainty of stage-discharge relations through hydraulic and bayesian approach. ICFM5: 5th International Conference on Flood Management, 27-29 September 2011, Tokyo, Japan.
- Braud, I., 2008. Analyse des données pluie-débit sur les sous-bassins du Mercier et de la Chaudanne. Période 1997-2007. Données de base, critique des données pluie, programmes Fortran et utilisation de R pour cette analyse, résultats. Contribution au WP1 du projet AVUPUR, Rapport du projet ANR AVuPUR, Cemagref, UR HHLY, Novembre 2009, 88pp.
- Braud, I. Breil, P., Thollet, F., Lagouy, M., 2011a. Impact of urbanization on the hydrological regime of periurban rivers. What can we learn from data analysis?, *Journal of Hydrology*, soumis.
- Braud I., Chancibault K., Debionne S., Lipeme Kouyi G., Sarrazin B, Jacqueminet C., Andrieu H., Béal D., Bocher E., Boutaghane H., Branger F., Breil P., Chocat B., Comby J., Dehotin J., Dramais G., Furusho C., Gagnage M., Gonzalez-Sosa E., Grosprêtre L., Honegger A., Jankowfsky S., Joliveau T., Kermadi S., Lagouy M., Leblois E., Martin J.Y., Mazagol P.O., Michel K., Molines N., Mosini M.L., Puech C., Renard F., Rodriguez F., Schmitt L., Thollet F., Viallet P., 2009. The AVuPUR project (Assessing the Vulnerability of Peri-Urbans Rivers) : experimental set up, modelling strategy and first results, Proceedings of the 7th Novatech 2010 Conference, June 28-July 1 2010, Lyon, France, 10pp.
- Braud, I., Jankowfsky, S., Branger, F., 2011b. Délimitation d'un bassin versant périurbain et identification de son réseau de drainage, fiche technique OTHU n°22, 4 pp.
- Breil, P., Joannis, C., Raimbaud, G., Brissaud, F., Desbordes, M., 1993. Drainage des eaux claires parasites par les réseaux sanitaires. De l'observation à l'élaboration d'un modèle prototype. *La Houille Blanche* N°1-1993: 45-57.
- 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

- Brossard, F., 2011. Automatisation du prétraitement des données spatiales pour la modélisation hydrologique en zone périurbaine, Mémoire de stage 2ème année, EPMI, Cergy, 46pp.
- Certu, 2003. La ville et son assainissement : principes, méthodes et outils pour une meilleure intégration dans la ville. Certu Lyon – Ministère de l'écologie (sur CD), 2003
- Chapuis, G., 2010. Analyses de données hydrologiques pluie-débit sur le bassin versant de l'Yzeron, Stage de 2ème année ingénieur, ENSEEIHT, INP Toulouse, 49 pp.
- Chocat, B., Dorval F. A., Renard, F., 2010 - Calibration des données radar à partir de mesures au sol en hydrologie urbaine : approche statistique. Actes du forum des utilisateurs de radars météorologiques, Météo-France, centre international de conférence, Toulouse, pp. 7-9
- DATAR, 2010. Prospective périurbaine et autres fabriques de territoires. Territoire 2040, n°2, 160 p.
- Dehotin, J., 2009a. Projet AVuPUR – Assessing the Vulnerability of Peri-Urban Rivers-Contribution au WP 1: Hydrological and GIS data collection. Description des données collectées sur le bassin de l'Yzeron, Rapport Cemagref, UR HHLY, Février, 2009, 17 pp
- Dehotin, J., 2009b. Projet AVuPUR – Assessing the Vulnerability of Peri-Urban Rivers- Contribution au WP3 'Simplified representation at the catchments scale'. Découpage spatial et caractérisation des unités de modélisation de l'Yzeron. Rapport Cemagref, UR HHLY, Février, 2009, 12 pp
- Dehotin, J., Breil, P., 2011. Rapport technique du projet IRIP: Cartographie de l'aléa inondation par ruissellement, Cemagref-Publications, rapport technique Juillet 2011 Lyon, : 76p.
- Dehotin J., de Lavenne A., Breil P., Braud I., Lagouy M., 2011. Runoff detection on a french small catchment: DEVERSE observation system, in preparation
- Delamarre A., 2002. La prospective territoriale. Paris : La Documentation Française- DATAR, 110 p.
- de Lavenne, A., 2010. Risque d'inondation par ruissellement. Instrumentation terrain et analyse géomatique, Ecole supérieure d'Agriculture d'Angers. Spécialisation Génie de l'environnement. Option: Sol - Eau- Hydrosystème, Angers, 95 pp.
