



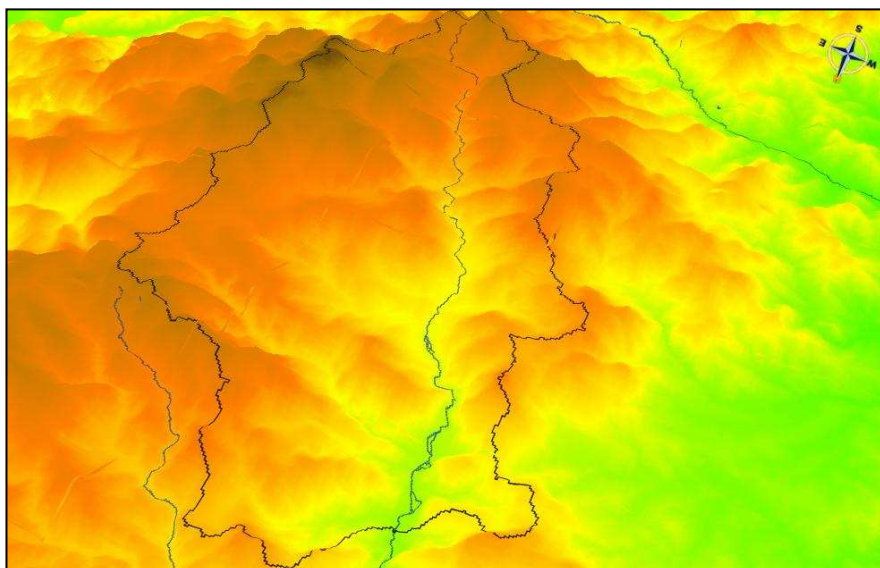
MASTER
Espace Rural & Environnement



MEMOIRE DE STAGE

Impact du changement climatique sur la ressource en eau en Bourgogne

Analyse du couplage entre une modélisation climatique
régionale distribuée et une modélisation pluie-débit globale
(GR4J)



Bassin versant de l'Yonne à Corancy

Maître de stage: **AMIOTTE-SUCHET Philippe**

Tuteur pédagogique: **RICHARD Yves**

Etienne BRULEBOIS
Promotion 2012-2013



Université de Bourgogne, UFR SVTE, 6 Bd Gabriel, F-21000 DIJON
Tél. 03 80 39 63 56, Fax. 03 80 39 63 87, umr6282@u-bourgogne.fr



MASTER
Espace Rural & Environnement



MEMOIRE DE STAGE

Impact du changement climatique sur la ressource en eau en Bourgogne

Analyse du couplage entre une modélisation climatique régionale distribuée et une modélisation pluie-débit globale (GR4J)

Maître de stage: **AMIOTTE-SUCHET Philippe**

Tuteur pédagogique: **RICHARD Yves**

Etienne BRULEBOIS
Promotion 2012-2013



Université de Bourgogne, UFR SVTE, 6 Bd Gabriel, F-21000 DIJON
Tél. 03 80 39 63 56, Fax. 03 80 39 63 87, umr6282@u-bourgogne.fr

« Il est largement prouvé par des relevés d’observations et des projections climatiques que les sources d’eau douce sont vulnérables et auront à souffrir gravement du changement climatique, avec de grandes répercussions sur les sociétés humaines et sur les écosystèmes »

Résumé exécutif du document technique VI du GIEC (2007) :
Le changement climatique et l’eau

“A truly rigorous medical diagnosis which does not employ extrapolation can probably be made only on the basis of a patient’s autopsy...”

Klemeš (1986a), à propos de l’extrapolation des fréquences de débits en hydrologie.

Remerciements

Mes remerciements vont en premier lieu à M. Philippe Amiotte-Suchet, pour m'avoir permis de réaliser ce stage, pour la confiance qu'il m'a accordée, et pour les nombreux conseils lors de discussions aussi intéressantes qu'informelles.

Je remercie également mon tuteur pédagogique durant ce stage, M. Yves Richard, qui a participé à l'amélioration de ce manuscrit et qui a accepté de l'évaluer.

Je n'oublie pas Nicolas Le Moine, dont l'expertise en modélisation hydrologique a permis d'orienter le travail présenté ici.

Cette modélisation hydrologique n'est pas réalisable sans la partie « amont » de la chaîne de modélisation. Pour cela, je remercie toute l'équipe de climatologie, au CRC : Thierry Castel, Yves Richard et Aurélien Rossi, pour la transmission des données et pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux.

Ce stage est porté par l'agence Alterre-Bourgogne, qui réalise un grand travail de gestion de projet. Je remercie donc Mme Hélène Toussaint pour son dynamisme dans cette gestion de projet, sa bonne humeur en toute circonstance, ses comptes-rendus qui m'ont bien été utiles pour m'intégrer au projet.

Le choix des bassins versants à l'étude s'est fait en étroite collaboration avec la DREAL Bourgogne, plus particulièrement avec Marc Philippe. Merci à ce dernier pour son expertise sur chaque bassin versant proposé ainsi que pour la transmission des chroniques de débit.

En parallèle, j'ai pu recevoir l'aide de plusieurs personnes durant ce stage. Je remercie donc Rémi Laffont, qui a su trouver du temps pour quelques séances de programmation, Séverine Fock, stagiaire M1 qui a travaillé sur la représentativité des bassins versants, et Agathe Germain, pour divers petits coups de main sur la forme du rapport.

De manière plus globale, ce stage termine cinq années d'études à l'Université de Bourgogne. Cinq années qui ont été très enrichissantes. Je remercie donc les différentes équipes pédagogiques de la Licence STE, du M1 SE et du M2 ERE pour tous les enseignements dispensés durant ces cinq années.

Un grand merci également aux collègues de promo (depuis 5 ans pour certains), pour les très bons moments partagés (parfois aussi les gal...R !).

Enfin je ne peux clore cette page sans adresser mes remerciements profonds à mes parents qui ont été et sont toujours là pour moi...

Merci à tous !

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
Partie 1 : Contexte de l'étude	2
1.1 <u>Le changement climatique et l'eau</u>	2
1.2 <u>Modélisation hydrologique dans le cadre du changement climatique.....</u>	3
1.3 <u>Enjeu de l'étude</u>	4
Partie 2 : Matériel et méthode.....	5
2.1 <u>Principe de la modélisation climatique.....</u>	5
2.1.1 <i>Climat à l'échelle globale.....</i>	5
2.1.1.1 ARPEGE-Climat et ERA-Interim	5
2.1.1.2 Scénarios d'évolution des émissions de gaz à effet de serre	6
2.1.2 <i>Méthode de désagrégation.....</i>	6
2.1.2.1 Désagrégation statistique et dynamique	6
2.1.2.2 Modèle de circulation régional et emboîtement des domaines.....	7
2.1.3 <i>Validation des simulation climatique</i>	8
2.1.3.1 Données SAFRAN et observations ponctuelles.....	8
2.1.3.2 Comparaisons.....	8
2.1.3.3 Post-Correction	8
2.2 <u>Modélisation hydrologique.....</u>	8
2.2.1 <i>Classification des modèles hydrologiques.....</i>	9
2.2.1.1 La distribution des paramètres.....	9
2.2.1.2 Le degré de compréhension des processus	9
2.2.1.3 La représentation du temps.....	9
2.2.1.4 Le pas de temps	9
2.2.1.5 La modélisation pluie-débit.....	10
2.2.2 <i>Le modèle GR4J.....</i>	10
2.2.2.1 Caractéristiques du modèle	10
2.2.2.2 Structure du modèle GR4J.....	11
2.2.3 <i>Efficacité et incertitude du modèle</i>	12
2.2.3.1 Comment juger de l'efficacité du modèle ?.....	12
2.2.3.2 Sources d'incertitude	13
2.3 <u>Choix opérationnels de la modélisation hydrologique</u>	14
2.3.1 <i>Données utilisées dans le modèle hydrologique.....</i>	14
2.3.1.1 Choix des bassins versants	14
2.3.1.2 Données climatiques en entrée du modèle hydrologique	16
2.3.2 <i>Calibrage-contrôle</i>	17
2.3.2.1 Période de Calibration/contrôle	17
2.3.2.2 Techniques de calibration.....	18
2.3.2.3 Critères de performance	19
2.3.3 <i>Réalisation d'un script sous R.</i>	21
2.3.3.1 Indexation des données.....	21
2.3.3.2 Production et routage.....	21
2.3.3.3 Options de calibration.....	21

Partie 3 : Résultats	22
<u>3.1 Représentativité des bassins versants</u>	22
3.1.1 <i>Contexte naturel de la Bourgogne.....</i>	22
3.1.2 <i>Description des bassins versants.....</i>	22
3.1.2.1 <i>Distribution géographique des bassins versants</i>	22
3.1.2.2 <i>Occupation du sol</i>	24
3.1.2.3 <i>Substratum géologique</i>	24
<u>3.2 Hydroclimatologie de la période 1980-2011 en Bourgogne</u>	27
3.2.1 <i>Écoulements et précipitations annuels par période</i>	27
3.2.1.1 <i>Débit observé et précipitations WRF.....</i>	27
3.2.1.2 <i>Débit observé et précipitations observées</i>	27
3.2.2 <i>Saisonnalité par période.....</i>	28
<u>3.3 Première calibration.....</u>	29
3.3.1 <i>Performance globales du modèle</i>	29
3.3.2 <i>Performance par bassin versant et par période</i>	30
3.3.3 <i>Calibration avec les précipitations observées.....</i>	32
3.3.4 <i>Calibration roulante</i>	33
3.3.5 <i>Première conclusion sur la tentative de couplage hydroclimatique</i>	34
<u>3.4 Influence des précipitations WRF sur la modélisation hydrologique.....</u>	34
3.4.1 <i>Biais quantitatif et biais saisonnier</i>	35
3.4.2 <i>Influence des précipitations sur le régime hydrologique</i>	37
3.4.2.1 <i>Calibrations à partir des précipitations observées et simulées</i>	38
3.4.2.2 <i>Tentative de correction sommaire des précipitations WRF.....</i>	39
3.4.3 <i>Conclusion sur l'influence des précipitations.....</i>	37
<u>3.5 Influence des ETP simulées sur la modélisation hydrologique.....</u>	41
Partie 4 : Discussions.....	42
<u>4.1 Couplage hydroclimatique à l'échelle locale</u>	42
<u>4.2 Possibilité de non stationnarité des données.....</u>	43
<u>4.3 Etude de sensibilité aux erreurs sur les précipitations</u>	44
4.3.1 <i>Sensibilité aux erreurs quantitatives</i>	44
4.3.2 <i>Sensibilité aux erreurs de phasage.....</i>	45
<u>4.4 Incertitudes et limites liées à la modélisation.....</u>	46
<u>4.5 Indicateurs hydrologiques de l'impact du changement climatique.....</u>	46
Conclusion.....	47
Références bibliographiques	48
Annexes	

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Tableaux

Tableau 1: Bornes des paramètres estimées par Perrin et al. (2003)	12
Tableau 2 : Liste des bassins versants HYCCARE-Bourgogne (pool prioritaire).....	15
Tableau 3 : Liste des bassins versants HYCCARE-Bourgogne (pool suppléant).....	15
Tableau 4 : Exemple de calibration/contrôle.....	20
Tableau 5 : Valeurs attendues du critère NS R(Q) sur un large échantillon de bassins versants ...	20
Tableau 6 : Répartition des grands bassins hydrographiques sur la Bourgogne et les bassins versants.....	23
Tableau 7 : Proportion des grands contextes hydrogéologiques sur la Bourgogne et sur les bassins versants.....	26
Tableau 8 : Stations d'observations des pluies par bassin versant.....	27
Tableau 9: Valeur des critères de performance en calibration et en contrôle comparées à celles de Perrin et al.(2003).....	30
Tableau 10 : Critères de performance moyens en contrôle sur la période entière pour la calibration roulante.....	33
Tableau 11: Caractéristiques des cumuls moyens annuels de 5 bassins versants.....	36
Tableau 12 : Résultats des calibrations avec la F.O NS (M) sur le bassin versant de l'Armançon.....	38
Tableau 13 : Résultats des calibrations à partir des précipitations WRF corrigées (critère NSM)	39
Tableau 14: Comparaison des ETP synoptiques et WRF	41
Tableau 15 : Caractéristiques hydroclimatiques avant et après 1988	43

