



**HAL**  
open science

# 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

M. Labbas

## ► To cite this version:

M. Labbas. 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. Sciences de l'environnement. 2011. hal-02596111

**HAL Id: hal-02596111**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02596111v1>**

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.

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

VOIE D'APPROFONDISSEMENT GREF « GESTION DE L'EAU » 2010-2011

**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.**

**Mériem LABBAS**

Mission effectuée du 4 avril au 28 juin 2011

Maître de stage : Flora BRANGER (Cemagref)

Tuteur AgroParisTech-Engref: Flavie CERNESSON

**AgroParisTech-Engref**  
**Centre de Montpellier**  
648, Rue Jean-François Breton  
B.P. 44494  
34093 MONTPELLIER CEDEX 5  
Tél. +33 (0)4 67 04 71 00  
Fax. +33(0)4 67 04 71 01  
[www.agroparistech.fr](http://www.agroparistech.fr)

**CEMAGREF Lyon**  
Centre de Lyon, 3 bis quai Chauveau CP 220,  
69336 LYON cedex 09 FRANCE  
Tél : (+33) 4 72 20 87 87  
Fax : (+33) 4 78 47 78 75

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Contexte et objectifs du stage</b>	<b>6</b>
1.1	Introduction générale . . . . .	6
1.2	Présentation du Cemagref et du projet AVuPUR . . . . .	6
1.3	Problématique scientifique et objectifs du stage . . . . .	8
1.4	Méthodologie de travail . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Présentation de la zone d'étude</b>	<b>11</b>
2.1	Le bassin versant périurbain de l'Yzeron . . . . .	11
2.2	Cartographie de l'occupation du sol . . . . .	12
2.3	Autres données spatiales décrivant le bassin . . . . .	12
2.4	Suivi hydrologique et météorologique . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Modélisation hydrologique : modèle J2000 et paramétrisation</b>	<b>14</b>
3.1	Présentation générale du modèle . . . . .	14
3.2	Fonctionnement de J2000 . . . . .	15
3.3	Mise en œuvre du modèle . . . . .	18
3.3.1	Maillage . . . . .	18
3.3.2	Forçages météorologiques . . . . .	20
3.3.3	Paramétrisation du modèle . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Résultats et analyse</b>	<b>25</b>
4.1	Occupation du sol et impacts sur le taux d'imperméabilisation .	25
4.1.1	Comparaison de l'occupation du sol entre les différentes cartes . . . . .	25
4.1.2	Comparaison des taux d'infiltration . . . . .	27
4.2	Résultats des simulations - Validation du modèle J2000 . . . . .	29
4.2.1	Critères de performance . . . . .	30
4.2.2	Analyse des critères sur les débits à l'exutoire . . . . .	31
4.2.3	Analyse sur les deux années hydrologiques choisies . . . . .	33
4.2.4	Analyse des critères sur les débits d'un sous-bassin ins- trumenté . . . . .	34
4.2.5	Comparaison des contributions aux débits observés (West- pro) et simulés (J2000) . . . . .	36
4.3	Comparaison entre les simulations issues des 4 cartes . . . . .	37
4.3.1	Débits simulés à l'exutoire de Taffignon . . . . .	37
4.3.2	Contributions aux débits simulés à l'exutoire de Taffi- gnon et évapotranspiration . . . . .	38
4.3.3	Contributions aux débits simulés dans un sous-bassin test	40
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>42</b>
5.1	Résumé des objectifs . . . . .	42
5.2	Premières conclusions . . . . .	42
5.3	Bilan . . . . .	43
5.4	Perspectives . . . . .	44

<b>6 Remerciements</b>	<b>45</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>47</b>
<b>Appendices</b>	<b>48</b>
<b>A Paramétrisation du modèle J2000</b>	<b>48</b>
<b>B Occupation du sol</b>	<b>48</b>
<b>C Données hydrologiques</b>	<b>49</b>
<b>D Critères de performance du modèle pour différentes périodes</b>	<b>50</b>
D.1 Pour le bassin versant de Taffignon . . . . .	50
D.2 Pour le sous-bassin versant de Craponne . . . . .	50

## Table des figures

1	Localisation du bassin versant de l'Yzeron. . . . .	11
2	Stations débitmétriques et pluviométriques présentes sur le bassin de l'Yzeron. . . . .	14
3	Description schématique des transferts de l'eau au sein des HRUs par le modèle J2000 (Jandot, 2010). . . . .	16
4	Réseaux de drainage du bassin (source : Grand Lyon) (Jandot, 2010). . . . .	19
5	Découpage du bassin versant de l'Yzeron en sous-bassins ruraux (vert) et urbains (rose). . . . .	20
6	Carte pédologique simplifiée du sol : Sables limoneux et sables argileux de gneiss et micaschistes (102), Sables limoneux à sables grossiers issus de granites (701), Sables limoneux à sables argileux issus de gneiss (702), Sables argileux issus de gneiss (7022). . . . .	23
7	Comparaison des pourcentages des catégories urbain, forêt et cultures pour les différentes données. . . . .	26
8	Cartes de classification de l'occupation du sol : (a) Ortho, (b) Quickbird, (c) Synthèse, (d) Spot. En rouge, la classe urbaine, en orange la classe mixte-cultures, en vert-clair la classe mixte-forêt, en jaune la classe rural-cultures et en vert-foncé la classe rural-forêt. . . . .	27
9	Cartes d'imperméabilisation : (a) Ortho, (b) Quickbird, (c) Synthèse, (d) Spot. Du plus clair au plus foncé, les surfaces perméables, moyennement perméables et imperméables. . . . .	28
10	Pourcentages d'imperméabilisation des différentes cartes en fonction de la surface totale du bassin. . . . .	29
11	Données pluviométriques et météorologiques : (a) Précipitations journalières, (b) Evapotranspiration potentielle, pour les années 2003-2004 et 2008-2009. . . . .	29
12	Fréquence des débits simulés et observés : (a) faibles et moyens débits, (b) forts débits, pour différents intervalles de débits, pour la période 1997-2009. . . . .	32
13	Débits simulés et observés à l'exutoire du bassin versant de Taffignon : (a) Année 2003-2004, (b) Année 2008-2009. . . . .	33
14	Sous-bassins versants emboîtés instrumentés par le Cemagref. . . . .	34
15	Débits simulés et observés à l'exutoire de Craponne : (a) Année 2003-2004, (b) Année 2008-2009. . . . .	35
16	Débit total et contributions au débit simulés par J2000 (Ortho, Quickbird, Spot et Synthèse) et par Westpro (mesure), à l'exutoire du bassin versant de Taffignon : (a) Année 2003-2004, (b) Année 2008-2009. . . . .	37
17	Contributions au débit calculés par J2000 à l'exutoire du bassin versant de Taffignon : (a) Année 2003-2004, (b) Année 2008-2009. . . . .	39
18	Sous-bassin test situé à l'Est du bassin versant de l'Yzeron. . . . .	40

19	Contributions aux débits simulés par J2000 pour un sous-bassin test (HRU 38) : (a) Année 2003-2004, (b) Année 2008-2009. . . .	41
20	Découpage du bassin versant de Taffignon en 96 sous-bassins, considérés comme HRUs pour le modèle J2000 (pas de code couleur). . . . .	48
21	Comparaison des pourcentages de classe d'occupation des sols dominante en fonction de la surface totale du bassin. . . . .	49
22	Précipitations mensuelles cumulées pour les années 2003-2004 et 2008-2009. . . . .	49

## Liste des tableaux

1	Caractéristiques des sources de données cartographiques. . . . .	13
2	Taux d'infiltration en fonction de la catégorie d'imperméabilisation de la surface pour chaque carte. . . . .	22
3	Paramétrisation de la végétation (profondeur racinaire et indice foliaire pour quatre périodes de l'année) en fonction de l'occupation du sol. . . . .	22
4	Définition des critères de performance calculés par le modèle J2000. . . . .	30
5	Critères de performance calculés par le modèle J2000 pour la période 1997-2009 pour le bassin de Taffignon. . . . .	31
6	Critères de performance calculés pour la période 1997-2009 pour le sous-bassin de Craponne. . . . .	35
7	Valeurs maximales des débits (en $m^3.s^{-1}$ ) pour quatre pics de crue en 2003-2004 et 2008-2009. . . . .	38
8	Contributions au débit, en pourcentage de la pluie brute, pour la période 1997-2009. . . . .	38
9	Critères de performance calculés par le modèle J2000 pour l'année 2003-2004, à Taffignon. . . . .	50
10	Critères de performance calculés par le modèle J2000 pour l'année 2008-2009, à Taffignon. . . . .	50
11	Critères de performance calculés pour l'année 2003-2004, à Craponne. . . . .	50
12	Critères de performance calculés pour l'année 2008-2009, à Craponne. . . . .	51

# 1 Contexte et objectifs du stage

## 1.1 Introduction générale

Avec le développement urbain, 60% de la population mondiale devrait vivre en ville en 2030 selon les Nations Unies, avec une tendance de 80% pour les pays industrialisés. Les évolutions les plus importantes et les plus rapides auront certainement lieu dans les zones périurbaines. Ces zones peuvent être définies comme des espaces à l'interface entre zone rurale et zone urbaine, dont le bâti est composé d'îlots urbains dans un milieu qui demeure rural. Si la tendance actuelle se maintient, ces zones vont subir une densification de la population et une modification rapide de l'occupation des sols. Les conséquences seront un accroissement des surfaces imperméables et une désertion des zones agricoles, qui seront urbanisées ou converties en jachère, puis naturellement reboisées. L'urbanisation peut alors engendrer des modifications des processus hydrologiques de surface et souterrains, à la fois quantitativement et qualitativement : évolution des chemins de l'eau dans le bassin versant, modification de la qualité chimique et/ou biologique de l'eau, etc. Au final, cela peut avoir un impact sur les écosystèmes, les phénomènes d'inondation et la recharge en eau des nappes souterraines (Bras et Perkins, 1975; Desbordes, 1989; Chocat *et al.*, 2001; Booth *et al.*, 2002; Matteo *et al.*, 2006).

Face à la problématique des bassins périurbains qui subissent une pression de plus en plus forte du fait de l'urbanisation, l'influence des modifications de l'occupation du sol sur le régime hydrologique doit être étudiée de manière plus approfondie. L'augmentation des zones urbanisées se traduit globalement par une imperméabilisation des surfaces et par une artificialisation des chemins de l'eau. Ainsi, deux réseaux hydrographiques différents acheminent l'eau vers les rivières : le réseau naturel constitué de tous les cours d'eau et fossés, et le réseau d'assainissement. Celui-ci permet d'évacuer l'eau pluviale soit vers une station d'épuration soit directement à la rivière. L'intensité de ces modifications dépend des formes d'urbanisation développées et de la présence et de la nature de la végétation. Différents outils sont disponibles pour étudier les impacts hydrologiques produits par des changements d'occupation du sol. Des réseaux d'observation adaptés et des outils de modélisation hydrologique spatialisée peuvent aider à la compréhension des processus hydrologiques actifs en prenant en compte les hétérogénéités spatiales et temporelles du système étudié.

## 1.2 Présentation du Cemagref et du projet AVuPUR

J'ai effectué mon stage au Cemagref qui est un Établissement Public à caractère Scientifique et Technologique (EPST) sous la double tutelle des Ministères de la Recherche et de l'Agriculture. Il est constitué de trois départements de recherche : Eau, Écotechnologies, Territoires, répartis dans 9 centres. Parmi les 1600 personnes travaillant au Cemagref, 500 chercheurs et 200 doctorants

sont réunis au sein de 20 unités de recherche et 5 unités mixtes.

A Lyon, les activités de recherche sont orientées sur le domaine de l'eau en tant que ressource naturelle et milieu vivant. Les deux unités de recherche présentes sont : l'unité Milieux Aquatiques, Ecologie et Pollutions (MALY) et l'unité Hydrologie-Hydraulique (HHLY). Le stage s'est déroulé au sein de l'unité HHLY du département Eau<sup>1</sup>, dans l'équipe « Hydrologie des bassins versants » dirigée par Isabelle Braud. La thématique de recherche dans laquelle s'inscrit les travaux de l'unité HHLY est : « Aléas et risques liés au cycle de l'eau » (ARCEAU). L'objectif est de comprendre les impacts de l'évolution de l'occupation des sols et des pressions anthropiques sur les ressources en eau en termes de quantité et de qualité. Ce travail répond plus particulièrement à l'axe thématique 1 « Représenter et modéliser le cycle de l'eau et les aléas associés » qui vise à enrichir les connaissances concernant les processus hydrologiques (bilans hydrologiques, flux d'eau, incertitudes, etc.) et à mettre en place des approches systémiques (changements d'échelle, processus globaux dominants, etc.).

Le projet dans lequel mon travail de stage s'est inscrit est le projet de recherche ANR AVuPUR (Assessing the Vulnerability of Peri-Urbain Rivers)<sup>2</sup>. Ce projet est coordonné par I. Braud et regroupe un consortium de chercheurs de différents laboratoires. Il a été mis en place pour améliorer la connaissance de l'hydrologie des bassins versants périurbains. Il s'appuie sur deux cas d'étude : le bassin de l'Yzeron (150 km<sup>2</sup>, près de Lyon) et le bassin de la Chézine (34 km<sup>2</sup>, près de Nantes). Des nombreuses bases de données existantes comprenant différentes couches d'informations géographiques, décrivant les bassins et des données hydrométéorologiques ont été regroupées pour mener à bien ce projet. A Lyon, l'unité de recherche Hydrologie Hydraulique du Cemagref (UR HHLY) s'est occupé de développer des modèles 1) détaillé sur de petits sous-bassins versants de l'Yzeron dans le cadre d'une thèse (Jankowsky et al., 2010) et 2) simplifié à l'échelle de l'Yzeron tout entier (Branger *et al.*, 2011). Cette démarche de simplification a été menée à partir du modèle J2000 (Krause *et al.*, 2006) pour comprendre les phénomènes hydrologiques à grande échelle sans pour autant être pénalisé par le manque de données ou les temps de calculs. En parallèle au travail de modélisation, un travail de cartographie de l'occupation des sols à fine échelle du bassin versant de l'Yzeron a été réalisé par l'équipe de géographes de l'UMR Ville Environnement Société (EVS) de Lyon et de Saint-Étienne impliquée dans le projet. Les données utilisées sont des images de télédétection à très haute résolution (images satellites (SPOT, Quick Bird) et des photos aériennes (BD Ortho de l'IGN)). L'UMR a pu ainsi produire des cartes d'occupation des sols sur le bassin de l'Yzeron de 1945 à nos jours, et des scénarios de prospectives territoriales à l'horizon 2030 (Kermadi

1. Site internet de l'équipe : <http://www.cemagref.fr/le-cemagref/lorganisation/les-centres/lyon/ur-hhly/hydrologie-des-bassins-versants>

2. Le projet AVuPUR a été sélectionné en réponse à l'Appel à Projet 2007 du programme « Vulnérabilité : Milieux et Climat ». Période : 01 Janvier 2008 au 31 Aout 2011. Site internet : <http://avupur.hydrowide.com/>



*et al.*, 2010; Dodane *et al.*, 2010).

### 1.3 Problématique scientifique et objectifs du stage

La cartographie de l'occupation du sol est une donnée d'entrée importante pour la modélisation hydrologique spatialisée. Elle permet de tirer des informations pour calculer les contributions potentielles au régime hydrologique du bassin versant (Kermadi *et al.*, 2010). Plusieurs méthodes existent pour cartographier le paysage d'un bassin versant (Cain, 2004) et la méthode la plus précise (mais aussi la plus coûteuse) est issue des techniques de télédétection. Celles-ci permettent de récolter des données à très haute résolution à partir de satellites d'observation et de photographies aériennes. Ces données apportent des informations sur les hétérogénéités spatiales et temporelles du paysage : limitations entre zones artificielles (bâti, routes) et zones non artificielles (forêt, cultures), évolution temporelle de ces limitations, etc. Ces informations sont ensuite utilisées pour paramétrer des modèles hydrologiques spatialisés. Le calcul du pourcentage de zones imperméables (notamment dans les zones urbanisées) permet de paramétrer la partition infiltration-ruissellement des eaux de pluie (coefficient de ruissellement). La connaissance de la nature du couvert végétal permet d'évaluer le taux d'interception (via l'indice foliaire) et de paramétrer l'évapotranspiration.

Ces techniques de cartographie de l'occupation des sols diffèrent par leur résolution et également par le mode de traitement d'images utilisé. Elles vont donc conduire à différentes paramétrisations de l'occupation du sol et, par conséquent, à différents calculs des processus hydrologiques. Cependant, les effets de l'utilisation d'une certaine source de données cartographiques sur la modélisation hydrologique spatialisée semblent encore peu étudiés. Chormanski *et al.* (2008) ont conduit une étude pour comprendre l'impact de l'utilisation d'images de moyenne et haute résolutions sur l'estimation des débits dans un bassin versant urbanisé à partir de modèles hydrologiques global, semi-distribué ou distribué. Ils ont montré que l'utilisation d'un modèle distribué combiné avec des données spatialisées d'imperméabilisation des surfaces était le mieux à même de prendre en compte l'importance de la connectivité entre les mailles pour calculer les débits. Les résultats obtenus montrent également que l'utilisation d'images à moyenne résolution ou d'images sub-pixellisées est un bon compromis entre l'erreur commise (environ 10%) et le prix des données haute résolution. Cependant, aucune étude ne semble avoir été conduite pour estimer l'impact du type de sources de données de façon plus détaillée qu'en regardant simplement les débits à l'exutoire. Il est donc intéressant d'étudier les différences que produisent l'utilisation de plusieurs sources de données cartographiques sur la modélisation hydrologique spatialisée afin de connaître les incertitudes produites et peut-être pouvoir choisir la « meilleure source de données » pour paramétrer le modèle.