- Diribarne, J., 2008. Dimensionnement d'une station de mesure débitmétrique sur le bassin versant de l'Yzeron. Site du Ratier, Mémoire de projet de fin d'études, ENTPE, Vaulx en Velin, France, 68pp.
- 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.
- Dodane C., Joliveau T., Honegger A., 2011. Anticiper les évolutions de l'occupation du sol. Analyse critique d'une expérience de géoprospective dans un bassin versant périurbain (Yzeron, métropole lyonnaise). L'Espace géographique (soumis).
- Dorval, F., 2011. Mise au point de techniques de traitement de données en continu pour l'identification des composantes de débit à l'exutoire des bassins versants urbains : Etude de cas des bassins versants Django Reinhardt et Ecully. Thèse de l'Université de Lyon (INSA).
- Dorval F. A., Chocat B., Emmanuel E., Lipeme Kouyi G., 2010. Sewer system flow components identification using signal processing. Water Science and Technology, 62(1), 106-114.
- Dorval, F. A., Chocat B., Lipeme Kouyi G., Emmanuel, E., 2011 : Use of multi-outlet approach to simulate flow components on urban catchment. 16th International Conference on Urban Drainage, 11-16 September 2011, Porto Alegre, Brésil.
- Duband, D., Rodriguez-Hernandez, J.Y., Obled, C., 1993. Unit hydrograph revisited: an alternative iterative approach to UH and effective precipitation identification. Journal of Hydrology, 150: 115-149.
- Emmanuel, I., 2011. Evaluation de l'apport de la mesure de pluie par radar météorologique pour la modélisation pluie-débit de petits bassins versants, Thèse de l'Ecole Doctorale Sciences pour l'Ingénieur, Géosciences, Architecture (SPIGA), Ecole Centrale de Nantes, 7 Décembre 2011.
- Furusho, C., 2008 : Etude du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant peri-urbain : la Chézine., Rapport de Master II Sciences et Techniques des Environnements Urbains, ECN, Nantes, France, 70pp.
- Furusho, C., 2011. Modélisation hydrologique des bassins périurbains, Ecole Doctorale Sciences pour l'Ingénieur, Géosciences, Architecture (SPIGA), Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes, 26 Septembre 2011, 266pp.

- Furusho, C., Andrieu, H., Chancibault, K., 2011a. Analysis of the hydrological functioning of an Urbanizing River Basin, Hydrological Processes, in revision.
- Furusho, C., Chancibault, K., Andrieu, H., 2011b. Adjustment of the coupled hydrological model ISBA-TOPMODEL to long term hydrological cycles of peri-urban rivers: evaluation and sensitivity study. Submitted to Journal of Hydrology, special issue on periurban catchments.
- 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. Revue des Sciences de l'Eau, 1, 83-101.
- Galea, G. and Ramez, P., 1995. Runoff and erosion control in hillslope vineyards: a handbook for landscape managers. Maîtrise du ruissellement et de l'érosion en vignoble de coteau : guide à l'usage des aménageurs. Coll. Etudes du Cemagref, série Gestion des milieux aquatiques n°10. 126 p. ISN 2-85362-416-1
- Gautron, C., 2009 : Etude du réseau hydrographique d'un bassin versant à partir d'une base de données géographique. Application au bassin versant périurbain de la Chézine. Rapport de Master I Sciences de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement, Université de Nantes, Nantes, 29pp.
- Gnouma, R., 2006. Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques: application au bassin versant de l'Yzeron, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, France, 14 Novembre 2006, 412 pp.
- Godet, M., 1991. De l'anticipation à l'action : manuel de prospective et de stratégie. Paris : Dunod, 390 p.
- Gonzalez-Sosa, E., Braud, I., Dehotin, J., Lassabatère, 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.
- Goutaland, D., 2009. Programme ANR AVuPUR. Prospection géophysique par panneau électrique de trois parcelles d'un sous-bassin de l'Yzeron. Rapport du CETE de Lyon, Juin 2009, 31 pp.
- Grosprêtre L., 2011. Dynamique hydro-morphologique, modélisation et gestion de petits systèmes fluviaux périurbains, Thèse de l'Université de Lyon, soutenance prévue le 12 Décembre 2011.
- Guilbaud, A-S., 2007: Description et analyse des chemins de l'eau en surface par l'enrichissement des banques de données urbaines et géographiques. Application au bassin versant péri-urbain de la Chézine, Rapport de stage Master I Sciences de la Terre de l'Univers et de l'Environnement, 25pp.
