HAL
open science

Quels liens entre climatologie, occupation des sols et inondations dans le bassin versant de l'Yzeron (ouest Lyonnais) ? Apport de l'analyse conjointe de données hydroclimatiques et d'images satellitaires très haute résolution

S. Kermadi, Isabelle Braud, C. Jacqueminet, F. Branger, Florent Renard, K. Michel

To cite this version:

S. Kermadi, Isabelle Braud, C. Jacqueminet, F. Branger, Florent Renard, et al.. Quels liens entre climatologie, occupation des sols et inondations dans le bassin versant de l'Yzeron (ouest Lyonnais) ? Apport de l'analyse conjointe de données hydroclimatiques et d'images satellitaires très haute résolution. Climatologie, 2012, 9, pp.83-127. hal-00865546

HAL Id: hal-00865546

https://hal.science/hal-00865546v1

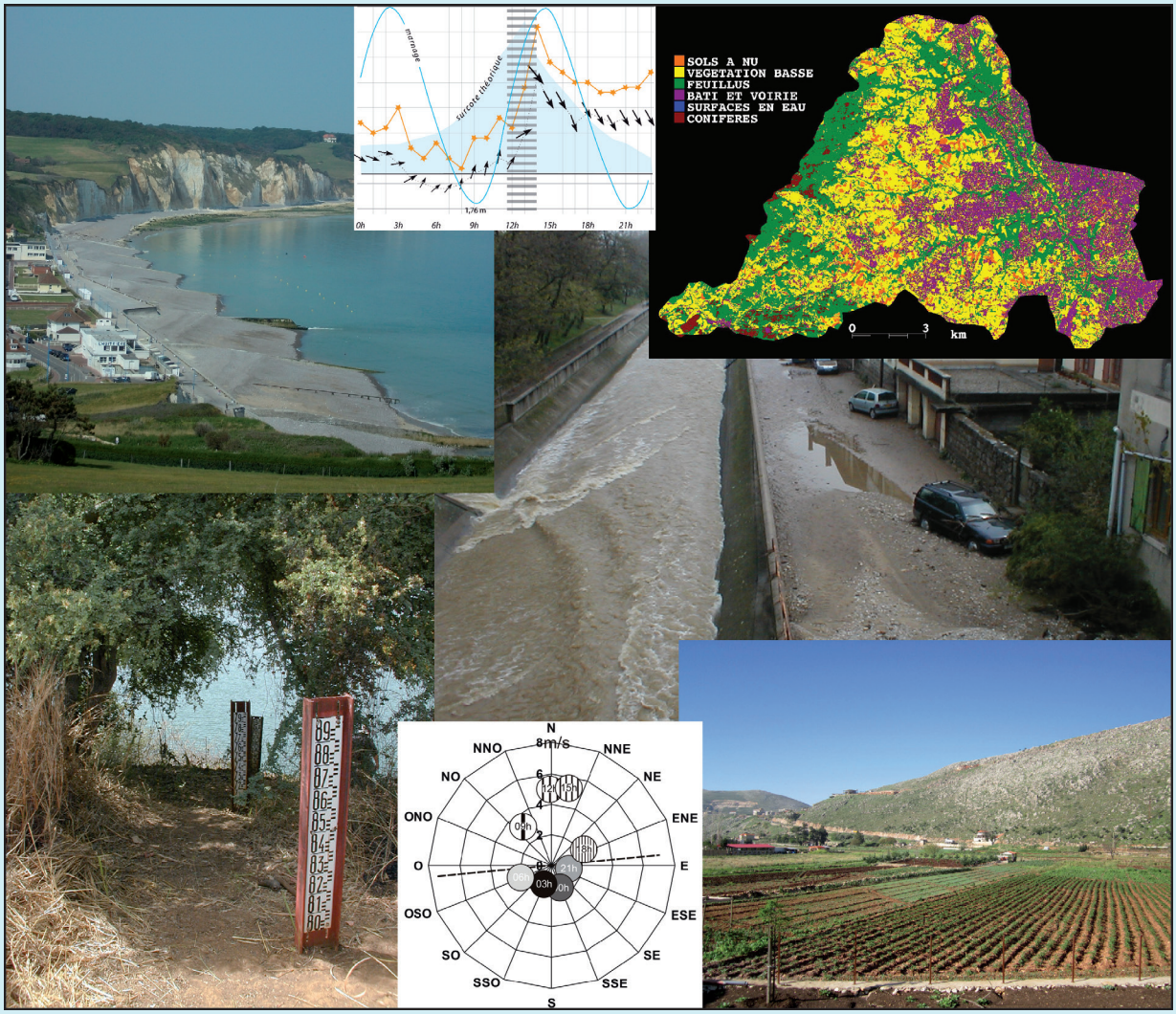
Submitted on 24 Sep 2013

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.

CLIMATOLOGIE

2012 - Volume 9



CLIMATOLOGIE

vol. 9 (2012)

ASSOCIATION INTERNATIONALE DE CLIMATOLOGIE
Institut de Géographie 29, avenue Robert Schuman
13261 AIX-en-PROVENCE Cedex - France

QUELS LIENS ENTRE CLIMATOLOGIE, OCCUPATION DES SOLS ET INONDATIONS DANS LE BASSIN VERSANT DE L'YZERON (OUEST LYONNAIS) ? APPORT DE L'ANALYSE CONJOINTE DE DONNÉES HYDROCLIMATIQUES ET D'IMAGES SATELLITAIRES TRÉS HAUTE RÉSOLUTION

Saïda KERMADI [1], Isabelle BRAUD [2], Christine JACQUEMINET [1], Flora BRANGER [2], Florent RENARD [1] et Kristell MICHEL [1]

[1] Université de Lyon, UMR CNRS 5600 EVS
18, rue Chevreul
F-69364 Lyon cedex, France
saida.kermadi@univ-lyon2.fr

[2] Irstea, UR HHLY
5 Rue de la Doua – CS 70077
69626 Villeurbanne Cedex Lyon, France
isabelle.braud@irstea.fr

Résumé

Le bassin versant de l'Yzeron, situé en périphérie immédiate de la ville de Lyon, est un bassin représentatif des bassins versants périurbains français. Il connaît, depuis les années 1970, une augmentation importante de son urbanisation. Ces dernières années, des crues importantes, entraînant des inondations à l'aval du bassin versant ont marqué les esprits, posant la question de l'impact des modifications de l'occupation des sols dans le bassin versant sur le régime des crues. Dans cet article, nous utilisons l'analyse combinée de données hydroclimatiques (pluie, température, évapotranspiration de référence - ET0, débits) et de cartes de l'occupation des sols dérivées d'images satellites SPOT à haute et très haute résolution pour aborder cette question. L'analyse des débits montre l'existence d'une évolution du régime des crues, avec une augmentation significative des crues sub-seuils pour des durées de 1,5 h, 3 h, 6 h, 12 h et 36 h sur la période 1970-2010. L'analyse de l'échantillon de crues obtenue par cette analyse débit – durée – fréquence montre que les crues les plus importantes sont plutôt liées à des épisodes ayant conduit à un cumul de pluie important (> 80 mm en quelques jours). Une corrélation significative est aussi obtenue entre débit de base et coefficient de ruissellement, ce qui montre que ces crues peuvent être associées à des écoulements sur surfaces saturées. Les évolutions du climat (pluviométrie, température, ET0) ne permettent pas d'expliquer l'augmentation des crues observées. En revanche, l'occupation des sols entre 1990 et 2008 montre une augmentation des surfaces imperméables qui passent de 15,2 % de la surface totale du bassin en 1990 à 18,2 % en 1999 et 22,6 % en 2008. Cette évolution de l'imperméabilisation est mise en regard de l'accroissement de la population du bassin sur cette même période. Enfin, nous illustrons la réponse hydrologique du bassin versant avec deux épisodes pour lesquels le rôle de l'occupation des sols est différent. Le premier, celui du 02/12/2003 est typique d'une réponse par saturation du bassin, avec une contribution majeure des zones rurales, suite à des cumuls pluviométriques importants. Le second, celui du 09/08/2009 représente un orage d'été, très court mais avec des intensités importantes, conduisant essentiellement à une réponse rapide des zones urbaines et pour lequel l'occupation des sols joue un rôle majeur.

Mots-clés : Périurbain, débit, précipitations, télédétection, inondation, occupation des sols.

Abstract

Relationships between climatology, land cover and flooding in the Yzeron catchment (western Lyon, France)? Interest of a combined analysis using hydro-climatological data and land cover mapping using very high resolution images

The Yzeron catchment, located in the suburbs of Lyon, France, is representative of French periurban catchments. Urbanization in this catchment has been increasing since the 1970s. In the last years, important events, leading to flooding downstream of the catchment, can be noticed. This raises the question of the impact of land cover change in the catchment on the flooding regime. In this paper, we combine analyses of hydroclimatological data (rainfall, temperature, reference evapotranspiration ET0, discharge) and land cover maps, derived from high and very high resolution SPOT satellite images to address this question. The discharge series analysis shows an

evolution of the flood regime, with a significant increase of sub-threshold floods for durations 1,5, 3, 6, 12 and 36h during the 1970-2010 period. The analysis of the floods sample, obtained from this discharge-duration-frequency analysis, shows that the most important floods are mostly related to events with a high cumulative rainfall (> 80 mm in a few days). A significant correlation is found between the base flow and the runoff coefficient, which shows that those floods can be associated with runoff on saturated surfaces. The climate series analysis (rainfall, temperature, ET0) do not explain the observed flood increase. On the other hand, the land cover maps of 1990 and 2008 show an increase of impervious areas which represent 15,2% of the total catchment area in 1990, 18,2% in 1999 and 22,6% in 2008. This change in the imperviousness is linked with the increase of the catchment population during the same period. Finally, we present two events, which illustrate the different catchment hydrological response in relation to land cover influence. The first one, from 2003/12/02 is typical of a response produced by soil saturation, with a major contribution of rural areas, produced by large cumulative rainfall. The second event, from 2009/08/09, is a typical summer thunderstorm, very short but with high rainfall intensities, leading mostly to a quick response from urban areas and for which land cover has a major role.

Keywords: Suburban, discharge, rainfalls, remote sensing, flooding, land cover.

Introduction

Les projections démographiques des Nations Unies[1] prévoient un accroissement notable de l'urbanisation avec 67 % de la population mondiale vivant en ville en 2050 (93 % pour la France). Les zones situées en périphérie des grandes villes sont celles pour lesquelles les évolutions de l'occupation des sols sont les plus marquées avec ce qu'on appelle la périurbanisation (Meija et Mogden, 2010). Cette urbanisation augmente l'imperméabilisation des sols, mais conduit aussi à des modifications significatives des chemins naturels de l'eau à cause des différents réseaux construits dans ces zones : routes, fossés, réseaux d'alimentation en eau potable, réseaux d'assainissement et d'eaux pluviales (Jankowfsky *et al.*, 2012). Les effets les plus immédiats de l'urbanisation sont une diminution de l'infiltration, une augmentation du ruissellement mais aussi une accélération des écoulements à cause des différents réseaux (Chocat, 1997 ; Jacobson, 2011). Des effets, parfois contradictoires, sont rapportés sur les débits de base des cours d'eau (Price, 2011). Certains constatent une diminution liée à la diminution de l'infiltration, mais d'autres auteurs observent une augmentation des niveaux de nappes liés à l'irrigation des jardins ou à l'utilisation de fosses septiques (Burns *et al.*, 2005). Les impacts sur l'écologie des cours d'eau sont aussi marqués, avec des pollutions liées notamment à l'utilisation de déversoirs d'orage dans les zones où l'assainissement est assuré par un réseau unitaire (combinaison d'eaux usées et d'eaux pluviales). Des impacts sur la géomorphologie et l'écologie des cours d'eau sont aussi notés (Schmitt *et al.*, 2004 ; Lafont *et al.*, 2006). Dans le cadre des directives cadre sur l'eau et sur les inondations, les collectivités locales sont amenées à prendre des mesures pour ramener les cours d'eau à un bon état écologique, mais aussi à cartographier et limiter les risques d'inondations. Dans la suite de cet article, nous nous limitons à l'étude des crues et à l'analyse d'un lien possible entre recrudescence des crues et évolution de l'occupation des sols. Compte tenu des non-stationnarités climatiques, il est aussi nécessaire d'étudier si des variations des régimes climatiques ou pluviométriques pourraient être à l'origine de ces évolutions des crues.

Quantifier l'impact de modifications de l'occupation des sols sur l'hydrologie (au sens large) de cours d'eau périurbains nécessite le choix de métriques/d'indicateurs pertinents. Si on se limite aux débits, Braud *et al.* (2013) identifient cinq classes d'indicateurs utilisés dans la littérature : des indicateurs décrivant le régime hydrologique, d'autres caractérisant les crues ou les bas débits, des indicateurs fondés sur la décomposition de séries de débits et l'analyse d'épisodes ainsi que d'autres basés sur l'utilisation de tests statistiques. Ces travaux

[1] *http://esa.un.org/unpd/wup/unup/*

s'appuient en général sur l'analyse de séries de données observées ou simulées. D'autres travaux essaient de quantifier l'évolution de l'urbanisation et de la relier aux conséquences sur l'hydrologie, le plus souvent via des modèles (Wegehenkel *et al.*, 2006 ; Chormanski *et al.*, 2008 ; Zou et Wang, 2008). Nous proposons dans cet article de combiner des analyses de données hydrométéorologiques (essentiellement par tests statistiques et analyse d'épisodes) et cartographie de l'évolution de l'occupation des sols à l'aide d'images haute (HRV) et très haute résolution (THR) pour progresser dans la compréhension des rôles respectifs de l'évolution des variables climatiques et de l'occupation des sols sur l'hydrologie de rivières périurbaines.