Figures

Figure 1 : Descente d'échelle progressive entre le GCM et le jeu de données finales, d'après David Viner (Climatic Research Unit, East Anglia, UK)	5
Figure 2: Evolution a) du forçage radiatif terrestre et b) des émissions de GES des 4 scénarios RCP du GIEC, (Moss et al., 2010).....	6
Figure 3 : Emboîtement des domaines : a) Domaine 1, résolution de 48km ; b) Domaine 2, résolution de 12km ; c) Domaine 3, résolution de 3km.	7
Figure 4 : Structure du modèle GR4J (Perrin et al., 2003).....	11
Figure 5 : Résumé de la méthode de calibrage/contrôle (Le Moine, 2008)	12
Figure 6: Situation géographique des bassins versants sur la Bourgogne.....	16
Figure 7 : Méthode de « split sampling » (Le Moine, 2008).	18
Figure 8 : Principe de la méthode d'optimisation des paramètres	18
Figure 9: Principe du critère de performance fréquentiel.....	20
Figure 10 : Altitude en Bourgogne et situation géographique des bassins versants.....	23
Figure 11 : Hydrogramme mensuel interannuel de l'ensemble des bassins versants.....	23
Figure 12 : Proportion des principales classes d'occupation du sol en Bourgognes et sur les bassins versants étudiés	24
Figure 13 : Grands domaines géologiques de Bourgogne	25
Figure 14: Découpage des périodes et bassins versants associés	26
Figure 15: Fréquences cumulées tous bassins versants confondus des a) Débits annuels, b) Précipitations annuelles, c) Ratios pluie-débit annuels, issues des précipitations WRF.	27

Figure 16: Fréquences cumulées de 5 bassins versants confondus des a) Débits annuels, b) Précipitations annuelles, c) Ratios pluie-débit annuels, issues des précipitations observées.	28
Figure 17: Coefficients d'irrégularité des précipitations et des débits, par période et par bassin versant a) sur les 12 bassins versants, b) sur 5 bassins versants comprenant des précipitations observées	29
Figure 18 : Fréquences cumulées des critères de performance en contrôle sur la période entière.	30
Figure 19: Critères de performance sur la période entière a) NS (Q), b) NS R(Q), c) NS log(Q), d) fréquentiel issus des calibrations avec les précipitations WRF	31
Figure 20 : Débits journaliers simulés et observés sur l'Armançon pour l'année 2004.....	31
Figure 21 : Comparaisons des critères de performance a) NS (Q), b) NS R(Q), c) NS log(Q), d) fréquentiel, produits par les calibrations avec les précipitations WRF et les précipitations observées pour les 3 périodes.	32
Figure 22 : Fréquences cumulées des paramètres a) X1, b) X2, c) X3, d) X4 fixés durant la calibration roulante avec les précipitations observées et WRF	33
Figure 23 : Représentation adimensionnelle des bassins versants (moyenne des écoulements), d'après Le Moine et al., 2007.	35
Figure 24 : Représentation adimensionnelle des 12 bassins versants avec le débit observé, les précipitations WRF et l'ETP WRF	36
Figure 25 : Représentation adimensionnelle des 5 bassins versants avec le débit observé, les précipitations observées et l'ETP WRF	36
Figure 26: Régimes des précipitations observées et WRF sur a) Brienon , b) Leuglay	37
Figure 27 : Régime hydrologique mensuel interannuel a) Armançon à Brienon ; b) Ource à Leuglay.....	38
Figure 28: Variation mensuelle interannuelle a) des précipitations ; b) du débit observé et modélisé selon les différentes modalités, sur l'Armançon à Brienon/A.....	40
Figure 29: Comparaisons entre l'ETP synoptique et WRF a) Dijon, b) Châtillon-sur-Seine	41
Figure 30: Régimes hydrologiques issus des calibrations forcées par l'ETP synoptique et WRF a) sur la Tille à Arceau, b) sur l'Ource à Leuglay	42
Figure 31 : Ratio Pluie-débit moyen par an	43
Figure 32: Influence de l'erreur quantitative sur les régimes hydrologiques a) sur Brienon, b) sur Leuglay.....	45
Figure 33: Influence de l'erreur de phasage sur les régimes hydrologiques a) sur Brienon, b) sur Leuglay.....	45

Liste des équations

Éq. 1	11
Éq. 2	11
Éq. 3	11
Éq. 4	18
Éq. 5	18
Éq. 6	20
Éq. 7	21
Éq. 8	28
Éq. 9	35

LISTE DES ABBREVIATIONS

BD LISA : Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères
BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CEMAGREF : Centre national du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
CNRM : Centre National de Recherches Météorologiques
DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
ECMWF : European Center for Medium-range Weather Forecasts
ETP : Evapo-Transpiration Potentielle
ETR : Evapo-Transpiration Réelle
FAO : Food and Agriculture Organization of the United Nations
FO : Fonction Objectif
GARDENIA : modèle Global A Réservoir pour la simulation des Débits et des Niveaux Aquifères
GCM : Global Climate Model
GES : Gaz à Effet de Serre
GICC : Gestion et Impact du Changement Climatique
GIEC (=IPCC) : Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat
GR2M : modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel
GR3H : modèle du Génie Rural à 3 paramètres Horaire
GR4J : modèle du Génie Rural à 4 paramètres journalier
HYCCARE-Bourgogne : Hydrologie, Changement Climatique, Adaptation et Ressource en Eau en Bourgogne
ICC-HYDROQUAL : Impact du Changement Climatique sur l'hydrosystème Loire : Hydrologie, régime thermique, régime thermique, QUALité des eaux du bassin de la Loire
IRSTEA : Institut national de Recherche en Sciences et Techniques pour l'Environnement et l'Agriculture
MEDDTL : Ministère de l'Environnement, du Développement Durable, des Territoires et du Logement
NS : critère de Nash et Sutcliff
P : Précipitation
Q : Débit
RCM : Regional Climate Model
RCP : Representative Concentration Pathways
REXHYSS : Impact du Changement Climatique sur les Ressources en eaux et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et de la Somme
SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SMA : Soil Moisture Accounting
WRF : Weather Research Forecasting (modèle climatique regional)
ZRE : Zone de répartition des eaux

Présentation de l'organisme d'accueil

Ce stage a été réalisé au sein du laboratoire de recherche BIOGEOSCIENCES, qui est une UMR Université de Bourgogne (uB) / CNRS, n°6282. Le laboratoire rassemble environ 120 personnes travaillant dans le domaine des sciences de la vie, de la terre et à l'interface de ces deux domaines. Il est structuré en 4 équipes qui travaillent respectivement dans leur domaine, ainsi qu'à l'interface des autres équipes :

- Equipe ECO/EVO (écologie évolutive) sous la responsabilité de Franck Cezilly. L'équipe travaille sur 3 axes de recherches qui sont : i) l'écologie évolutive des relations parasite-hôte, ii) l'écologie comportementale et iii) la dynamique de la biodiversité et la gestion des populations naturelles ;
- équipe BioME (Biodiversité, Macroécologie, Evolution), sous la responsabilité de S. Montuire. L'équipe a fixé 4 axes thématiques qui sont : i) la biominéralisation, ii) l'émergence et la structuration des phénotypes, iii) l'évolution des traits d'histoire de vie et iv) la macroécologie.
- équipe SEDS (systèmes, environnements & dynamique sédimentaire), sous la responsabilité de E. Vennin. Cette équipe analyse les systèmes sédimentaires à travers différents axes transversaux : i) production et transfert de matières à la surface des continents, ii) paléoclimats et iii) architecture stratigraphique des réservoirs carbonatés : fracturation et diagenèse.
- équipe CRC (Centre de Recherche en Climatologie), sous la responsabilité de Y. Richard. L'équipe travaille sur deux thématiques : i) dynamique du climat et ii) impacts climatiques régionalisés.

Le laboratoire comprend environ 120 personnes : chercheurs CNRS - enseignants chercheurs uB - - enseignants chercheurs EPHE - enseignants chercheurs AgroSup - ITA CNRS - IATOS uB - doctorants - personnels de recherche en CDD (ATER et post-doctorants) - personnels techniques en CDD.

Le stage s'est déroulé du 1^{er} mars au 30 août 2013 au sein de l'équipe SEDS sous la direction de Philippe Amiotte-Suchet (MCF uB) et en collaboration avec l'équipe CRC dont Thierry Castel (MCF uB, Agrosup), Yves Richard (MCF uB) et Aurélien Rossi (post-doctorant uB). La partie modélisation a été réalisée en collaboration avec Nicolas Le Moine (MCF Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, UMR 7619).

INTRODUCTION

La ressource en eau a toujours été un enjeu pour les civilisations humaines. Il faut cependant attendre la fin du XXème siècle pour que la problématique de la gestion de la ressource en eau ne soit reconnue par les Etats comme une problématique essentielle (Musy, 2004). Face au changement climatique, et à l'augmentation de la pression anthropique, cette problématique a pris davantage d'importance. Aujourd'hui, il apparaît nécessaire, pour les générations futures, de limiter notre impact sur cette ressource vitale. C'est l'objectif de nombreux travaux : déterminer l'influence du changement climatique sur la ressource en eau, afin de mieux s'adapter et gérer de manière soutenable ces impacts.

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet HYCCARE-Bourgogne (Hydrologie, Changement Climatique, Adaptation et Ressource en Eau en Bourgogne). L'objectif général de ce projet de recherche est de mettre à disposition des décideurs locaux les outils qui leur permettront de gérer le risque local lié à l'impact du changement climatique sur la ressource en eau. Pour cela, un important travail de modélisation de cet impact sera réalisé. Les principales étapes sont : i) la simulation à l'échelle locale du changement climatique sur la Bourgogne (1980-2100) ii) l'utilisation des simulations climatiques de ces décennies récentes (1980-2011) afin de calibrer un modèle hydrologique et iii) l'utilisation des simulations climatiques sur la période 1980-2100 pour alimenter le modèle hydrologique calibré et simuler les débits (soumis au changement climatique) sur cette même période.

D'autre part, l'appropriation des résultats par les acteurs et les interactions entre ces derniers seront analysés afin d'identifier les clés de la construction d'une politique d'adaptation au changement climatique.

Ce rapport fait part de la tentative de calibration du modèle hydrologique GR4J (modèle pluie-débit global), utilisé habituellement avec des données observées, à partir des simulations climatiques. Plusieurs questions se posent alors.

La performance du modèle, calibré avec les simulations climatiques locales, sera-t-elle aussi élevée que celle du modèle calibré avec des observations ?

La performance du modèle sera comparée entre des calibrations effectuées à partir de données simulées à l'échelle locale puis observées afin de répondre à cette question.

Si la calibration à partir de simulations climatiques n'est pas satisfaisante, quels en sont les principaux obstacles, et peuvent-ils être évités ?

Des travaux de l'impact des données climatiques simulées (et de leurs erreurs) sur le modèle hydrologique seront réalisés, et les différents facteurs influant sur la calibration d'un modèle hydrologique seront analysés.

La première partie récapitule les connaissances de la modélisation hydrologique sous l'influence du changement climatique. Dans une seconde partie, les étapes de construction des simulations climatiques, les principaux types de modèles hydrologiques puis la méthodologie de la modélisation hydrologique sont détaillées. Dans une troisième partie, les résultats des calibrations sont présentés. Enfin, une quatrième partie discute de la possibilité de calibration d'un modèle pluie-débit global à partir de simulations climatiques, à l'échelle de petits versants.

Partie 1 : Contexte de l'étude

1.1 Le changement climatique et l'eau

L'existence d'un changement climatique est, à l'heure actuelle, sans équivoque dans la communauté scientifique (GIEC, 2007). Ainsi, à l'échelle du globe, de grandes tendances ont déjà été observées : hausse des températures moyennes de l'atmosphère et de l'océan, fonte massive de la neige et de la glace, élévation du niveau eustatique moyen.

Les principaux facteurs régulant le bilan énergétique du système Terre sont la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre (GES) et en aérosols, la couverture végétale et le rayonnement solaire. Or, toujours d'après le GIEC (2007), les émissions mondiales de GES imputées aux activités humaines ont subi une augmentation de 70% entre 1970 et 2004. Ainsi, l'élévation de la température globale observée depuis le milieu du XXème siècle est, de manière très probable, attribuable à cette évolution des GES (Stott et al., 2001), tout comme celle des températures à l'échelle d'un continent (Karoly et al., 2003), (Zwiers and Zhang, 2003) ou même à l'échelle d'un territoire plus restreint comme la France (Planton and Terray, 2007).