- Houet, T., Hubert-Moy, L., Tyssot C., 2008. Modélisation prospective spatialisée à l'échelle locale : approche méthodologique. Revue Internationale de Géomatique, Vol. 18/3, pp. 345-373.
- Jacqueminet C., Kermadi S., Michel K., Béal D., Branger F., Jankowsky S., Braud I., 2011. Land cover mapping using aerial and VHR satellite images for distributed hydrological modelling of periurban catchments: application to the Yzeron catchment (Lyon, France), Journal of Hydrology special issue on "Hydrology of periurban catchments: processes and modelling" (soumis)
- Jacqueminet, C., Kermadi, S., Michel, K., Chocat, B., 2011a. Méthodes de cartographie de l'occupation du sol et de son évolution pour le suivi des phénomènes hydrologiques de bassins versants périurbains, Fiche technique OTHU n°24, 4 p.
- Jacqueminet, C., Michel, K., Kermadi, S., 2010a. Carte des usages du sol dans le bassin versant de l'Yzeron en 1990. Université de Lyon, UMR 5600 EVS. Cartographie réalisée par digitalisation manuelle d'une mosaïque de photographies aériennes ©IGN en noir et blanc de 1990.
- Jacqueminet, C., Michel, K., Kermadi, S., 2010b. Carte des usages du sol dans le bassin versant de l'Yzeron en 2008. Université de Lyon, UMR 5600 EVS. Cartographie réalisée par digitalisation manuelle de la BD ORTHO@IGN de 2008.
- Jankowsky, 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, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, France. Soutenance prévue le 15 Décembre 2011.
- Jankowsky, S., Branger, F., Braud, I., Gironas, J., Rodriguez, F., 2011a. Integration of sewer system maps and field observations in topographically based sub-basin delineation in suburban areas, submitted to Hydrological Processes.

- Jankowsky, S., Branger, F., Braud, I., Rodriguez, F., 2010. Integration of sewer system maps in topographically based sub-basin delineation in suburban areas. EGU General Assembly, 2-7 May 2010, Vienna, Austria, Geophysical Research Abstracts, vol. 12, EGU2010-4553, poster
- Jankowsky, S., Branger, F., Braud, I., Rodriguez, F., Debionne, S., Viallet, P., 2011b. Influence of urban expansion on the hydrology of small catchments: development of the suburban PUMMA model by coupling of urban and rural hydrological models, 12th International Conference on Urban Drainage, 11-15 September 2011, Porto Alegre, Brasil, 8 pp.
- Joliveau, T., Dodane, C., Honegger, A., Jacqueminet, C., Michel, K., Kermadi, S., 2010. Cartes de simulation des usages du sol dans le bassin versant de l'Yzeron en 2030. Université de Lyon, UMR 5600 EVS.
- Joliveau, T., Dodane, C., Honegger, A., 2011. Méthodes de prospective territoriale pour simuler les évolutions de l'occupation future du sol, appliquées à un bassin versant périurbain. Fiche technique OTHU, n°25. 6 p.
- Kermadi S., Renard F., Jacqueminet C., Michel K., 2010. Inondations et occupation du sol dans un bassin-versant périurbain : l'Yzeron (Ouest lyonnais), Actes du XIIIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Rennes, 1-4 septembre 2010, 313-318, ISBN 978-2-907696-16-6. Voir aussi <http://www.climato.be/aic/colloques.html>
- Kermadi, S., Renard, F., Braud, I., Jacqueminet, C., Michel, K., Branger, F., 2011. Occupation du sol et pluviométrie dans un bassin versant péri-urbain soumis aux inondations : Yzeron (Ouest Lyonnais), Climatologie, in revision.
- Krause P., 2002. Quantifying the impact of land use changes on the water balance of large catchments using the J2000 model, Physics and Chemistry of the Earth, 27, 663-673.
- Krause, P., Bäse, F., Bende-Michl, U., Fink, M., Flügel, W., et Pfennig, B., 2006. Multiscale investigations in a mesoscale catchment - hydrological modelling in the Gera catchment. Adv. Geosci., 9:53-61.
- Labbas, M., 2011. Impacts de la caractérisation de l'occupation des sols par différentes sources sur la simulation des processus hydrologiques. Application au bassin versant de l'Yzeron. Mémoire de fin d'études Master ENGREF « Gestion de l'eau », 51 pp.
- Lagouy, M., 2010. Recueil de données du bassin versant de l'Yzeron. Année 2009, Cemagref, UR Hydrologie-Hydraulique, 24 pp.