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet ANR AVuPUR 2008-2011 (*Assessing the Vulnerability of Peri-Urban Rivers* – Braud *et al.*, 2010), qui avait pour objectif d'améliorer la description des bassins périurbains, la compréhension des processus hydrologiques qui y sont à l'œuvre et de proposer des outils de modélisation hydrologique permettant de quantifier la vulnérabilité de ces bassins aux évolutions de l'occupation des sols. Deux bassins pilotes ont été considérés dans ces travaux : le bassin de l'Yzeron (148 km^2) en périphérie lyonnaise et le bassin de la Chézine (34 km^2) en banlieue nantaise. Cet article se focalise sur le bassin de l'Yzeron, qui est un exemple représentatif de bassins périurbains français. Il a connu une urbanisation importante depuis les années 1970 et la recrudescence d'inondations à l'aval du bassin versant a fait émerger la question du rôle possible des modifications de l'occupation des sols sur cette augmentation des crues (Chocat, 1997).

Nous présentons dans un premier temps le site d'étude et les données disponibles. Puis nous analysons le régime hydrologique de la rivière Yzeron, le régime pluviométrique ainsi que la température et l'évapotranspiration de référence ET0 sur la période 1970-2010 afin de quantifier les évolutions observables. Nous présentons ensuite la méthodologie retenue pour cartographier l'occupation des sols, à l'aide d'images SPOT, de 1990 à 2008, et quantifier son évolution en tenant compte des différences de résolution spatiale entre les images au cours du temps. La présentation détaillée de deux épisodes permet d'analyser la réaction du bassin versant en fonction des types de précipitations (intensité et durée) et de l'occupation des sols. En perspective, nous évoquons les premiers résultats d'une modélisation hydrologique utilisant les cartes de 1990 à 2008 qui éclairent utilement les liens entre hydrologie et occupation des sols.

1. Contexte de l'étude et données utilisées

1.1. Présentation générale de la zone d'étude

Le bassin versant de l'Yzeron situé en périphérie lyonnaise a une superficie de 148 km² (figure 1). Il intègre à la fois une partie du Grand Lyon et une partie des Monts du Lyonnais, culminant à 918 m d'altitude sur la bordure occidentale du bassin. L'exutoire est situé à 162 m d'altitude, à la confluence avec le Rhône. Ceci conduit à un dénivelé global de 756 m. Les pentes, calculées à l'aide d'un modèle numérique de terrain (MNT) de résolution 50 m, sont supérieures à 10 % pour plus de la moitié du bassin (Gnouma, 2006). La géologie du bassin versant est dominée par des formations cristallines (gneiss, granites) dans la partie ouest, et par des formations glaciaires et alluviales dans la partie est (Gnouma, 2006). La carte pédologique du bassin (SIRA, 2010) indique des sols peu profonds, conduisant à une faible capacité de stockage du bassin (Braud *et al.*, 2013). La population totale du bassin est d'environ 164 000 habitants en 2006 (d'après INSEE, 2006)[2]. D'amont en aval, on passe d'un

[2] Les limites du bassin versant étant différentes des limites communales, cette estimation est une estimation maximale puisqu'elle a été calculée comme la somme des habitants de toutes les communes ayant tout ou partie de leur territoire dans le bassin.

espace rural partagé entre parcelles agricoles et habitats peu denses à un espace périurbain de plus en plus urbanisé et densément peuplé (Jacqueminet *et al*., 2011 ; Braud *et al.,* 2013).

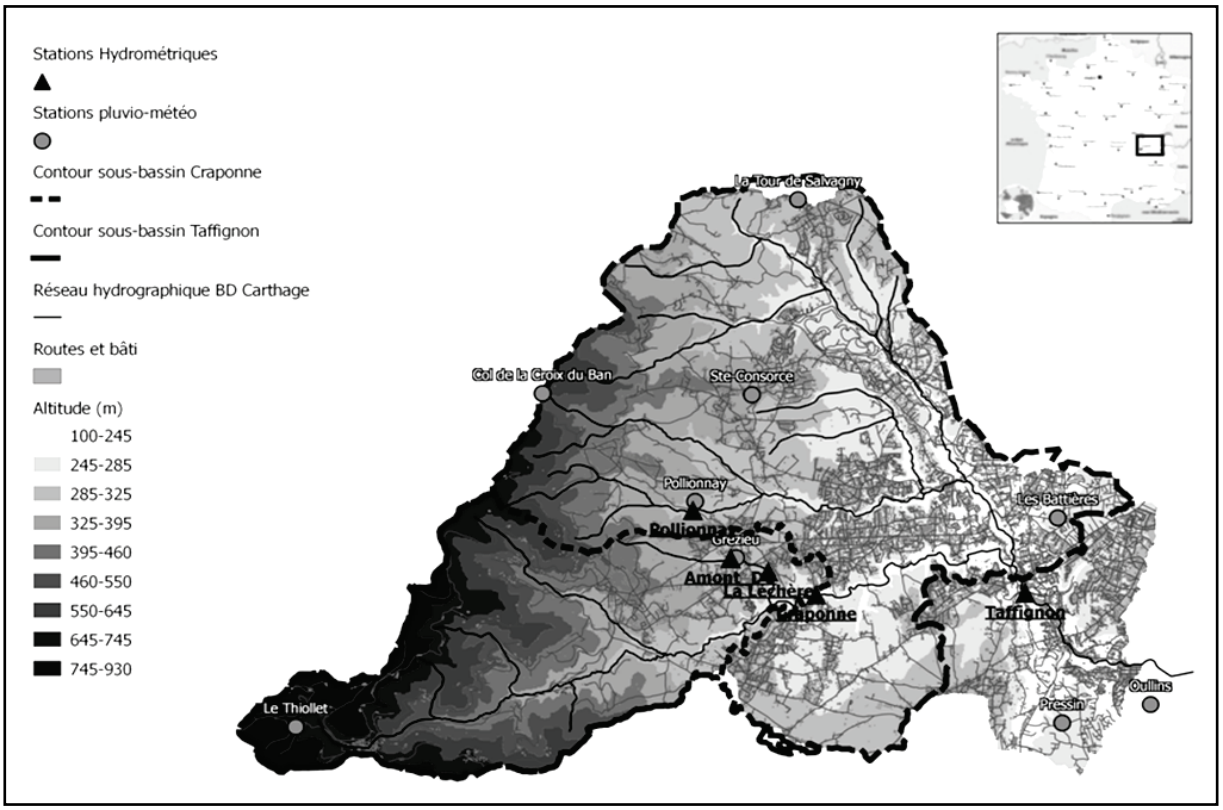


Figure 1 : Localisation du bassin versant de l'Yzeron. Cartographie du relief tirée d'un modèle numérique de terrain à 25 m et localisation des stations hydrométriques (DREAL Rhône, Irstea) et pluviométriques (Grand Lyon et Irstea). *Location of the Yzeron catchment. Elevation map from a 25 m digital elevation model and location of the discharge (DREAL Rhône, Irstea) and rain gauges (Grand Lyon and Irstea).*

Le bassin versant de l'Yzeron est étudié depuis une vingtaine d'années et fait partie de l'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine (OTHU, 2012) qui a débuté en 1999. Une des thématiques centrale de l'OTHU est l'étude des rejets urbains de temps de pluie (RUTP), qui a justifié les premières instrumentations. Dans le cadre du projet AVuPUR, c'est à l'ensemble du cycle hydrologique que l'on s'est intéressé, ce qui a conduit à élargir la gamme des données collectées. Le projet a ainsi permis de rassembler et valoriser un ensemble de couches de Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) documentant le relief, la géologie, les sols, les réseaux (routes, fossés, réseaux d'assainissement) mais surtout l'occupation des sols, comme cela est abordé dans la suite de cet article.

1.2. Les données hydrologiques et climatiques

Les résultats présentés utilisent essentiellement les données de deux stations hydrométriques gérées par la DREAL Rhône-Alpes (Craponne et Taffignon) drainant des surfaces de 48 et 127 km^2 respectivement (figure 1). Ces stations de la banque Hydro[3] fournissent des données à pas de temps variable respectivement depuis les automnes 1969 et 1988. La qualité des stations est jugée bonne par le producteur des données. Nous utilisons aussi, pour l'analyse de l'épisode du 09 août 2009, les données des stations de Pollionnay sur la rivière Mercier (6,7 km^2) et les stations Amont_DO (2,1 km^2) et La Léchère (4,1 km^2) sur la rivière Chaudane, suivies par Irstea depuis 1997 pour les deux premières et 2005 pour la

[3] *http://www.hydro.eaufrance.fr/*

troisième. Ces stations mesurent les débits à pas de temps variables et drainent des bassins dont l'occupation des sols est composée de forêts et cultures pour la station de Pollionnay, de cultures pour la station Amont_DO, et de cultures et de zones urbaines pour la station La Léchère. A noter qu'entre les stations Amont_DO et La Léchère, deux déversoirs d'orage (DO) importants peuvent déverser des eaux polluées dans le cours d'eau. Le débit du premier DO est aussi suivi (voir Braud *et al.*, 2013, pour plus de détails sur l'analyse de ces données).

Sur le bassin versant de l'Yzeron, on dispose de huit postes pluviométriques avec une durée d'observation allant de 2 à 25 ans (figure 1). Quatre stations du Grand Lyon fournissent des données à pas de temps de 6 min depuis 1985 (Pressin, Les Battières, La Tour de Salvagny) et 2002 (Sainte-Consorce). Les stations d'Irstea fournissent des données à pas de temps variable depuis 1997 (Pollionnay, Grézieu), 2005 (Col de la Croix du Ban) et 2006 (Oullins). Pour la recherche de tendances sur les précipitations, afin d'avoir une profondeur d'analyse temporelle suffisante, la station synoptique de Bron (15 km à l'est du bassin versant, données disponibles depuis 1920) est utilisée en complément des postes pluviométriques du bassin. Un travail de critique et de comparaison de ces différentes stations a montré la cohérence des différentes sources de données (Kermadi *et al.*, 2011).

En complément, nous avons aussi utilisé les réanalyses SAFRAN (Quintana-Sagui *et al.*, 2008 ; Vidal *et al.*, 2010) qui fournissent des variables climatiques (pluie, neige, température et humidité de l'air, vitesse du vent, rayonnements solaires et grandes longueurs d'ondes incidents) à pas de temps horaire sur des mailles de 8 x 8 km^2. A l'aide de ces données, une évapotranspiration de référence horaire a été estimée avec la méthode de la FAO (1998). Des pluies moyennes horaires de bassin ont aussi pu être calculées pour les sous-bassins de Craponne et de Taffignon, ce qui permet en particulier de combler l'absence de stations pluviométriques entre 1970 et 1985 sur le bassin.

1.3. Les données satellitaires

Pour la cartographie de l'occupation des sols, nous disposons d'un ensemble de sept images SPOT 4 et 5 datant des années 1990, 1999 et 2008 (tableau 1). Cet intervalle de temps (~ 20 ans) a été choisi pour mieux apprécier les changements interannuels des unités paysagères (Robin, 2002). Pour les années 1990 et 1999, nous disposons de plusieurs images enregistrées à des saisons différentes : du printemps à l'automne. Ceci est un atout pour suivre l'évolution intra-annuelle du couvert végétal, notamment celle des surfaces agricoles.

	SPOT 4 : 1990	**SPOT 4 : 1999**	**SPOT 5 : 2008**
Date de prise de vue *(résolution spatiale)*	29 mai *(20 m)* 3 août *(10 et 20 m)*	24 juin *(20 m)* 24 août *(10 et 20 m)* 27 octobre *(20 m)*	22 septembre (2,5 m)

Tableau 1 : Dates des scènes SPOT 4 et 5 utilisées dans cette étude. *Dates of the SPOT 4 and 5 images used in this study.*

Pour l'année 2008, nous avons privilégié la très haute résolution (2,5 m en mode fusion) afin de mieux restituer l'hétérogénéité des surfaces influant sur le cheminement des eaux. De plus, pour bien représenter l'évapotranspiration dans les modèles hydrologiques, il est intéressant de disposer d'une caractérisation fine des objets minéraux et végétaux et de l'évolution de l'indice foliaire qui peut être estimé via le NDVI (Dezetter *et al.*, 2003). Idéalement, nous souhaitions disposer d'au moins une image en période printemps-été, mais cela n'a pas toujours été possible. Cette période, ayant été pluvieuse, nous n'avons pu avoir qu'une seule image au début de l'automne. Cette image de 2008 est donc importante pour cartographier les unités spatiales du bassin et la carte d'occupation des sols extraite servira de

référence pour le reclassement et la correction des classifications des images des années 1990 et 1999 (Kermadi *et al.*, 2012).

2. Caractéristiques hydrologiques et pluviométriques

2.1. Le régime hydro-pluviométrique de l'Yzeron (1970-2010)

Les résultats présentés ici s'appuient sur les données de la station de Craponne qui possède la série la plus longue (41 ans), mais nous avons pu vérifier que son comportement était similaire à celui observé à Taffignon (Braud *et al.*, 2013).

Le débit moyen mensuel de l'Yzeron mesuré à la station de Craponne est de 0,33 m³ s^{-1} et la pluviométrie moyenne interannuelle est de 785 mm (pluie de bassin calculée avec les réanalyses SAFRAN sur 1970-2010). La figure 2 présente l'évolution des pluies (moyenne des pluies SAFRAN sur le sous-bassin de Craponne) et des débits journaliers à la station de Craponne. On y indique aussi les quatre épisodes de crue majeurs sur la période.