D'autre part, des changements dans les fonctionnements hydrologiques ont également été observés depuis plusieurs décennies (Bates et al., 2008) : augmentation de la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère, variation dans la répartition et dans l'intensité des précipitations (pluies, neiges, grêles..), variations saisonnières des régimes hydrologiques des cours d'eau (notamment ceux alimentés par la fonte des glaciers). Il apparaît que le réchauffement global a d'ores et déjà pour conséquences des changements du cycle hydrologique à l'échelle du globe (Bates et al., 2008), comme à l'échelle des grands bassins versants continentaux (Rossi, 2010), ou encore à l'échelle de bassins versants régionaux (Habets et al., 2011 ; ICC-HYDROQUAL, 2010 ; Sauquet et al., 2010). En ce qui concerne les impacts prévus sur la France et sur l'Europe, ils touchent la ressource en eau de différentes manières.

Impacts quantitatifs

D'après Boé et al. (2009), les impacts positifs sur la ressource en eau ne compenseront pas les impacts négatifs. La disponibilité en eau devrait diminuer sur le territoire français durant le XXIème siècle, tandis que les besoins vont, eux, augmenter (notamment pour compenser des étés plus arides). Les débits d'étiage (débits de basses eaux) seront plus fréquents durant l'année tandis que les débits moyens verront leur occurrence diminuer.

Selon les résultats du projet Explore 2070 (Ministère de l'écologie du développement durable, des transports et du logement, 2012), la diminution de la ressource en eau devrait concerner à peu près tous les cours d'eau de la métropole. En cause : une augmentation de l'évapo-transpiration réelle, combinée avec une diminution des précipitations. De ces impacts, la saisonnalité des débits devraient augmenter, avec des débits plus élevés durant la saison de débit de pointe et plus bas durant la saison de basses eaux. A court terme, la fonte des glaciers pourrait diminuer cette saisonnalité pour les débits des cours d'eau des Alpes. Mais à long terme, le recul des glaciers entraînera une diminution des débits d'été (Hock et al., 2005, d'après Bates et al., 2008). Ces diminutions globales de disponibilité en eau devraient causer une plus grande variabilité des rendements agricoles et une chute du rendement moyen (Jones et al., 2003b et Trnka et al., 2004, d'après Bates et al., 2008). Certaines régions seront ainsi plus exposées aux risques de sécheresse (notamment autour de la Méditerranée), ce qui va augmenter la concurrence autour de la ressource en eau (Döll, 2002, Donevska et Dodeva, 2004, d'après Bates et al., 2008).

Au niveau énergétique, le potentiel hydroélectrique devrait diminuer d'environ 6% sur toute l'Europe, mais présenterait des conditions stables au niveau de l'Europe de l'Ouest (Lehner et al., 2005 d'après Bates et al., 2008). La production de biocarburants sera, elle, tributaire de l'évolution du rendement agricole précédemment décrit.

Impacts qualitatifs

En parallèle de la diminution globale des débits des cours d'eau, un réchauffement de la colonne d'eau risque de limiter la diffusion de l'oxygène dans celle-ci, et donc diminuer le taux de saturation en oxygène dissous ([Ducharne, 2008](#)). De plus, une diminution du gel risque de causer une augmentation de la charge de nutriments dans les cours d'eau ([Bouraoui et al., 2004](#), [Kaste et al., 2004](#) et [Eisenreich, 2005](#), d'après [Bates et al., 2008](#)). L'action combinée de ces deux impacts va entraîner une eutrophisation intensive des plans d'eau et zones humides.

Les phénomènes de précipitations ainsi que les sécheresses extrêmes peuvent augmenter la population microbienne totale présente dans les eaux douces, et donc influencer l'occurrence de maladies et la qualité de l'eau générale.

1.2 Modélisation hydrologique dans le cadre du changement climatique

Le domaine de l'hydrologie est vaste. Littéralement, c'est la science qui étudie les eaux, sous toutes ses formes. Les objets étudiés sont par conséquent variés et ne peuvent faire l'objet d'expériences simples au vu de la multitude d'interaction qu'ils ont avec l'environnement ([Le Moine, 2008](#)). Par exemple, étudier l'influence de la température ambiante (tout autre paramètre restant constant) sur le débit d'un cours d'eau est impossible. Il est alors indispensable d'avoir recours à la modélisation pour étudier le fonctionnement de ces objets.

De nombreux travaux ont déjà porté sur la modélisation hydrologique, notamment vis-à-vis du changement climatique. La connaissance du fonctionnement futur d'un cours d'eau est primordiale en terme de gestion quantitative (les crues ou les sécheresses sont autant de situations créatrices de tensions autour de cette ressource) et qualitative. Dans l'optique d'améliorer la connaissance et donc rendre possible l'anticipation de telles situations, la modélisation hydrologique est une nécessité.

Sur l'Europe, le changement climatique engendrerait une diminution d'environ 10 à 30% de la ressource en eau d'ici 2050 ([Milly et al., 2005](#)). A l'échelle régionale, les conclusions du programme RexHyss ([Habets et al., 2011](#)) prévoient une diminution de l'ordre de 30% des débits du bassin versant de la Seine à l'horizon 2100. Les conclusions du programme [ICC-HYDROQUAL \(2010\)](#) sur le bassin de la Loire vont dans le sens d'une diminution de la disponibilité des ressources en eau, avec des étiages plus sévères et plus longs, résultats conformes à ceux du programme RexHyss (bassin de la Seine et de la Somme).

Ces différents travaux ont pour point commun d'utiliser comme entrée des modèles hydrologiques une simulation climatique issue d'un modèle climatique global (GCM), fournissant une information climatique à large échelle. Ces informations sont ensuite désagrégées à l'aide de méthodes statistiques qui reposent sur de lourdes hypothèses de stationnarité du climat ([MEDDTL, 2011a](#)) c'est-à-dire sur la supposition que les valeurs statistiques des variables climatiques seront les mêmes au cours du temps.

A l'échelle de la Bourgogne, un réchauffement a déjà été observé, de l'ordre de 1.5°C depuis 1961 ([Cuccia, 2008](#)) et des études prévoient une hausse des températures d'environ 2.8°C en moyenne sur la Bourgogne, pour les 60 prochaines années selon [Xu et al. \(2012\)](#).

En 2009, Alterre Bourgogne, l'Université de Bourgogne et l'INRA de Dijon ont produit une étude de l'influence des changements climatiques sur la ressource en eau des sols ([Alterre Bourgogne, 2010](#)) grâce à la désagrégation dynamique d'un GCM sur une maille de 9km sur 9km, au pas de temps journalier et pour une année « type » future. Une modélisation du bilan hydrique a simulé la sensibilité des sols à la sécheresse. Les conclusions décrivent une réserve utile plus rapidement asséchée au printemps, et plus sévèrement. De plus, les précipitations disponibles pour la recharge des nappes risquent de diminuer.

Tous ces impacts sont encore incertains, notamment à l'échelle locale ([Bates et al., 2008](#)). L'échelle fine (quelques dizaines à centaines de km²), adaptée à la prise de décision locale, est encore trop peu documentée. Ceci est notamment dû à la complexité des phénomènes

météorologiques liés aux précipitations. Les variations spatiales et temporelles des différents paramètres climatiques, tels que la température, l'évapotranspiration ou les précipitations, auront des conséquences locales différentes sur les ruissellements de surface et l'infiltration en profondeur (Alterre Bourgogne, 2012) ; d'où la nécessité de modélisation hydrologique locale, pour tous les décideurs et gestionnaires de l'eau.

1.3 Enjeu de l'étude

D'après Bates et al. (2008), il conviendrait de réaliser des études portant sur un pas de temps plus fin que les études actuelles. Il est également demandé de développer davantage de jeux de données à l'échelle du bassin versant, afin d'orienter les gestionnaires de l'eau. Enfin, la prise en compte des impacts sur la qualité de l'eau, sur les aspects socio-économiques, ou encore sur les eaux souterraines, est peu développée.

Dans ce cadre, le projet HYCCARE-Bourgogne (2013-2015), financé par le programme « Gestion et Impact du Changement Climatique » (GICC) du Ministère de l'Environnement, du Développement Durable, du Territoire et du Logement, propose d'améliorer la connaissance de l'impact du changement climatique sur la ressource en eau selon deux axes de travail.

Axe 1 : Production de connaissances sur les impacts du changement climatique.

Cet axe consiste en la connaissance des impacts du changement climatique à l'échelle locale, sur une dizaine de bassins versants de Bourgogne. Cela comprend les prévisions climatiques (à l'aide d'un RCM), qui serviront d'entrée pour les simulations hydrologiques. L'échelle fine de cette étude permettra notamment une meilleure lecture des risques et de l'évolution de la ressource pour les acteurs du territoire. Dans ce contexte, les modèles globaux GR4J (Perrin et al., 2007) et GARDENIA (Thiéry, 2003) seront utilisés et leur efficacité sera comparée.

Axe 2 : Adaptation et analyse des dynamiques collectives vis-à-vis des vulnérabilités

Cet axe cherchera à déterminer quels sont les moyens pour une prise de décision efficace par les pouvoirs publics et la mise en place de politiques autour du changement climatique.

Cette connaissance locale du changement climatique est nécessaire du fait que la Bourgogne couvre les têtes de bassins des 3 plus grands bassins versants français (Rhône, Seine et Loire) et est caractérisée par l'absence de grands aquifères pérennes. La ressource en eau est en effet fragmentée en de multiples nappes souterraines dont le comportement hydrogéologique varie spatialement.

L'originalité de cette étude réside dans la volonté d'associer une chaîne de modélisation climatique impliquant un GCM (modèle climatique global) pour forcer un modèle climatique régional (RCM), produisant les données nécessaires au forçage d'un modèle pluie-débit global.

Dans un premier temps, il conviendra de calibrer le modèle hydrologique sur le temps présent (1980-2011), en utilisant les simulations climatiques et des chroniques de débits observés.

Afin de conserver une calibration correcte du modèle entre la calibration sur 1980-2011 et la simulation sur 1980-2100, il est nécessaire d'utiliser des données construites de la même façon. C'est pourquoi la calibration devra être effectuée non pas avec des données climatiques observées (utilisées habituellement avec le modèle GR4J), mais sur les simulations climatiques.

Cela permettra dans une phase ultérieure de réaliser des simulations de l'impact du changement climatique sur le débit des cours d'eau bourguignons sur une période continue de 1980 à 2100.

Ce rapport fait état de cette tentative de calibration à partir de données simulées. Nous montrerons quelles sont les principales difficultés à ce couplage entre modèle climatique et hydrologique et comment peut-on les éviter.

Partie 2 : Matériel et méthode

2.1 Principe de la modélisation climatique

La chaîne de modélisation climatique va s'attacher à produire une information spatialisée à une échelle suffisamment fine pour une étude d'impact sur de petits bassins versants. Au préalable, des jeux de données décrivent le climat à l'échelle de 150km par 150km. Il s'agit des simulations du modèle ARPEGE-Climat et des réanalyses ERA-Intérim. Le modèle ARPEGE-Climat va fournir les simulations du changement climatique sur la période 1980-2100, et le modèle sera forcé successivement par deux scénarios d'évolution de gaz à effets de serre (GES), tandis que le jeu de données ERA-Intérim décrit le climat sur le temps présent (1980-2011) et sera utilisé pour la calibration du modèle hydrologique. Ces simulations à large échelle (étape 1 de la figure 1) vont permettre de forcer aux limites un modèle climatique régional (RCM), c'est l'étape 2 dans la figure ci-dessous. Il s'agit dans cette étude du modèle WRF. Il va prendre en compte les différentes composantes physiographiques locales (hydrologie, végétation, topographie..) et, par sauts d'échelle successifs, simuler le climat à une échelle de 3km par 3km, permettant la prise de décision locale. C'est l'étape 3 décrite ci-dessous.