- Lassabatère, L., Angulo-Jaramillo, R., Soria-Ugalde, J.M., Cuenca, R., Braud, I., Haverkamp, R., 2006. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments. Soil Science Society of America Journal, 70(2): 521-532.
- Lassabatère L., Garcia C, Letellier L, Chancibault K., 2010 : Caractérisation hydrodynamique du bassin versant péri-urbain de la Chézine, décembre 2010, 27pp.
- Lassabatère, L., Yilmaz, D., Angulo-Jaramillo, R., Soria Ugalde, J., Braud, I., Simunek, J., 2009. Numerical evaluation of inverse modelling methods for 1D and 3D water infiltration experiments, 19<sup>th</sup> World Congress of Soil Science, Soil solutions for a changing world, 1-6 August 2010, Brisbane, Australia, 4 pp. available at <http://www.19wcss.org.au/congress-program.php> and presentation of a poster
- Leblois, E., Creutin, J.D., 2011. Space-time simulation of intermittent rainfall with prescribed advection field : adaptation of the turning band method, in preparation for submission to Water Resources Research.
- Lepioufle, J.-M., 2009. Modélisation spatio-temporelle d'un champ de pluie. Application aux pluies journalières du bassin versant de la Loire, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, France, 162 pp.
- Lepioufle, J.M., Leblois, E., Creutin, J.D., 2011. Variography of rainfall accumulation in presence of advection, in preparation for submission to Journal of Hydrology
- Mas, J.-F. Kolb, M., Houet, T., Paegelow, M., Camacho Olmedo M.-T., 2011. Eclairer le choix des outils de simulation des changements des modes d'occupation et d'usages des sols. Une approche comparative. Revue Internationale de Géomatique, Vol. 21/3.
- Michel, C., 2009. Exploitation des données de deux sous-bassins versants de l'Yzeron : la Chaudanne et le Mercier. Analyse des données 1997-2008. Master 1 Sciences de l'eau dans l'environnement continental, Université Montpellier 2, Août 2009, 53 pp.

- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Mosini, M-L, Letellier L., Leroux, C., Furusho, C., Rouaud J-M, Rodriguez F., Chancibault K, 2011 : Projet AVuPUR : validation et analyse des données hydrologiques du bassin versant périurbain de la Chézine, 23pp.
- Navratil O., Breil P., Schmitt L., Grosprêtre L., Albert M.B.(2011). Hydrogeomorphic adjustments of stream channels disturbed by urban runoff(Yzeron river basin, france). *Journal of Hydrology*, special issue on periurban catchments, submitted.
- Paillé, Y., 2010. Conceptualisation et modélisation d'une base de données en vue de son implémentation dans un modèle hydrologique distribué. Mémoire de Master 2 Cartographie et Gestion des Espaces à Fortes Contraintes, Université de Nantes, 50 pp.
- Palaccio, M., 2008 : Modélisation hydrologique distribuée des espaces périurbains basée sur l'analyse des données géographiques vectorielles : application au bassin versant de la Chézine. Rapport de Master II Sciences et Techniques des Environnements Urbains, ECN, Nantes, France, 61 pp.
- Palma-Lopes, S., Chancibault, K., Letellier, L., Garcia, C., Lassabatère, L., Rouaud, J.M., Dérobert, X., Bénot, R., Montigné, S., Mahé, J.F., 2011. Utilisation de méthodes géophysiques pour la description des sols dans le bassin de la Chézine : étude de faisabilité. Rapport de synthèse pour le projet AVuPUR (ANR), 40 pp.
- Preusser F., Schmitt L., Delile D., Grospretre L., 2011. Optically Stimulated Luminescence (OSL) dating of the sedimentation history of the Yzeron basin (Chaudanne sub-catchment), Rhône Valley, France. *Quaternaire*, 22(1), 73-83
- Privolt, G., 2009. Contribution à l'analyse de la mise en place des colluvions sur le bassin versant de l'Yzeron. Etude diachronique fine de l'occupation du sol depuis deux siècles, sur quatre sous-bassins de l'Yzeron : La Chaudanne, le Bouillon, le Verdy et le Prés-Mouchettes. Mémoire de Master I Interface-Nature-Société, Université Lumière Lyon 2, 121 pp + annexes de cartes.
- 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.
- Radojevic, B., 2002. Méthode d'évaluation de l'influence urbaine sur le régime des crues d'un bassin versant de 130 km<sup>2</sup>, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, 252 pp.
- Radojevic, B., Breil, P., Chocat, B., 2010. Assessing impact of global change on flood regimes. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 2(2): 167-179.