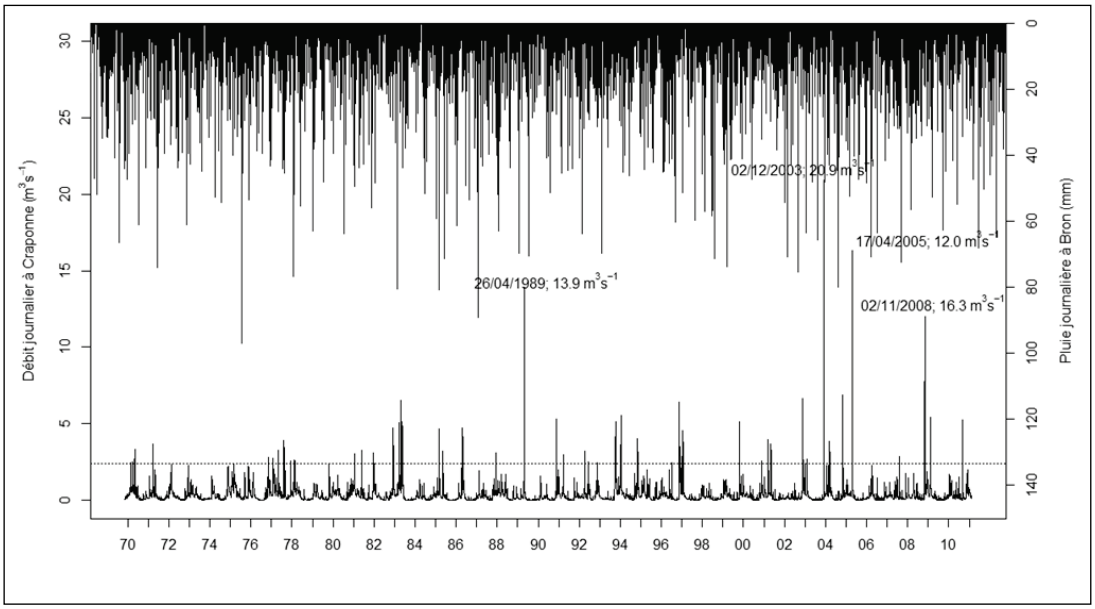


Figure 2 : Evolution des pluies journalières (pluie moyenne de bassin calculée à l'aide des réanalyses SAFRAN) et des débits journaliers à la station de Craponne (48 km^2) pour la période 1970-2010. La ligne pointillée horizontale représente le débit journalier dépassé 1 % du temps. *Time series of the daily rainfall (catchment average from the SAFRAN reanalyses) and of the daily discharge at Craponne (48 km^2) over the 1970-2010 period. The horizontal dashed line is the daily discharge exceeded 1% of the time.*

La figure 3 présente les moyennes mensuelles interannuelles et leur variabilité pour l'évapotranspiration de référence (ET0), la pluie et les écoulements. Comme attendu, l'ET0 révèle un cycle annuel marqué avec des valeurs maximales en été et des valeurs minimales en hiver. La variabilité est plus forte en été qu'en hiver. Les précipitations présentent deux maxima : l'un au printemps (mai) et l'autre en automne (septembre, octobre). C'est en hiver que les pluies sont les moins abondantes. Pourtant, c'est la saison durant laquelle les écoulements sont les plus importants, alors qu'ils sont minimaux en été. Ceci s'explique par l'effet de la végétation qui conduit à une évapotranspiration réelle (ETR) importante d'avril à octobre, ce qui limite les écoulements. Les valeurs d'ETR sont faibles en hiver, permettant l'établissement d'écoulements importants. Gnouma (2006) montre ainsi, en analysant le déficit d'écoulement (pluie – écoulement) que les mois d'octobre et novembre forment la période de reconstitution des stocks d'eau dans le sol. Il indique aussi un fonctionnement majoritaire par ruissellement sur surfaces saturées pour les zones rurales du bassin.

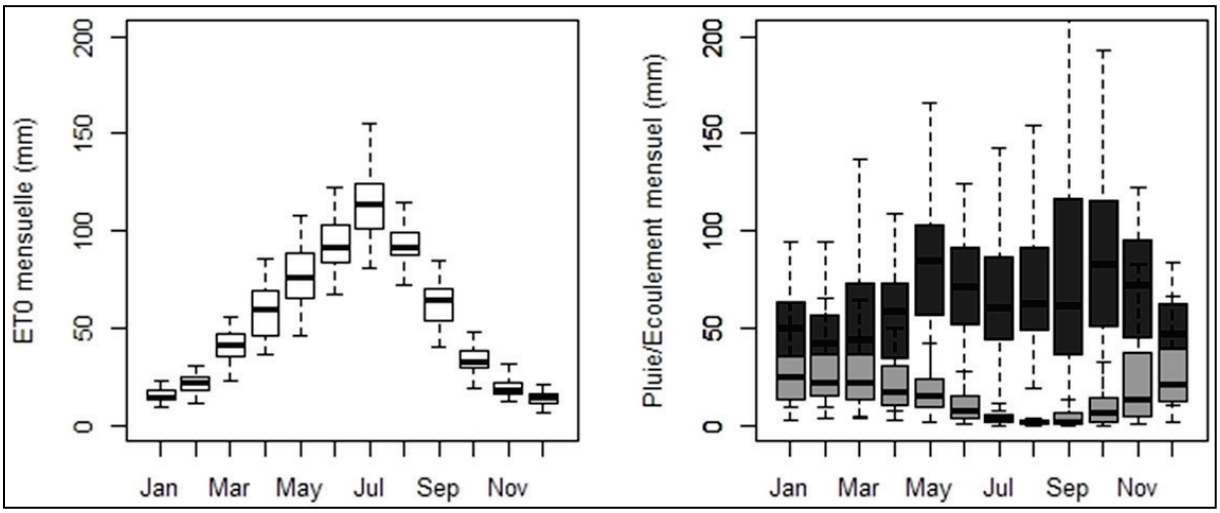


Figure 3 : Moyennes mensuelles interannuelles (mm) de l'évapotranspiration de référence (ET0) en blanc (graphique de gauche), des précipitations en gris foncé (graphique de droite), calculées à l'aide des données SAFRAN (1970-2010), des écoulements en gris clair (graphique de droite), calculées à l'aide des données de la station de Craponne (1970-2010). *Interannual monthly average (mm) of reference evapotranspiration (ET0) in white (at left), rainfall in dark gray (at right), computed using the SAFRAN data (1970-2010), runoff in light gray (at right), computed using the Craponne gauge data (1970-2010).*

2.2. Evolution du régime de crues dans le bassin versant de l'Yzeron

Cette évolution est étudiée sur le sous-bassin versant de Craponne pour lequel la chronique de débits est suffisamment longue pour appliquer des tests statistiques. Nous avons utilisé le test de Pettitt (1979) pour la détection de ruptures dans les séries et le test de Mann-Kendall (Mann et Whitney, 1947) pour la détection de tendance.

Le régime des crues est caractérisé par une analyse débit-durée-fréquence, appelée QdF (Galéa et Prudhomme, 1994 ; Javelle *et al.*, 1999) qui est une extension à différentes durées caractéristiques de crue de l'analyse des débits sub-seuils (*Peak Other Threshold* en anglais), qui s'intéresse au débit de pointe (figure 4a). La durée caractéristique de crue du bassin de Craponne (mais aussi de Taffignon) a été estimée à d=12 h (Braud *et al.*, 2013) et l'analyse QdF a été réalisée pour les durées *d, d/8, d/4, d/2, d, 3d* (Sauquet et Ribatet, 2004), soit des durées de 0 (débit de pointe), 1,5 h, 3 h, 6 h, 12 h et 36 h. Pour ces grandeurs, un échantillonnage sub-seuil conduisant à une moyenne de deux crues par an a été retenu, ce qui permet de conserver une indépendance entre les événements, tout en augmentant la taille de l'échantillon analysé (Renard *et al.*, 2006). Cet échantillonnage permet de sélectionner les crues indépendantes les plus importantes (en débit de pointe) sur la période étudiée.

Le maximum annuel, ainsi que les composantes du débit (débit de base, débit de sub-surface et ruissellement rapide) extraites par filtrage de la série en utilisant le logiciel WETSPRO (Willems, 2009) ont aussi été analysés à l'aide des tests de Pettitt et Mann-Kendall. Les résultats ne montrent pas d'augmentation significative du débit maximum annuel, ni du débit de pointe. En revanche, pour les durées 1,5, 3, 6, 12 et 36 h, on note une augmentation significative du débit de crue au seuil 10 %. Des ruptures significatives au seuil 10 % sont aussi obtenues dans les années 1977-1979 pour les durées 6 et 36 h (Braud *et al.*, 2013 ; figure 4b). Il est aussi intéressant de noter la hausse significative au seuil 1 % du ruissellement rapide et du débit de sub-surface, ainsi que la baisse significative au seuil 5 % du débit de base (Braud *et al.*, 2013). Ce résultat est cohérent avec l'augmentation de l'urbanisation sur la période, dont une des conséquences attendues est une augmentation du ruissellement rapide et une diminution des débits de base (voir l'introduction).

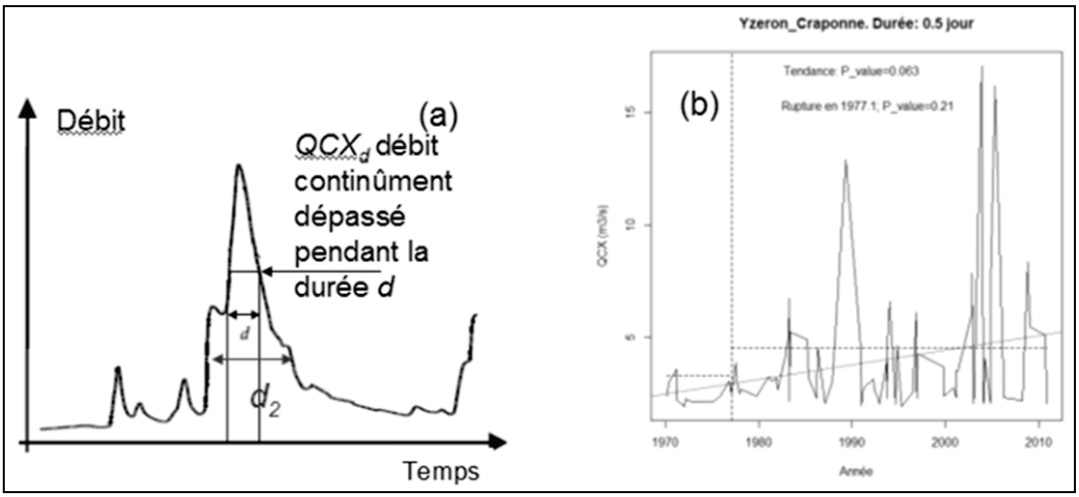


Figure 4 : a) Principe de la méthode d'échantillonnage des débits sub-seuil. On déplace une fenêtre de largeur *d* le long de la chronique et on sélectionne les crues indépendantes. On peut faire ce travail pour une autre durée *d2*. b) Analyse des débits de crue sub-seuils à Craponne pour la durée *d*=12 h. Les lignes pointillées horizontales marquent respectivement les moyennes sur les périodes avant et après rupture, marquée par la ligne pointillée verticale. La droite en pointillés est la tendance linéaire ajustée sur les données. *a) Principle of the sampling method for the QdF analysis. A time window of width d is moved along the time series and independent flood events are selected. The same analysis can be done for a second duration d2. b) Analysis of sub-threshold flood discharges at Craponne for the duration d=12h. The horizontal dotted lines shows the average before and after the rupture date, indicated with the vertical dotted line. The dashed line is the linear trend adjusted on the data.*

On s'intéresse maintenant à l'échantillon de crues obtenu lors de l'analyse QdF (79 épisodes de crues indépendantes conduisant aux débits de pointe les plus élevés). La figure 5a montre l'évolution au cours du temps du nombre de crues par an dans cet échantillon. On note une augmentation significative de ce nombre, ce que confirme le test de Mann-Kendall au seuil 1 % ($p = 0{,}005$). Une rupture en 1990 est par ailleurs détectée par le test de Pettitt ($p < 10^{-6}$). Si on s'intéresse à la saisonnalité des crues, la figure 5b indique que le nombre de crues de l'échantillon est maximum en novembre (13 crues sur 79). Un autre maximum est observé en juillet (9 crues). Les mois de janvier et février sont ceux durant lesquels le nombre de crues est le plus faible (4 crues).

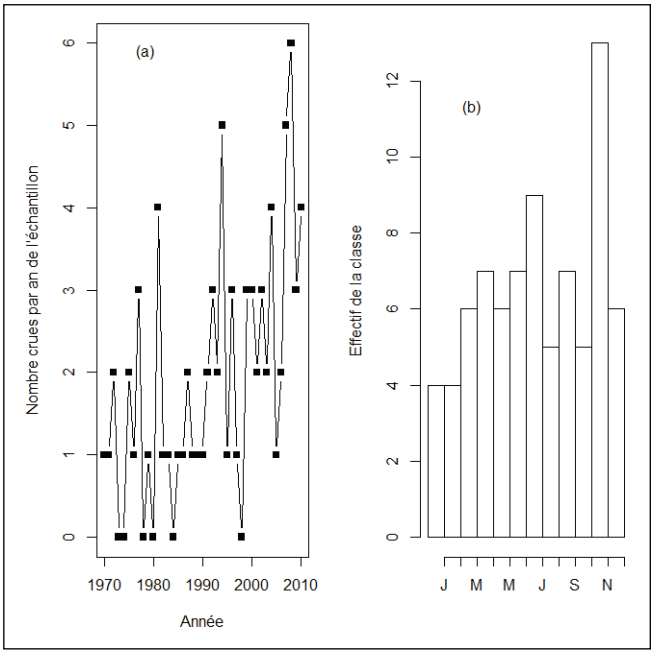


Figure 5 : a) Nombre de crues par an à la station de Craponne ; b) Saisonnalité des crues. L'échantillon de crues a été obtenu par échantillonnage sub-seuil à deux crues par an sur la période 1970-2010. *a) Number of floods per year at the Craponne station; b) Seasonality of the floods. The flood sample was obtained using a sub-threahold sampling with two floods per year in the period 1970-2010.*

A la station de Craponne, Sauquet et Ribatet (2004) définissent le débit de crue instantané de temps de retour de 2 ans à 7,8 $m^3 s^{-1}$ et le débit quinquennal à 11,9 $m^3 s^{-1}$. L'échantillon constitué pour l'analyse QdF, avec un échantillonnage à deux crues par an, contient 12 crues dont le débit de pointe a excédé la valeur quinquennale. Parmi elles, on peut distinguer les cinq crues majeures suivantes : 2 décembre 2003 (53,9 $m^3 s^{-1}$), 2 novembre 2008 (44 $m^3 s^{-1}$), 17 avril 2005 (23,6 $m^3 s^{-1}$), 26 avril 1989 (22,4 $m^3 s^{-1}$) et 6 février 2009 (21,3 $m^3 s^{-1}$). Pour les différents épisodes de crues, nous avons calculé les cumuls de pluie durant l'épisode, les débits maxima atteints, le débit en début d'épisodes, ainsi que le coefficient de ruissellement défini comme le rapport entre l'écoulement (auquel on a retranché le débit de base) et la pluie.