Mon travail de stage s'est donc attaché à comprendre l'influence de l'uti-

lisation de différentes sources de données en entrée d'un modèle hydrologique spatialisé. Il s'inscrit dans le prolongement des travaux de modélisation simplifiée à partir du modèle J2000 qui avaient déjà entamés par l'UR HHLV du Cemagref de Lyon, dans le cadre du projet AVuPUR. Afin d'utiliser le potentiel de l'imagerie à très haute résolution, utilisée pour la description fine de l'occupation des sols, j'ai mis en œuvre le modèle spatialisé J2000 en me basant sur quatre cartes d'occupation du sol issues de différentes sources disponibles pour une même année (l'année 2008). Les simulations ont été réalisées sur de longues durées et au pas de temps journalier ce qui a conduit à analyser principalement les résultats en terme de bilan sur plusieurs années. Cette démarche m'a ensuite amenée à m'interroger sur l'impact de l'utilisation d'une certaine source de données sur la simulation des processus hydrologiques.

## 1.4 Méthodologie de travail

Tout d'abord, j'ai analysé les quatre cartographies du bassin de l'Yzeron à ma disposition. Ces cartographies sont issues d'images satellites Quikbird et Spot, d'images aériennes de la base de données Ortho de l'IGN et d'une carte de synthèse qui a été effectuée par les géographes de l'UMR ENVS à partir des trois sources mentionnées précédemment. Ces données cartographiques ont ensuite été transcrites en paramètres hydrologiques (degré d'imperméabilisation et taux d'infiltration) afin d'effectuer des modélisations et étudier l'impact de l'utilisation de différentes sources de données sur les simulations hydrologiques. Pour ce faire, la plateforme de modélisation JAMS, qui intègre le modèle hydrologique spatialisé J2000 déjà testé par Flora Branger dans le cadre d'AVuPUR, a été utilisée. Les modélisations ont été effectuées sur de longues périodes (un an à dix ans) au pas de temps journalier afin de pouvoir estimer les différentes composantes du cycle de l'eau en fonction des différentes données d'occupation des sols. Pour interpréter les résultats donnés par le modèle, les bilans hydriques et les différentes contributions au débit de différents compartiments (végétation, sol, sous-sol) ont été calculés. Les résultats globaux du modèle ont ensuite été comparés aux données mesurées à l'exutoire du bassin versant. Pour interpréter les phénomènes hydrologiques de manière plus détaillée, il a fallu comparer les sorties spatialisées du modèle aux débits mesurés à l'exutoire de différents sous-bassins instrumentés de l'Yzeron. Ce modèle a ensuite pu servir, d'outil pour comparer les différentes simulations issues des différentes sources cartographiques, notamment en terme de contributions au débit. Également, un logiciel de décomposition du débit, Westpro (Willems, 2009), en partie calibré par Isabelle Braud, a été utilisé pour estimer les différentes contributions aux débits des données mesurées et ce, afin de les comparer aux contributions calculées par le modèle J2000.

Mon rapport se découpe en trois différentes parties. La première partie présente la zone d'étude, les données cartographiques utilisées pour caractériser l'occupation des sols ainsi que les données hydrologiques et météorologiques exploitées. Est ensuite décrit l'outil de modélisation employé ainsi que les pa-

ramétrisations effectuées (paramétrisations antérieures au stage effectuées par Flora Branger et paramétrisations mises en place durant le stage). Enfin, la dernière partie détaille les résultats obtenus. Celle-ci présente tout d'abord une analyse de l'occupation du sol issue des données cartographiques et du taux d'imperméabilisation associé. Puis, une analyse globale effectuée sur l'ensemble du bassin versant et une analyse détaillée au sein de sous-bassins versants montrent l'intérêt de l'utilisation de J2000 pour comparer les données cartographiques entre elles. En dernier lieu, une comparaison des simulations issues des quatre différentes occupations du sol est effectuée pour mettre en relief les différences en terme de contributions au débit.

## 2 Présentation de la zone d'étude

### 2.1 Le bassin versant périurbain de l'Yzeron

L'objet d'étude est le bassin versant de l'Yzeron, qui est un bassin versant périurbain d'environ 150 km<sup>2</sup>, situé à l'ouest de la ville de Lyon (cf. figure 1). Il intègre à la fois une partie du Grand Lyon et une partie des Monts du Lyonnais. L'exutoire du bassin se situe à la hauteur de la ville d'Oullins où la rivière Yzeron se jette dans le Rhône.



FIGURE 1 – Localisation du bassin versant de l'Yzeron.

Le bassin est constitué en amont d'une partie rurale partagée entre parcelles agricoles et habitations peu denses, de zones périurbaines, et en aval d'une partie urbaine dense (une vingtaine de communes dont une partie de l'agglomération lyonnaise). Il est soumis à une forte augmentation de l'urbanisation depuis les années 1970. La population totale est de 164 000 habitants dont 80% se trouve en zone urbaine et périurbaine. Selon Dodane *et al.* (2010), le bassin versant de l'Yzeron aurait gagné 600 hectares d'espaces urbanisés entre 1990 et 2008, soit un surplus de 13% par rapport aux hectares déjà urbanisés en 1990.

Le dénivelé global est de 700 m, avec des pentes de plus de 10% pour plus de la moitié du bassin (Gnouma, 2006). La structure pédogéologique, constituée d'un socle granitique et de sols peu profonds, est peu favorable au stockage de l'eau. Le climat subit des influences continentales et méditerranéennes. Le régime de type pluvial est contrasté avec de fortes périodes d'étiage en été et des crues importantes et rapides au printemps et en automne. Par sa morphologie et son climat, ce bassin réunit toutes les conditions pour la formation de crues

rapides qui peuvent se trouver aggravées par les phénomènes d'urbanisation et d'imperméabilisation croissants.

## 2.2 Cartographie de l'occupation du sol

Ces données ont été acquises et traitées lors du projet AVuPUR, en collaboration avec l'UMR Environnement Villes Sociétés (EVS) de l'Université de Saint-Étienne et de Lyon (Kermadi *et al.*, 2010; Dodane *et al.*, 2010). Dans le cadre de ce projet, Flora Branger avait commencé à analyser ces données cartographiques pour l'année 2008 et j'ai poursuivi son travail.

Plusieurs sources d'imagerie ont conduit à la réalisation de différentes cartographies de l'occupation du sol du bassin de l'Yzeron en 2008. Celle-ci a été cartographiée à l'aide d'images à très haute résolution : images aériennes de la BD-Ortho de l'IGN du 05/05/2008 avec une résolution de 50 cm (longueurs d'onde visible), images satellites Quickbird du 29/08/2008 avec une résolution de 2,44 m (longueurs d'ondes visibles et proche infrarouge) et images satellites Spot 5 du 22/09/2008 avec une résolution de 2,50 m (longueurs d'onde visible et proche infrarouge). Ces trois sources de données ont ensuite été synthétisées dans une carte de synthèse par l'UMR EVS. Plusieurs méthodes de traitement d'images ont été développées par les géographes pour extraire les informations sur l'occupation des sols à partir de l'information spectrale des images, directement liée aux propriétés physiques des surfaces (couleurs, géométrie, activité chlorophyllienne). Ces traitements, par exemple avec le logiciel ENVI et la création de néo-canaux, ont conduit à une classification de l'image en six ou huit classes (Kermadi *et al.*, 2010) : 1) sols nus, 2) herbacées très chlorophylliennes, 3) feuillus, 4) herbacées peu chlorophylliennes, 5) routes, 6) surfaces en eau, 7) conifères, 8) bâti. Le tableau 1 résume les caractéristiques des différentes sources de données.

## 2.3 Autres données spatiales décrivant le bassin

Le MNT est issu de données de la BD TOPO, à la résolution à 25m. Les altitudes sur le bassin varient de 167 à 910 mètres. La carte géologique du bassin utilisée a été digitalisée par R. Gnouma (2006) dans le cadre de sa thèse à partir d'exemplaires papiers à l'échelle 1/50000 provenant du BRGM. La majorité du bassin est constituée de roches de type métamorphique (pour la partie Ouest), caractérisant les Monts du Lyonnais. La partie Est du bassin est constituée d'alluvions. La carte pédologique est issue des données de la BD DONESOL, mises en place dans le cadre du programme national IGCS (source : IGCS, Cartes des sols du Rhône, Sol-CONSEIL/ Association Sol-Info Rhône-Alpes) (Gnouma, 2006). Il n'existe pas de cartes hydrogéologiques précises qui couvrent ce bassin versant mais selon le référentiel hydrogéologique produit à l'échelle de toute la France par le BRGM, tout le bassin versant de l'Yzeron se situe sur un terrain granitique et métamorphique.

Images	BD Ortho IGN	Quickbird 2	SPOT 5
Résolution	0.50 m	2,44 m	2,50 m
Bande spectrale	visible	visible proche IR	visible proche IR
Date d'acquisition	5 mai 2008	31 août 2008	22 septembre 2008
Traitement	Segmentation orientée objet (Matlab)	Segmentation orientée objet (Definiens)	Classification pixellaire (ENVI)
Types d'occupation des sols	Forêts  Herbacées  Sols nus Eau Bâti Routes	Feuillus Conifères Herbacées chlor Herbacées non chlor Sols nus Eau Bâti Routes	Feuillus Conifères Herbacées chlor Herbacées non chlor Sols nus Eau Bati Routes

TABLE 1 – *Caractéristiques des sources de données cartographiques.*

## 2.4 Suivi hydrologique et météorologique

De nombreuses données sont disponibles sur le bassin versant de l'Yzeron. Les données pluviométriques et débitmétriques relatives à ce bassin (cf. figure 2) ont été rassemblées lors du projet AVuPUR et grâce à la coopération du Cemagref avec différents partenaires : l'observatoire de terrain en hydrologie urbaine (OTHU), la DREAL Rhône-Alpes, le Grand Lyon et la Communauté de communes des vallons lyonnais (CCVL). Elles couvrent la période de 1970 à 2011.

L'hydrologie des cours d'eau du bassin est bien documentée grâce à la présence de deux stations hydrométriques du réseau national (Banque Hydro, DREAL Rhône-Alpes) : la station de Craponne (48 km<sup>2</sup>) et la station de Taffignon (129 km<sup>2</sup>) (cf. figure 2). Ces stations fournissent des données à pas de temps variable depuis 1970 et 1988 respectivement. Celles-ci ont été complétées plus récemment par un réseau de stations emboîtées suivi par le Cemagref, et couvrant une gamme d'échelle de quelques km<sup>2</sup> à quelques dizaines km<sup>2</sup>.

*Remarque* : Comme aucune station débitmétrique ne fonctionne à l'exutoire de l'Yzeron, je me suis intéressée principalement au bassin versant plus restreint de Taffignon pour étudier les différents régimes hydrologiques.

Les données météorologiques proviennent de huit stations pluviométriques dont la durée d'observation varie de 1 à 25 ans, d'une station météo du Cemagref et de la base de données SAFRAN (Quintana-Segui *et al.*, 2008; Vidal *et al.*, 2010) de Météo-France, disponible depuis 1970 à une résolution de 8\*8 km<sup>2</sup>. Ces données ont servi pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle (Braud et Vannier, 2010) selon la méthode FAO (G. *et al.*, 1998).

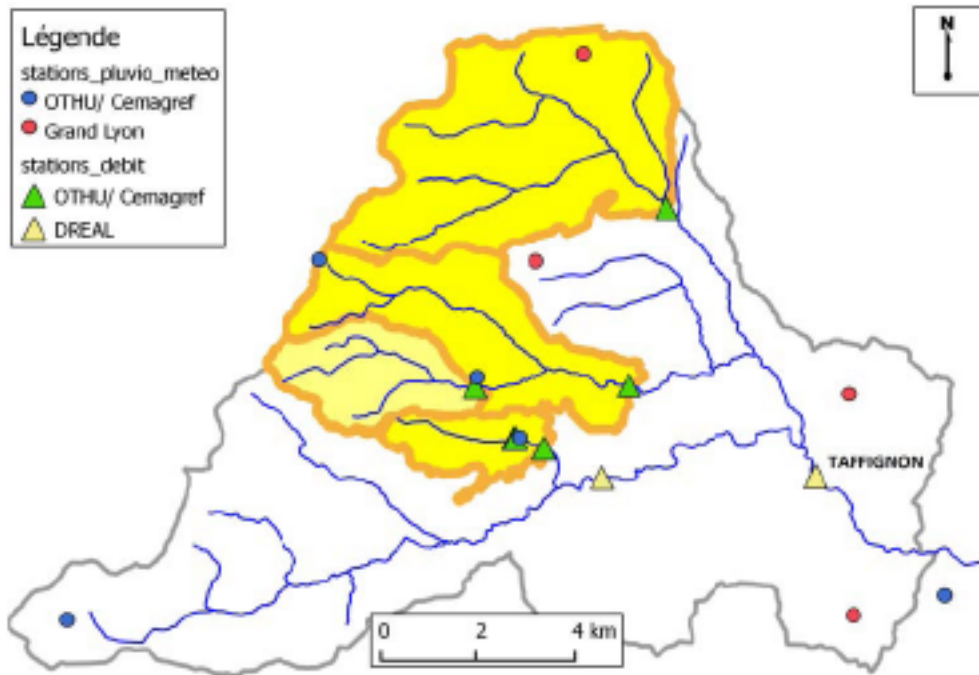


FIGURE 2 – Stations débitmétriques et pluviométriques présentes sur le bassin de l'Yzeron.

### 3 Modélisation hydrologique : modèle J2000 et paramétrisation

#### 3.1 Présentation générale du modèle

Le modèle J2000 (Ruyter et al. 2000) est un modèle hydrologique à grande échelle développé par le Centre de Recherche en Hydrologie et Mécanique des Fluides (CERHMF) de l'Université de Jena. Il est basé sur le modèle J2000 (Ruyter et al. 2000) et est paramétrisé pour le bassin de l'Yzeron (Ruyter et al. 2011). Le modèle J2000 est un modèle hydrologique à grande échelle développé par le Centre de Recherche en Hydrologie et Mécanique des Fluides (CERHMF) de l'Université de Jena. Il est basé sur le modèle J2000 (Ruyter et al. 2000) et est paramétrisé pour le bassin de l'Yzeron (Ruyter et al. 2011). Le modèle J2000 est un modèle hydrologique à grande échelle développé par le Centre de Recherche en Hydrologie et Mécanique des Fluides (CERHMF) de l'Université de Jena. Il est basé sur le modèle J2000 (Ruyter et al. 2000) et est paramétrisé pour le bassin de l'Yzeron (Ruyter et al. 2011).

Le modèle J2000 est un modèle hydrologique à grande échelle développé par le Centre de Recherche en Hydrologie et Mécanique des Fluides (CERHMF) de l'Université de Jena. Il est basé sur le modèle J2000 (Ruyter et al. 2000) et est paramétrisé pour le bassin de l'Yzeron (Ruyter et al. 2011).

3. Par exemple, le module calcul de la neige a été désactivé pour le bassin de l'Yzeron.

intègre néanmoins explicitement les paramètres physiques du bassin.

La discrétisation spatiale du modèle se fait en unité de réponse hydrologique (ou HRU). Ces unités sont supposées hydrologiquement homogènes selon des critères tels que la pente, l'orientation, l'altitude, la végétation, le type de sol et la distribution des précipitations. Ainsi, les variations dynamiques des processus hydrologiques à l'intérieur des HRU sont négligées par rapport aux variations d'une HRU à une autre (Flugel, 1995). Le routage s'opère par le réseau hydrographique naturel constitué de brins de rivière.

A partir des forçages météorologiques en entrée (pluie et évapotranspiration), le modèle calcule pour chaque pas de temps et au sein de chaque maille, les contributions du débit (ruissellement de surface, écoulement de sub-surface et débit de base). La connaissance du comportement de chaque maille et l'implémentation du routage permet de connaître le débit à l'exutoire du bassin versant. Le modèle calcule également plusieurs critères de performance sur le débit à l'exutoire.

Ce modèle présente donc plusieurs intérêts :

1. d'un point de vue pratique, l'utilisation de J2000 au sein d'une plateforme de modélisation permet à l'utilisateur de choisir les processus qu'il veut prendre en compte ;
2. c'est un modèle hydrologique spatialisé qui permet d'intégrer les connaissances géographiques de l'occupation du sol ;
3. il est possible de connaître les différents flux au sein de chaque maille, aux exutoires des différents sous-bassins (soit dans les brins de rivière) et à l'exutoire du bassin tout entier.

### 3.2 Fonctionnement de J2000

Le pas de temps de J2000 est fixe et peut être choisi par l'utilisateur. Les simulations s'articulent autour de deux boucles temporelles emboîtées. A chaque instant, le modèle décrit le comportement hydrologique de chaque unité de modélisation puis, à partir du calcul de production de ces unités spatiales, il effectue le routage dans le réseau hydrographique.

Au sein de chaque HRU, le calcul des processus est basé sur une vision conceptuelle. L'entrée d'eau se fait par le biais des précipitations. Celles-ci sont ensuite transférées dans six réservoirs différents qui représentent le comportement de la végétation, du sol et des nappes souterraines, via plusieurs modules : le module Interception avec le réservoir Végétation, le module Sol avec le réservoir Dépressions (assimilables aux « flaques » de surface c'est-à-dire aux points d'arrêts et de stockage du ruissellement de surface pouvant se réinfiltrer) et les réservoirs du sol MPS et LPS et le module Aquifère avec les réservoirs RG1 et RG2 qui représente la nappe souterraine. L'évapotranspiration potentielle est également fournie en entrée au modèle afin de calculer l'évapotranspiration réelle. Ces modules, leurs réservoirs et les transferts entre eux sont schématisés sur la figure 3.