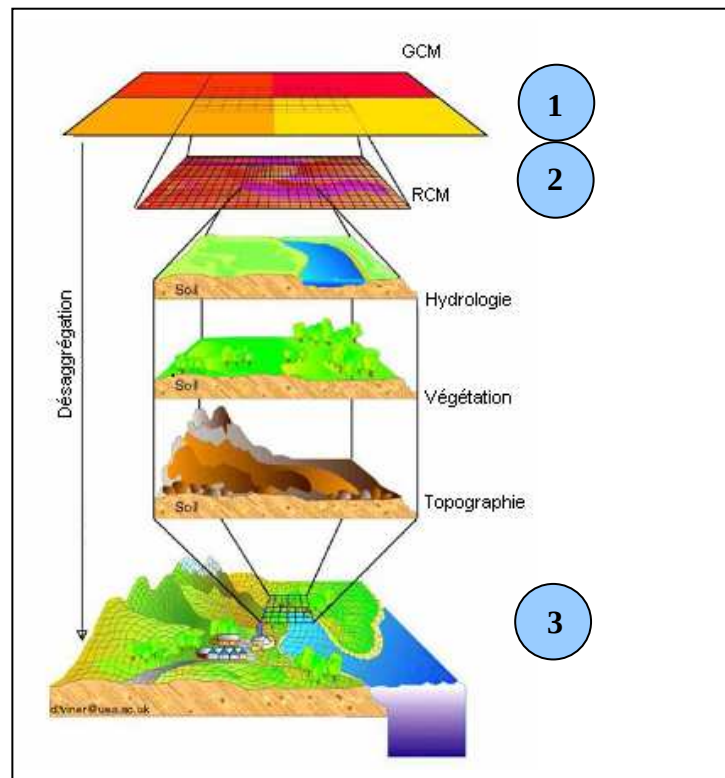


Figure 1 : Descente d'échelle progressive entre le GCM et le jeu de données finales, d'après David Viner (Climatic Research Unit, East Anglia, UK)

2.1.1 Climat à l'échelle globale

2.1.1.1 ARPEGE-Climat et ERA-Interim

La première étape de la chaîne de modélisation climatique concerne la simulation à l'échelle globale (étape 1 de la figure 1).

Le jeu de données utilisé pour la simulation du changement climatique dans cette étude est celui produit par le modèle atmosphérique « ARPEGE-Climat », développé conjointement par

MétéoFrance et l'ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts) (Voldoire et al., 2012). Il est disponible sur la période 1980-2100.

Le deuxième jeu de données global utilisé est celui fourni par les réanalyses ERA-Interim, sur la période 1980-2011. Ces données sont produites par l'ECMWF. Elles sont réanalysées, ce sont donc des simulations (à la résolution de 150km) contraintes de manière régulière (toutes les 6h) par des observations, pour empêcher la dérive du climat (Simmons et al., 2006). Ces données simulées sur le temps présent seront utilisées lors de la calibration du modèle hydrologique. Elles seront donc comparées aux observations pour s'assurer d'une calibration correcte du modèle hydrologique.

2.1.1.2 Scénarios d'évolution des émissions de gaz à effet de serre

Le modèle « ARPEGE-Climat » utilise les données historiques de concentration de CO₂ pour reproduire le climat passé, et se base sur les scénarios d'émission de Gaz à Effets de Serre (GES) décrits dans le rapport n°4 du GIEC (Moss et al., 2010) pour le climat futur. Toutefois, le climat simulé de 1980 à nos jours ne correspond pas au climat avéré, mais à un climat « possible ». Il ne peut donc pas être comparé jour par jour, mais les tendances climatiques doivent être semblables à celles observées. Afin de permettre une étude de sensibilité de l'influence du changement climatique, il est nécessaire de réaliser les simulations climatiques sur plusieurs scénarios d'émission de GES. Dans cet optique, les chercheurs du CRC ont choisi de privilégier les 2 scénarios les plus extrêmes des 4 scénarios RCP (Representative Concentration Pathways) décrits par le GIEC (Moss et al., 2010) : RCP2.6 et RCP8.5

Le scénario RCP 2.6 (IMAGE 2.6 dans la figure 2) est le plus optimiste des 4 scénarios (diminution du forçage radiatif après 2040). A l'inverse, le scénario RCP 8.5 (MESSAGE 8.5 dans la figure 2) prévoit un forçage supérieur à 8.5 W.m⁻² à la fin du siècle. La figure 2 décrit l'évolution du forçage radiatif et celle des GES associée. Ces deux scénarios seront appliqués à partir de l'année 2006.

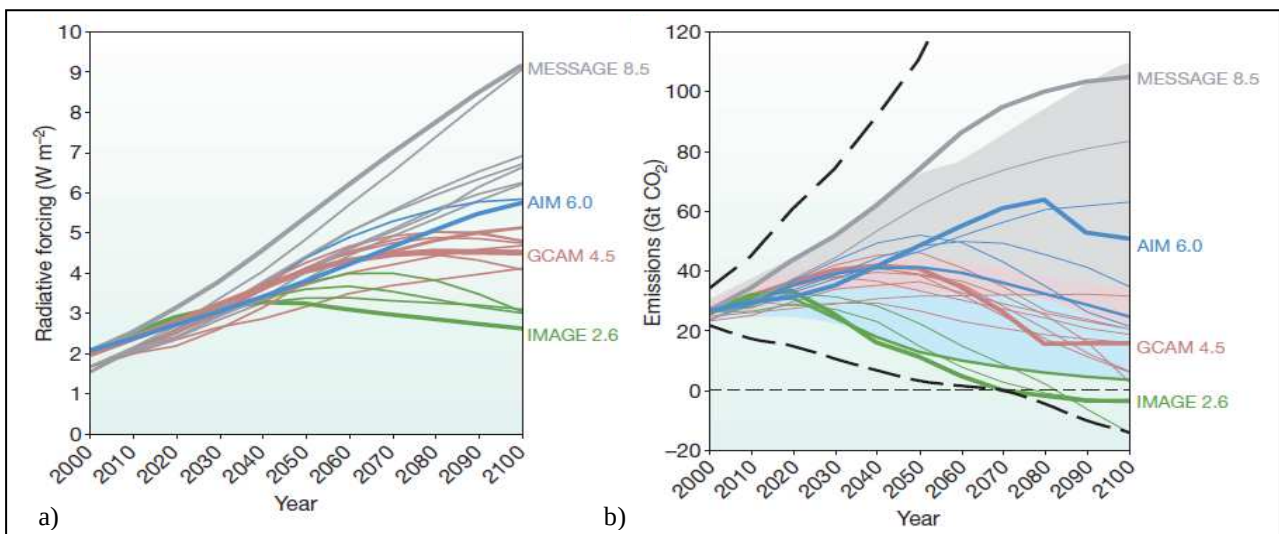


Figure 2: Evolution a) du forçage radiatif terrestre et b) des émissions de GES des 4 scénarios RCP du GIEC, (Moss et al., 2010)

2.1.2 Méthode de désagrégation

2.1.2.1 Désagrégation statistique et dynamique

La résolution faible des GCM (150 km de côté) ne permet pas de prendre en compte les caractéristiques physiographiques locales. Or ce sont ces caractéristiques, couplées aux conditions climatiques globales, qui seront à l'origine du climat local (Von Storch, 1999). Une manière de résoudre ce problème est d'utiliser une méthode de désagrégation du climat simulé par le GCM. Il existe deux grandes « familles » de désagrégation climatique (Boé, 2007) : la désagrégation statistique et la désagrégation dynamique.

Méthodes de désagrégation statistique

Ces méthodes consistent en la prédiction d'une variable d'intérêt à l'échelle locale, connaissant la distribution d'une autre variable, dite prédictive, à l'échelle globale. Ces méthodes reposent sur 3 grandes hypothèses (Boé, 2007) :

- la variable prédictive doit être cohérente avec la question posée par le modélisateur, fortement liée au climat local et simulée de façon réaliste par le modèle climatique global ;
- La relation entre la variable prédictive et le climat local est supposée constante dans le temps ;
- La variable prédictive doit être sensible aux changements climatiques.

La seconde hypothèse, dite de « stationnarité » est problématique, car elle n'est pas vérifiable dans le cadre des études sur le changement climatique. C'est-à-dire qu'il n'est pas garanti que dans un climat futur, la variable prédictive et le climat local soient liés de la même façon.

Méthodes de désagrégation dynamique

Pour simuler le climat à une échelle plus fine, on peut faire le choix d'augmenter la résolution du modèle de circulation générale, ce qui peut être très coûteux en temps de calcul. Deux alternatives existent pour faire face à ce problème :

- Augmenter la résolution sur la zone d'étude, en diminuant progressivement la maille à mesure qu'on s'éloigne de celle-ci. On parle alors de modèle à résolution variable ;
- Utiliser un RCM sur une zone géographique limitée ; celui-ci est alors forcé à ses frontières par le GCM.

Cette dernière approche, la plus utilisée en raison de son plus faible coût numérique, a été retenue dans cette étude. Elle présente l'avantage de reproduire à l'échelle locale toute la physique du climat, et toutes les variables météorologiques, tandis que les méthodes statistiques se bornent aux seules variables d'intérêt. La méthodologie utilisée par l'équipe du CRC consiste à forcer un modèle climatique régional (RCM) à l'aide des simulations d'un GCM (étape 2 de la figure 1). Le RCM utilisé est le modèle WRF (Weather Research Forecasting) (Skamarock et al., 2008).

2.1.2.2 Modèle de circulation régional et emboîtement des domaines

Le modèle climatique régional WRF va être forcé par deux types de climat :

- pour la simulation du changement climatique, le climat ARPEGE-Climat, simulé sur la période 1980-2100, et qui reproduit un climat « qui aurait pu se produire » sur le passé, et un climat « possible » pour le futur.
- pour la calibration du modèle hydrologique, le climat ERA-Interim, simulé sur la période 1980-2011 et contraint par les observations.

Puis le modèle WRF va simuler successivement le climat sur des résolutions de plus en plus fines. Les sorties précédentes du modèle servent de conditions aux limites pour la modélisation à l'échelle plus fine (étape 3 de la figure 1). La résolution de la modélisation WRF va ainsi passer d'une maille de 48km à 12km puis enfin à 3km par sauts d'échelle successifs (figure 3).

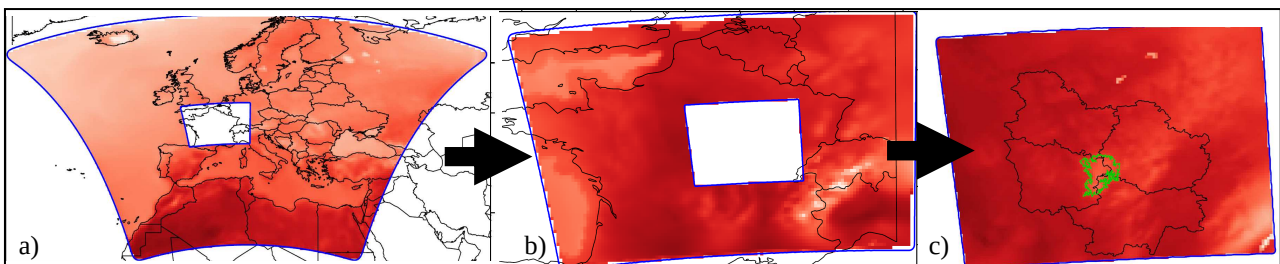


Figure 3 : Emboîtement des domaines : a) Domaine 1, résolution de 48km ; b) Domaine 2, résolution de 12km ; c) Domaine 3, résolution de 3km.

2.1.3 Validation des simulations climatiques

2.1.3.1 Données SAFRAN et observations ponctuelles

Afin de pouvoir comparer les différents climats simulés à l'échelle de la Bourgogne, des données observées ont été nécessaires. Deux genres de données sont utilisés pour ces comparaisons. Le jeu de données SAFRAN ([Le Moigne, 2002](#)) consiste en une interpolation sur une maille de 8km, d'observations ponctuelles réanalysées. Il a été produit par le CNRM de MétéoFrance (Centre National de Recherches Météorologiques) et a été mis à disposition de l'équipe du CRC. Des observations ponctuelles de précipitations et de températures de 127 stations de MétéoFrance comprises dans ou autour de la Bourgogne sont également interpolées, pour obtenir une grille de la même résolution que les simulations WRF (3km). Les stations ont été retenues pour leur faible nombre de lacunes sur la période 1980-2011.

2.1.3.2 Comparaisons

La chaîne de simulation « ERA-Interim → WRF » est d'abord validée par les observations réanalysées SAFRAN et les observations ponctuelles interpolées. Puis, afin de tester la robustesse des simulations du changement climatique par la chaîne de modélisation « ARPEGE-Climat → WRF », le climat simulé sur 1980-2006 par le modèle ARPEGE-Climat est comparé au jeu de données « ERA-Interim ». Ces deux climats sont différents ; cependant, les tendances et valeurs moyennes doivent être du même ordre de grandeur entre ces deux simulations.