La figure 6a montre la relation entre le coefficient de ruissellement et le débit en début d'épisode (en échelle log). Une corrélation (R^2) de 0,35 est obtenue. Le débit en début d'épisode (ou débit de base) est souvent considéré comme un indicateur de l'état de saturation du bassin. On constate que les coefficients de ruissellement sont d'autant plus importants que le débit de base est élevé. Ces résultats confirment le fonctionnement par ruissellement sur surface saturée pour les épisodes majeurs déjà proposé par Gnouma (2006). La figure 6b montre la corrélation entre le débit maximum de l'épisode (en échelle log) et la pluie cumulée sur l'épisode. Là encore, on trouve une corrélation significative entre ces deux grandeurs (R^2 = 0,26). Les épisodes majeurs sur l'Yzeron sont donc associés à des épisodes pluvieux conduisant à des cumuls pluviométriques élevés. Les cinq épisodes majeurs mentionnés plus haut ont ainsi un cumul pluviométrique supérieur à 80 mm sur la durée de l'épisode. Ces cumuls se produisent en général sur plusieurs jours.

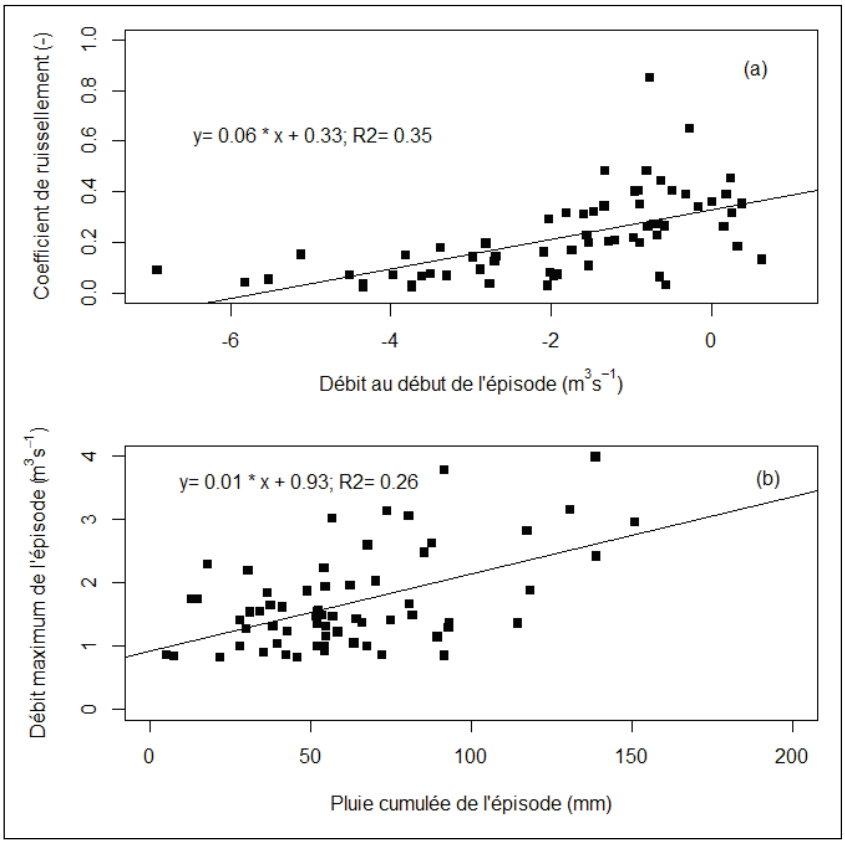


Figure 6 : a) Relation entre coefficient de ruissellement et débit en début d'épisode (en échelle log). b) Relation entre débit maximum (en échelle log) et cumul pluviométrique de l'épisode. L'échantillon de crues a été obtenu par échantillonnage sub-seuil à deux crues par an sur la période 1970-2010. *Relationship between the runoff coefficient and the discharge at the beginning of the event. b) Relationship between the maximum peak discharge and the event cumulative rainfall. The flood sample was obtained using a sub-threahold sampling with two floods per year in the period 1970-2010.*

2.3. Evolution des précipitations, de la température et de l'ET0 sur la période 1970-2010

L'analyse des crues confirme l'existence d'une tendance à leur augmentation pour certaines des grandeurs les caractérisant. Une première cause de ces modifications pourrait être une modification du régime pluviométrique et/ou climatique. Le test de tendance de Mann-Kendall appliqué aux pluies mesurées à la station de Bron sur la période 1920-2010 ne montre pas de tendance significative au seuil de 10 % dans l'évolution des pluies annuelles et mensuelles. Il n'y a pas non plus de tendance significative sur le maximum annuel, ainsi que le maximum annuel des pluies cumulées sur 3 jours. En revanche, le test montre une augmentation significative au seuil de 5 % des valeurs du maximum annuel des pluies cumulées sur 5, 10 et 15 jours avec une rupture détectée vers 1974 par le test de Pettitt (figure 7a). Ces mêmes tests, appliqués sur la période 1970-2010, ne montrent pas de tendance significative au seuil de 10 % dans l'évolution des pluies annuelles et mensuelles. Il n'y a pas non plus de tendance significative sur le maximum annuel et le maximum des pluies cumulées sur 3, 5, 10 et 15 jours (figure 7b).

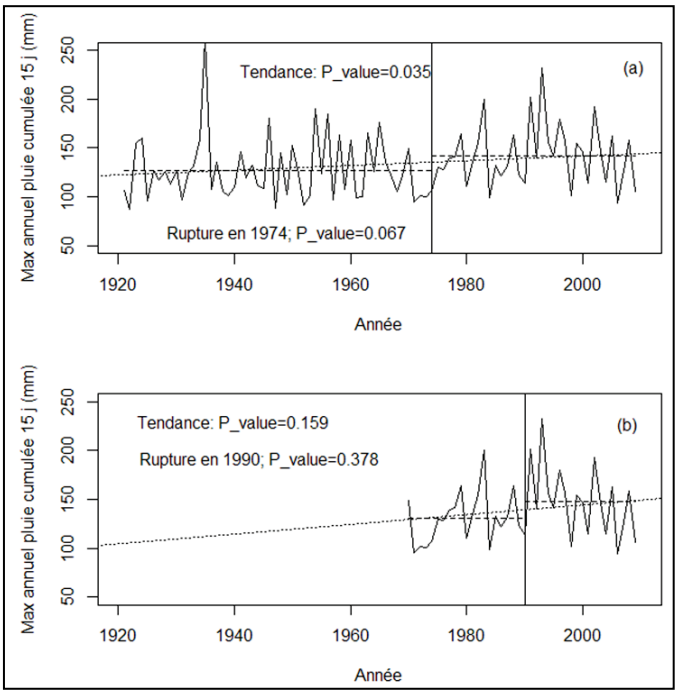


Figure 7 : Analyse de tendance et de rupture de la série des maxima annuels des pluies cumulées sur 15 jours pour la période 1920-2010 (a) et 1970-2010 (b). *Trend/rupture analysis of the maximum annual cumulative rainfall over 15 days for the (a) 1920-2010 and (b) 1970-2010 periods.*

Le test de Mann-Whitney a été utilisé pour comparer les distributions des cumuls annuels, des maximum annuels et des pluies sub-seuil (échantillonnage à 2 épisodes par an) cumulés sur 1, 3, 5, 10, 15 jours entre trois sous-périodes de 30 ans pour la station de Bron selon une méthode proposée par Radojevic *et al.* (2010). Il met en évidence des différences significatives aux seuils 5 ou 10 % sur les maxima des cumuls sur 5, 10, 15 jours entre les trois périodes : 1920-1950, 1951-1980 et 1981-2009. En revanche, on ne retrouve pas ces différences sur les pluies sub-seuil échantillonnées à 2 épisodes par an sauf pour le cumul sur 10 jours entre les périodes 1951-1980 et 1981-2009 (figure 8). Des épisodes aux cumuls plus importants, à durée égale, sur la dernière décennie seraient de nature à favoriser les crues sur la partie rurale du bassin.

L'analyse des réanalyses climatiques issues de la base SAFRAN sur la période 1970-2009 montre une tendance significative à la hausse (p = 0,006) des températures de 0,52°C tous les dix ans. Il n'y a pas en revanche de tendance significative à la hausse de l'ET0 annuelle (p = 0,13), mais une rupture significative à la hausse en 2002 qui restera à confirmer dans le futur (Kermadi *et al.*, 2011).

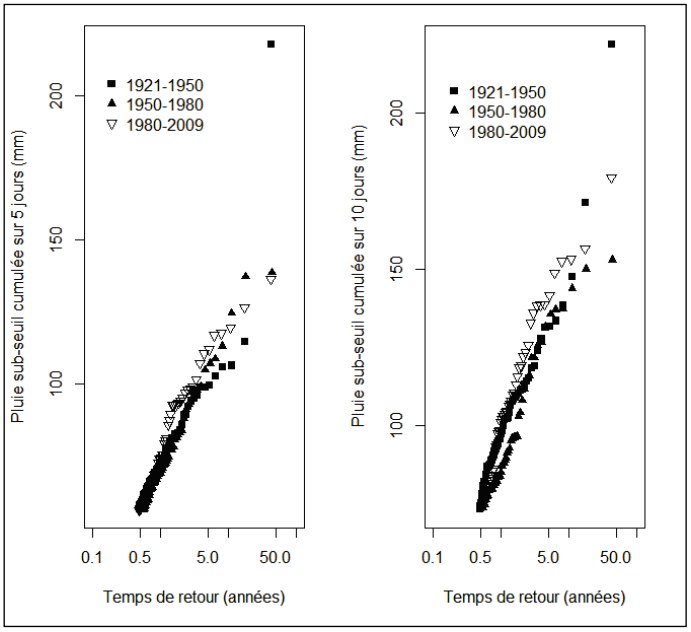


Figure 8 : Comparaison des distributions des pluies sub-seuils (échantillonnage à 2 épisodes par an) cumulées sur 5 jours et 10 jours. *Comparison of the distributions of sub-threshold rainfall (sampling with two events per year) over 5 days and 10 days.*

Sur la période 1970-2010, il n'y a donc pas de signal très net d'une modification du régime des précipitations ou du climat, même si des cumuls plus importants sur des durées de 10 jours ne sont pas exclus. Cette analyse a été restreinte à des pluies journalières et il faudrait aussi analyser les pluies sur des durées plus courtes (horaires par exemple), ce qui sera possible lorsque les séries disponibles sur le bassin auront la durée suffisante (seulement 25 ans pour le moment). On pourrait en effet attendre une réponse plus importante des surfaces imperméables à une augmentation des intensités de pluie sur des durées courtes. Sur la période 1970-2010, les modifications des conditions climatiques ne semblent donc pas pouvoir expliquer de manière nette l'augmentation du nombre de crues sur le bassin de l'Yzeron. Nous allons chercher à caractériser l'évolution de l'occupation des sols sur ce bassin, qui est un facteur possible d'évolution de la fréquence des crues.

3. Cartographie de l'évolution de l'occupation des sols de 1990 à 2008

L'information liée à l'occupation des sols est une des entrées nécessaire à la modélisation hydrologique spatialisée. Cette information est en particulier utilisée pour délimiter les unités hydrologiques représentatives (HRUs – *Hydrological Representative Units*) sur lesquelles on suppose les processus hydrologiques homogènes (Flügel, 1995 ; Fortin *et al.*, 2001 ; Jacqueminet *et al.*, 2013). Notre objectif est donc de développer une méthodologie restituant non seulement la délimitation et la caractérisation des objets végétaux et minéraux, mais également l'estimation de leur taux de perméabilité (Kermadi *et al.,* 2011). Cette cartographie a d'abord été mise au point à partir de l'image SPOT du 22 septembre 2008 qui est la plus récente et qui présente une résolution fine.

3.1. Cartographie de l'occupation des sols en 2008

Trois étapes classiques structurent notre démarche de cartographie. Une première étape vise à l'amélioration de la discrimination des classes par la création de néo-canaux combinant les informations présentes dans les images originales. Une deuxième étape, analogique, aide à

l'interprétation visuelle des classes de l'occupation des sols et prépare la troisième étape d'analyse numérique et de classifications.

1) **Création de nouvelles images** : Dans cette étape, plusieurs indices ont été créés : l'indice de brillance (IB) et l'indice de végétation normalisé (NDVI), reconnus pour leur apport dans la distinction des surfaces minérales et végétales (Tucker, 1979 ; Dubucq, 1986). Un indice de texture (IT) a également été créé pour améliorer la séparabilité entre les classes « bâti » et « sols nus ». Basés sur une seule image, les résultats de cet indice dépendent donc du choix de l'image d'entrée. C'est ainsi que nous avons réalisé une Analyse en Composantes Principales (ACP), et avons retenu l'image de la première composante résumant le maximum de variance. Il existe un grand nombre d'indices de texture en traitement d'image. L'indice utilisé dans cette étude est l'indice de co-occurrence de Haralick *et al.* (1973) pour sa simplicité et la pertinence de ses résultats (Iftene et Abdelmoudaine, 2004).