Pour chaque HRU et à chaque pas de temps, le modèle calcule les processus hydrologiques entre les réservoirs et leur bilan hydrique : l'évapotranspiration,



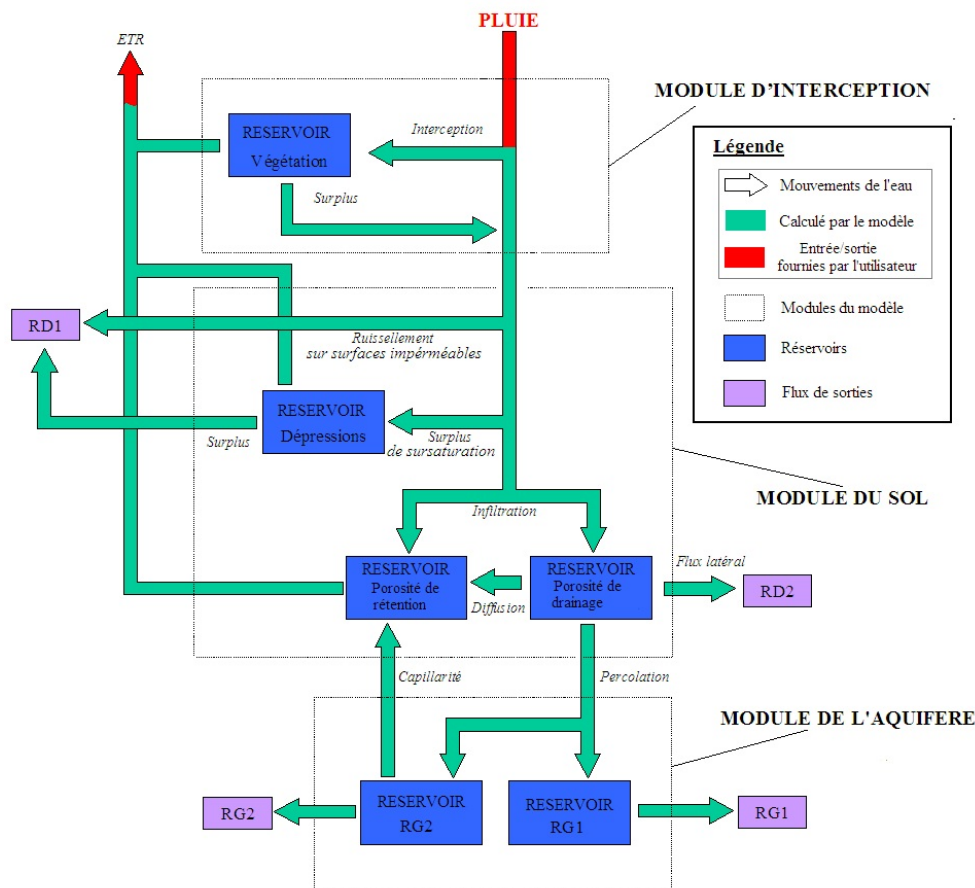


FIGURE 3 – Description schématique des transferts de l'eau au sein des HRUs par le modèle J2000 (Jandot, 2010).

l'interception, les différentes contributions au débit (ruissellement, écoulement hypodermique et débit de base) et le stockage dans le sol et dans la nappe souterraine. Ces calculs se font au sein de différents modules qui peuvent être modifiés, activés ou désactivés par l'utilisateur. Une fois le calcul effectué dans les différents éléments du maillage, le modèle coordonne les transferts entre ces éléments qui sont, soit reliés entre eux, soit reliés aux brins du réseau hydrographique. Le débit total est calculé à partir de la production et du transfert dans les unités de modélisation de quatre flux différents :

- Ruissellement direct rapide (RD1) composé du ruissellement des surfaces imperméables des sous-bassins urbanisés à plus de 50% et du ruissellement de surface à saturation,
- Écoulement hypodermique ou ruissellement de subsurface lent (RG1) présent dans la partie supérieure du sol,
- Débit de base rapide (RG1) issu du transfert de l'eau dans la partie supérieure des nappes d'eau souterraine,
- Débit de base lent (RG2) issu du transfert de l'eau dans la partie inférieure des nappes d'eau souterraine.

La simulation des différents processus hydrologiques au sein de chaque unité

de modélisation se fait par le biais de plusieurs modules de calcul listés précédemment et décrits ci-dessous.

**Module Interception :** Ce module opère un premier filtre des pluies brutes. Celles-ci sont en partie interceptées par le réservoir végétation qui se vide ensuite par évaporation. Le paramètre qui contrôle la quantité d'eau de pluie interceptée est l'indice foliaire (ou Leaf Area Index, LAI). Ce dernier correspond à la surface du feuillage rapporté à la surface du sol. Il dépend de la saison et du type d'occupation du sol. En cas du surplus du réservoir, l'eau rejoint directement les réservoirs du sol, comme la pluie qui n'a pas été interceptée.

**Module Sol :** La pluie nette peut ensuite s'infiltrer dans le sol en fonction des paramètres (par exemple, taux d'imperméabilisation de la surface  $\beta_{imp}$ ) et de l'état des réservoirs du sol. Le modèle considère trois types de surface : les surfaces imperméables (taux d'imperméabilisation supérieur à 80%, les surfaces moyennement perméables (taux d'imperméabilisation inférieur à 80%) et les surfaces totalement perméables (taux d'imperméabilisation égal à zéro). Pour les surfaces imperméables (respectivement moyennement perméables), le pourcentage de pluie qui s'infiltrer est égal au taux  $soilImpGT80$  (respectivement  $soilImpLT80$ ) défini par l'utilisateur.

Si la pluie nette tombe sur une surface totalement perméable ( $\beta_{imp} = 0$ ), elle s'infiltrer entièrement dans le sol et le flux de ruissellement de surface est nul. Ce n'est que lorsque la capacité maximale d'infiltration est atteinte lors du processus d'infiltration que l'eau ruisselle en surface.

La quantité d'eau pouvant s'infiltrer au maximum,  $Inf_{max}$ , est fonction du taux de saturation du sol  $soil_{sat}$  et de la capacité maximale d'infiltration  $Cinf_{max}$  qui est un paramètre défini par l'utilisateur. Elle se calcule de la façon suivante :

$$Inf_{max} = (1 - soil_{sat}) \cdot Cinf_{max} \quad (1)$$

Le taux de saturation du sol dépend de la capacité maximale et actuelle (au moment du calcul) en eau des réservoirs du sol.

L'eau infiltrée est stockée dans deux réservoirs MPS et LPS qui représentent chacun une partition de la porosité du sol. Le réservoir MPS (Middle Pore Storage) représente les pores de tailles moyennes (porosité de rétention) où l'eau est considérée comme statique. Il est assimilé à la réserve utile du sol, soit la quantité d'eau que le sol peut absorber et restituer à la végétation. Le réservoir LPS (Large Pore Storage) représente les larges pores (porosité de drainage) où l'eau est mobile. Il est assimilé à la capacité d'air du sol. L'eau infiltrée remplit d'abord le réservoir MPS jusqu'à saturation avant de stocker le reste de l'eau dans le réservoir LPS. MPS se vide uniquement par transpiration. L'eau présente dans LPS est ensuite partagée entre un flux de diffusion  $Diff$  vers MPS, un flux de percolation  $Perc$  vers la nappe souterraine et le flux de

sub-surface ou écoulement hypodermique *RD2*. Les équations qui régissent les flux de sortie sont :

$$LPS_{out} = soil_{sat}^{OutLPSCoeff} \cdot LPS_{act} \quad (2)$$

$$Perc = LPS_{out} \cdot (1 - \tan(\alpha)) \cdot LatVertCoeff \quad (3)$$

$$RD2 = LPS_{out} \cdot \tan(\alpha) \cdot LatVertCoeff \quad (4)$$

$$Diff = LPS_{act} \cdot (1 - e^{-\frac{DiffCoeff}{\Theta_{MPS}}}) \quad (5)$$

avec *OutLPSCoeff*, *DiffCoeff* et *LatVertCoeff* trois paramètres de calibrage fixés par l'utilisateur, *LPS<sub>act</sub>* la quantité d'eau présente dans le réservoir LPS au moment du calcul,  $\alpha$  la pente moyenne de la HRU dans laquelle s'effectue le calcul et  $\Theta_{MPS}$  la teneur en eau relative du réservoir MPS.

**Module Aquifère :** Le module de l'aquifère contient deux réservoirs RG1 et RG2 qui représentent le comportement de la nappe souterraine. Le bassin de l'Yzeron n'ayant pas de nappes profondes, le réservoir RG2 a été désactivé. Le réservoir RG1 se remplit par percolation de l'eau du sol avec le flux *Perc* et se vide en débit de base *RG1* (ou par capillarité vers le sol lorsque le phénomène est activé). L'équation de vidange du réservoir de la nappe est :

$$RG1 = \frac{1}{k_{RG1} \cdot gwRG1Coeff} RG1_{act} \quad (6)$$

avec  $k_{RG1}$  le temps de rétention dans le réservoir, *gwRG1Coeff* un coefficient de calibration et *RG1<sub>act</sub>* la quantité d'eau présente dans le réservoir RG1 au moment du calcul.

**Module Rivière :** Ce module permet de calculer la vitesse, le stockage de l'eau et les débits à l'intérieur et en sortie des brins de rivières.

Grâce à ce découpage en différents modules, il est ainsi possible d'avoir accès au comportement de chaque HRU, de chaque brin de la rivière et de l'exutoire du bassin tout entier à chaque pas de temps.

### 3.3 Mise en œuvre du modèle

Pour l'Yzeron, les simulations ont été conduites au pas de temps journalier.

#### 3.3.1 Maillage

L'approche choisie a été d'utiliser le maillage en sous-bassins versants mixtes ruraux et urbains réalisé dans le cadre du projet AVuPUR (Dehotin, 2009).

L'analyse du modèle numérique de terrain et du réseau hydrographique de la BD Carthage a permis de dénombrer 38 sous-bassins versants de type

ruraux, c'est-à-dire drainés par le réseau hydrographique naturel. Or, le réseau d'assainissement existant sur le bassin versant de l'Yzeron (réseaux unitaires ou réseaux séparatifs) draine 34% de sa superficie (cf. figure 4).

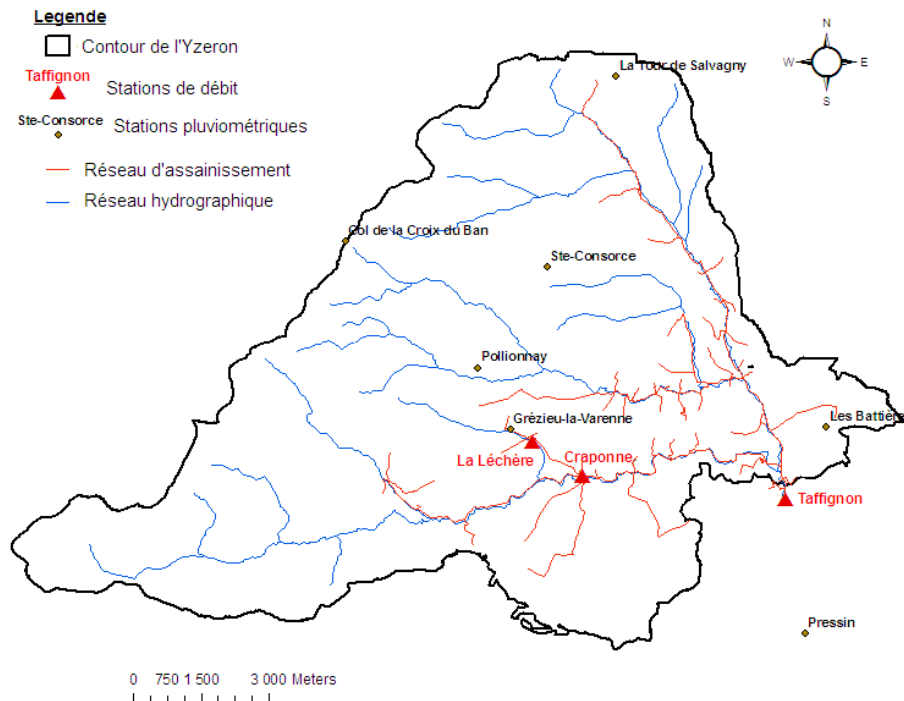


FIGURE 4 – Réseaux de drainage du bassin (source : Grand Lyon) (Jandot, 2010).

Une partie des eaux pluviales ne rejoint donc pas le réseau hydrographique du sous-bassin correspondant et transite par le réseau de collecteurs. Ces eaux pluviales sont rejetées dans le réseau hydrographique via des points de rejets ou dans des déversoirs d'orage. Des bassins urbains ont donc été délimités autour des principaux déversoirs d'orage et points de rejets, considérés comme des exutoires du réseau dans le milieu naturel. Pour ce faire, les informations disponibles sur les sens de l'écoulement dans les collecteurs, le cadastre et le zonage d'assainissement du Grand Lyon (pour la partie Est du bassin) et du syndicat des eaux SIAVHY ont été utilisées (Dehotin, 2009). Ainsi, le bassin de l'Yzeron a été redécoupé en 103 sous-bassins dont 63 bassins urbains.

Comme seul le réseau hydrographique naturel est pris en compte par le modèle, les connexions des sous-bassins au réseau se font soit directement dans la rivière pour les bassins ruraux soit au niveau du point de rejet principal pour les bassins urbains. En tout 96 sous-bassins ont été délimités pour le bassin de Taffignon (cf. Annexe figure 20) ainsi que 64 brins de rivière.

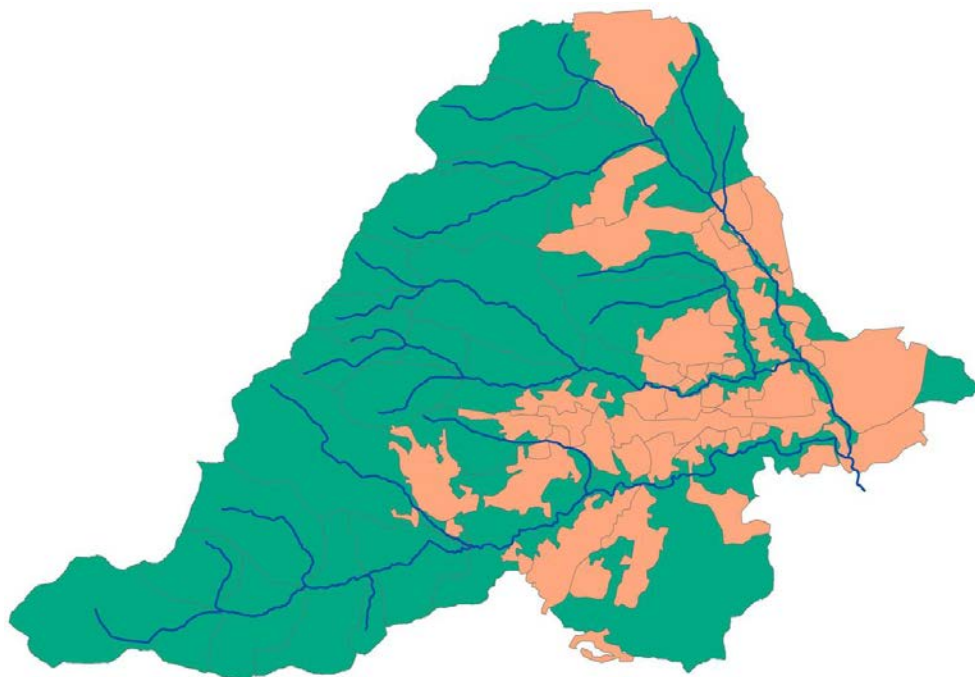


FIGURE 5 – Découpage du bassin versant de l'Yzeron en sous-bassins ruraux (vert) et urbains (rose).

### 3.3.2 Forçages météorologiques

Les précipitations journalières de sept postes pluviométriques ont introduites en entrée de J2000 avec une prise en compte (par paramétrisation) des 4 stations les plus proches pour calculer la pluie moyenne tombant sur chaque HRU (méthode de pondération inverse à la distance). Parmi les sept stations (cf. figure 2), trois appartiennent au Cemagref (Pollionnay, Croix du Ban, Grézieu-la-Varenne) et quatre au Grand Lyon (Pressin, La Tour de Salvagny, Les Battières, Sainte-Consorce).

Le modèle requiert également une donnée d'évapotranspiration potentielle en entrée et il a été choisi d'appliquer une valeur journalière uniforme sur tout le bassin. Celle-ci a été calculée par I. Braud et O. Vannier (Braud et Vannier, 2010) selon la méthode FAO.

*Remarque :* Durant mon stage, j'ai principalement utilisé les données météorologiques et hydrologiques couvrant une période sur laquelle des traitements de données avaient déjà été réalisés : 1997 à 2009.

### 3.3.3 Paramétrisation du modèle

Plusieurs paramètres distribués géométriques et hydrologiques permettent de caractériser les HRUS et les brins de rivière dans le modèle, via la caractérisation de l'occupation du sol, du type de sol et du sous-sol. La topologie de ces entités est également décrite pour permettre l'implémentation du transfert de l'eau. Des paramètres globaux, appliqués sur l'ensemble du bassin, doivent

également être définis. L'ensemble de ces paramètres a déjà été fixé par Flora Branger. La plupart des coefficients de calibration ont été choisis de sorte qu'ils n'influencent pas dans les équations et ce, pour éviter de caler le modèle.

**Paramétrisation géométrique** Chaque brin de rivière est défini par sa longueur, sa largeur, sa pente, sa rugosité, son altitude, sa surface et son aspect. Les 96 sous-bassins sont caractérisés par leur position, leur altitude, leur surface, le type de drainage (par une autre HRU ou par un brin de rivière), leur pente, leur aspect, le type d'occupation du sol, le type de sol et le type de sous-sol.

**Paramétrisation distribuée - Occupation du sol** Grâce aux données cartographiques, il est possible de différencier la forêt (feuillus et conifères), les cultures, les routes, le sol nu, l'eau, le bâti et les herbacées (chlorophylliennes et non chlorophylliennes) (cf. tableau 1).

Afin de simplifier la paramétrisation de l'occupation du sol, Flora Branger a effectué un regroupement en trois catégories :

- Urbain : routes + bâti,
- Forêt : feuillus + conifères,
- Cultures : sols nus + herbacées très chlorophylliennes + herbacées peu chlorophylliennes.