2.1.3.3 Post-Correction

Au vu des comparaisons avec les observations, il sera peut-être nécessaire de réaliser des post-corrections des différentes variables simulées. Ces post-corrections concernent des événements spécifiques que le modèle WRF a du mal à reproduire. Ainsi, [Castel et al. \(2010\)](#) ont déjà mis en évidence un biais humide des précipitations WRF sur la Bourgogne, en conditions convectives.

2.2 Modélisation hydrologique

Un modèle cherche à simplifier un système plus complexe. Dans le cas de la modélisation hydrologique, l'unité fonctionnelle est le bassin versant. Un bassin versant est « *un système ouvert qui transforme les signaux « précipitations solides et liquides » et « évapotranspiration » en un signal de sortie « écoulement » en intégrant son état de surface, les échanges avec les eaux souterraines, les prélèvements, les rejets et la gestion des ouvrages de transfert et/ou de régulation* ». ([Ministère de l'écologie du développement durable, des transports et du logement, 2011b](#)). Le bassin versant peut être considéré comme un système ouvert et complexe (il échange de la matière et régule son fonctionnement) et peut donc être soumis à l'exercice de la modélisation ([Payraudeau, 2002](#)). Toutefois, sa définition peut parfois être problématique, les limites topographiques d'un bassin versant ne correspondant pas toujours aux limites réelles (limites géologiques). D'autant plus lorsque le bassin versant considéré est karstique par exemple ([Le Moine, 2008](#)).

Dans le cadre du projet HYCCARE-Bourgogne, deux modèles hydrologiques ont été choisis pour simuler l'impact du changement climatique sur la ressource en eau : le modèle du **G**énie **R**ural à 4 paramètres **J**ournalier (GR4J), développé par le CEMAGREF ([Perrin et al., 2007](#)) et le modèle **G**lobal À **R**éservoirs pour la simulation de **D**ébits et de **N**iveaux **A**quifères (GARDENIA) développé par le BRGM ([Thiéry, 2003](#)). Cette présente étude ne concerne que des essais de calibration sur le modèle GR4J.

Cette partie présente d'abord une brève classification des modèles hydrologiques, puis décrira les caractéristiques et le fonctionnement du modèle GR4J. Enfin nous verrons les sources

d'incertitudes liées à l'exercice de la modélisation et comment l'on peut quantifier les performances et la robustesse du modèle utilisé.

2.2.1 Classification des modèles hydrologiques

Les modèles en hydrologie sont différenciés selon leur finalité, les données utilisées, ou encore leur structure. Les différentes manières d'aborder la modélisation hydrologique sont présentées ci-après. Elles permettent d'identifier les grandes catégories de modèles hydrologiques.

2.2.1.1 La distribution des paramètres

On peut citer les modèles distribués, utilisant une information spatialisée (plus ou moins fine) des différents paramètres, et les modèles globaux, qui considèrent leur maille élémentaire (le bassin versant) comme homogène ([Le Moine, 2008](#)).

Les modèles distribués soulèvent la question du niveau de précision des paramètres pour rendre compte de l'hétérogénéité de l'environnement (pouvant se compliquer à l'infini) et de l'échelle des observations ([Le Moine, 2008](#)). Cela pose des problèmes notamment en termes de disponibilité des données mais également de sur-paramétrisation qui complexifie le modèle et conduit à la prise en compte de phénomènes parfois peu réalistes. Cela tend à diminuer la robustesse du modèle (sa capacité à reproduire les débits dans des contextes différents). Néanmoins, l'utilisation de tels modèles permet une meilleure compréhension des phénomènes naturels à différentes échelles ([Gnouma, 2006](#) ; [Le Moine, 2008](#)).

A l'inverse, les modèles globaux, de type « boîte noire », considèrent le bassin versant comme la maille élémentaire. Ils ne prétendent pas décrire la variabilité spatiale mais seulement les relations entre des données « entrées » (les précipitations et l'évapotranspiration potentielle par exemple) et des données « sorties » (le débit à l'exutoire), de manière non spatialisée.

2.2.1.2 Le degré de compréhension des processus

Les modèles à base physique vont décomposer le fonctionnement du système grâce à des équations physiques qui s'appuient sur une discrétisation fine du milieu. A l'inverse, les modèles empiriques ne comprennent pas de base physique mais des relations fonctionnelles, établies à partir de l'analyse des données entrées et sorties du modèle. Ils cherchent à représenter la dynamique des variables sans décrire les processus élémentaires ([Roche et al., 2012](#)). Notons toutefois l'existence de modèles intermédiaires dits modèles conceptuels, qui vont chercher à reproduire le comportement du bassin versant via plusieurs simplifications du cycle de l'eau, sous la forme de réservoirs interconnectés ([Gnouma, 2006](#)).

2.2.1.3 La représentation du temps

Les modèles continus reproduisent la variabilité de processus dans le temps (comme par exemple, l'évolution des débits mensuels sur plusieurs années). Tandis que les modèles événementiels s'attachent à décrire un événement particulier sur une période courte (par exemple, le débit horaire d'une crue spécifique) ([Gnouma, 2006](#)).

2.2.1.4 Le pas de temps

Les processus hydrologiques sont continus. Idéalement, les modèles devraient tous l'être également mais on est souvent amené à choisir un pas de temps de calcul (modèles à pas de temps discret). Ce pas de temps doit être fin pour limiter les biais de l'échantillonnage du calcul, en gardant un temps de calcul raisonnable. Le plus souvent, un pas de temps long est associé à une structure plus simple du modèle. Ce pas de temps devrait être choisi mathématiquement, selon les temps caractéristiques du processus. En général il est cependant souvent choisi en fonction de la disponibilité des données. ([Roche et al., 2012](#)).

2.2.1.5 La modélisation pluie-débit

La modélisation pluie-débit est un des nombreux domaines de l'hydrologie. Elle s'attache à étudier le lien existant entre les écoulements d'un bassin versant et les précipitations sur ce bassin versant, qui en sont la cause directe. L'objectif de la modélisation pluie-débit sera alors de comprendre le fonctionnement et la dynamique du bassin versant, et permettre ainsi de répondre à plusieurs questions concernant la gestion des risques en hydrologie ou la gestion de la ressource en eau (Perrin, 2000). Les modèles utilisés dans l'axe 1 du projet HYCCARE-Bourgogne (GR4J et GARDENIA) font partie de la famille des modèles pluie-débit

2.2.2 Le modèle GR4J

2.2.2.1 Caractéristiques du modèle

Un modèle à faible nombre de paramètres

Le modèle GR4J est un modèle global présentant une faible paramétrisation (4 paramètres à caler). Ce nombre limité de paramètres simplifie le système et confère au modèle une meilleure robustesse. (Perrin, 2000). Dans sa thèse réalisée en 2000, Perrin nous décrit le principe de parcimonie exprimé en premier lieu par Nash et Sutcliffe en 1970. Ce principe de modélisation souhaite que toute augmentation de la complexité d'un modèle se fasse en contrepartie d'une augmentation significative de la performance et de la robustesse du modèle.

Or, plusieurs auteurs émettent déjà l'hypothèse que la variabilité hydrologique peut être reproduite sur la plupart des bassins versants à l'aide de modèles comprenant moins de 10 paramètres (Beven, 1989 ; Jakeman et Honeberger, 1993, d'après Perrin, 2000). Dans leur article datant de 2003, Perrin et al. (2003) réalisent une série de calibrations avec un nombre important de structures de modèles à complexité croissante (de 0 à 6 paramètres). Il apparaît que le modèle GR4J permet une simulation aussi bonne que des modèles plus complexes (à 5 ou 6 paramètres).

Le principe de parcimonie semble un enjeu important dans notre étude, car une sur-paramétrisation permet au modèle d'aboutir aux mêmes performances avec des jeux de paramètres différents, ce qui amène de grandes incertitudes dans l'optimisation des paramètres. En outre, Perrin (2000) souligne l'importance de déterminer le « bon » jeu de paramètres dans une étude de sensibilité à un changement environnemental (comme c'est le cas ici).

Un modèle global et empirique

Le modèle GR4J est global, les données nécessaires au modèle (précipitations et ETP) seront donc des données agrégées à l'échelle du bassin versant, au pas de temps journalier. Notre problématique ne concernant pas la prédiction de variables spatialisées, le caractère global du modèle ne pose donc pas de problème méthodologique.

La structure du modèle GR4J présente des ressemblances avec l'environnement physique du bassin versant. Ainsi, la présence de réservoirs, d'une fonction d'échange avec l'extérieur du bassin versant, de conditions antérieures d'humidité (remplissage initial des réservoirs), peuvent faire s'apparenter GR4J à un modèle conceptuel. Il n'en reste pas moins un modèle empirique (Perrin et al., 2007).

Un modèle journalier

Plus le pas de temps est fin, plus les données prendront en compte la variabilité du régime hydrologique du bassin versant, d'autant plus que la plus grande partie des jeux de données fournit une information au pas de temps journalier. Ce pas de temps semble alors assez bien adapté à un jeu de bassins versants dont la taille reste faible. Malgré tout, il est possible que des événements tels que les crues ne soient pas correctement représentés, leur amplitude temporelle étant parfois inférieure à la journée.

2.2.2.2 Structure du modèle GR4J

Fonctionnement

Le fonctionnement est repris par la figure 4. La première étape est la neutralisation des précipitations journalières (P) par l'ETP (E) pour déterminer les précipitations nettes (P_n) et l'évapotranspiration nette E_n (équations 1 et 2).

$$\text{Si } P > E, \text{ alors } P_n = P - E \text{ et } E = 0 \quad \text{Éq. 1}$$

$$\text{Si } P < E, \text{ alors } P_n = 0 \quad \text{et } E_n = E - P \quad \text{Éq. 2}$$

La fonction de rendement va ensuite collecter une partie de ces précipitations nettes (P_s) pour alimenter le réservoir de production, et une partie de l'évapotranspiration nette (E_s) va être soustraite à ce même réservoir. Le remplissage du réservoir est donné par l'équation 3 :

$$S' = S - E_s + P_s \quad \text{Éq. 3}$$

La fonction de percolation va alors calculer la quantité d'eau qui va percoler lors de la vidange du réservoir ($Perc$). Cette quantité d'eau rejoint la partie de la pluie nette qui n'a pas alimenté le réservoir ($P_n - P_s$) et atteint la partie routage du modèle (Pr).

L'écoulement Pr est ensuite divisé en deux composantes d'écoulement (90% selon l'hydrogramme unitaire $HU1$ et 10% selon l'hydrogramme unitaire symétrique $HU2$). On note « Q_9 » le débit issu de $HU1$ et Q_1 celui issu de $HU2$. Le débit Q_9 va alimenter le réservoir de routage tandis que Q_1 va subir une infiltration directe. La quantité d'eau retenue par le réservoir de routage et celle infiltrée directement vont subir une perte ou un gain, grâce à la fonction d'échange avec l'extérieur non atmosphérique. La vidange du réservoir (selon le taux de remplissage du réservoir) Q_r ainsi que l'infiltration Q_d vont alors constituer le débit final en sortie du modèle (Q).

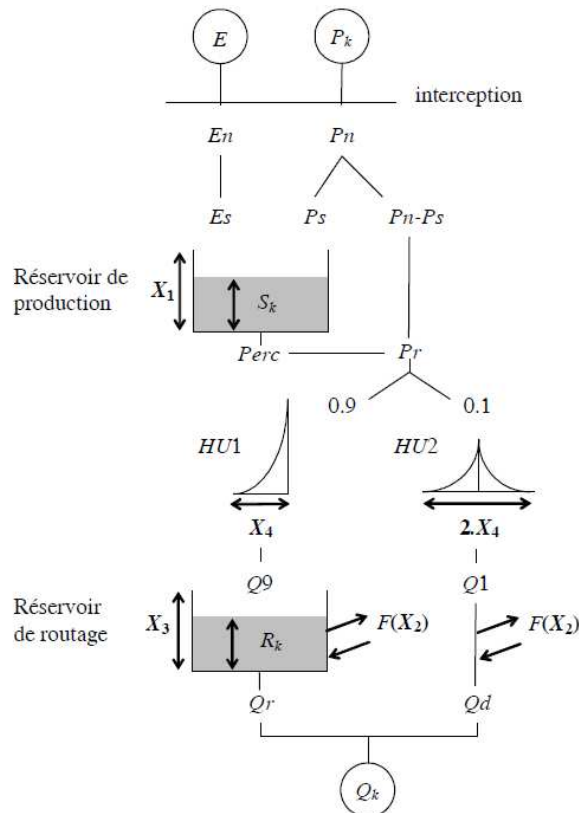


Figure 4 : Structure du modèle GR4J (Perrin et al., 2003)

Paramètres du modèle

Le modèle GR4J possède donc 4 paramètres optimisables, notés X1 à X4.