2) **Analyse analogique** : L'objectif de cette deuxième étape réside dans l'interprétation visuelle de l'occupation des sols, en se basant sur des compositions colorées et sur les variables visuelles (couleur, taille, forme, texture et structure des objets). Ces compositions, intégrant les bandes spectrales d'origine et/ou les néo-canaux, sont d'un grand apport visuel, et contribuent à améliorer la perception des unités spatiales et à la sélection des échantillons de pixels servant à étalonner les classifications. D'autre part, la reconnaissance des classes d'occupation des sols s'est appuyée sur une composition multidate des NDVI des trois années (1990, 1999 et 2008). Cette composition présente l'avantage de faire ressortir les unités stables (végétales ou minérales) par rapport aux espaces subissant des changements interannuels.

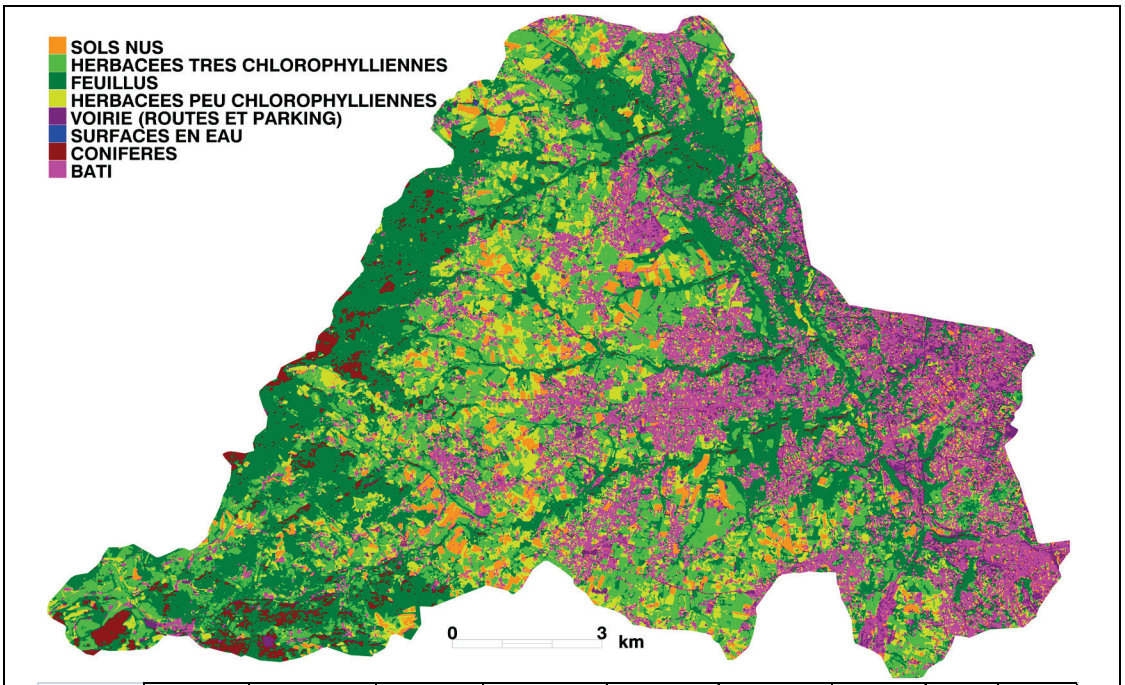
3) **Analyse numérique** : Suite à l'analyse visuelle, huit classes ont été prédéfinies : feuillus, conifères, herbacées peu chlorophylliennes, herbacées très chlorophylliennes, surfaces en eau, voirie (routes et parking), sols à nu et bâti. Cette dernière a été extraite directement par seuillage de l'indice de texture. Les autres classes ont été cartographiées par classification supervisée par maximum de vraisemblance.

La figure 9 présente les huit classes ainsi que leur superficie (en km² et en %) dans le bassin versant de l'Yzeron. Les deux classes de végétation basse (peu ou très chlorophyllienne) et les sols à nu représentent les surfaces les plus importantes : elles occupent 42,2 % (respectivement 36,7 et 5,5 %) de la superficie du bassin. Viennent ensuite les surfaces forestières (35 %), puis les surfaces artificielles (22,5 %) avec respectivement 17 % pour le bâti et 5,5 % pour la voirie.

3.2. Evaluation de la classification

La classification de l'image de 2008 est validée à l'aide d'une matrice de confusion (Congalton et Green, 1999). Le calcul de cette matrice repose sur la comparaison de l'image classée et d'échantillons de réalité terrain représentatifs de chacune des classes ; 146 échantillons ont été collectés pour l'ensemble des classes, à partir de la BD-Ortho®IGN de mai 2008. Cette dernière image présente l'avantage d'être de la même année que l'image SPOT 5. Cependant, son enregistrement au mois de mai entraîne des écarts phénologiques de la végétation avec l'image SPOT classée (enregistrée en septembre), notamment pour les surfaces agricoles. L'indice de Kappa – calculé sur les sept classes suivantes : feuillus, conifères, herbacées (peu ou très chlorophylliennes), sols à nu, bâti, voirie et surfaces en eau – est de 0,80 (tableau 2). Pour limiter les confusions liées aux variations saisonnières du couvert végétal, nous avons calculé une seconde matrice de confusion où les classes « herbacées » et

« sols nus » sont rassemblés en une seule classe. Dans ce cas, l'indice de Kappa est de 0,84 (Jacqueminet *et al.*, 2013).



	SOLS A NU	HERBACEES TRES CHLOROPHYLLIENNES	FEUILLUS	HERBACEES PEU CHLOROPHYLLIENNES	SURFACES EN EAU	VOIRIE (ROUTES ET PARKING)	CONIFERES	BATI	TOTAL
SURFACE EN Km²	8,55	29,96	48,79	24,44	0,02	8,21	3,16	25,22	148,34
SURFACE EN %	5,8%	20,2%	32,9%	16,5%	0,0%	5,5%	2,1%	17,0%	100%

Figure 9 : Carte d'occupation des sols du bassin versant de l'Yzeron (image SPOT 2,5 m du 22 septembre 2008). *Land cover map of the Yzeron catchment (SPOT 2,5m image from 2008/09/22).*

D'une manière générale, les pourcentages de pixels bien classés par classe donnent des résultats satisfaisants (tableau 2). Dans le détail, la végétation arborée (feuillus et conifères) est bien extraite, elle est reconnue pour 97,9 % pour les feuillus et pour 78,2 % pour les conifères. En analysant les erreurs de commission et d'omission, on constate que la classe des feuillus est surestimée alors que celle des conifères est sous représentée.

	FEUILLUS	CONIFERES	HERBACEES	SOLS A NU	BATI	VOIRIE	SURFACES EN EAU	ERREUR DE COMMISSION
FEUILLUS	**97,9**	21,8	7,7	0	0	0	0	0,19
CONIFERES	0	**78,2**	2,3	0	0	0	0	0,05
HERBACEES	2,1	0	**79,1**	39,9	0,9	0	0	0,35
SOLS A NU	0	0	6,6	**55,7**	9,3	1,6	0	0,17
BATI	0	0	1,8	4,2	**62,3**	20,8	0	0,36
ROUTE	0	0	2,5	0,2	27,5	**77,6**	1,1	0,45
SURFACES EN EAU	0	0	0	0	0	0	**98,9**	0,00
ERREUR D'OMISSION	0,02	0,21	0,21	0,44	0,37	0,22	0,11	**Indice Kappa = 0,80**

Tableau 2 : Matrice de confusion de la carte extraite de l'image SPOT à 2,5 m. *Confusion matrix of the map extracted from the SPOT image.*

Le rassemblement des deux classes « herbacées » donne également un bon résultat, elles sont identifiées pour 79,1 %. Quant aux classes « bâti » et « voirie », les résultats sont plus mitigés puisque ces deux classes sont respectivement reconnues à 62,3 et 77,6 %. L'analyse des matrices indique des confusions entre ces deux classes et celle des sols nus. Ces deux classes ont également des erreurs d'omission et de commission élevées, ce qui révèle des valeurs spectrales proches pour ces trois thèmes.

3.3. Cartographie de l'occupation des sols en 1990 et en 1999

La cartographie des années 1990 et 1999 est conduite à partir de plusieurs images enregistrées au cours de l'année (tableau 1). Ces images ont des résolutions de 10 à 20 m. Pour faciliter les traitements, elles sont ré-échantillonnées à 10 m. Les indices de végétation, de brillance et des analyses en composantes principales sont calculés à chaque date (printemps/été pour 1990 et l'automne en plus pour 1999). Le calcul de l'indice de texture à cette résolution se révélant peu probant pour discriminer le bâti, a été abandonné. Les classifications supervisées sont réalisées sur la base des néo-canaux (IB, NDVI, ACP1) calculés à chaque date. Les surfaces agricoles sont ainsi mieux discriminées que sur la carte extraite de l'image unique de 2008. Les cultures (d'hiver ou d'été) d'une superficie de 6,5 % pour 1990 et 3,6 % pour 1999 sont distinguées des prairies (occupant 43,9 % en 1990 et 43,1 % en 1999). A cette résolution spatiale, il n'a pas été possible de séparer les classes « bâti » et « voirie ». Ces deux thèmes sont associés dans une même classe « surfaces artificielles » dont la superficie est de 25,3 % en 1990 et 29,4 % en 1999 (figure 10).

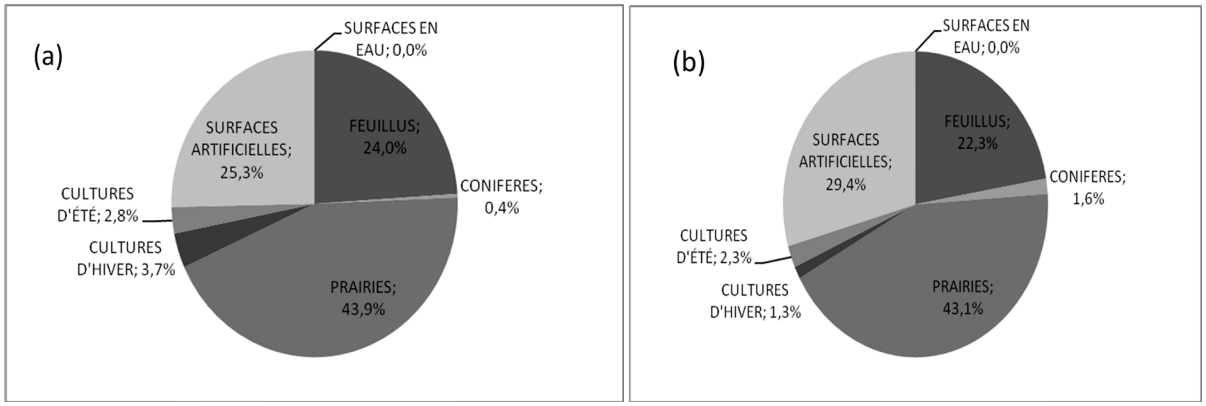


Figure 10 : Part de chaque classe dans l'occupation des sols en 1990 (a) et en 1999 (b). *Repartition of the various land cover classes in 1990 (a) and 1999 (b).*

Des différences surfaciques des classes sont à souligner entre les trois dates : par exemple, la classe « feuillus » passe de 22 % en 1990 à 24 % en 1999 et 33 % en 2008. Ces différences sont principalement liées aux changements de résolution des images. Le faible pourcentage de feuillus dans les années 90 est lié à l'importance des pixels mixtes (Skupinski *et al.,* 2009). Ces 'mixels' caractérisent, d'une part, les lisières des parcelles agricoles (quand la végétation arborée délimite les surfaces agricoles), et d'autre part, les zones urbaines où les pixels mixtes l'emportent sur les pixels homogènes. La résolution à 2,5 m de l'image de 2008 permet d'extraire ces éléments de végétation arborée peu étendus dans la partie urbaine (bâti peu dense, boulevards arborés, parcs) et lorsqu'elle se juxtapose à la végétation basse (haies ou arbres dans les champs).

Pour l'étude de l'évolution de l'occupation des sols entre 1990 et 2008, ces différences surfaciques des classes ont été corrigées par une reclassification, des images classées de 1990 et de 1999, par arbre décisionnel.

3.4. Evolution de l'occupation des sols de 1990 à 2008

La comparaison des cartes d'occupation des sols des années 90 avec la carte de 2008 est biaisée par les différentes résolutions spatiale et temporelle (tableau 1) et rend difficile le suivi de chaque classe. Pour la connaissance du fonctionnement hydrologique de ces surfaces, nous avons besoin de deux grands types d'informations : la nature perméable ou imperméable des surfaces et la nature des couverts végétaux. Nous regroupons les différentes classes en quatre grands thèmes : surfaces en eau, surfaces artificielles, végétation arborée et végétation non arborée. Dans ce travail, nous présentons essentiellement l'évolution des surfaces artificielles, que nous souhaitons relier à l'évolution des crues importantes sur le bassin de l'Yzeron. Notre démarche pour étudier l'évolution de ces surfaces artificielles repose sur une classification par arbre décisionnel des trois cartes d'occupation des sols réalisées à chaque date. La carte de référence est celle de 2008 car sa résolution fine a permis de mieux individualiser les composants de petite taille des milieux artificialisés. Nous émettons l'hypothèse que les espaces artificialisés en 1990 le sont également en 1999 et 2008. Il est peu probable qu'une surface agricole succède à une surface bâtie (figure 11).