Les sous-bassins versants ont ensuite été classifiés en fonction de leur occupation du sol. La classification choisie est la suivante :

- *Classe 1* : sous-bassins versants à dominante urbaine, c'est-à-dire avec un pourcentage de zones urbaines supérieur ou égale à 50%,
- *Classe 2* : sous-bassins versants mixtes urbain-culture, c'est-à-dire avec un pourcentage de zones urbaines strictement inférieur à 50% et supérieur ou égal à 10% et avec un pourcentage de cultures supérieur au pourcentage de forêts,
- *Classe 3* : sous-bassins versants mixtes urbain-forêt, c'est-à-dire avec un pourcentage de zones urbaines strictement inférieur à 50% et supérieur ou égal à 10% et avec un pourcentage de forêts supérieur au pourcentage de cultures,
- *Classe 4* : sous-bassins versants à dominante rurale-cultures, c'est-à-dire avec un pourcentage de zones urbaines strictement inférieur à 10% et avec un pourcentage de cultures supérieur au pourcentage de forêts,
- *Classe 5* : sous-bassins versants à dominante rurale-forêt, c'est-à-dire avec un pourcentage de zones urbaines strictement inférieur à 10% et avec un pourcentage de forêts supérieur au pourcentage de cultures.

Cette classification a été appliquée à toutes les sources de données. La paramétrisation liée à l'occupation du sol sera explicitée dans le chapitre suivant.

La structure de J2000 impose de définir seulement trois classes de taux d'imperméabilisation en fonction de la proportion d'urbain dans les sous-bassins versants : imperméable, moyennement perméable et totalement per-

méable. Ces classes d'imperméabilisation sont directement liés aux classes d'occupation du sol : la classe 1 correspond à la classe imperméable, les classes 2 et 3 à la classe moyennement perméable et les classes 4 et 5 à la classe totalement perméable. Trois taux d'infiltration doivent être fixés, chacun associé à une classe d'imperméabilisation. Le taux d'imperméabilisation de chacune de

<b>Cartes</b>	<b>Surfaces imperméables</b>	<b>Surfaces moyennement perméables</b>	<b>Surfaces perméables</b>
<b>Ortho</b>	X	0.841	1
<b>Quickbird</b>	0.413	0.681	1
<b>Synthèse</b>	0.427	0.668	1
<b>Spot</b>	0.412	0.674	1

TABLE 2 – *Taux d'infiltration en fonction de la catégorie d'imperméabilisation de la surface pour chaque carte.*

ces trois classes d'imperméabilisation correspond à la moyenne du pourcentage de zones urbaines au sein de ces classes (cf tableau 2).

La caractérisation du type d'occupation du sol permet également de spécifier le comportement de la végétation - via l'indice foliaire pour quatre périodes différentes (début de la période de végétation, période où la croissance de la végétation est maximum, période de maturité et décroissance et fin de la période de végétation) et la profondeur racinaire (cf. tableau 3). L'indice foliaire a été choisi sur la base d'Ecoclimap développée par le CNRM (dernières corrections en 2006) avec un indice « Temperate broad-leaved forests » pour les HRUs rurales et mixtes à dominante forêt, un indice « French complex cultivation patterns » pour les HRUs rurales et mixtes à dominante cultures et un indice « Temperate suburban » pour les HRUs urbaines. La base de données ECOCLIMAP fournit moins d'informations concernant les profondeurs de racines. Les seules profondeurs de racines d'arbres qui sont renseignées sont celles appartenant aux conifères (« conifer trees ») pour la dominante de feuillus. Concernant les prairies et cultures, la valeur choisie est une moyenne entre les données de « Grazing pastures », « Spring Wheat », « Winter Wheat », « Maize », « Grapes » et « Apples, peaches, pears » (Jandot, 2010).

<b>Type d'occupation du sol</b>	<b>Classes</b>	<b>Profondeur racinaire (dm)</b>	<b>LAI1</b>	<b>LAI2</b>	<b>LAI3</b>	<b>LAI4</b>
<b>Urbain</b>	1	7.5	1.8	2	1.9	1.8
<b>Cultures</b>	2+4	12.5	3.6	4	3.3	2.9
<b>Forêt</b>	3+5	17.5	2.7	4.4	4	3.3

TABLE 3 – *Paramétrisation de la végétation (profondeur racinaire et indice foliaire pour quatre périodes de l'année) en fonction de l'occupation du sol.*

**Paramétrisation distribuée - Sol et sous-sol** La caractérisation du type de sol du sous-bassin consiste à estimer la capacité au champ (pour différentes profondeurs) de MPS et la capacité d'air de LPS de chaque sous-bassin. Grâce à un calcul statistique réalisé à partir de la carte pédologique du bassin, le type de sol présent en majorité dans chaque sous-bassin a pu être identifié. Dans le bassin versant de l'Yzeron, le sol est essentiellement constitué de sables limoneux et sables argileux (cf. carte pédologique simplifiée figure 6).

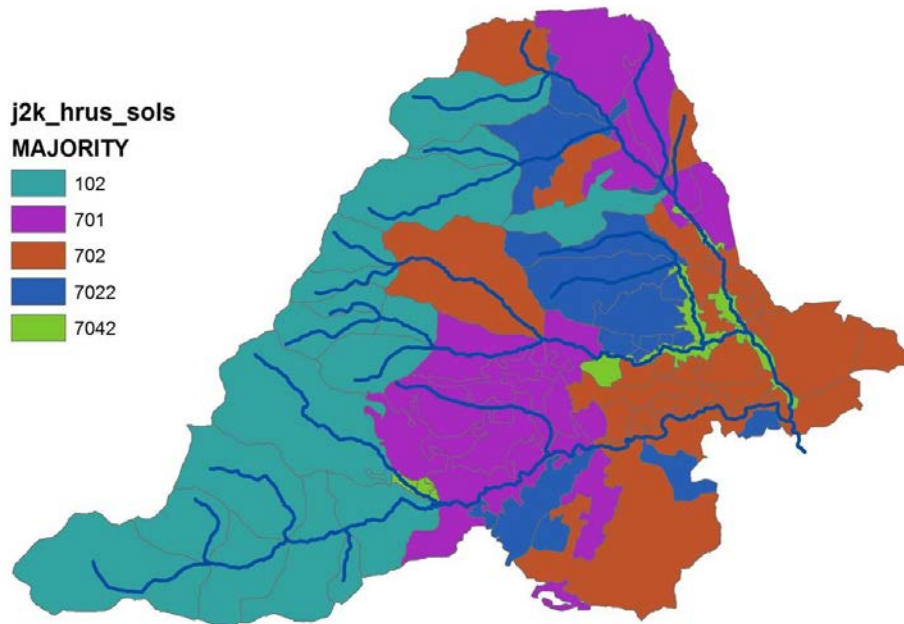


FIGURE 6 – Carte pédologique simplifiée du sol : Sables limoneux et sables argileux de gneiss et micaschistes (102), Sables limoneux à sables grossiers issus de granites (701), Sables limoneux à sables argileux issus de gneiss (702), Sables argileux issus de gneiss (7022).

Pour le sous-sol, selon le référentiel hydrogéologique produit à l'échelle de toute la France par le BRGM, tout le bassin versant de l'Yzeron se situe sur un terrain granitique et métamorphique. Les aquifères présents dans ce type de sol sont appelés « aquifères de socle ». Ils sont considérés comme « discontinus », c'est à dire de faibles tailles et indépendants les uns des autres. En considérant les données connues et disponibles, il a été fait le choix de désactiver le réservoir RG2 dans le modèle. Le flux RG2 est donc nul. Pour le réservoir RG1, il faut caractériser sa taille et le temps de séjour. Ce réservoir modélise la couche d'altérites<sup>4</sup> présente dans le sous-sol. Il présente donc une porosité importante et une grande perméabilité. Cette notion de grande perméabilité a été prise

4. Un aquifère de socle se distingue en général par trois couches aux propriétés hydrogéologiques différentes (J.C. et , collectif) : la roche saine au plus profond, puis un horizon fissuré et une formation meuble d'altération de granite (altérites) au plus proche de la surface.



en compte en prenant un temps de rétention faible de 10 jours. La taille du réservoir a été choisi de sorte qu'il ne soit jamais rempli entièrement soit 200 mm. Le coefficient correctif  $gwRG1Coef$  a été pris égal à un et la remontée capillaire de la nappe au réservoir MPS a été désactivée dans un souci de simplification.

**Paramétrisation globale** Il s'agit principalement de coefficients correctifs introduits dans le calcul de flux et de facteurs limitatifs pour certains transferts.

Dans cette étude, il n'y a pas de réservoir Dépressions ni de neige. Tous les réservoirs sont vides à l'état initial.

L'eau qui peut s'infiltrer provient uniquement de la pluie nette  $P_{nette}$ . La capacité maximale d'infiltration  $C_{inf_{max}}$  a été fixée à 200 mm en été et en hiver.

La paramétrisation globale sur la bassin versant permet de caractériser la diffusion entre les réservoirs LPS et MPS du sol, la vidange de LPS et le taux de percolation, grâce à des paramètres qui sont choisis et fixés par l'utilisateur. Le coefficient  $DiffCoef$  a été choisi de sorte que toute l'eau restante dans LPS diffuse vers MPS. Le coefficient  $OutLPSCoef$  a été fixé à 5 et le coefficient  $LatVertCoef$  à 2. Le taux maximal de percolation est de 20 mm.

*Remarque :* Mon travail de stage s'est appuyé sur les critères définis par F. Branger et j'ai appliqué la même méthodologie aux quatre cartes d'occupation du sol : SPOT, Quickbird, Ortho et Synthèse afin de pouvoir les comparer et comparer les résultats produits via le modèle J2000.

## 4 Résultats et analyse

Le travail mené lors de ce stage a eu pour but de comparer, du point de vue hydrologique, le comportement du bassin versant de l'Yzeron cartographié de quatre manières différentes : carte Ortho, carte Quickbird, carte Spot et carte Synthèse. La démarche entreprise a consisté à utiliser le modèle hydrologique spatialisé J2000 pour prendre en compte l'influence de la caractérisation de l'occupation du sol sur les processus hydrologiques.

Dans un premier temps, cette partie présente le travail qui a été mené pour étudier les différences en termes d'occupation des sols issue des quatre cartes. Celle-ci ayant un impact direct sur les processus hydrologiques en termes de comportement de la végétation et de la surface du sol (infiltration, ruissellement), ont également été comparé les degrés d'imperméabilisation des surfaces du bassin versant pour chaque carte. Dans un second temps, sont présentés les résultats obtenus à partir des simulations hydrologiques de J2000.

### 4.1 Occupation du sol et impacts sur le taux d'imperméabilisation

#### 4.1.1 Comparaison de l'occupation du sol entre les différentes cartes

A partir des données d'occupation des sols catégorisées en huit classes par les géographes de l'UMR EVS, j'ai regroupé, pour les quatre cartes (Ortho, Quickbird, Synthèse et Spot) et dans chaque sous-bassin versant, ces classes en trois catégories : forêt, urbain et cultures. L'histogramme de la figure 7 représente le pourcentage de ces trois catégories pour chaque carte et pour l'ensemble du bassin versant.

La carte sur laquelle il existe le plus de zones urbaines est la carte Spot (27,93%) tandis que la carte Ortho est celle sur laquelle les zones urbaines sont les moins présentes (7,63 %). La présence de forêts détermine la quantité de pluie interceptée par la végétation. La carte Quickbird est celle qui montre un pourcentage de forêt le plus élevé (42,18 %) alors que la carte Ortho (23,13 %) identifie principalement la présence de cultures (65,24 %). Les cartes synthèse et Spot sont celles qui se ressemblent le plus en terme de pourcentage global de type d'occupation des sols.

*Cette première analyse ne permet cependant pas de caractériser le comportement hydrologique des surfaces, et notamment des surfaces imperméables qui sont à l'origine du ruissellement direct (pour cela, il faut connaître le pourcentage de surfaces contenant plus de 50% de zones urbaines). Néanmoins, elle montre clairement les différences entre les proportions des types d'occupation du sol en fonction de la source de données utilisée.*

Ceci m'a ensuite permis de définir, pour chacun des sous-bassins, l'indice de classe allant de 1 à 5 (cf. section 3.3.3). Le résultat a été compilé sous la forme de cartes (cf. figure 8) pour comprendre les différences de répartition de

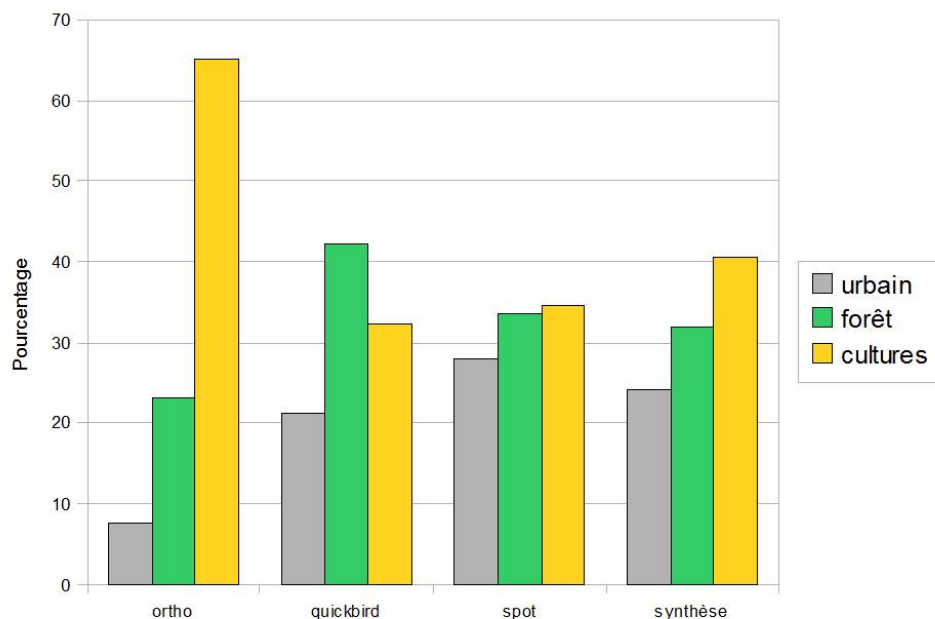


FIGURE 7 – *Comparaison des pourcentages des catégories urbain, forêt et cultures pour les différentes données.*

l’occupation du sol. Pour une approche globale, les résultats sont également présentés sous forme d’un histogramme en annexe (cf. figure 21).

Il apparaît ainsi de grandes différences entre les cartes de classification de l’occupation du sol. La classification issue de la carte Ortho ne contient aucun sous-bassin classé « urbain » et est recouverte à majorité de sous-bassins classés « mixtes-cultures ». Ce résultat est dû à la résolution des photos aériennes de la BD Ortho (0.50 m) qui permettent de distinguer, par exemple, une maison de son jardin et les clairières dans les forêts. Or, ceci est plus difficile à réaliser à partir des données issues d’images satellites car la résolution est de 2.5 m. La carte Ortho montre donc moins de zones urbaines que les autres cartes. Quant aux différences entre les données issues des images satellite SPOT et Quickbird, de même résolution, elles sont principalement dues aux différents traitements des images opérés.

Les différences de répartition de l’occupation du sol entre les quatre cartes sont très nettes. Or, le type d’occupation du sol et sa répartition spatiale sont directement reliés au calcul de l’interception par la végétation et au calcul du ruissellement de surface (cf. section 3.3.3). Les zones dites forêt et celles dites cultures, qu’elles soient mixtes ou rurales, sont paramétrées identiquement pour l’indice foliaire et la profondeur racinaire (cf. annexe 3). En ce qui concerne la répartition entre l’infiltration et le ruissellement, elle est contrôlée par sa classe d’imperméabilisation et le taux d’infiltration correspondant.

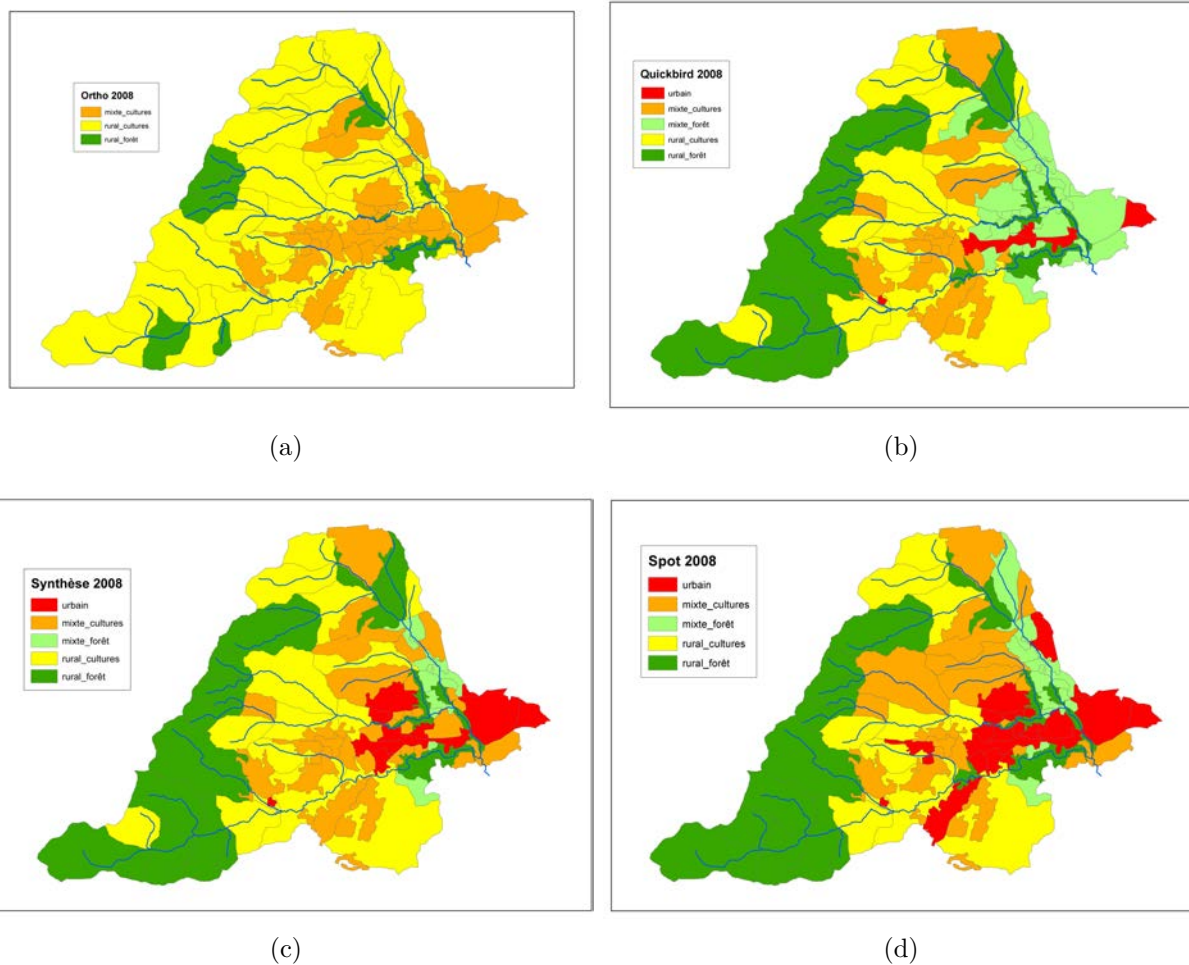


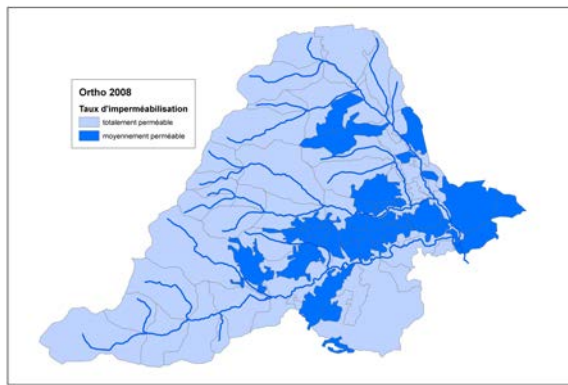
FIGURE 8 – Cartes de classification de l'occupation du sol : (a) Ortho, (b) Quickbird, (c) Synthèse, (d) Spot. En rouge, la classe urbaine, en orange la classe mixte-cultures, en vert-clair la classe mixte-forêt, en jaune la classe rural-cultures et en vert-foncé la classe rural-forêt.