X1 (mm) définit le volume du réservoir de production.

X2 (mm/jour) représente la fonction d'échange entre le bassin versant et l'extérieur. Ce paramètre prend une valeur positive dans le cas d'un gain et négative pour une perte. L'existence d'une fonction d'échange permet la prise en compte de phénomènes de flux souterrains (qui sont ainsi mieux pris en compte que par une correction des précipitations, comme il a été parfois utilisé dans certaines études) (Le Moine et al., 2007).

X3 (mm) définit le volume du deuxième réservoir, le réservoir de routage.

X4 (jours) représente enfin le temps de base de l'hydrogramme unitaire, et donc définit le délai avec lequel l'eau précipitée est transformée en débit à l'exutoire du bassin versant considéré.

Pour chacun de ces paramètres est défini un espace de variation au-delà duquel ils ne représenteraient plus des processus naturels plausibles. Ces espaces de variations ont été estimés grâce à un test du modèle sur un large échantillon de bassins versants par les développeurs du modèle (Perrin et al., 2003). La distribution de chaque paramètre a été analysée sur l'ensemble des calibrations (sur 429 bassins versants) puis le décile inférieur et supérieur ont été retirés pour garder un intervalle à 80% de confiance. Cet intervalle (tableau 1) servira à borner nos paramètres pendant l'exercice de calibration.

Paramètre	Borne inf.	Borne sup.
X1 (mm)	100	1200
X2 (mm/jour)	-5	3
X3 (mm)	20	300
X4 (jour)	1,1	2,9

Tableau 1: Bornes des paramètres estimées par Perrin et al. (2003)

2.2.3 Efficacité et incertitude du modèle

2.2.3.1 Comment juger de l'efficacité du modèle ?

L'efficacité d'une modélisation doit être mise à l'épreuve systématiquement, non pas pour valider le modèle, mais pour le mettre en défaut (Le Moine, 2008). Afin de juger des performances d'un modèle, on pratique une méthode en deux phases distinctes, dite de « calibration/contrôle ». La figure 5 (Le Moine, 2008) résume cette méthode. D'abord, on divise la période de disponibilité des données en sous-périodes, puis on calibre sur une première sous-période et on contrôle sur les suivantes. En divisant en plusieurs sous-périodes, on augmente le nombre de contrôle possibles.

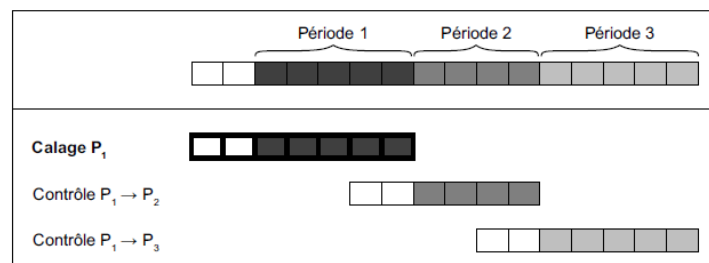


Figure 5 : Résumé de la méthode de calibrage/contrôle (Le Moine, 2008)

Phase 1 : Calibration d'un modèle hydrologique

La calibration du modèle est effectuée sur une partie du jeu de données, dite période d'apprentissage, sur laquelle le modèle tente d'optimiser ses paramètres afin de simuler un débit ressemblant au maximum au débit observé. La similarité entre les débits observé et simulé est

quantifiée par le calcul d'une « Fonction Objectif » (F.O). Plusieurs jeux de paramètres sont testés successivement (par itération). La F.O est calculée à chaque itération pour déterminer si le modèle augmente ou non sa performance par rapport au jeu de paramètres précédemment testé. Lorsqu'on considère que la performance n'augmente plus significativement entre deux itérations, le modèle a alors convergé. Le jeu de paramètres utilisé est fixé et le modèle est calibré. Afin de qualifier cette calibration, il est nécessaire de calculer plusieurs critères de performance, qui caractérisent la similarité entre le débit observé et le débit simulé. Ces critères seront décrits dans le paragraphe 2.3.2.3.

Phase 2 : Contrôle

On transfère alors le jeu de paramètres fixé dans une simulation sur la période dite de « contrôle ». Cette période doit avoir des données indépendantes de la période de calibration. De nouveau, on compare le débit simulé au débit observé, et on calcule les mêmes critères de performance que sur la phase de calibration. Notons que l'utilisation d'un modèle calibré doit en théorie suivre les 3 règles d'homogénéité : temporelle, spatiale et la stationnarité du fonctionnement du bassin versant. Un modèle calibré ne doit donc être appliqué que sur le bassin versant sur lequel l'apprentissage a été effectué, sans modification notable des débits et du bassin versant ([Mathevet, 2005](#)). Pourtant, cette hypothèse est très souvent mise en défaut dans les travaux de modélisation puisque cela impliquerait de réaliser une modélisation sur des données stationnaires or [Matheron \(1978\)](#) note (d'après [Le Moine, 2008](#)) que : « *Il n'y a pas deux expériences identiques : elles diffèrent toujours l'une de l'autre par quelques facteurs accessoires (mais c'est nous qui les jugeons tels), et par les conditions de lieu ou de temps. Tout ce que l'on peut dire, c'est que les facteurs qui nous paraissent importants ont été rendus aussi semblables que nous le permettent nos moyens techniques, et les autres sont ce qu'ils sont* ».

Dans notre cas d'étude d'influence du changement climatique, il est évident que les données ne seront pas stationnaires dans le temps (c'est même l'enjeu de notre étude).

On estimera l'efficacité d'un modèle à sa sensibilité (c'est-à-dire sa capacité à prendre en compte de fines variations dans les données entrées), sa robustesse et sa performance.

La sensibilité est directement liée à l'échelle de temps du modèle : plus le pas de temps est fin, plus la sensibilité du modèle sera grande ([Roche et al., 2012](#)). Le pas de temps journalier est un pas de temps permettant de prendre en compte de fines variations dans les régimes hydrologiques.

La robustesse décrit la capacité à reproduire la variabilité du phénomène étudié. Elle s'estime grâce aux périodes de contrôle (indépendantes des périodes de calage). Si les critères de performance restent homogènes entre calibration et contrôle, cela signifie que le modèle est capable de reproduire le débit de manière égale entre les périodes. A l'inverse, si les paramètres varient beaucoup et si les critères de performance diminuent fortement entre la calibration sur une période et le contrôle, cela signifie que le modèle n'a pas pris en compte la totalité de la variabilité climatique dans l'optimisation des paramètres.

Enfin, la performance est simplement déterminée par les valeurs des critères de performance calculés.

2.2.3.2 Sources d'incertitude

Les erreurs de modélisation sont les écarts entre les valeurs observées et les valeurs simulées. Même après calibrage des paramètres hydrologiques, des erreurs demeurent : ce sont les incertitudes. Les chroniques de débits en sortie du modèle devront être lues conjointement avec une estimation de l'incertitude de ces données.

Les erreurs et les incertitudes liées à la modélisation hydrologique sont de 3 types :

- le paramétrage, qui est fonction de la période de calibration ;
- le modèle lui-même, qui simplifie la complexité naturelle (spatiale et temporelle) ;

- les données en entrée (métrologie pour les observations et incertitudes de la modélisation climatique).

Le paramétrage du modèle

La calibration réalisée sur une période suppose que toute la variabilité hydrologique est contenue dans cette période. Dans ce cas, les paramètres fixés sont spécifiques au bassin versant, mais non à la période utilisée pour calibrer.

Le modèle lui-même

Le travail de modélisation sera réalisé en parallèle par le BRGM, sur le modèle GARDENIA (Thiéry, 2003), et permettra une comparaison de l'efficacité des modèles à reproduire le débit des cours d'eau. Ce sont tous les deux des modèles globaux. L'originalité de GARDENIA est qu'il prend en compte une donnée piézométrique dans le calibrage de ses paramètres. Les incertitudes liées à la modélisation hydrologique seront déterminées par une comparaison des débits simulés par GARDENIA et par GR4J.

Les données en entrée

Les chroniques de débits peuvent difficilement faire l'objet de comparaisons. Il n'est pas possible de renaturaliser les débits éventuellement anthropisés, de par l'absence de données journalières de prélèvement.

Du point de vue des incertitudes de la modélisation climatique, elles peuvent être issues également des données en entrée du modèle climatique, du scénario d'émissions de GES utilisé, et enfin du modèle climatique lui-même.

2.3 Choix opérationnels de la modélisation hydrologique

Nous avons vu dans la partie précédente la description de la chaîne de modélisation climatique, ainsi que la présentation du modèle hydrologique employé pour cette étude. La partie suivante concerne tous les choix techniques nécessaires pour aboutir au couplage de la modélisation climatique avec le modèle hydrologique, c'est-à-dire, de la calibration du modèle hydrologique grâce aux données simulées par la chaîne de modélisation « ERA-Interim => WRF ».

2.3.1 Données utilisées dans le modèle hydrologique

2.3.1.1 Choix des bassins versants

Les bassins versants retenus pour l'étude ont d'abord été sélectionnés parmi les stations hydrométriques de la Banque HYDRO (tenue par la DREAL). En effet, le calibrage étant nécessaire pour chaque bassin versant, il est important de disposer de chroniques de débits de qualité sur une longue période afin d'ajuster au mieux les paramètres du modèle. La banque HYDRO possède 202 stations en Bourgogne. Elles ont fait l'objet d'un tri à partir de critères objectifs, afin d'éliminer les stations non éligibles à l'étude et de garantir une modélisation « réalisable » :

- au moins 20 ans de données disponibles (sur la période 1980-2010) ;
- taille du bassin versant comprise entre 10 et 5000km² ;
 - o Un bassin trop « petit » est difficile à modéliser pour GR4J.
 - o Un bassin trop « grand » n'est pas pertinent pour l'enjeu de disponibilité de la ressource
- élimination des stations douteuses (selon l'expertise de la DREAL) ;
- élimination des stations dont le débit est trop influencé par les activités humaines.

Après quoi, il reste 61 stations sur le territoire de la Bourgogne. La région étant la tête de bassin de 3 grands bassins versants (Rhône, Seine, Loire), les bassins versants étudiés ont été répartis sur ces

3 grands territoires hydrographiques. Un pool de 12 bassins versants (soit 4 par bassin hydrographique) a donc été déterminé.

Le choix définitif s'est porté sur des bassins :

- peu influencés ([Marc Philippe, DREAL Bourgogne, communication personnelle](#)) ;
- où la ressource en eau est un enjeu (discussion avec les acteurs de l'Eau) ;
- déjà ciblés par les acteurs locaux (présence de SAGE, contrats de rivières, ZRE...) ;

On vérifiera dans la partie Résultats que ces 12 bassins versants recouvrent de manière représentative les grandes entités hydrogéologiques présentes en Bourgogne.

Les bassins versants retenus dans ce premier pool sont ceux décrits dans le tableau 2.

Bassin versant	Enjeu sur la ressource
L'Armançon à Brienon-sur-Armançon	Alimentation du lac de Pont (AEP), et du canal de Bourgogne
L'Arroux à Dracy-Saint-Loup	Zone d'expansion de crues
L'Arroux à Rigny-sur-Arroux	Zone d'expansion de crues, AEP, industries, alimentation du canal de Bourgogne
L'Yonne à Corancy	Tête de bassin, alimentation du lac de Pannecière, AEP
La Nièvre d'Arzembouy à Poiseux	Enjeux de milieux naturels
La Seille à Saint-Usuge	Enjeux de milieux naturels, enjeux quantitatifs
La Tille à Arceau (intermédiaire)	Tensions d'usages, soutien d'étiage, enjeu de solidarité de bassin
La Tille à Champdôtre (aval)	
La Tille à Crecey-sur-Tille (amont)	
Le Nohain à Saint-Martin-sur-Nohain	Irrigation estivale forte
Le Serein à Chablis	Enjeux quantitatifs, étiages sévères
L'Ource à Leuglay	Bassin de référence en zone karstique non influencée

Tableau 2 : Liste des bassins versants HYCCARE-Bourgogne (pool prioritaire)

Un deuxième choix de bassins versants a également été retenu (tableau 3). Ils seront utilisés dans le cas de difficultés rencontrées lors de la modélisation des bassins versants du pool 1 (prioritaire).