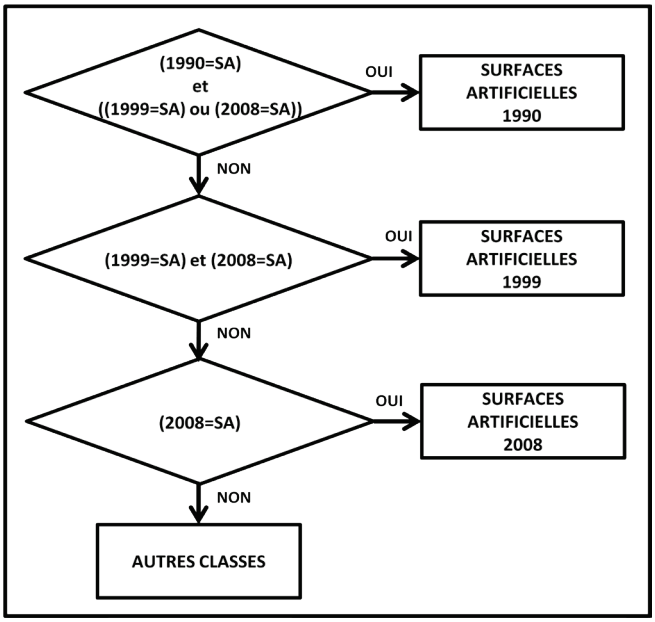


Figure 11 : Reclassification interannuelle des surfaces artificielles (SA) par arbre décisionnel : application à 1990, 1999 et 2008. *Use of a decision-tree for the reclassification of artificial surfaces (SA) from 1990, 1999 and 2008.*

Cette classification multidate des surfaces artificielles est basée sur une comparaison spatiale (pixel à pixel) des résultats des trois cartes d'occupation des sols (1990, 1999 et 2008). Un pixel est considéré comme étant une surface artificielle en 1990, s'il est identifié dans cette classe durant les trois années ou, au minimum, durant au moins deux (1990 et 1999 ou 1990 et 2008) ; il sera classé comme surface artificielle en 1999 s'il est défini dans cette classe en 1999 et 2008 et enfin, comme surface artificielle en 2008, s'il est présent uniquement à cette date. Les autres thèmes d'occupation des sols sont regroupés dans « autres classes ».

D'une manière générale, cette reclassification des surfaces artificielles a permis une rectification des pixels mal classés dans les images de 1990 et 1999 à 20 m et 10 m de résolution. La figure 12, comparant les superficies des surfaces artificielles par valeurs brutes ou par arbre décisionnel, met en évidence les erreurs liées aux changements de résolution spatiale. Les calculs de superficie bruts présentent une évolution interannuelle incohérente,

avec des augmentations et des baisses désordonnées. La superficie des surfaces artificielles supposée de 25,3 % en 1990 passerait à 29,4 % en 1999 pour redescendre à 22,6 % en 2008.

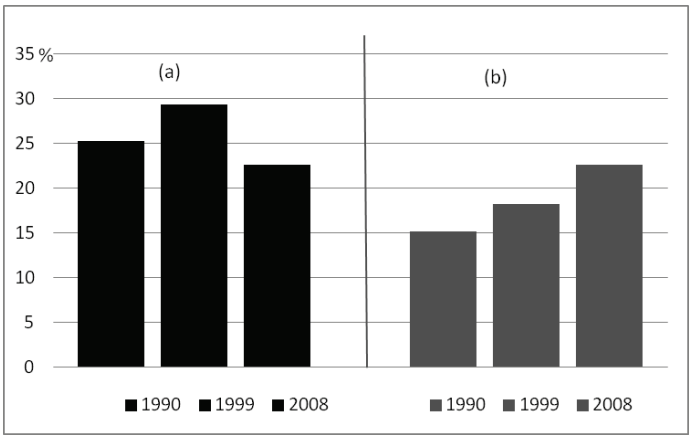


Figure 12 : Superficie des surfaces artificielles : a) valeurs brutes en 1990, 1999 et 2008 ; b) valeurs reclassées par arbre décisionnel. *Artificial surfaces areas: a) rough values in 1190, 1999 and 2008; b) reclassified values using a decision tree.*

Après reclassement, les superficies des surfaces artificielles ont une évolution croissante, en cohérence avec la réalité : les valeurs sont ramenées à 15,2 % en 1990, 18,2 % en 1999 et 22,6 % en 2008. Leur augmentation de 3 % pour la première décennie et de 4,4 % pour la deuxième, s'est faite essentiellement au détriment des surfaces agricoles : presque 8 % des surfaces couvertes par la végétation basse sont devenues des surfaces artificielles entre 1990 et 2008 (figure 13).

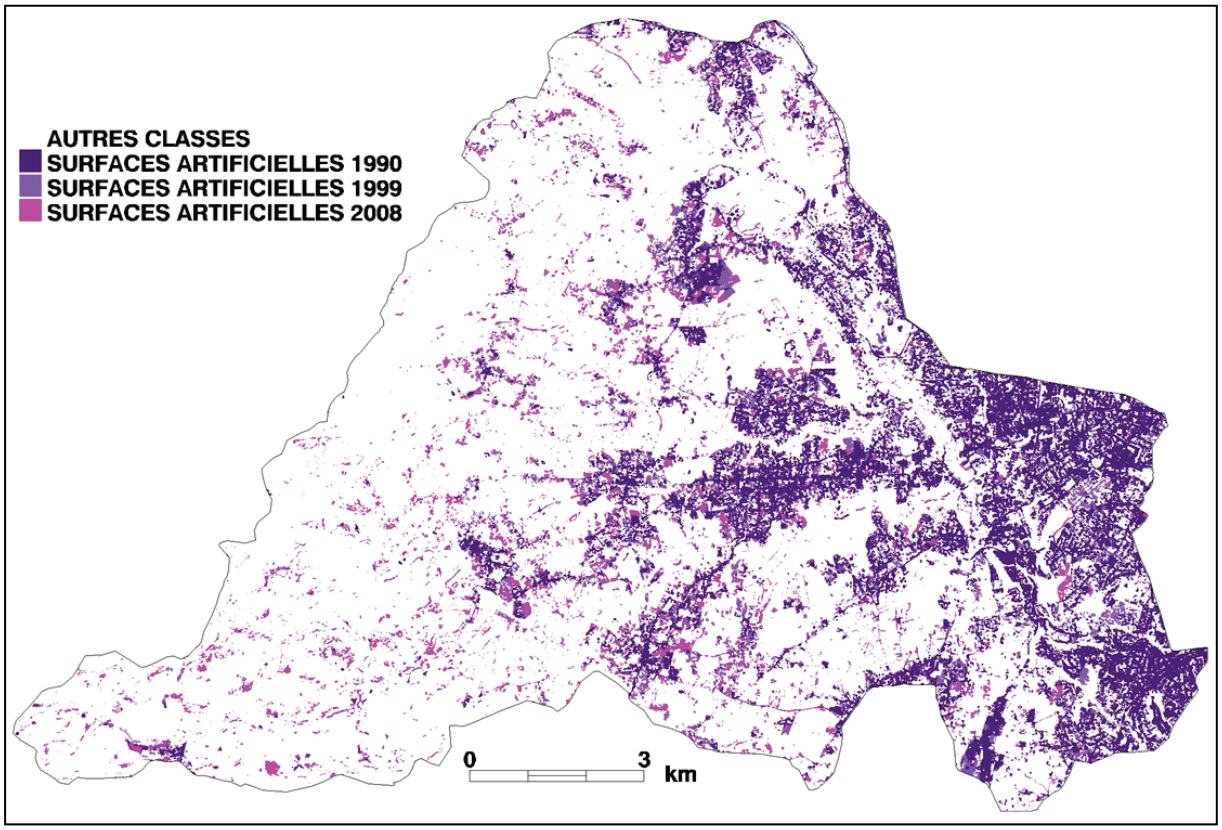


Figure 13 : Carte d'évolution spatiale et temporelle des surfaces artificielles pour les trois séries temporelles d'images SPOT. *Map of the spatial and temporal evolution of artificial surfaces for the three SPOT images decades.*

Cette augmentation des surfaces artificielles est étroitement corrélée à l'évolution de la population du bassin versant qui a doublée entre 1962 et 2006, passant de 75 600 habitants à 164 000 habitants (données INSEE de 2006). Pour la période 1990-2006, qui nous intéresse plus particulièrement, on compte 20 000 habitants en plus sur le bassin versant de l'Yzeron. Cet accroissement de la population a concerné, en premier lieu, les communes limitrophes du Grand Lyon comme Oullins et Sainte-Foy-les-Lyon. Dans ces communes, la population s'est essentiellement accrue entre 1960 et 1980 avant de connaître une phase de stabilisation. Cette dernière phase est suivie, parfois, d'une décroissance, comme c'est le cas d'Oullins qui a perdu près de 2000 habitants entre 1975 et 2006 (figure 14).

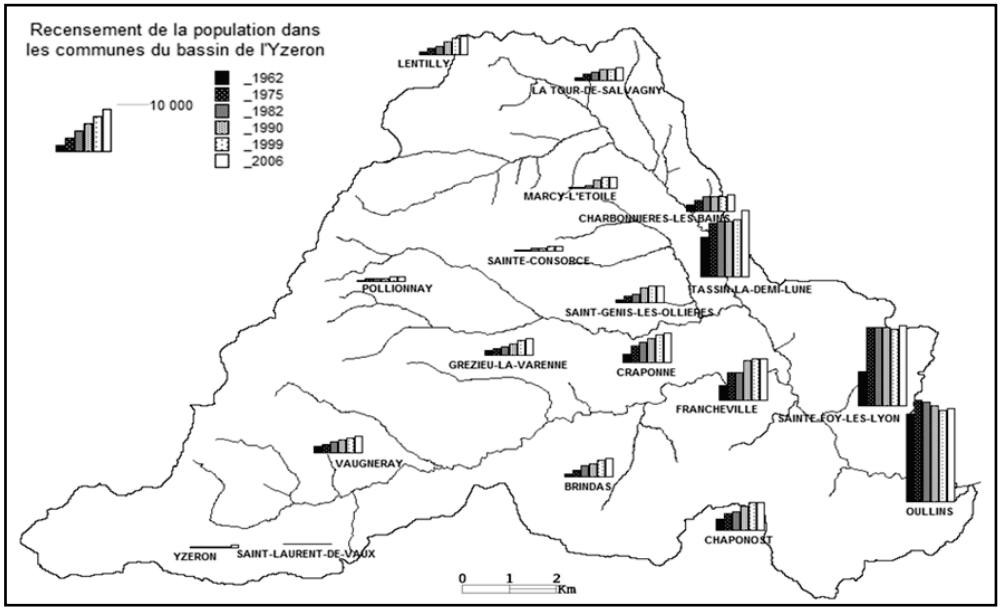


Figure 14 : Evolution de la population des communes du bassin versant (1962-2006) ; source : données INSEE.
Evolution of the population in the catchment cities (1962-2006); source: INSEE data.

Les communes de la 2ème couronne de Lyon, peu exposées à l'accroissement démographique entre 1960 et 1980, ont été plus touchées après 1980. La population des communes de Chaponost, Francheville ou Saint-Génis-Les-Ollières a significativement augmenté ces dernières décennies, et certaines d'entre elles, comme Marcy-L'Etoile, ont même vu leur population quadrupler entre 1975 et 2006. La population des communes localisées à l'amont du bassin Yzeron, en dehors de quelques unes comme Vaugneray et Lentilly marquées par un accroissement après 1990, reste relativement stable.

L'accroissement de la population, dans ce bassin périurbain, a entraîné de fortes modifications de l'occupation des sols. Ces changements, se manifestent par un accroissement des surfaces artificialisées, plus fortement imperméables, ce qui peut accroître les écoulements rapides et les inondations. Les crues sont produites d'une part par des épisodes pluvieux durables et d'autre part, par des épisodes intenses et de courte durée, comme nous l'illustrons dans la partie suivante à l'aide de deux exemples représentatifs.

4. Analyse détaillée de deux épisodes pluviométriques

Dans cette partie, nous présentons deux épisodes pluvieux, ayant conduit à des débits importants sur le bassin de l'Yzeron, mais qui sont de nature différente. Le premier épisode (le 2 décembre 2003) est un épisode hivernal, avec un cumul pluviométrique important sur plusieurs jours, qui donne lieu à des inondations à l'aval (commune d'Oullins), plutôt représentatif d'une réponse des parties rurales du bassin. Le second épisode (le 9 août 2009)

est un épisode d'été, correspondant à des conditions sèches, de courte durée mais avec des intensités de pluie importantes, ayant conduit majoritairement à une réponse des zones urbanisées.

4.1. L'épisode pluvieux du 02 décembre 2003

C'est l'épisode majeur sur la période de mesures des débits sur le bassin de l'Yzeron. Il a conduit à un débit de pointe de 53 $m^3 s^{-1}$ à la station de Craponne et de 95 $m^3 s^{-1}$ à Taffignon. Les périodes de retour de ces débits instantanés sont estimés à près de 60 ans par l'analyse QdF mentionnée plus haut. Cet épisode est survenu après un été aux caractéristiques pluvio-thermiques exceptionnelles. La faiblesse des précipitations et les températures au dessus de la normale (voir caniculaire pour la première quinzaine d'août) ont favorisé l'installation d'une sécheresse pédologique, en France, dès le mois de mars (Bessemoulin, 2004). Cette sécheresse s'est prolongée au début de l'automne et le total pluviométrique de septembre est de 20 à 30 mm en dessous de la normale (1970-2000) pour les stations de l'Yzeron. Quant au dernier trimestre 2003, si le total pluviométrique correspond à la normale, il est largement au dessus pour octobre et surtout pour décembre (figure 15). Le cumul pluviométrique de ce dernier mois est 2,5 fois la normale (139 mm, contre 55 mm) à Bron (station synoptique de référence), mais 4 fois supérieur à la normale (~ 160 mm, contre 40 mm) dans les postes pluviométriques du bassin versant.