#### 4.1.2 Comparaison des taux d'infiltration

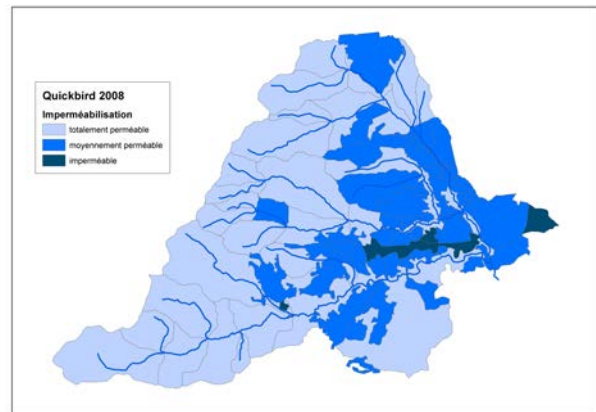
L'histogramme de la figure 10 permet de comparer le pourcentage de surfaces, pour différents degrés d'imperméabilisation, pour chaque carte. Pour une représentation spatialisée du taux d'imperméabilisation, on peut se reporter aux cartes de classe d'imperméabilisation (cf. figure 9).

La carte ortho ne présente aucune surface imperméable car aucune surface n'a été classifiée dans la catégorie classe 1 urbain. A contrario, la carte Spot est celle présentant le plus de surfaces imperméables.

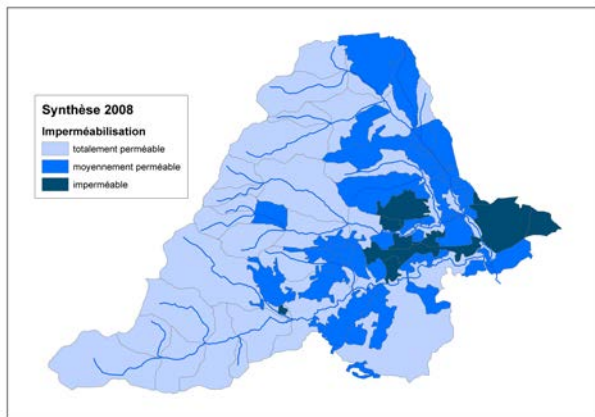
Le résultat du calcul des taux d'infiltration a été synthétisé dans le tableau 2. La carte Ortho ne possède pas de zones classées urbaines donc aucun coefficient d'infiltration n'a pu être calculé pour ce type de surface. Le plus fort taux d'imperméabilisation est obtenu pour la carte Spot tandis que la carte Ortho est celle présentant le plus fort taux d'infiltration pour les surfaces



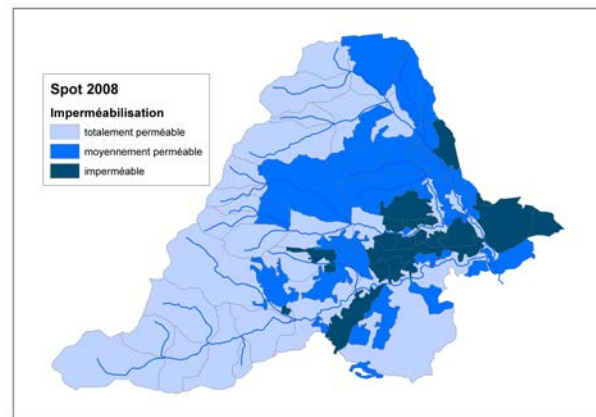
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURE 9 – Cartes d'imperméabilisation : (a) Ortho, (b) Quickbird, (c) Synthèse, (d) Spot. Du plus clair au plus foncé, les surfaces perméables, moyennement perméables et imperméables.

moyennement perméables, majoritaires pour cette carte (79%). Dans l'ordre décroissant : Ortho est plus perméable que Quickbird que Synthèse que Spot.

*Cette première étude montre que la carte Ortho est la carte ne présentant aucune surface à fort degré d'imperméabilité et que pour ses surfaces moyennement perméables, le taux d'infiltration est le plus élevé. Au contraire, la carte Spot présente 12% de surfaces imperméables et les taux d'infiltration attribués sont plus faibles en comparaison. Les cartes Quickbird et Synthèse conduisent à des résultats situés entre ces deux extrêmes. Du fait de l'influence du taux d'infiltration sur le calcul du ruissellement de surface, on peut donc penser que les simulations hydrologiques vont donner des résultats très différents en terme de contributions au débit.*

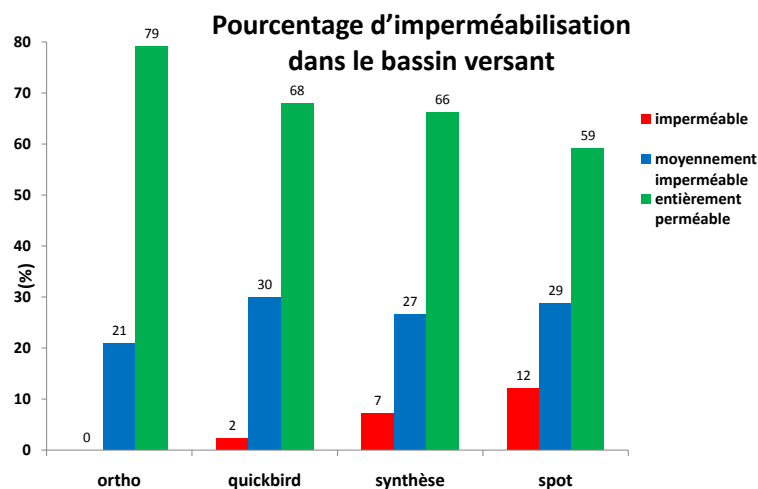


FIGURE 10 – Pourcentages d'imperméabilisation des différentes cartes en fonction de la surface totale du bassin.

## 4.2 Résultats des simulations - Validation du modèle J2000

Plusieurs années de données hydrologiques étant à ma disposition, j'ai choisi d'effectuer les simulations entre 1997 et 2009. L'efficacité du modèle a été analysé sur cette période, à partir de différents critères de performance. J'ai également effectué des bilans hydriques pour comprendre le comportement de J2000.

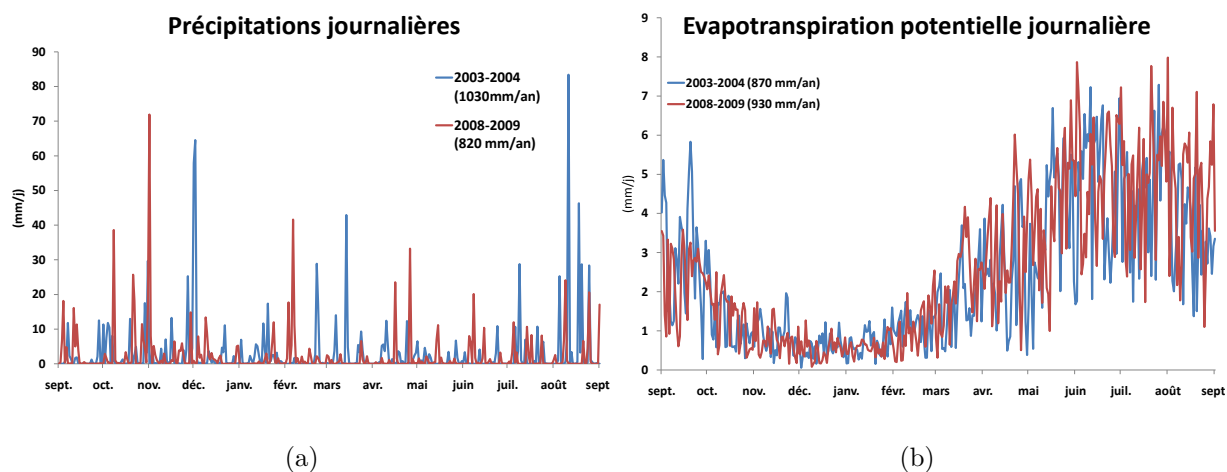


FIGURE 11 – Données pluviométriques et météorologiques : (a) Précipitations journalières, (b) Evapotranspiration potentielle, pour les années 2003-2004 et 2008-2009.

Pour une analyse plus fine, j'ai également effectué des simulations sur deux années hydrologiques<sup>5</sup> différentes afin de visualiser le comportement du modèle : 2003-2004 et 2008-2009 (cf. figure 11(a) pour les précipitations journalières et figure 11(b) pour les valeurs de l'évapotranspiration potentielle). Le cumul annuel de pluie s'élève à 1030 mm/an en 2003-2004 et 820 mm/an en 2008-2009. La différence de cumul annuel d'ETP est moins flagrante : 870 mm/an en 2003-2004 et 930 mm/an en 2008-2009.

L'année 2003-2004, même si elle ne correspond pas à l'année dont sont issues les données d'occupation du sol, est intéressante à utiliser du point de vue de la modélisation hydrologique, notamment du point de vue des conditions initiales. En effet, à l'état initial, les réservoirs du modèle sont vides. Or, l'été 2003 a été caniculaire et a vidé en grande partie les réservoirs d'eau en surface et souterrains, ce qui justifie l'utilisation de cette année hydrologique. Cependant, une autre particularité de cette année est la crue de décembre 2003 (pic de crue moyen journalier :  $36 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). C'est pourquoi j'ai également choisi l'année 2008-2009, qui présente aussi une crue ayant causé des inondations en novembre 2008, mais de plus faible importance (pic de crue moyen journalier :  $24 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

#### 4.2.1 Critères de performance

Plusieurs critères de performance sont calculés par le modèle, en comparant les simulations aux données observées (débits mesurés à l'exutoire du bassin versant de Taffignon). Parmi ces critères, cinq ont été retenus pour estimer l'efficacité du modèle : deux coefficients de Nash and Stutcliffe (Nash et Stutcliffe, 1970), deux coefficients de corrélation et l'erreur relative en volume (ou biais). Le tableau 4 décrit leur expression mathématique et leur intérêt.

Critères de performance	Expressions	Intérêts
Nash 1	$N_1 = 1 - \frac{ Q_{obs} - Q_{simu} }{ Q_{obs} - Q_{obs}^{moy} }$	Analyse du régime continu
Nash 2	$N_2 = 1 - \frac{ Q_{obs} - Q_{simu} ^2}{ Q_{obs} - Q_{obs}^{moy} ^2}$	Caractérisation de la dynamique des pics
Régression linéaire (pente $a$ et $r^2$ )	$Q_{simu} = a \cdot Q_{obs} + b$	Corrélation entre les données simulées et observées
Erreur relative en volume	$b = \frac{\sum_{i=1}^N V_i^{simu} - V_i^{obs}}{\sum_{i=1}^N V_i^{obs}} * 100$	Pourcentage d'erreur (biais)

TABLE 4 – Définition des critères de performance calculés par le modèle J2000.

Le critère de Nash  $N_2$  quantifie le degré d'ajustement entre les valeurs observées et simulées en comparant l'écart quadratique moyen des débits par rapport à la variance. Il peut varier de  $-\infty$  à 1. S'il est inférieur à zéro, le débit

5. Une année hydrologique commence au 1er septembre et se termine au 31 août de l'année suivante.

calculé par le modèle est une plus mauvaise estimation que la moyenne des débits observés. La valeur optimale est 1 (estimation parfaite) mais on considère classiquement que la simulation est bonne lorsque ce coefficient est supérieur à 0,7. Pour l'étude de longues séries temporelles, ce critère présente l'inconvénient de donner plus de poids aux événements extrêmes qu'aux débits moyens. L'utilisation du critère de Nash simple  $N_1$  permet de diminuer l'influence des hauts débits dans la valeur du coefficient. Un autre inconvénient de ce critère est l'influence du décalage temporel entre les valeurs simulées et observées.

Estimer le degré de corrélation entre les données simulées et les données observées permet également de caractériser l'efficacité du modèle. La pente de la régression linéaire entre les valeurs observées et les valeurs simulées renseignent sur la surestimation ou la sous-estimation des débits calculés par le modèle. Si la pente est supérieure à un, le modèle surestime les valeurs de débits, sinon il les sous-estime. Le coefficient de corrélation  $r^2$  décrit le degré de colinéarité entre les valeurs mesurées et calculées. Le modèle est parfait si  $r^2 = 1$ . Plus la valeur de ce coefficient est élevé, plus le modèle est en accord avec la réalité.

Le biais, ou l'erreur relative en volume, permet de renseigner sur la sur-estimation ou la sous-estimation du bilan en eau calculé par le modèle. Mais contrairement à la pente de la régression linéaire, il donne plus d'influence aux valeurs extrêmes et prend en compte la dynamique des simulations.

#### 4.2.2 Analyse des critères sur les débits à l'exutoire

Les critères de performance obtenus pour les différentes cartes sont répertoriés dans le tableau 5 pour la période 1997-2009 et dans les tableaux 9 et 10 en annexe pour les années 2003-2004 et 2008-2009.

Critères de performance	Ortho	Quickbird	Synthèse	Spot
<b>Nash 1</b>	0.36	0.35	0.31	0.24
<b>Nash 2</b>	0.43	0.50	0.48	0.42
<b>Pente régression</b>	0.62	0.68	0.70	0.74
$r^2$	0.47	0.54	0.54	0.52
<b>Biais (%)</b>	0.3	15.4	20.3	29.8

TABLE 5 – Critères de performance calculés par le modèle J2000 pour la période 1997-2009 pour le bassin de Taffignon.

Dans l'ensemble, les valeurs de Nash trouvées pour les quatre cartes sont comparables et elles montrent que les simulations correspondent correctement aux données observées. Néanmoins, ce seul critère ne permet pas de justifier le choix d'une carte par rapport à une autre pour simuler le mieux les phénomènes hydrologiques.

Les valeurs des pentes de la régression linéaire indiquent que le modèle simule en moyenne des plus faibles débits que les débits mesurés. Les valeurs



positives du biais pour les quatre cartes montrent néanmoins que le modèle surestime les forts débits.

L’histogramme 12 compare les débits classés par fréquence d’apparition et permet de confirmer ces deux constatations. Tout d’abord, il montre que les débits les plus fréquents sont les faibles débits (inférieurs à  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Pour ces valeurs, le débit observé est en moyenne supérieur aux débits simulés. D’où une valeur de la pente de la régression inférieure à un. À plus forts débits (supérieurs à  $1.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), ce sont les débits simulés qui sont supérieurs aux débits mesurés. Le calcul du biais donnant plus d’importance aux valeurs extrêmes, cela explique les valeurs positives obtenues pour la période 1997-2009.

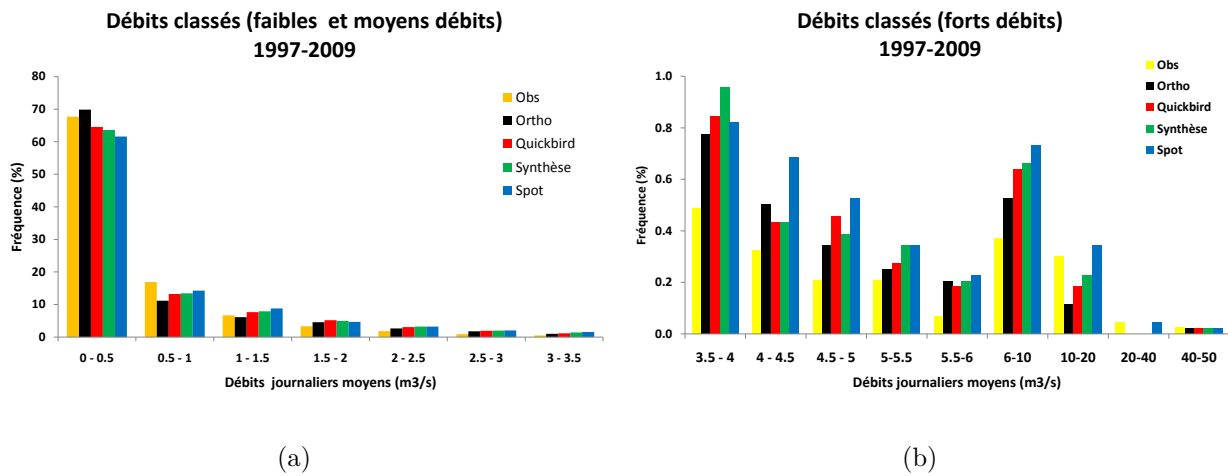


FIGURE 12 – Fréquence des débits simulés et observés : (a) faibles et moyens débits, (b) forts débits, pour différents intervalles de débits, pour la période 1997-2009.