Bassin versant pool 2
L'Houssière à Chaumard
L'Ignon à Villecomte
La Bourbince à Vitry-en-Charollais
La Brenne à Montbard
La Celle à la Celle-en-Morvan
La Guye à Sigy-le-Chatel
La Sansfond à Saulon-la-Rue
La Seine à Nod-sur-Seine

Tableau 3 : Liste des bassins versants HYCCARE-Bourgogne (pool suppléant)

Les bassins versants décrits ci-dessus sont repris dans une carte récapitulative (figure 6). Seulement 5 bassins versants du pool 2 apparaissent sur cette carte, 3 de ces bassins versants étant des sous-bassins du pool 1 (la Brenne est un affluent de l'Armançon, l'Ignon un affluent de la Tille et la Celle un affluent de l'Arroux). En annexe n°1 est disponible une carte situant de manière plus précise les bassins versants ainsi que leur exutoire sur le territoire de la Bourgogne.

Pour plus de lisibilité dans les figures et de concision dans le texte, les bassins versants du pool 1 seront désignés par leur station hydrométrique dans la suite de ce manuscrit (Brienon ; Dracy-St-Loup ; Poiseux...).

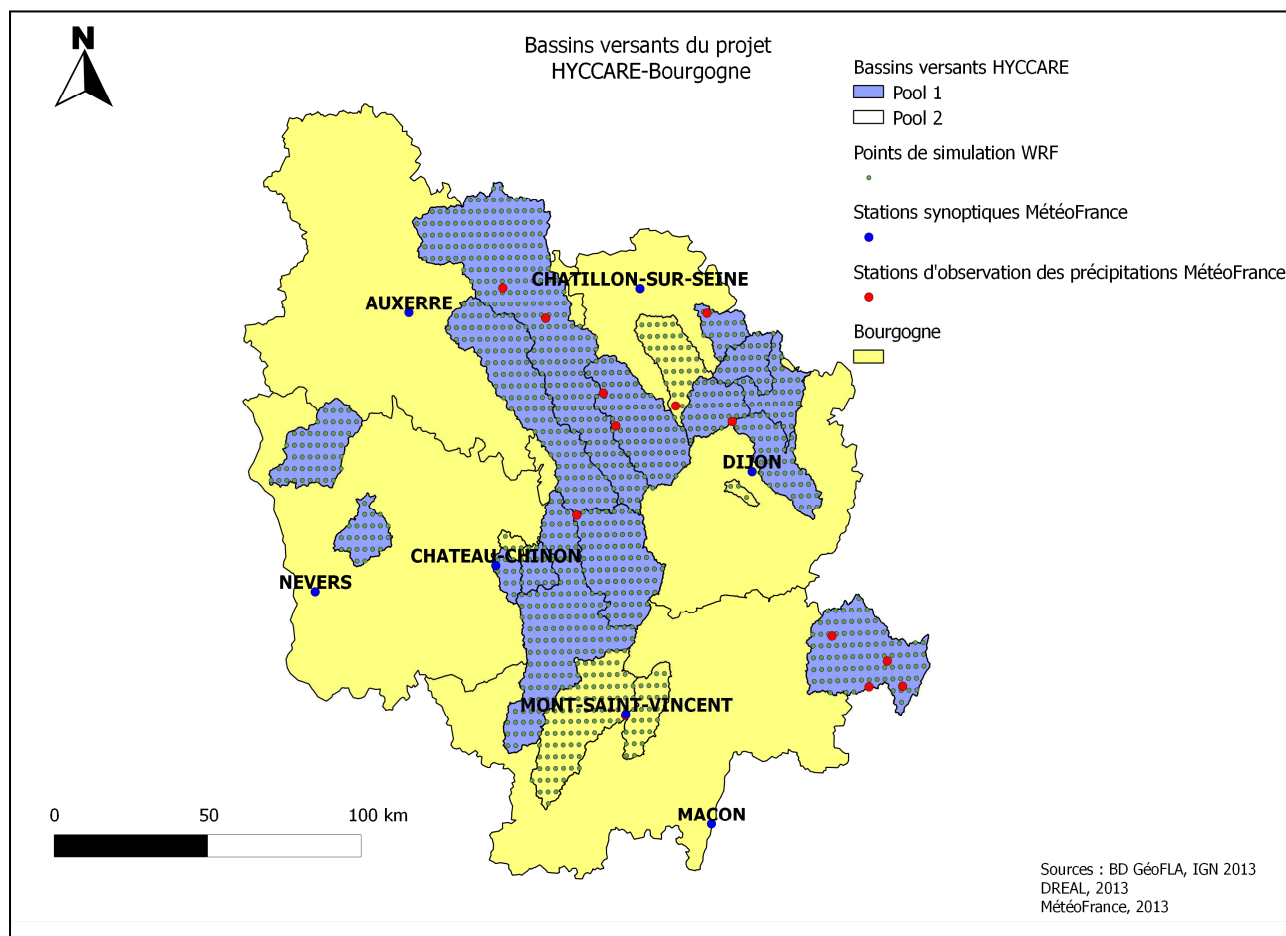


Figure 6: Situation géographique des bassins versants sur la Bourgogne

2.3.1.2 Données climatiques en entrée du modèle hydrologique

Le modèle hydrologique sera forcé par les données issues de la modélisation climatique. La calibration des modèles hydrologiques se fera donc sur les données simulées à partir de la chaîne de simulation « ERA-Intérim → WRF ».

Formulation de l'ETP

Ce concept, introduit en 1948 par Thornwaite : « Il y a une distinction entre le volume d'eau qui est effectivement évapotranspiré et celui qui pourrait être évapotranspiré s'il était disponible » a largement été utilisé dans des domaines tels que l'hydrologie ou l'agronomie. Oudin (2004) présente l'influence de l'intégration de plusieurs formes d'ETP sur la simulation des débits par le modèle GR4J. Il apparaît que la formulation de l'ETP importe peu sur le résultat en terme de débit. En terme de variabilité spatiale, la spatialisation de l'ETP ou au contraire, la régionalisation à partir de données observées, n'a pas d'influence sur le débit. De la même manière, l'utilisation de données journalières datées ou de moyennes journalières interannuelles ne provoque pas de différence sur la modélisation. Le modèle WRF utilisé par le CRC fournit les paramètres climatiques nécessaires au calcul de l'ETP de Pennman. Néanmoins, la formulation de l'ETP qui sera appliquée est une version modifiée de l'ETP de Pennman-Monteith (FAO, 1998) selon l'équation 4.

$$ETP = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad \text{Éq. 4}$$

Avec

- ETP : Evapotranspiration potentielle (mm/jour)
- Rn : radiation nette en surface (MJ/m²/jour)
- G : densité du flux de chaleur du sol (MJ/m²/jour)
- T : température journalière moyenne de l'air à 2m de hauteur (°C)
- u₂ : vitesse du vent à 2m de hauteur (m/s)
- e_s : pression de vapeur saturante (kPa)
- e_a : pression de vapeur ambiante (kPa)
- e_s - e_a : déficit de pression de vapeur saturante (kPa)
- Δ : pente de la courbe de pression de vapeur (kPa/°C)
- γ : constante psychrométrique (kPa/°C)

L'ETP sera fournie au pas de temps journalier et sur la même maille que les précipitations, soit un point tous les 3km. Ici nous resterons sur une moyenne équipondérée des valeurs d'ETP sur le territoire de chaque bassin versant.

Le modèle GR4J calcule sa propre valeur d'évapotranspiration réelle (ETR) à partir de l'ETP en entrée (voir équation 5). Cette valeur est fonction des précipitations, de l'ETP, du paramètre X1 et de S, le coefficient de remplissage du réservoir sol (dont la taille en mm est définie par le paramètre X1).

$$ETR = ETP \left(\frac{S}{X1} \left(2 - \frac{S}{X1} \right) \right) \quad \text{Éq. 5}$$

Avec

- ETR : évapotranspiration réelle (mm/jour)
- ETP : évapotranspiration potentielle (mm/jour)
- S : quantité d'eau du réservoir de production (mm)
- X1 : volume du réservoir de production (mm)

Les précipitations

Il apparaît que les modèles « pluie-débit » globaux s'adaptent à la méthode de calcul des précipitations moyennes ([Andréassian et al., 2001](#) ; [Mathevet, 2005](#)). Ici, nous resterons donc sur une moyenne équipondérée des valeurs de précipitations sur le territoire de chaque bassin versant (moyenne des points inclus dans le contour du bassin versant).

2.3.2 Calibrage-contrôle

La bonne calibration du modèle hydrologique sur le temps présent est le seul gage de qualité des simulations hydrologiques sur le temps futur. Il est indispensable que la méthodologie employée ici soit la plus précise possible, afin d'identifier clairement l'influence de chaque paramètre en jeu.

Comme vu précédemment, la phase de calibrage doit être différente de la phase de contrôle. Il faut donc au préalable sous-échantillonner la période de disponibilité des données. Dans notre cas, la période 1980-2011 a été retenue comme période référence, car c'est celle pour laquelle il existe moins de lacunes dans les observations climatiques utilisées. De plus, les données de chroniques de débits sont également suffisamment fournies sur cette période.

2.3.2.1 Période de Calibration/contrôle

La calibration est réalisée sur chaque bassin versant. Afin de réaliser un nombre important de contrôles pour la même période de référence, on utilise la méthode de split-sampling ([Le Moine, 2008](#), d'après [Klemes, 1986 b](#)). La figure 7 résume ce principe. La période de référence est divisée en plusieurs sous-périodes d'une durée suffisamment grande pour (on en fait l'hypothèse) qu'elle comprenne la totalité de la variabilité hydrologique. On réalise ensuite une calibration

(apprentissage du modèle) sur chacune de ces périodes. Notons que la première année de la période de calibrage est destinée à l'initialisation du modèle (estimation des paramètres initiaux du modèle : niveau de remplissage des réservoirs). Puis, sur les autres sous-périodes (de contrôle), on transfère le modèle calibré et on compare de nouveau le débit simulé au débit observé.

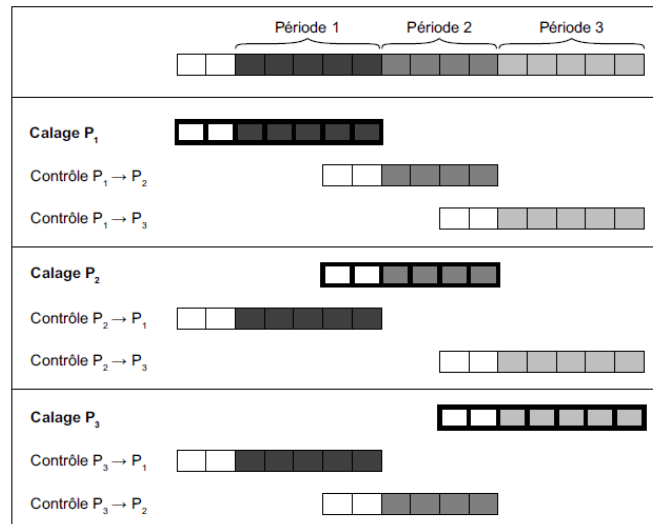


Figure 7 : Méthode de « split sampling » (Le Moine, 2008).

2.3.2.2 Techniques de calibration

Les techniques de calibration des paramètres peuvent être manuelles (graphiques), on compare alors visuellement le débit observé au débit simulé, ou bien automatiques, via des algorithmes de calcul. L'algorithme minimise les différences entre débit simulé et observé en faisant varier les paramètres optimisables (Rojas Serna, 2005). Le principe de cette optimisation a été schématisé dans la figure 8. Lorsque le débit simulé ne se rapproche plus du débit observé (c'est-à-dire que la F.O ne varie plus significativement), le jeu de paramètres est fixé.