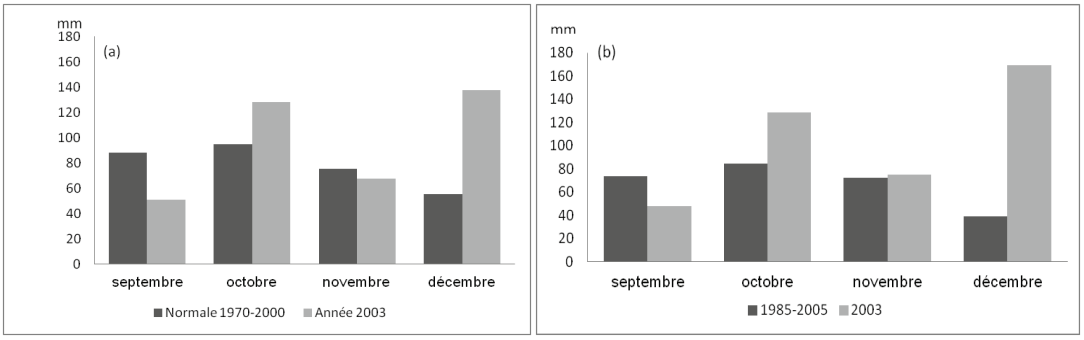


Figure 15 : Précipitations moyennes mensuelles à Bron (a) et Pressin (b). *Monthly average of rainfall at Bron (a) and Pressin (b).*

C'est donc sur un sol saturé que l'épisode pluvio-orageux intense des 2-3 décembre s'est abattu ; 85 % des précipitations totales de décembre ont été enregistrés ces deux journées et le cumul de ces événements a dépassé 150 mm (figure 16).

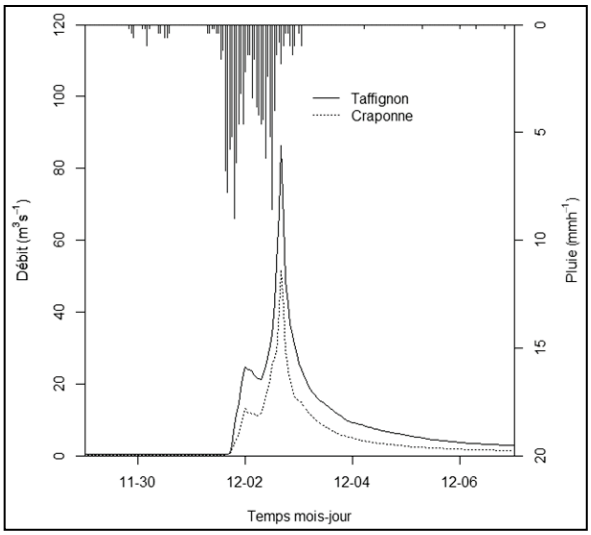


Figure 16 : Pluie horaire à la station de Grézieu et débits horaires aux stations de Craponne et Taffignon pour l'épisode du 02/12/2003. *Hourly rainfall at the Grézieu rain gauge and hourly discharges at the Craponne and Taffignon gauges for the 2003/12/02 event.*

L'intensité de cet épisode est liée à une perturbation découlant d'une rencontre d'une masse d'air froid d'altitude et de l'air chaud et humide provenant de la Méditerranée (figure 17). Si ce genre de perturbation est classique au Sud-Est de la France, en cette période de l'année, l'extension septentrionale de son intensité est inhabituelle. Les pluies ont concerné une bonne partie du bassin versant du Rhône et de ses affluents, remontant jusqu'au département de la Saône et de la Loire. Le cumul pour les deux journées a dépassé 100 mm en plaine, 300 mm en altitude, pour approcher 400 mm pour les stations les plus exposées de l'Ardèche. Ces pluies ont donc engendré des crues remarquables au niveau du Rhône et de ses affluents, avec des périodes de retour particulièrement exceptionnelles allant jusqu'à 200 ans pour les parties les plus septentrionales (Taboulot *et al.*, 2004).

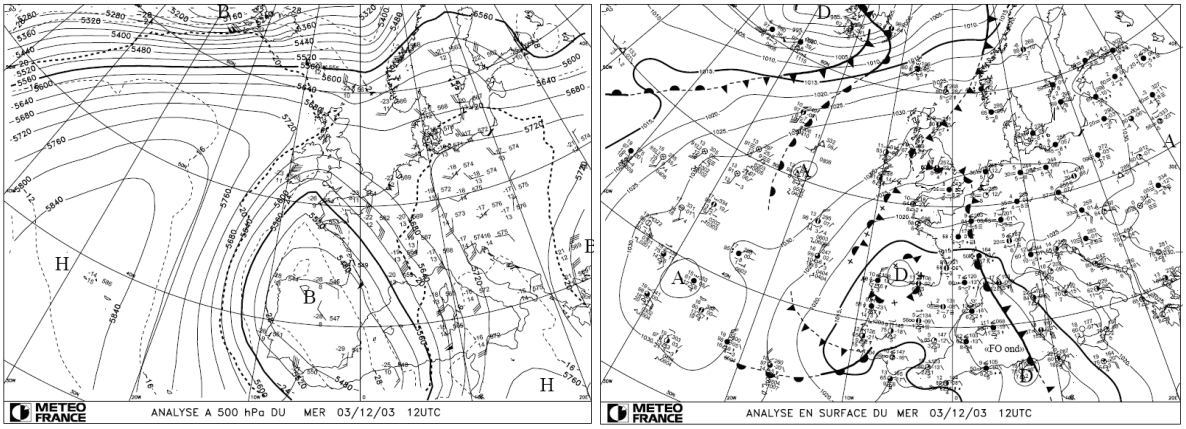


Figure 17 : Pression à 500 hPa (à gauche) et en surface (à droite) de la journée du 3 décembre 2003 (source : Météo-France). *The 500 hPa pressure (left) and surface pressure (right) on 03.12.2003 (source: Météo-France).*

Cependant, les débordements de l'Yzeron ne sont pas les seules causes des inondations. L'augmentation de l'urbanisation entraîne inévitablement un accroissement de l'imperméabilisation des sols qui peut conduire à des inondations liées au ruissellement. Dans l'étude de cas suivante, les inondations ne sont pas liées à un débordement des cours d'eau, mais à une saturation du réseau d'évacuation des eaux pluviales. A la différence des inondations par débordement de cours d'eau liées à des précipitations dont la hauteur d'eau cumulée est remarquable (2-3 décembre 2003), ces inondations par ruissellement sont provoquées par des averses de forte intensité, tel le cas du 9 août 2009.

4.2. L'épisode pluvieux intense du 09 août 2009

Sur le bassin versant de l'Yzeron, les pluies les plus intenses se concentrent majoritairement de juin à août (Renard, 2010). L'épisode du 9 août 2009 est un épisode de ce type, avec des cumuls journaliers plus au moins importants, allant de 1 à 28 mm. Ces précipitations sont le résultat d'une situation aérologique classique de la saison : une situation de marais barométrique au sol et un léger flux de SW en altitude, devançant un talweg peu développé en latitude (figure 18). Ces précipitations orageuses durent environ 1h30, avec des intensités mesurées à la station de Grézieu atteignant 92 mm h^{-1} en 6 mn, et 64 mm h^{-1} à la station de la Croix du Ban. Les cumuls sur ces deux stations sont respectivement de 21,6 et 31 mm. En revanche, les cumuls aux quatre stations du Grand Lyon sont inférieurs à 10 mm. Les débits de pointe enregistrés aux stations de Craponne et Taffignon sont respectivement de 1,95 et 1,51 m^3 s^{-1}, donc plus faibles à l'aval qu'à l'amont, même si les débits maxima moyens en une heure sont plus élevés à Taffignon (1,48 m^3 s^{-1}) qu'à Craponne (1,24 m^3 s^{-1}) comme on le voit sur la figure 19. Ceci peut être dû à la variabilité de la pluie, l'orage ayant vraisemblablement affecté surtout la partie ouest du bassin.

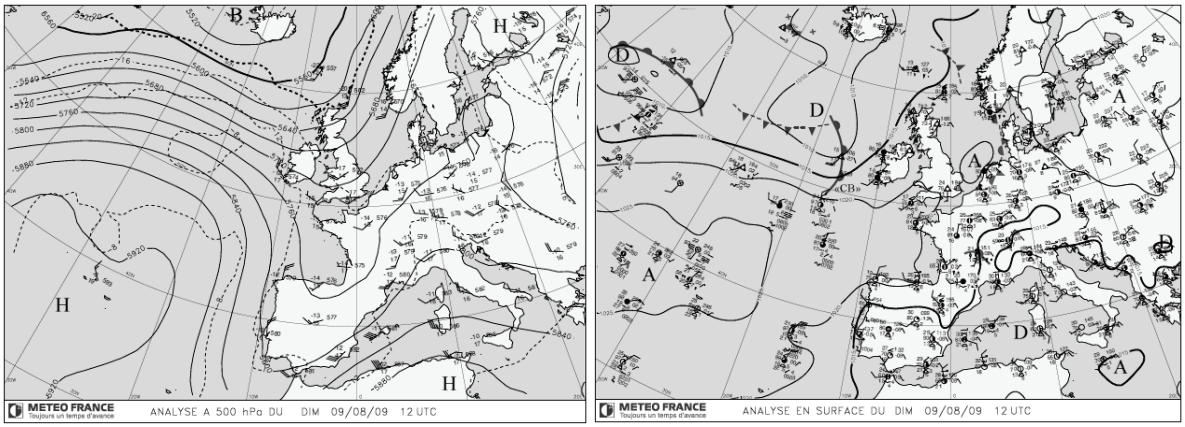


Figure 18 : Pression à 500 hPa (à gauche) et en surface (à droite) de la journée du 9 août 2009 (source : Météo-France). *The 500 hPa pressure (left) and surface pressure (right) on 08.09.2009 (source: Météo-France).*

Les mesures effectuées sur les stations hydrométriques du ruisseau du Mercier (station de Pollionnay, 6,7 km^2) et sur la rivière Chaudanne (stations Amont_DO, 2,1 km^2 et La Léchère, 4,1 km^2) sont très révélatrices de l'impact de l'occupation des sols durant ce type d'événement. Les débits à la station de Pollionnay, où l'occupation des sols est dominée par des forêts et des cultures, ne bougent pas et la rivière reste à sec. La station Amont_DO, située à l'amont de la zone urbaine sur le bassin de la Chaudanne, dominée par des cultures, voit son débit augmenter jusqu'à 0,58 m^3 s^{-1} (soit 0,28 m^3 s^{-1} km^{-2}), alors que la station située à l'aval de la zone urbaine de Grézieu (station de La Léchère) enregistre un débit maximum de 2,17 m^3 s^{-1} (soit 0,52 m^3 s^{-1} km^2). Le déversoir d'orage suivi entre ces deux stations déverse durant une dizaine de minutes, ce qui montre qu'il y a eu saturation du réseau d'assainissement unitaire. Sur ces zones, l'impact de la variabilité spatiale de la pluie, combiné à la variabilité spatiale de l'occupation des sols devient prépondérant, notamment sur de petites échelles.

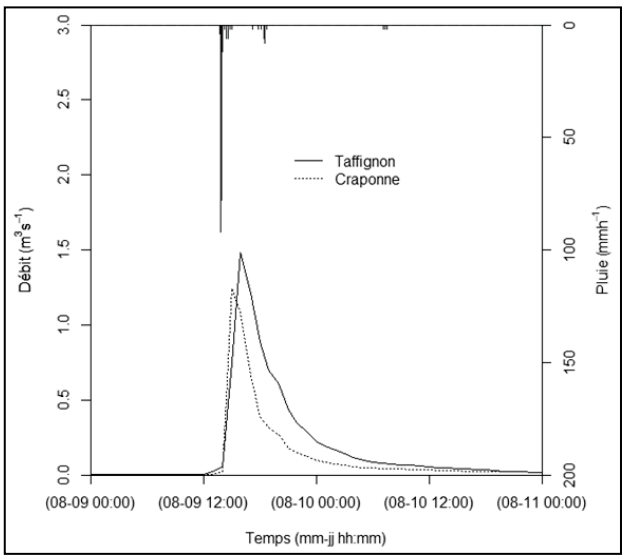


Figure 19 : Pluie en 6 minutes à la station de Grézieu et débits horaires aux stations de Craponne et Taffignon lors de l'épisode du 09/08/2009. *The 6 minutes rainfall rates at the the Grézieu rain gauge and hourly discharge at the Craponne and Taffignon gauges, for the 2009/08/09 event.*

Conclusion et perspectives

L'étude de l'évolution des crues entre 1970 et 2010 dans le bassin versant de l'Yzeron a montré une augmentation de leur fréquence pour certaines de leurs caractéristiques. Cette augmentation n'est pas expliquée par une évolution des précipitations journalières ou de leur cumul sur 3, 5, 10 et 15 jours. Pour aller plus loin, nous avons cherché un lien entre modification du régime des crues et évolution de l'occupation des sols, notamment

l'accroissement des surfaces artificielles. Cette dernière est documentée par l'analyse de trois cartes d'occupation des sols en 1990, 1999 et 2008, dérivées d'images satellites SPOT. Deux types d'épisodes caractéristiques de la zone sont distingués. Le premier correspond à des pluies intenses qui conduisent à des ruissellements sur les zones imperméables et sont donc fortement liés à l'occupation des sols. L'exemple du 9 août 2009 l'atteste avec des réponses différentes entre les débits des bassins à dominance rurale (forêt et surfaces agricoles) et ceux des bassins urbains. Pendant que les premiers restaient stables, les seconds ont enregistré des augmentations. Le deuxième type d'épisodes correspond à des épisodes longs, générant des cumuls importants. L'épisode pluvieux et durable du 2-3 décembre 2003 le révèle bien. Les inondations durant cet épisode, touchant les bassins ruraux et urbains, soulignent une responsabilité partagée entre facteurs naturels et anthropiques. L'augmentation des surfaces artificielles contribuent à l'augmentation des inondations, mais son implication est à nuancer, tant les conditions physiques peuvent aussi contribuer à des débordements rapides (sols et sous-sols peu perméables, pentes de plus de 10 % pour la moitié du bassin versant). Cependant, si la responsabilité de cette évolution est partagée entre facteurs naturels et anthropiques, le rôle de ce dernier paramètre est important dans l'augmentation de la vulnérabilité (Chocat, 1997).