Ces résultats peuvent être compris en rappelant l’hypothèse de base de J2000 : dans le modèle, seul le routage hydrographique naturel est pris en compte, il n’y a pas de réseaux d’eaux pluviales. Ainsi lorsqu’un épisode pluvieux survient dans le modèle, toute l’eau qui ruisselle rejoint directement la rivière. Or, normalement, le réseau d’assainissement récupère une partie de l’eau de pluie et l’envoie soit en STEP si le réseau est unitaire (ce qui est majoritairement le cas sur le bassin de l’Yzeron), soit directement à la rivière en certains points de rejets. La quantité d’eau qui contribue au débit à l’exutoire par ruissellement devrait donc être surestimée par le modèle. De plus, on considère en général que le réseau draine une partie de l’eau des nappes (15 à 30% de l’eau du réseau est une eau parasite). Ceci peut expliquer pourquoi le modèle surestime le débit à l’exutoire en période de crue (fort débit) en comparaison avec les données observées (biais positif pour toutes les cartes), en surestimant le ruissellement de surface et le débit de base. Cet effet est maximal pour la carte Spot qui a le plus de zones imperméables (biais de 30%).

### 4.2.3 Analyse sur les deux années hydrologiques choisies

Pour une analyse plus fine des résultats, on peut comparer l'évolution des débits pour les deux années hydrologiques choisies : 2003-2004 et 2008-2009 sur les figures 13(a) et 13(b). La légende indique le débit journalier moyen annuel. Pour les deux années, on peut observer que les simulations produisent un débit journalier moyen annuel supérieur à celui des données observées : + 42% pour Ortho et + 63% pour Spot.

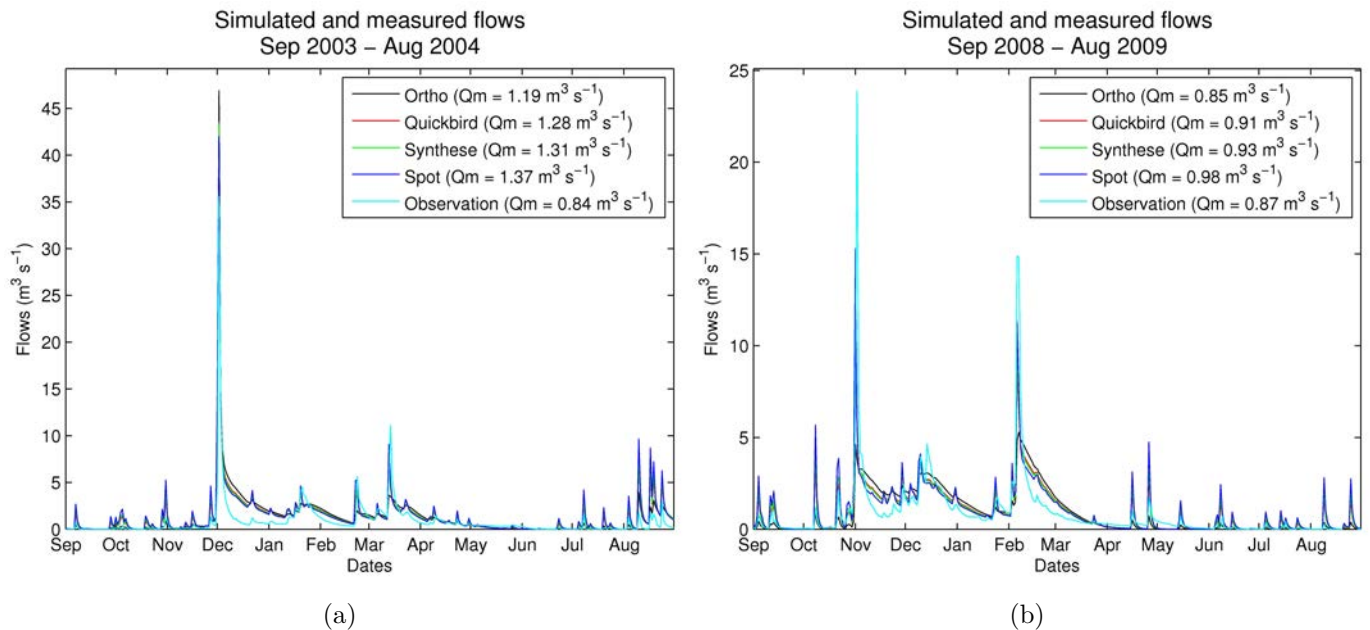


FIGURE 13 – Débits simulés et observés à l'exutoire du bassin versant de Tafignon : (a) Année 2003-2004, (b) Année 2008-2009.

En terme de dynamique de simulation, l'ascension du pic du débit est en général bien simulée mais la simulation de la décroissance des pics de débit est moins satisfaisante. En effet, la décrue des débits observés est beaucoup plus rapide que celle des débits simulés. Quantitativement, les pics de débits sont plus importants pour les débits observés que pour les débits simulés lors des fortes crues.

*Pour conclure sur ces premières analyses, il semblerait que le modèle simule assez bien les débits à l'exutoire : en moyenne, les résultats semblent plutôt corrects. Néanmoins, le modèle surestime en volume pour les crues moyennes et certains débits lors de fortes crues tandis qu'il sous-estime les bas débits. Les principales différences apparaissent principalement en comparant les débits simulés aux débits observés. Entre les débits issus des quatre cartes et simulés à l'exutoire, les différences ne sont pas flagrantes.*

#### 4.2.4 Analyse des critères sur les débits d'un sous-bassin instrumenté

J2000 permet d'avoir accès au débit à l'exutoire du bassin versant de Taffignon mais également aux débits à l'exutoire de différents sous-bassins versants. Pour certains sous-bassins (constitués d'un ou plusieurs sous-bassins définis pour le maillage) situés à l'ouest du bassin versant de l'Yzeron (cf. figure 14), il est possible d'avoir accès aux débits observés, car ils sont instrumentés. Dans ce cas, la comparaison avec les débits observés se fait manuellement ainsi que le calcul des critères de performance. Ces sous-bassins sont : Mercier (dominante rurale), Craponne (dominante rurale avec une partie à l'Est dominée par l'urbanisation), Chaudanne à La Léchère (dominante urbaine), Chaudanne au Pont de la Barge.

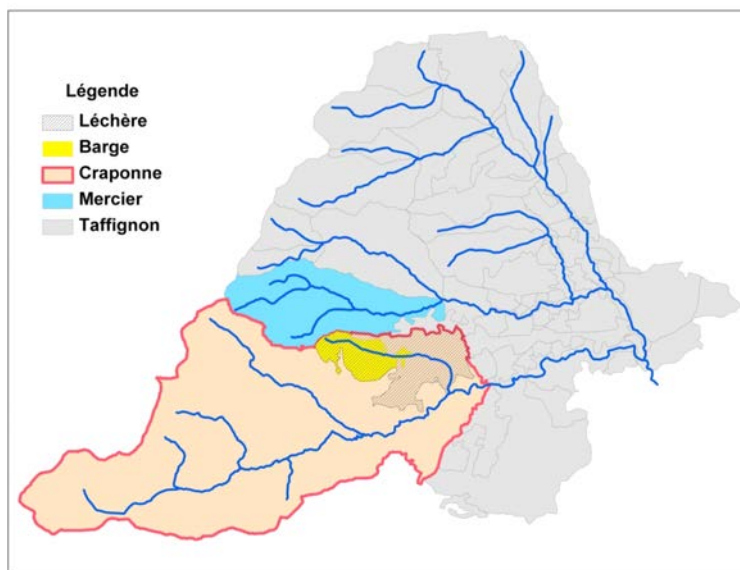


FIGURE 14 – *Sous-bassins versants emboîtés instrumentés par le Cemagref.*

Seuls les résultats concernant le sous-bassin de Craponne seront présentés ici car les données de débits des autres sous-bassins n'ont pas été traitées ou ne recouvrent pas les périodes choisies. Selon le type de cartes, l'imperméabilisation et la végétation du bassin de Craponne diffèrent.

Le tableau 6 récapitule les critères de performance, pour les différentes cartes, pour la période complète 1997-2009. Les simulations sont satisfaisantes selon les critères de Nash. Comme pour Taffignon, le modèle sous-estime les débits en comparaison avec les observations (pente régression inférieure à un) et surestime en moyenne les volumes. Les résultats sont un peu moins satisfaisants que ceux issus des simulations sur le bassin tout entier (Nash et pente plus faible, biais plus important). Une remarque similaire à ce qui a été fait pour le bassin de Taffignon : les différences majeures apparaissent entre les simulations et l'observation et non entre les simulations qui sont très semblables.

L'évolution des débits est visible à la figure 15 pour les deux années choisies. L'année 2003-2004 donne de meilleurs résultats que l'année 2008-2009 en

Critères de performance	Ortho	Quickbird	Synthèse	Spot
Nash 2	0.39	0.42	0.42	0.42
Pente régression	0.48	0.50	0.51	0.51
$r^2$	0.42	0.44	0.44	0.44
Biais (%)	26.57	23.21	22.95	21.34

TABLE 6 – Critères de performance calculés pour la période 1997-2009 pour le sous-bassin de Craponne.

terme de critères de performance : critère de Nash, coefficient de corrélation et pente plus élevés, biais plus faible pour l'année 2003-2004 (cf. tableaux 11 et 12 en annexe). Les débits simulés moyens journaliers annuels sont identiques aux débits moyens observés pour l'année 2003-2004 mais sont deux fois moins importants pour l'année 2008-2009 (cf. légende figure 15), ce qui diffère des résultats obtenus précédemment. Concernant la dynamique de l'évolution des débits, trois remarques peuvent être faites à partir de la figure 15 : 1) les pics de débit simulés sont similaires entre les quatre cartes, 2) les pics de débit simulés sont inférieurs aux pics de débit observés, 3) les pics de débit de l'année 2008-2009 ne sont pas satisfaisants (12 à 5 fois moins importants que les débits observés). La qualité des simulations dépend donc fortement de l'année étudiée. Ceci peut s'expliquer par le fait que les conditions initiales du modèle sont différentes de celles observées dans la réalité. Simuler pendant l'année 2003-2004 (qui a commencé par un été caniculaire conduisant très probablement à la vidange des réservoirs du sol) permet de restreindre l'impact des conditions initiales du système et donc d'obtenir de meilleurs résultats.

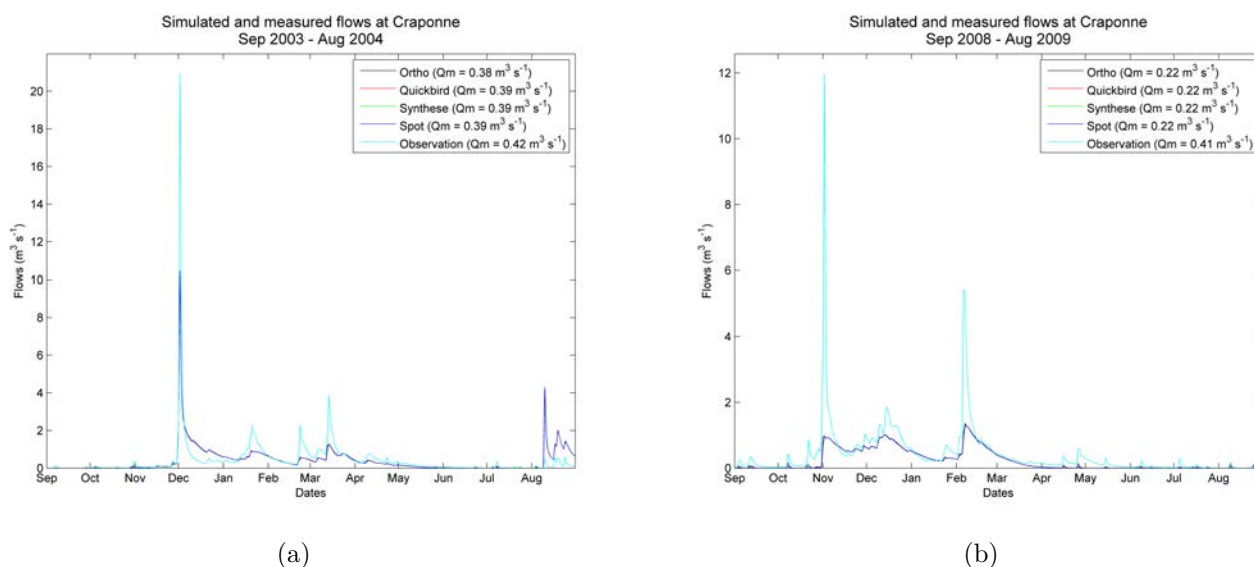


FIGURE 15 – Débits simulés et observés à l'exutoire de Craponne : (a) Année 2003-2004, (b) Année 2008-2009.

*Pour conclure sur les observations faites pour les deux bassins versants, même si les résultats sont moins satisfaisants pour le sous-bassin de Craponne que pour le bassin de Taffignon, le modèle J2000 est un outil plutôt acceptable pour comparer les simulations entre elles, notamment en terme de contribution au débit.*

#### **4.2.5 Comparaison des contributions aux débits observés (Westpro) et simulés (J2000)**

Le modèle J2000 n'ayant pas pour but de décomposer le débit observé en ses différentes contributions, j'ai utilisé un modèle spécifique avec le logiciel Westpro (Willems, 2009). Westpro décompose le débit total en différents signaux qui sont assimilés à des récessions exponentiellement décroissantes (identiques au débit en sortie d'un réservoir linéaire), avec des temps de récession différents selon le type de contributions. Une fois ces temps de récession connus (ou plutôt estimés par l'utilisateur), Westpro peut ensuite filtrer le signal en ses différentes composantes. Son utilisation est facilitée par son insertion dans des feuilles de calcul Excel. Plusieurs paramètres servent à calibrer le modèle. Les principaux paramètres à entrer sont les temps de récession de chacune des composantes du débit. J'ai utilisé le modèle déjà calé par Isabelle Braud qui a choisi des temps de récession de 21 jours pour le débit de base, de 7 jours pour l'écoulement de subsurface et d'1 jour pour le ruissellement de surface. Le résultat produit figure sur le graphique 16(a) pour l'année 2003-2004 et 16(b) pour l'année 2008-2009. Sur ces graphiques, le débit observé total et décomposé par Westpro est comparé aux débits simulés par J2000. Le débit de base semble être simulé de la même manière par Westpro et par J2000 et ne contribue pas aux pics de crue de décembre 2003, novembre 2008 et mars 2009. Pour le pic de crue de 2003, Westpro calcule une contribution majoritaire du ruissellement de surface alors que J2000 en attribue l'origine à un pic d'écoulement de subsurface. Pour les pics de crue de 2008 et 2009, les deux modèles en attribuent l'origine à des pics de ruissellement et les contributions du débit de base et de l'écoulement de surface sont de même ordre de grandeur.

*Westpro est un logiciel intéressant à utiliser car il est facile à mettre en œuvre et le modèle de base utilisé pour filtrer les données est relativement simple. L'inconvénient majeur est le calibrage des paramètres qu'il est difficile de valider. Il a cependant permis de confronter les résultats du modèle J2000 à un autre modèle. Les résultats semblent satisfaisants pour l'année 2008-2009 mais le pic de crue de l'année 2003 semble conduire à un effet non attendu du modèle J2000 avec une très forte contribution de l'écoulement de base. La principale différence est visible entre les simulations et les observations et non entre les simulations elles-mêmes.*

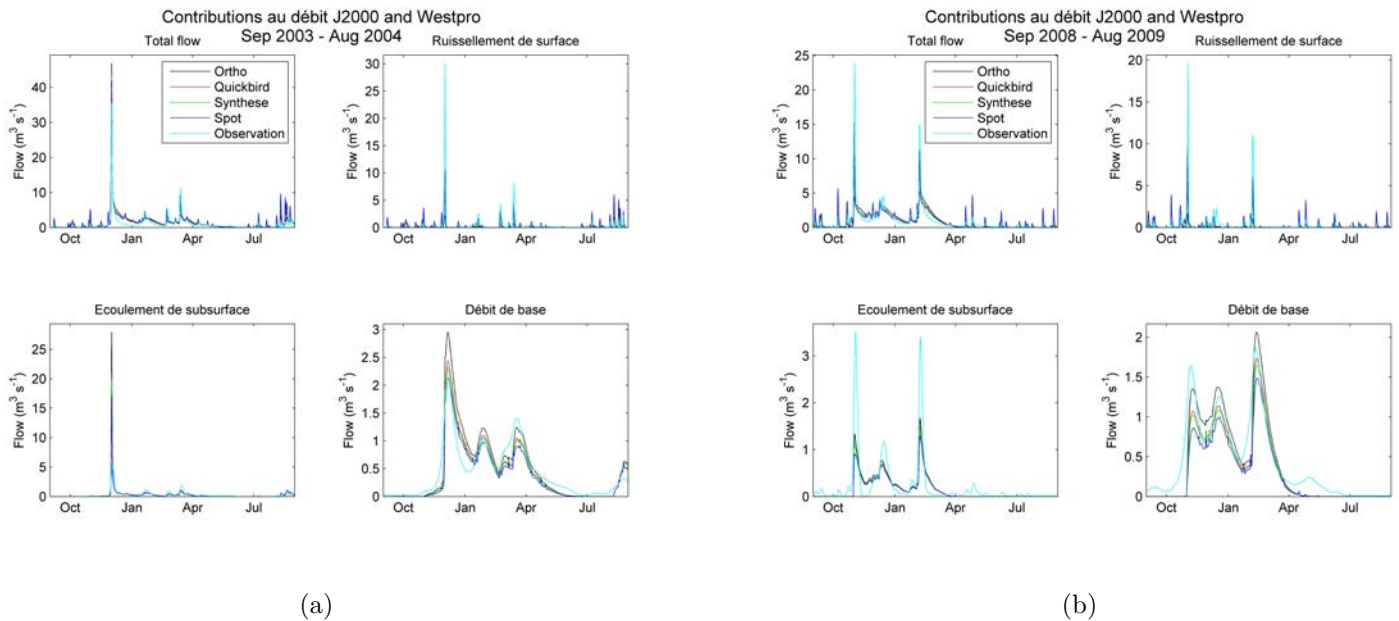


FIGURE 16 – Débit total et contributions au débit simulés par J2000 (Ortho, Quickbird, Spot et Synthèse) et par Westpro (mesure), à l'exutoire du bassin versant de Taffignon : (a) Année 2003-2004, (b) Année 2008-2009.