- Renard, F., 2010 ; Le risque pluvial en milieu urbain. De la caractérisation de l'aléa à l'évaluation de la vulnérabilité : le cas du Grand Lyon. Thèse de l'Université Jean Moulin, Lyon 3, soutenue le 13/12/2010.
- Renard, F. and J. Comby, 2010: Overview of the Greater Lyon radar weather from 90's to 2008. *Advances in Geosciences*, 25, 79-83.
- Renard, B., Kavetski, D., Leblois, E., Thyer, M., Kuczera, G., 2011. Towards a reliable decomposition of predictive uncertainty in hydrological modelling : characterizing rainfall errors using conditional simulation, *Water Resources Research*, doi:10.1029/2011WR010643, in press.
- Rodriguez F., Andrieu H., Creutin J.D., 2003. Surface runoff in urban catchments: morphological identification of unit hydrographs from urban databanks. *Journal of Hydrology*, 283 (1-4), 146-168
- Rodriguez, F., Andrieu, H., Morena, F., 2008. A distributed hydrological model for urbanized areas - Model development and application to case studies. *Journal of Hydrology*, 351(3-4): 268-287.
- Rodriguez, F., Bocher E., Chancibault, K., 2011. Terrain representations of peri-urban catchments channels, in preparation for submission to *Journal of Hydrology*
- Rossignol, H., 2011. Agriculture sectorielle ou territoriale dans l'ouest lyonnais ? L'exemple du bassin versant de l'Yzeron. Mémoire de MASTER 2 Systèmes Territoriaux, Développement Durable, Aide à la Décision. Lyon : Ecole normale supérieure de Lyon, 133 p.
- Sanzana, P., 2011. Automatic preprocessing for a distributed hydrological model using the HRU (Hydrological Response Units) concept with GRASSGIS. Mémoire de Master, Université de Chile, Santiago de Chile, 61 pp.



- Sarrazin, B., 2012. Approches spatiales pour décrire le réseau de drainage et suivre sa dynamique de fonctionnement en milieu rural dans une perspective d'aide à la modélisation hydrologique, Ecole doctorale Terre, Univers, Environnement. l'Institut National Polytechnique de Grenoble. Soutenance prévue en Janvier 2012.
- Sarrazin, B., Braud, I., Puech, C., 2011. A functional typology of headwater channels extracted from high resolution lidar DEM, Hydrological Processes, in revision.
- Shields A., 1936 : Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung, Mitt. Preuss. Versuchsanst. Wasserbau Schiffbau, 26. (English translation by W.P. Ott and J.C. van Uchelen, 36 pp., U.S.D.A. Soil Conser. Serv. Coop. Lab., Calif., Inst. of Technol., Pasadena, 1936.)
- Schmitt, L., Valette, L., Valin, K., Piégay, H., Hallot, E., 2004. 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): 323-340.
- Sogreah, Insavalor, 2005. Manuel d'utilisation de CANOE, Tech. Report.
- Thollet, F., 2007. Recueil de données du bassin versant de l'Yzeron. Année 2007, Cemagref, UR Hydrologie-Hydraulique, 40 pp.
- Thollet, F. et Branger, F., 2008. Recueil de données du bassin versant de l'Yzeron. Année 2008, Cemagref, UR Hydrologie-Hydraulique, 24 pp.
- Toulan, A., 2011. État des lieux et perspectives de l'agriculture dans le bassin versant de l'Yzeron. Les enjeux de l'irrigation des terres agricoles. Mémoire de MASTER 1 Géographie, Lyon : Université Lyon 2, 160 p.
- Vannier, O., Braud, I., 2010. Calcul d'une évapotranspiration potentielle (ETP) spatialisée pour la modélisation hydrologique à partir des données de la réanalyse SAFRAN de Météo-France. Note de travail du plateau SOMME, Cemagref, Avril 2010, 22pp.
- Viallet, P., Debionne, S. Braud, I., Dehotin, J., Haverkamp, R., Saâdi, Z., Anquetin, S., Branger, F. and Varado, N., 2006. Towards multi-scale integrated hydrological models using the LIQUID framework, Proceedings of the 7th International Conference on Hydroinformatics 2006, Ph. Gourbesville, J. Cunge, V. Guinot and S.Y. Liong (Eds), Research Publishing, 4-8 September, Nice, France, Vol I, 542-549
- Voirion-Canicio, C., 2006. L'espace dans la modélisation des interactions nature société. In colloque international « Interactions Nature-Société, analyse et modèles ». La Baule : UMR 6554 LETG, 6 p.
- Willems, P., 2009. A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall-runoff models. Environmental Modelling & Software, 24(3): 311-321.