Les cartes d'occupation des sols produites dans cette étude ont aussi été utilisées en entrée d'un modèle hydrologique distribué pour évaluer l'impact des modifications d'occupation des sols sur le régime hydrologique et les composantes des écoulements (Branger *et al.*, 2012). Les résultats montrent que l'utilisation des cartes de 1990, 1999 ou 2008 conduit à des modifications des composantes du débit, avec un accroissement du ruissellement rapide. Ce premier travail s'est uniquement intéressé au régime mensuel et annuel, le pas de temps de la modélisation (journalier) étant inadapté à l'étude des crues. Les travaux se poursuivent avec une modélisation à pas de temps plus fin, qui devrait permettre de mieux mettre en évidence l'impact des modifications de l'occupation des sols sur le régime des crues.

L'analyse présentée dans cet article devra encore être enrichie par une analyse de l'évolution des précipitations à des pas de temps inférieurs à la journée (intensité, durée des épisodes de pluie). L'analyse conjointe des crues enregistrées et des caractéristiques des pluies pourrait permettre d'aboutir à une typologie des épisodes et d'identifier les crues pour lesquelles l'intensité des pluies est déterminante et celles pour lesquelles la saturation des sols peut jouer un rôle prépondérant.

Remerciements : Le projet AVuPUR a été soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) via le contrat n° ANR-07-VULN-01. Les images SPOT de 1990 à 2008 ont été acquises dans le cadre d'un programme ISIS, Copyright CNES, Distribution SPOTimage S.A. Météo-France, Irstea et la Direction de l'eau du Grand Lyon ont mis à notre disposition les données pluviométriques. La DREAL Rhône-Alpes a fourni les données hydrométriques des stations de Craponne et Taffignon. Le bassin de l'Yzeron est un des sites d'observations de l'OTHU.

Bibliographie

BESSEMOULIN P., BOURDETTE N., COURTIER P. et MANACH J., 2004 : La canicule d'août 2003 en France et en Europe. *La Météorologie,* 46, 25-33.

BRANGER F., KERMADI S., KRAUSE P., LABBAS M., JACQUEMINET C., MICHEL K., BRAUD I., KRALISCH S., 2012 : *Investigating the impact of two decades of urbanization on the water balance of the Yzeron peri-urban catchment, France*. International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2012, Managing Resources of a

Limited Planet, Sixth Biennial Meeting, Leipzig, Germany, R. Seppelt, A.A. Voinov, S. Lange, D. Bankamp (Eds.), http://www.iemss.org/society/index.php/iemss-2012-proceedings, 8 pages.

BRAUD I., BREIL P., THOLLET F., LAGOUY M., BRANGER F., JACQUEMINET C., KERMADI S., MICHEL K., 2013 : Evidence of the impact of urbanization on the hydrological regime of a medium-sized periurban catchment in France. *Journal of Hydrology*, 485, 5-23, 10.1016/j.jhydrol.2012.04.049.

BRAUD I., CHANCIBAULT K., DEBIONNE S., LIPEME KOUY G., SARRAZIN B., JACQUEMINET C., ANDRIEU H., BEAL D., BOCHER E., BOUTAGHANE H., BRANGER F., BREIL P., CHOCAT B., COMBY J., DEHOTIN J., DRAMAIS G., FURUSHO C., GAGNAGE M., GONZALEZ-SOSA E., GROSPRETRE L., HONEGGER A., JANKOWFSKY S., JOLIVEAU T., KERMADI S., LAGOUY M., LEBLOIS E., MARTIN J.Y., MAZAGOL P.O., MICHEL K., MOLINES N., MOSINI M.L., PUECH C., RENARD F., RODRIGUEZ F., SCHMITT L., THOLLET F., VIALLET P., 2010 : *The AVuPUR project (Assessing the Vulnerabiliy of Peri-Urbans Rivers): experimental set up, modelling strategy and first results*. Proceedings of the 7th Novatech 2010 *Conference*, June 28-July 1 2010, Lyon, France, 10 pages, http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00527564_v1/.

BURNS D., VITVAR T., MCDONNELL J., HASSETT J., DUNCAN J., KENDALL C., 2005 : Effects of suburban development on runoff generation in the Croton River basin, New York, USA. *Journal of Hydrology*, 311 (1-4), 266-281.

CHOCAT B., 1997 : Le rôle possible de l'urbanisation dans l'aggravation du risque d'inondation : l'exemple de l'Yzeron à Lyon. *Revue de géographie de Lyon,* 72-4, 273-280.

CHORMANSKI J., VAN DE VOORDE T., DE ROECK T., BATELAAN O., CANTERS F., 2008 : Improving Distributed Runoff Prediction in Urbanized Catchments with Remote Sensing based Estimates of Impervious Surface Cover. *Sensors*, 8, 910-932.

CONGALTON R.G. et GREEN K., 1999 : Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices. Lewis publishers.

DEZETTER A., DELCLAUX F., LECONTE J., SERVAT E., MAI I. et PARTUREL J. E., 2003 : Prise en compte de la végétation à l'aide de données NOAA-AVHRR dans la modélisation pluie débit en Afrique de l'Ouest. *IAHS Publications*, 278, 144-150.

DUBUCQ M., 1986 : Télédétection spatiale et érosion des sols, Etude bibliographique. *Cahiers de l'ORSTOM*, Série Pédologie, XXII, 2, 247-258.

FAO, 1998 : *Crop Evaporation - Guidelines for computing crop water requirements*. N°56, FAO, Rome.

FLUGEL W.-A., 1995 : Delineating hydrological response units by geographical information system analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the River Bröl – Germany. *Hydrological Processes*, 9 (3-4), 423-436.

FORTIN J.-P., TURCOTTE R., MASSICOTTE S., MOUSSA R., FITZBACK J., VILLENEUVE J.-P., 2001 : Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. I. Description of model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6 (2), 91-99.

GALEA G. et PRUDHOMME C., 1994 : Modèles débit-durée-fréquence et conceptualisation d'un hydrogramme de crue synthétique : validation sur le BVRE de Draix. *Hydrologie Continentale*, 9 (2), 139-151.

GNOUMA R., 2006 : *Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques : application au bassin versant de l'Yzeron*. Thèse

de doctorat, INSA Lyon, 325 pages. Disponible à http://theses-search.insa-lyon.fr/thematic-search.html?menuKey=theses_insa&submenuKey=authors&id=gnouma_raouf.

HARALICK R. M., SHANMUGAM K. et DINSTEI I. 1973 : Textural features for image classification. IEEE Transactions on Systems. *Man and Cybernetics*, SMC-3, 6, 610-621.

IFTENE T. et ABDELMOUNAINE S., 2004 : Comparaison entre la matrice de cooccurence et la transformation en ondelettes pour la classication texturale des images HRV de SPOT, *Télédétection,* 4, 1, 39-49.

JACOBSON C. R., 2011 : Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: A review. *Journal of Environmental Management*, 92 (6), 1438-1448.

JACQUEMINET C., KERMADI S., MICHEL K., CHOCAT B., 2011 : Comment cartographier l'occupation des sols et son évolution pour le suivi des phénomènes hydrologiques ? *Fiche technique OTHU,* n° 24, 4 pages. http://www.graie.org/othu/publi3_FTech.htm.

JACQUEMINET C., KERMADI S., MICHEL K., BEAL D., BRANGER F., JANKOWSKY S., BRAUD I., 2013 : Land cover mapping using aerial and VHR satellite images for distributed hydrological modelling of periurban catchments : application to the Yzeron catchment (Lyon, France). *Journal of Hydrology*, 485, 68-83, http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.028.

JANKOWFSKY S., BRANGER F., BRAUD I., GIRONAS J., RODRIGUEZ F., 2012 : Comparison of catchment and network delineation approaches in complex suburban environments. Application to the Chaudanne catchment, France. *Hydrological Processes*, in press, doi: 10.1002/hyp.9506.

JAVELLE P., GESILLON J.-M., GALEA G., 1999 : Modélisation des courbes débit- durée-fréquence en crues et invariance d'échelle. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences – Séries IIA - Earth and Planetary Sciences*, 329 (1), 39-4.

KERMADI, S., BRAUD, I., JACQUEMINET, C., MICHEL, K., BRANGER, F., 2011 : Evolution de la pluviométrie dans le bassin péri-urbain de l'Yzeron (Ouest Lyonnais) depuis les années 1970 et caractérisation de l'imperméabilisation. *Publications de l'Association Internationale de climatologie*, 24, *351-356.*

KERMADI S., BRAUD I, JACQUEMINET C., MICHEL K., BRANGER F., BREIL P., 2012 : Evolution du régime hydrologique d'un bassin-versant péri-urbain : l'Yseron (ouest lyonnais). Complémentarité de l'analyse des données, de la modélisation et de la cartographie de l'occupation des sols. *Publications de l'Association Internationale de climatologie*, 25, 23-38.

LAFONT M., VIVER A., NOGUEIRA S., NAMOUR P., BREIL P., 2006 : Surface and hyporheic oligochaete assemblages in a French suburban stream. *Hydrobiologia*, 564 (1), 183-193.

MANN H. B., WHITNEY, D. R., 1947 : On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *Ann. Math. Statist*., 18 (1), 50-60.

MEIJA A. I., MOGLEN G. E., 2010 : Spatial distribution of imperviousness and the space-time variability of rainfall, runoff generation, and routing. *Water Resources research*, 46, W07509, doi:10.1029/2009WR008568.

OTHU, 2012 : *http://www.graie.org/othu/*. Consulté le 06/12/2012.

PETTITT A. N., 1979 : A non parametric approach to the change point problem. *Applied Statistics*, 28, 126-135.

PRICE K., 2011 : Effects of watershed topography, soils, land use, and climate on baseflow hydrology in humid regions: A review. *Progress in Physical Geography*, 35, 465-492, doi:10.1177/0309133311402714.

QUINTANA-SEGUI P., LE MOGNE P., DURAND Y., MARTIN E., HABETS F., BAILLON M., CANELLAS C., FRANCHISTEGUY L. et MOREL, 2008 : Analysis of near-surface atmospheric variables: validation of the SAFRAN analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47, 92-107.

RADOJEVIC B., BREIL P. et CHOCAT B., 2010 : Assessing impact of global change on flood regimes. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 2 (2), 167-179.

RENARD F., 2010 : *Le risque pluvial en milieu urbain. De la caractérisation de l'aléa à l'évaluation de la vulnérabilité : le cas du Grand Lyon*. Thèse de doctorat, Université Lyon 3, 528 pages.

RENARD B., LANG M., BOIS P., DUPEYRAT A., MESTRE O., NIEL H., GAILHARD J., LAURENT C., NEPPEL L. et SAUQUET E., 2006 : Evolution des extrêmes hydrométriques en France à partir de données observées. *La Houille Blanche - Revue Internationale de l'eau*, 6, 48-54.

ROBIN M., 2002 : *Télédétection, Des satellites au SIG. Une analyse complète du processus création d'un type essentiel d'information géographique*. Nathan Université, 318 pages.

SAUQUET E. et RIBATET M., 2004 : *Caractérisation du régime des hautes eaux en débit-durée-fréquence. Application en région Rhône-Alpes*. Cemagref, Lyon, novembre 2004, 111 pages.

SCHMITT L., VALETTE L., VALIN K., PIEGAY H., HALLOT E., 2004 : Proposition d'une méthode de typologie hydro-géomorphologique des cours d'eau et test sur un sous-bassin du Rhône (Bassin de l'Yzeron). *Mosella*, XXIX(3-4), 323-340.

SIRA, 2010 : *http://www.rhone-alpes.chambagri.fr/sira/*. Consulté le 06/12/2012.

SKUPINSKI G., BINH TRAN D. et WEBER C., 2009 : Les images satellites SPOT multi-dates et la métrique spatiale dans l'étude du changement urbain et suburbain – Le cas de la basse vallée de la Bruche (Bas-Rhin, France). *CyberGeo: European Journal of Geography*, http://cybergeo.revues.org/index21995.html.

TABOULOT S., PELLETIER R. MAGNOULOUX A., 2004 : *Fortes précipitations de décembre 2003 et conséquences sur les bassins du Rhône*. Rapport de Météo-France, 19 pages.

TUCKER C. J., 1979 : Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 127-150.

VIDAL J.-P., MARTIN E., FRANCHISTEGUY L., BAILLON M., SOUBEYROUX J.-M., 2010 : A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the SAFRAN system. *International Journal of Climatology*, 30 (11), 1627-1644.

WEGEHENKEL M., HEINRICH U., UHLEMANN S., DUNGER V., MATSCHULLAT J., 2006 : The impact of different spatial land cover data sets on the outputs of a hydrological model : a modelling exercise in the Ucker catchment, North-East Germany. *Physics and Chemistry of the Earth*, 31 (17), 1075-1088.

WILLEMS P., 2009 : A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall-runoff models. *Environmental Modelling & Software*, 24 (3), 311-321.

ZOU Y., WANG Y.Q., 2008 : Remote sensing of impervious surface area for improved hydrologic modeling. The International Archives of the Photogrammetry. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII, Part B8, 73-78.