### 4.3 Comparaison entre les simulations issues des 4 cartes

#### 4.3.1 Débits simulés à l'exutoire de Taffignon

L'analyse des critères de Nash (N2) montre que les meilleures simulations en terme de dynamique sont issues des cartes Quickbird et Synthèse (cf tableau 5). Les moins bonnes simulations sont obtenues pour les cartes Spot et Ortho. Si on compare les coefficients simples de Nash (N1), qui donnent moins d'importance aux pics de crue, on constate que les meilleures simulations pour la période considérée sont celles provenant des cartes Quickbird et Ortho.

Les valeurs des pentes de la régression linéaire indiquent que les simulations issues de la carte Ortho semblent celle qui simulent le mieux en terme de bilan en volume (biais quasi-nul) mais l'observation de l'évolution des débits montre que la dynamique des simulations issues de la carte Ortho est la moins bonne quand on la compare avec la dynamique de l'évolution des débits observés.

Si l'on compare l'évolution des débits pour les deux années hydrologiques choisies : 2003-2004 et 2008-2009 sur les figures 13(a) et 13(b) on observe que la carte Ortho conduit au plus faible débit journalier moyen annuel, tandis que la carte SPOT est celle qui produit le plus fort débit moyen.

Pour les débits simulés, le maximum est obtenu, dans l'ordre décroissant, pour : Spot, Synthèse, Quickbird, Ortho, sauf pour le pic de crue de décembre 2003. Le tableau 7 recense les pics des quatre plus fortes crues. A part pour la crue de décembre 2003, les résultats montrent que les débits simulés sont inférieurs aux débits mesurés. On retrouve ce résultat sur l'histogramme des

débits classés 12(b).

Dates	Déc. 2003	Mars 2004	Nov 2008	Févr. 2009
<b>Ortho</b>	46.9 (+32%)	3.6 (-68%)	4.6 (-80%)	4.9 (-68%)
<b>Quickbird</b>	44.0 (+23%)	6.8 (-39%)	10.8 (-55%)	8.6 (-42%)
<b>Synthèse</b>	44.0 (+23%)	7.5 (-33%)	12.3 (-49%)	9.5 (-36%)
<b>Spot</b>	42.0 (+18%)	9.1 (-18%)	15.3 (-36%)	11.3(-24%)
<b>Observation</b>	35.6	11.1	23.9	14.9

TABLE 7 – Valeurs maximales des débits (en  $m^3.s^{-1}$ ) pour quatre pics de crue en 2003-2004 et 2008-2009.

Pour les pics de crue plus faibles mais plus fréquents, la tendance montre que les simulations issues des cartes Spot, Synthèse et Quickbird produisent, dans l'ordre décroissant, des débits supérieurs aux débits observés, alors que les débits simulés issus de la carte Ortho sont plus faibles que les débits observés. Ceci peut expliquer les valeurs trouvées pour les critères de performance (biais et pente de la régression linéaire).

#### 4.3.2 Contributions aux débits simulés à l'exutoire de Taffignon et évapotranspiration

Pour comprendre l'influence de l'occupation du sol sur les phénomènes hydrologiques, il est intéressant de comprendre quelles sont les valeurs des différentes contributions au débit. Du fait des paramètres choisis, il existe trois types de contributions au débit simulés par J2000 : le ruissellement de surface (RD1), l'écoulement hypodermique ou de sub-surface (RD2) et le débit de base ou écoulement de nappes (RG1). Le tableau 8 permet de comparer les résultats des simulations en terme de contributions au débit et d'évapotranspiration pour la période 1997-2009.

Cartes	Ruissellement de surface	Écoulement hypodermique	Débit de base	ETR réelle
<b>Ortho</b>	2	6	12	80
<b>Quickbird</b>	7	5	10	77
<b>Synthèse</b>	9	5	9	77
<b>Spot</b>	12	5	8	75

TABLE 8 – Contributions au débit, en pourcentage de la pluie brute, pour la période 1997-2009.

Les flux calculés par le modèle sont donnés en pourcentage de la pluie brute. Il apparaît très clairement de grandes différences entre les simulations issues des quatre cartes d'occupation du sol. Tout d'abord, on peut remarquer que le pourcentage de pluie évapotranspirée est nettement plus important que le pourcentage de pluie contribuant au débit. Ce pourcentage est d'ailleurs plus important pour la carte Ortho que pour la carte Spot, ce qui explique que le



biais calculé par le modèle soit plus grand pour Spot que pour Ortho. On observe également une différence entre Ortho et Quickbird qui ont respectivement une majorité de cultures et de forêt. La présence de forêt diminue l'évapotranspiration en comparaison aux cultures. Parmi les différentes contributions, la carte présentant le plus de surfaces imperméables (carte Spot) conduit à un pourcentage de ruissellement de surface le plus important (12% contre 2% pour la carte Ortho). A contrario, la carte présentant le plus de surfaces perméables (carte Ortho) conduit à une contribution majoritaire au débit par le débit de base. Les quatre simulations produisent le même pourcentage d'écoulement de subsurface.

*Le calcul de l'évapotranspiration pour le modèle appliqué à Ortho est donc meilleur car le biais obtenu est plus faible (volume écoulé moins important). Cependant, le débit simulé est moins satisfaisant pour Ortho que pour Spot quand on analyse le Nash et le coefficient de corrélation. Ceci provient du calcul des contributions avec beaucoup plus de ruissellement (et donc une dynamique de crue plus importante) calculé pour Spot que pour Ortho.*

La figure 17 permet de visualiser, pour les deux années 2003-2004 et 2008-2009, les contributions au débit simulées par J2000 pour les quatre cartes.

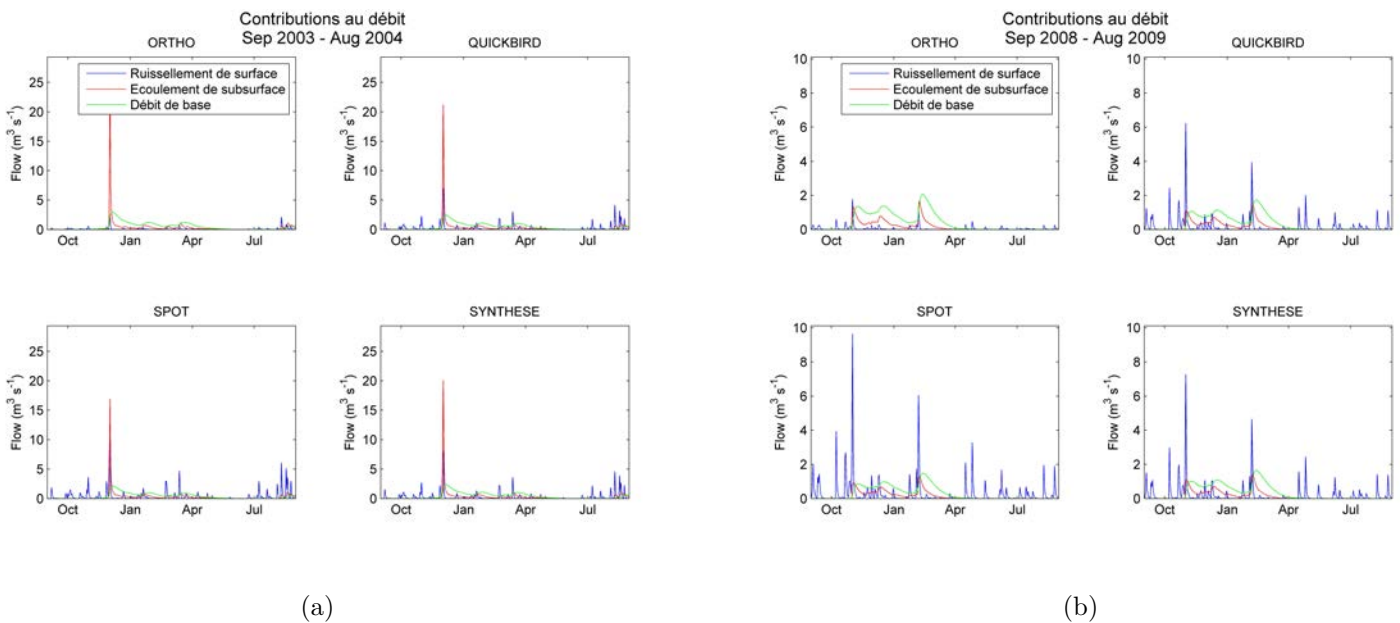


FIGURE 17 – Contributions au débit calculés par J2000 à l'exutoire du bassin versant de Taffignon : (a) Année 2003-2004, (b) Année 2008-2009.

On peut tout d'abord remarquer que les contributions simulées sont très différentes selon la source de données et d'une année sur l'autre (notamment à cause de la crue de décembre 2003 qui a un pic de débit plus important que la plus grande crue de 2008-2009). En 2003, le pic de crue conduit à un pic de l'écoulement de subsurface qui n'apparaît pas en 2008. Mis à part cet effet seuil provoqué par de fortes précipitations, ces deux figures montrent que plus



l'occupation du sol est constituée de surfaces imperméables, plus le ruissellement de surface est important. La carte Spot produit donc beaucoup plus de pics de ruissellement que la carte Ortho. Pour les deux années, on observe un débit de base assez semblable entre les cartes (même s'il est un peu plus important pour la carte Ortho). Concernant l'écoulement de subsurface, il est également semblable entre les quatre cartes pour l'année 2008-2009 mais le comportement diffère en 2003-2004. Pour cette année, le modèle montre que la crue provient essentiellement de l'écoulement de subsurface et non pas du débit de base ou du ruissellement de surface. Ce pic est également d'autant plus important que la carte est constituée de surfaces perméables.

### 4.3.3 Contributions aux débits simulés dans un sous-bassin test

Pour avoir une vision plus détaillée du comportement du modèle, on peut voir sur la figure 19 le comportement d'un sous-bassin versant (HRU 38) situé à l'extrême est du bassin versant (cf. figure 18).

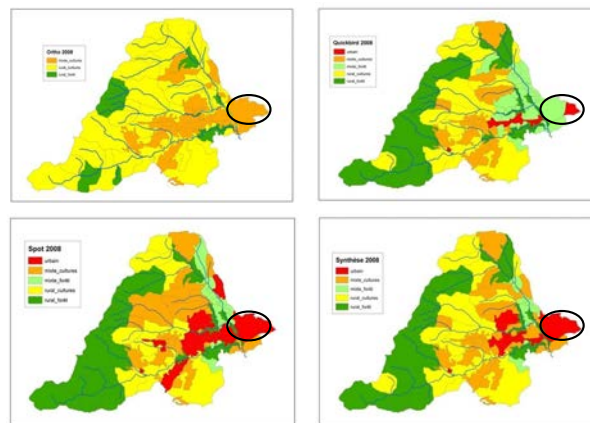


FIGURE 18 – Sous-bassin test situé à l'Est du bassin versant de l'Yzeron.

Ce bassin est classé mixte-culture pour la carte Ortho, mixte-forêt pour la carte Quickbird et urbain pour les cartes Spot et Synthèse. Pour les deux années, on peut observer une contribution au débit par ruissellement de surface d'autant plus importante que le degré d'imperméabilisation de la surface est élevé. Le pic de débit de la crue de 2003 apparaît clairement pour la carte Ortho et à moindre degré pour la carte Quickbird.

*Cette analyse, effectuée grâce au modèle J2000, des différentes contributions au débit à l'exutoire ou au sein d'une maille montre de grandes différences entre l'influence des cartes d'occupation du sol. Ces différences n'apparaissent pas en comparant le débit total uniquement. Le choix d'une source de données cartographiques par rapport à une autre a donc une influence importante sur les simulations des processus hydrologiques au sein d'un bassin versant. Si l'on considère ces différentes sources cartographiques comme autant de scénarios d'occupation du sol du bassin versant, on peut voir clairement l'impact de l'urbanisation (carte Spot) sur l'augmentation du ruissellement de surface tandis*

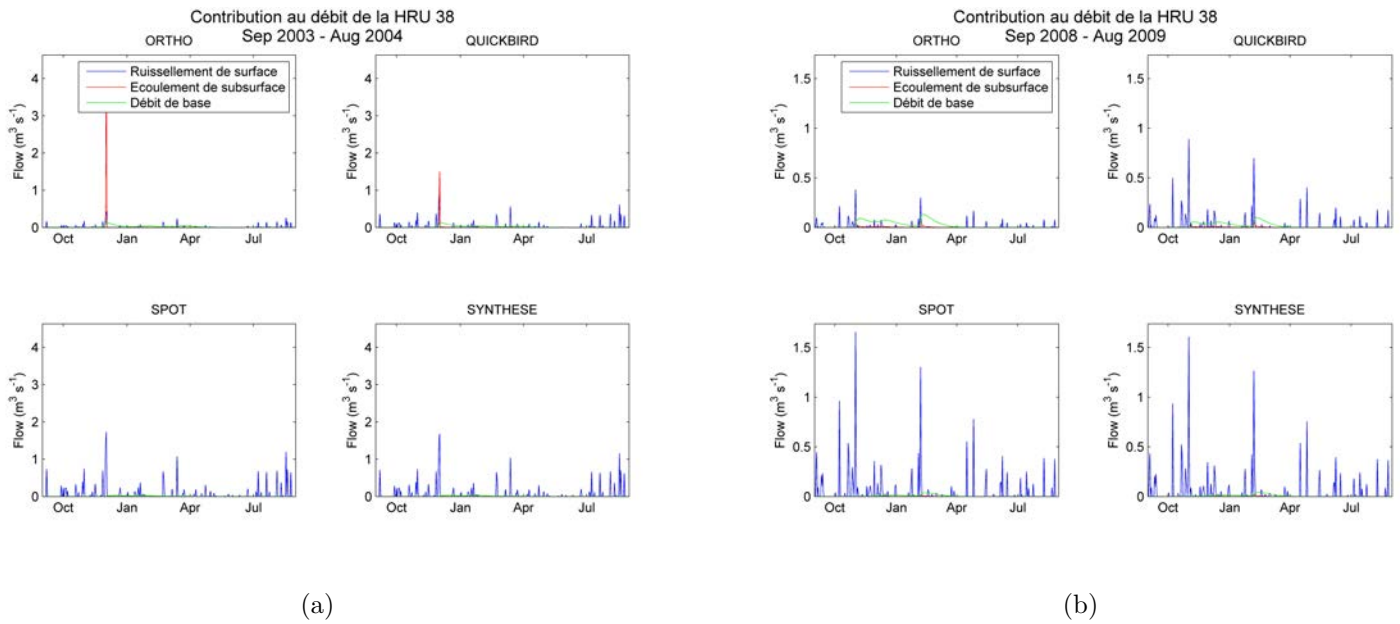


FIGURE 19 – Contributions aux débits simulés par J2000 pour un sous-bassin test (HRU 38) : (a) Année 2003-2004, (b) Année 2008-2009.

qu'une occupation des sols moyennement urbaine avec beaucoup de cultures (carte Ortho) provoque de forts débits issus de l'écoulement de subsurface en cas de fortes crues (selon le modèle J2000).

## 5 Conclusion

### 5.1 Résumé des objectifs

La recherche en hydrologie a déjà constaté que l'urbanisation d'un bassin versant pouvait conduire à des modifications quantitatives et qualitatives de ses processus hydrologiques. Ce stage s'est inscrit dans le projet AVuPUR, dont le but est d'approfondir les connaissances sur les impacts de l'urbanisation sur un bassin versant périurbain, notamment en terme de modifications des flux hydrologiques. Dans ce cadre, je me suis intéressée au bassin périurbain de l'Yzeron, qui a l'avantage d'être instrumenté et suivi depuis longtemps par plusieurs équipes de chercheurs (hydrologues et géographes), dont le Cemagref de Lyon. En plus des données hydrologiques et météorologiques, j'avais à ma disposition un modèle hydrologique spatialisé (déjà paramétré en majeure partie), ainsi que quatre cartes d'occupation du sol. Ces cartes sont issues de l'analyse d'images haute résolution satellites (Spot et Quickbird) et aériennes (BD Ortho), prises en 2008, ainsi que d'une synthèse effectuée à partir de ces trois sources de données. Les différences entre ces cartes sont dues à différentes résolutions et méthodes de traitement d'images.

Au final, ces cartes ont été utilisées pour répondre à deux objectifs différents. Le premier objectif, que l'on pourrait qualifier d'objectif-hydrologique, a été de comprendre l'impact de l'urbanisation sur l'hydrologie d'un bassin versant. Du fait des différences de résolution, de bande spectrale et de traitement des images, ces cartes montrent une répartition et des pourcentages différents des types d'occupation du sol de l'Yzeron (les trois principaux types identifiés étant les zones urbaines, les zones culturelles et les zones forestières). Or, leurs répartitions et leurs proportions sur le bassin versant impactent directement la paramétrisation hydrologique. Ces cartes ont donc servi à comprendre l'influence de l'occupation du sol sur les simulations hydrologiques, en proposant différents scénarios d'urbanisation du bassin versant de l'Yzeron. Le second objectif, ou objectif-cartographique, de l'utilisation de ces cartes a consisté à évaluer l'impact du choix d'une source de données (et donc d'une carte) sur la modélisation hydrologique.

### 5.2 Premières conclusions

Plusieurs conclusions ressortent de ce travail. Premièrement, l'utilisation du modèle J2000 pour étudier l'impact de la paramétrisation de l'occupation du sol s'est avérée satisfaisante selon les critères de performance choisis, sur une longue période (1997-2009) et sans calibration. Les simulations peuvent cependant être améliorées en modifiant certains paramètres du modèle, notamment les paramètres du sol et le calcul de l'ETP qui est pour l'instant uniforme sur tout le bassin. Des améliorations de la description de l'occupation du sol peuvent également être apportées en localisant par exemple des zones d'occupation du sol homogènes au sein de chaque sous-bassin versant. La prise en compte du réseau d'assainissement en complément du réseau naturel pourrait également permettre de mieux prendre en compte la composante urbaine du

bassin versant. Le temps imparti n'a pas permis d'étudier tous les résultats de modélisation spatialisés (notamment dans d'autres sous-bassins instrumentés de l'Yzeron que Craponne), ce qui pourrait permettre de mieux cibler les faiblesses et les forces du modèle.

Deuxièmement, les résultats issus des simulations à l'exutoire montrent que l'impact des différentes répartitions et proportions de types d'occupation du sol est faible pour le calcul du débit à l'exutoire mais significatif pour le calcul des contributions au débit total, notamment en ce qui concerne le ruissellement de surface. Ainsi, plus le bassin est urbanisé (cartes Spot et Synthèse), plus le ruissellement de surface contribue au débit à l'exutoire. Pour un bassin faiblement urbanisé (cartes Quickbird et Ortho), il y a peu de ruissellement de surface et une plus forte évapotranspiration. Le modèle montre également que, pour une forte crue (comme celle de décembre 2003), une grande partie du débit à l'exutoire provient de l'écoulement de subsurface, peu importe l'occupation du sol. Ce résultat est différent de celui trouvé en utilisant un logiciel de décomposition de débit, Westpro. Celui-ci attribue le pic de débit de la crue de 2003 à un pic de ruissellement de surface. Il faut donc prendre ce dernier résultat avec prudence, un effet seuil du modèle J2000 ayant pu engendrer ce comportement (en effet, pour des pics de crue plus faibles, comme en 2008, la contribution majeure est celle du ruissellement de surface).

### 5.3 Bilan

L'utilisation de différentes cartes d'occupation du sol a ainsi pu montrer que la proportion et la répartition des zones urbaines influençaient l'écoulement de l'eau dans le bassin versant. En terme de gestion des eaux, cette conclusion est importante car cela montre que la gestion des risques hydrologiques ou de la pollution dépend de l'urbanisation du bassin. Selon la répartition de l'occupation du sol (notamment des surfaces à fort coefficient de ruissellement), des mesures différentes doivent être prises pour empêcher des phénomènes telles que les crues.

Une autre conclusion majeure est que la cartographie d'un même bassin versant, la même année, mais avec plusieurs sources, conduit à des résultats très similaires à l'exutoire mais très différents du point de vue des contributions aux débits. Le choix, s'il existe, de la source de données d'occupation du sol peut donc avoir un fort impact sur les résultats spatialisés obtenus. Il peut alors être utile de produire une carte telle que la carte synthèse pour combiner les différentes informations. Mais cette étude a montré que la carte Synthèse n'est pas toujours celle qui conduit aux meilleures simulations selon les critères choisis. C'est pourquoi la comparaison des simulations des quatre cartes d'occupation du sol est intéressante.

Dans ces conditions, choisir une carte spécifique pour étudier l'hydrologie d'un bassin versant va dépendre de l'objet d'étude. Si celle-ci se focalise uniquement sur les débits à l'exutoire, étant donné le résultat des simulations, le choix d'une carte par rapport à une autre n'est pas pénalisant. Par contre, pour des études plus fines (dimensionnement, analyse de la qualité), il peut

être utile de préférer une carte particulière pour modéliser un phénomène. Les modélisations hydrologiques issues de la carte Ortho simulent très mal les pics de crue. Le meilleur Nash et le meilleur coefficient de corrélation s'obtiennent pour les cartes Quickbird et Synthèse. Quant à la simulation des faibles débits, les modélisations issues des cartes Synthèse et Spot provoquent un débit trop important et trop dynamique (trop de ruissellement). On peut donc proposer d'utiliser la carte Synthèse pour étudier les grandes crues et la carte Quickbird pour le régime normal et les petites crues.

## 5.4 Perspectives

Le travail effectué pendant ce stage d'à peine trois mois a permis d'arriver à des conclusions intéressantes en rapport avec la cartographie de l'occupation du sol et l'impact de l'urbanisation sur un bassin versant périurbain. Il ne s'arrête pas là car en octobre 2011, je débute une thèse au Cemagref de Lyon sur l'impact des modifications de l'occupation du sol et de la gestion des eaux pluviales passées et futures sur l'hydrologie du bassin versant de l'Yzeron. Cette thèse me conduira à améliorer la paramétrisation du modèle J2000 pour comprendre la nature des processus hydrologiques à partir de cartographies d'occupation passée du sol (1945, 1970, 1990, 1999) et de scénarios de prospective territoriale (2030).

## 6 Remerciements

Mes premiers remerciements vont à Flora pour sa patience, sa pédagogie, ses cours d'hydrologie, ses remarques sincères et également pour l'incroyable liste de lecture de chevet qu'elle m'a conseillée.

Merci à Isabelle pour son aide précieuse pendant la préparation de mon dossier de thèse, qui s'est faite en parallèle du stage, et qui a demandé de nombreuses relectures. Merci également de m'avoir permis de participer, même pour une courte période, au projet AVuPUR.

Merci à Sonja, qui, même en pleine rédaction de thèse, est toujours là pour répondre aux questions. Merci d'avoir établi le contact avec l'Université de Feiburg où j'ai enfin découvert le « terrain ».

Merci à l'équipe de géographes : Christine et Christelle pour les données que je ne tarderais pas à utiliser, Saïda pour le temps passé à m'expliquer le travail sur les images Spot, Clément pour son soutien, son téléphone portable et son dynamisme.

Un énorme merci à Antoine qui m'a montré le pouvoir de Linux et à qui je dois encore un paquet de michoco pour les nombreuses heures passées à tenter de lire des fichiers de données.

Merci à Judicaël, toujours disponible pour débogger les problèmes d'Arc-Gis.

Merci à Pascal Breil pour son aide sur Excel et les discussions très intéressantes sur l'hydrologie péri-urbaine.

Merci à toute l'équipe du Cemagref pour les bons moments passés sur la pelouse du parc de la tête d'Or, au barbecue et à la pause café.

Enfin, un dernier merci à celui qui arrive à me donner envie de travailler avec Matlab et Java, même un dimanche matin.

## Références

- BOOTH, D., HARTLEY, D. et JACKSON, R. (2002). Forest cover, impervious-surface area, and the mitigation of stormwater impacts. *Journal of the American Water Resources Association*, 38:835–845.
- BRANGER, F. (2010). Modélisation du cycle hydrologique sur l'Yzeron avec le modèle J2000. *In Réunion AVuPUR du 9-19 décembre 2010*.
- BRANGER, F., KERMADI, S., JACQUEMINET, C., MICHEL, K., KRAUSE, P. et BRAUD, I. (2011). Assessment of the influence of land use on the hydrology of a suburban catchment using a simplified distributed modelling approach. *Journal of Hydrology special issue « Hydrology of periurban catchments : processes and modelling »*.
- BRAS, R. et PERKINS, F. (1975). Effects of urbanization on catchment response. *J. of Hydraulics Division*, 101(HY3):451–466.
- BRAUD, I. et VANNIER, O. (2010). *Calcul d'une évapotranspiration potentielle (ETP) spatialisée pour la modélisation hydrologique à partir des données de la réanalyse SAFRAN de Météo-France*. Cemagref UR HHLY, LTHE Grenoble.
- CAIN, A. (2004). The usefulness of impervious cover mapping and analysis based on pre-existing classified land use datasets. *In The 2004 IMAGIN annual conference*, East Lansing, Michigan.
- CHOCAT, B., KREBS, P., MARSALECK, J., RAUCH, W. et SCHILLING, W. (2001). Urban drainage redefined : from stormwater removal to integrated management. *Water and Science technology*, 43:61–68.
- CHORMANSKI, J., Van de VOORDE, T., DE ROECK, T., BATELAAN, O. et CANTERS, F. (2008). Improving distributed runoff prediction in urbanized catchments with remote sensing based estimates of impervious surface cover. *Sensors*, 8:910–932.
- DEHOTIN, J. (2009). *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. Cemagref UR HHLY.
- DESBORDES, M. (1989). Principales causes d'aggravation des dommages dus aux inondations par ruissellement superficiel en milieu urbanisé. *Bulletin hydrologie urbaine - SHF*, 4:2–10.
- DODANE, C., JOLIVEAU, T., HONEGGER, A. et MOLINES, N. (2010). Simuler les changements d'occupation du sol à l'horizon 2030. *CNRS UMR EVS, Atelier Yzeron*.
- FLUGEL, W. (1995). Delineating Hydrological Response Units by geographical information system analyses for regional hydrological modeling using Prms/Mms in the drainage basin of the Rivere Brol, Germany. *Hydrological processes*, 9(3-4):423–436.
- G., A. R., S., L., L.S., P., D., R. et M., S. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Paper 56*. FAO.
- GNUUMA, 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*. Thèse de doctorat, INSA, Lyon.
- JANDOT, A. (2010). *Développement et évaluation d'une modélisation hydrologique simplifiée sur le bassin versant de l'Yzeron*.
- J.C., R. et (COLLECTIF) (2006). *Aquifères et eaux souterraines en France*. Editions BRGM.
- KERMADI, S., RENARD, F., BRAUD, I., JACQUEMINET, C., MICHEK, K. et BRANGER, F. (2010). Occupation du sol et pluviométrie dans un bassin versant péri-urbain soumis aux inondations : l'Yzeron (ouest lyonnais). *In Journées de climatologie de la commission « Climat et Société » du CNFG*.
- KRALISCH, S., KRAUSE, P., FINK, M., FISCHER, C., et FLÜGEL, W. (2007). Component based environmental modelling using the JAMS framework. *In MODSIM 2007 International Congress on Modelling and Simulation*, pages 812–818.
- 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.
- MATTEO, M., RANDHIR, T. et BLONIARZ, D. (2006). Watershed-scale impacts of forest buffers on water quality and runoff in urbanizing environment. *Journal of the American Water Resources Association*, 132:142–152.

- NASH, J. et STUTCLIFFE (1970). River flow forecasting through conceptual models - Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3):282–290.
- QUINTANA-SEGUI, P., LE MOIGNE, P., DURAND, Y., MARTIN, E., HABETS, F., BAILLON, M., CANELLAS, C., FRANCHISTEGUY, L. et 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.
- VIDAL, J., MARTIN, E., FRANCHISTEGUY, L., BAILLON, M. et SOUBEYROUX, J. (2010). A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the SAFRAN system International. *International Journal of Climatology*, 30(11):1627–1644.
- WILLEMS, P. (2009). A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall runoff models. *Environmental Modelling and Software*, 24(3):311–321.



# Appendices

## A Paramétrisation du modèle J2000

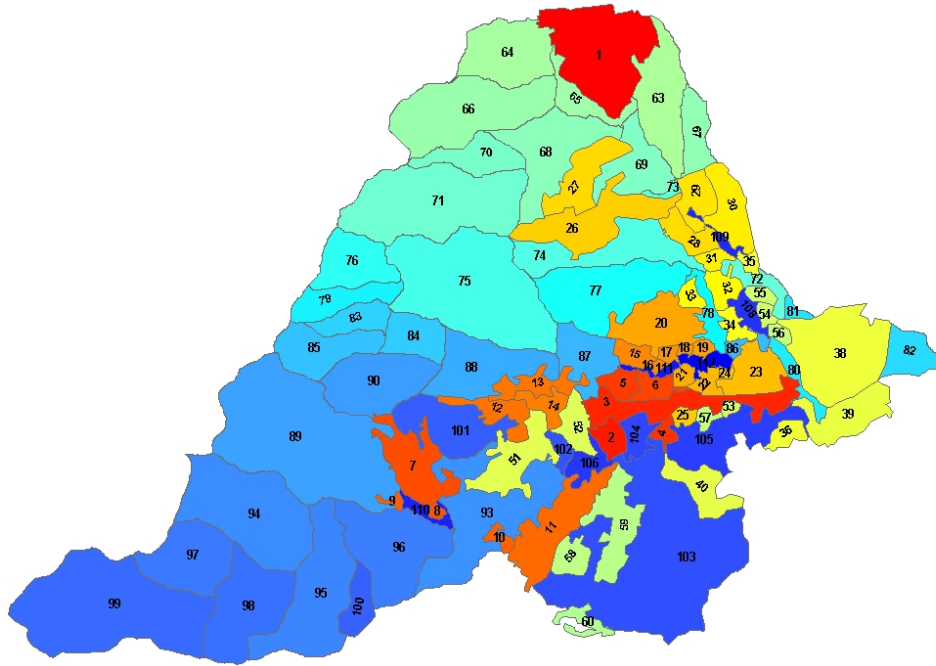


FIGURE 20 – *Découpage du bassin versant de Taffignon en 96 sous-bassins, considérés comme HRUs pour le modèle J2000 (pas de code couleur).*

## B Occupation du sol

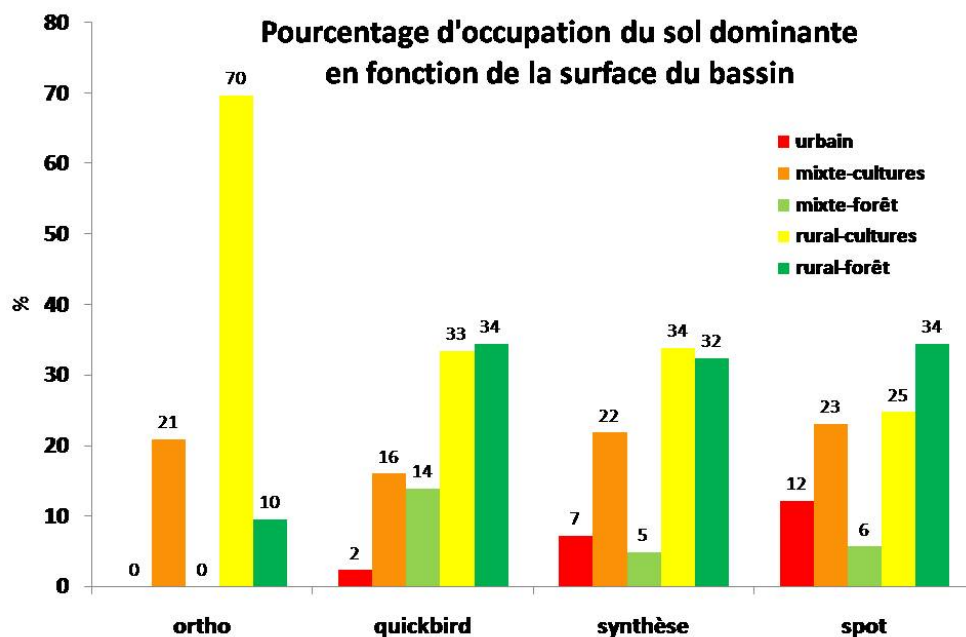


FIGURE 21 – Comparaison des pourcentages de classe d'occupation des sols dominante en fonction de la surface totale du bassin.

## C Données hydrologiques

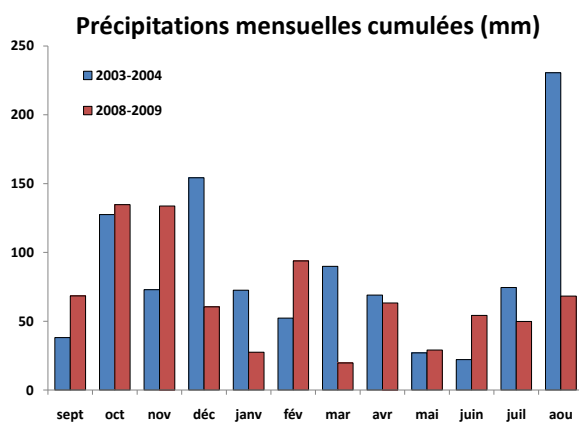


FIGURE 22 – Précipitations mensuelles cumulées pour les années 2003-2004 et 2008-2009.

## D Critères de performance du modèle pour différentes périodes

### D.1 Pour le bassin versant de Taffignon

Critères de performance	Ortho	Quickbird	Synthèse	Spot
Nash 1	0.36	0.31	0.28	0.21
Nash 2	0.74	0.75	0.72	0.65
Pente régression	1.16	1.11	1.11	1.09
$r^2$	0.86	0.86	0.85	0.81
Biais (%)	41.01	52.22	55.47	62.27

TABLE 9 – Critères de performance calculés par le modèle J2000 pour l'année 2003-2004, à Taffignon.

Critères de performance	Ortho	Quickbird	Synthèse	Spot
Nash 1	0.46	0.52	0.50	0.47
Nash 2	0.45	0.56	0.55	0.53
Pente régression	0.41	0.50	0.51	0.56
$r^2$	0.45	0.56	0.56	0.53
Biais (%)	-1.44	6.05	8.35	13.54

TABLE 10 – Critères de performance calculés par le modèle J2000 pour l'année 2008-2009, à Taffignon.

### D.2 Pour le sous-bassin versant de Craponne

Critères de performance	Ortho	Quickbird	Synthèse	Spot
Nash 2	0.67	0.68	0.68	0.68
Pente régression	0.52	0.54	0.55	0.55
$r^2$	0.72	0.72	0.72	0.72
Biais (%)	3.90	6.13	6.29	7.45

TABLE 11 – Critères de performance calculés pour l'année 2003-2004, à Craponne.

<b>Critères de performance</b>	<b>Ortho</b>	<b>Quickbird</b>	<b>Synthèse</b>	<b>Spot</b>
<b>Nash 2</b>	0.34	0.37	0.38	0.38
<b>Pente régression</b>	0.27	0.29	0.29	0.29
$r^2$	0.43	0.48	0.48	0.48
<b>Biais (%)</b>	37.37	35.34	35.20	34.11

TABLE 12 – *Critères de performance calculés pour l'année 2008-2009, à Cra-ponne.*