Le jeu de paramètres enfin déterminé est en théorie dépendant du bassin versant mais non des données de la séquence chronologique utilisée. Les paramètres sont donc censés être constants quelle que soit la période de calibration. Le jeu de paramètres fixé permet de simuler le débit qui est comparé au débit observé par l'intermédiaire de plusieurs critères de performance (voir paragraphe 2.3.2.3). Puis on réalise l'étape de contrôle : on transfère les mêmes paramètres sur une période différente. Les mêmes critères de performance sont alors également calculés.

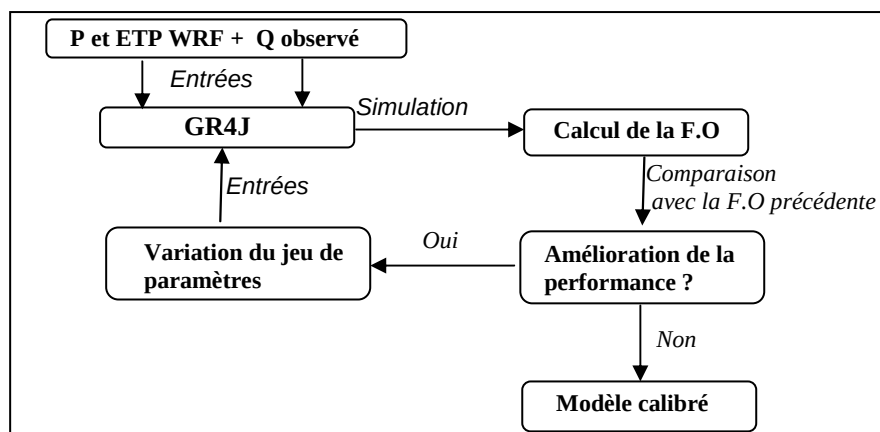


Figure 8 : Principe de la méthode d'optimisation des paramètres

Le tableau 4 présente un exemple de calibration/contrôle : on calibre successivement sur P1, P2 et P3 et on contrôle à chaque fois sur les deux autres sous-périodes.

		Contrôle		
		P1	P2	P3
Calibration	P1	0.82	0.75	0.71
	P2	0.76	0.78	0.65
	P3	0.65	0.68	0.72

0,123 Valeur de la F.O en contrôle sur la période de calibration

Tableau 4 : Exemple de calibration/contrôle avec la F.O comme critère de performance

La robustesse du modèle peut être estimée en comparant les valeurs du critère de performance sur la période de calibration, et celles sur les périodes de contrôle (lecture horizontale dans le tableau 4). Si les critères de performance sont très différents entre une période de calibration et les contrôles associés, cela signifie que la période de calibration a un comportement hydrologique différent des autres périodes donc que l'hypothèse de stationnarité du climat sur l'ensemble de la période n'est pas respectée. Le paramétrage issu de cette calibration sera biaisé, et le modèle ne pourra pas reproduire toute la variabilité hydrologique.

Il est également possible de comparer les critères de performance en calibration sur une période, et ceux en contrôle sur la même période (lecture verticale dans le tableau). De la même manière, si les valeurs sont trop différentes, cela signifie que la calibration sur une sous-période ne permet pas de reproduire les débits sur une autre sous-période.

Notons que la meilleure performance doit être atteinte lors du contrôle sur la période de calibration. Chaque cellule en diagonale doit contenir les plus grandes valeurs de la ligne et de la colonne à laquelle elle appartient. Le contraire indique un problème méthodologique dans la calibration.

Les conditions initiales (niveau de remplissage du réservoir de production et du réservoir de routage) sont amenées à 0 au début de chaque simulation. Le but de la période d'initialisation est d'estimer ces valeurs. On utilisera une période d'au moins un an pour l'initialisation ([ICC-HYDROQUAL, 2010](#)), soit un cycle hydrologique complet.

2.3.2.3 Critères de performance

Dans le cadre de ce travail, nous n'utiliserons que des critères de performance quantitatifs (la performance ne sera pas évaluée par l'analyse graphique des débits). Nous verrons ici quelques exemples de critères quantitatifs, qui nous semblent plus objectifs.

Critère de Nash et Sutcliffe

Le critère est donné par l'équation suivante :

Avec :

- NS : Critère de Nash et Sutcliffe
- $Q_{obs,i}$: le débit observé au jour i (mm)
- $Q_{sim,i}$: le débit simulé au jour i (mm)
- $\overline{Q_{obs}}$: le débit moyen observé

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

Éq. 6

Le critère de NS donne une valeur comprise entre moins l'infini et 1. Si la valeur est de 1, l'ajustement entre le débit simulé et le débit observé est parfait. Si la valeur est négative, alors le débit simulé est moins juste que le débit moyen observé appliqué de manière constante. Ce critère

est sensible aux valeurs extrêmes (Legates and McCabe, 1999) et relativement exigeant sur la restitution des débits en hautes eaux (ICC-HYDROQUAL, 2010).

Pour réduire la sensibilité aux valeurs extrêmes, on peut utiliser -au lieu du débit- la racine du débit, qui prend en compte de manière égale tous les comportements du régime hydrologique, ou le logarithme népérien du débit, plus exigeant sur la restitution en basses eaux (Le Moine, 2008).

Dans la suite de ce manuscrit, les différents critères de Nash seront nommés NS pour le critère de Nash et Sutcliffe, NS R(Q) pour le critère sur la racine des débits, et NS log (Q) pour le critère sur le logarithme des débits. Ils seront également utilisés en tant que F.O durant les calibrations.

Critère de performance fréquentiel

Dans notre étude, les données en entrée sont issues de la simulation climatique et peuvent posséder un biais de phasage. Il apparaît nécessaire de ne pas prendre en compte ce biais lors du calcul de la performance du modèle. Le calcul d'un critère de performance basé sur la fréquence de distribution des débits sera plus à même de comparer les simulations et les observations. Le critère de performance est donné par l'équation 5.

$$A = 1 - D \quad \text{Éq. 7}$$

Avec

- A : critère de performance fréquentiel
- D : distance maximale entre la distribution des débits de référence et simulés

La figure 9 illustre la distance maximale D. Avec un tel critère, la modélisation obtiendra un bon résultat si les débits reviennent aux mêmes fréquences, sans prise en compte du phasage temporel exact. Ce critère fréquentiel est compris dans un domaine de variation de 0 à 1.

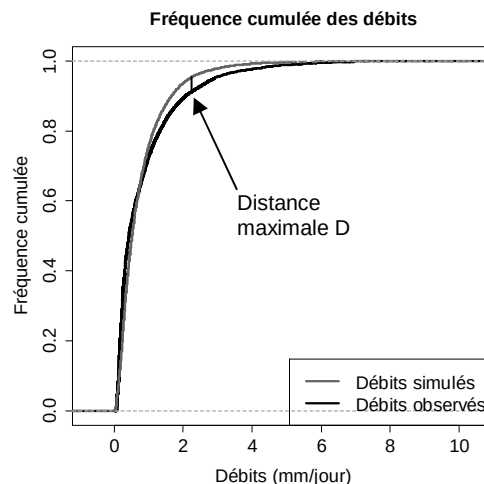


Figure 9: Principe du critère de performance fréquentiel

Valeur attendue du critère NS :

Certains auteurs ont réalisé des tests des modèles globaux à grande échelle (sur de nombreux bassins versants). Les valeurs moyennes du critère NS R(Q) obtenues en calibration et contrôle lors de ces tests sont reprises dans le tableau 5. On constate que la valeur attendue de ce critère de performance, sur un grand nombre de calibration, est de l'ordre de 0,6 à 0,7, tandis que la valeur en contrôle sera de l'ordre de 0,44 à 0,54.

Auteur	Mathevet (2005)	Perrin et al. (2001)	Perrin et al.(2003)
Modèle testé	4 modèles globaux	19 modèles globaux	GR4J
Nbre de paramètres	4 à 10	6 à 9	4
Nbre de bassins versants	313	429	
NS R(Q) en calibration	0,620	0,699	-
NS R(Q) en contrôle	0,440	0,542	0,510

Tableau 5 : Valeurs attendues du critère NS R(Q) sur un large échantillon de bassins versants

2.3.3 Réalisation des scripts sous R.

2.3.3.1 Indexation des données

La première étape a été de choisir un support pour la modélisation. Le modèle GR4J a été programmé dans plusieurs langages (Visual Basic, FORTRAN, package R, Scilab...). Notre choix s'est porté sur le logiciel R, via le package « hydromad » ([Andrews, 2011](#)) développé par les chercheurs Australiens Tony Jakeman et Barry Croke à l'Université Nationale Australienne.

La première étape a consisté à indexer (sous QGIS) les données de précipitations, d'évapotranspirations et de débits par bassin versant. Il a fallu assigner à chaque point de la grille de simulation WRF (1160 points) le bassin versant auquel il appartient (cf figure 6). Les valeurs moyennes des variables nécessaires à l'utilisation du modèle GR4J sont alors calculées sous R pour chaque bassin versant. On obtient ainsi pour chaque bassin versant un fichier contenant les entrées nécessaires à l'utilisation du modèle GR4J ainsi que la date du jour. Chaque fichier contient 11686 lignes, correspondant chacune à un jour (du 1^{er} janvier 1980 au 29 décembre 2011).

2.3.3.2 Production et modèle de routage

Le package hydromad propose plusieurs fonctions de production, appelées SMA (Soil Moisture Accounting) et de routage (routing). Nous avons choisi le SMA « gr4j » qui détermine les précipitations réelles (mm) à partir des précipitations et de l'ETP. Ces précipitations réelles sont ensuite transformées en débit (en mm également) par le biais de la fonction de routage « gr4jrouting ». ([Andrews, 2011](#)). Les paramètres du SMA et de la fonction de routage nécessitent d'être bornés avant de réaliser toute calibration. Par défaut, la valeur de ces paramètres est donnée par un minimum et un maximum, correspondant à l'intervalle de confiance à 80% décrit par [Perrin et al \(2003\)](#) (cf tableau 1).

2.3.3.3 Options de calibration

La méthode d'optimisation choisie est la méthode « fitByOptim » comprise dans le package hydromad. Elle possède de nombreux arguments qu'il convient de préciser pour réaliser une calibration ([Andrews, 2011](#)).

Algorithme d'optimisation des paramètres

L'algorithme utilisé est l'algorithme « Nelder-Mead ».

Fonction « objectif » (F.O)

Les différentes F.O choisies sont successivement le NS, le NS R(Q) et le NS log (Q).

Contrôle de l'optimisation

L'optimisation s'arrête lorsque la valeur de la F.O n'augmente plus de manière significative entre deux itérations. Cette différence de valeurs de F.O, ou tolérance, peut être modifiée manuellement. Ici on a utilisé une tolérance de 1.10^{-5} . Dans le cas où le nombre d'itérations maximal est faible, il est possible que l'algorithme n'ait pas eu le temps de converger. Nous avons choisi d'augmenter le nombre maximal d'itérations de 200 à 400 itérations.

Pré-échantillonnage des paramètres

Afin de fournir un jeu de paramètres initial, point de départ de l'optimisation, l'algorithme échantillonne un certain nombre de jeux de paramètres, compris dans leur domaine de variation. Ici, nous avons laissé la valeur par défaut (100). L'algorithme choisit alors comme condition initiale le jeu de paramètres qui fournit la meilleure valeur de F.O. Ici, l'échantillonnage se fait linéairement entre les bornes inférieures et supérieures de chaque paramètre (méthode « latin.hypercube »).

Partie 3 : Résultats

3.1 Représentativité des bassins versants

Le projet porte sur l'impact du changement climatique sur la région entière, il faut donc s'assurer que les bassins versants retenus puissent reprendre les différents contextes naturels de la Bourgogne. Cette partie présente le contexte naturel de la Bourgogne puis quelques arguments concernant la représentativité des bassins versants à l'échelle de la Bourgogne. Le tableau des caractéristiques des précipitations, du débit et de l'ETP, ainsi que plusieurs indices de caractérisation du fonctionnement hydrologique des bassins versants sont disponibles en annexe n°2.

3.1.1 Contexte naturel de la Bourgogne

D'une superficie d'environ 31500 km², la Bourgogne est située dans le quart Nord-Est de la France. Elle présente des reliefs variés, qui sont la traduction de phénomènes géologiques bien distincts. A l'Ouest, le Morvan est constitué d'un socle primaire (qui est le prolongement du Massif Central). A l'Est, la Bourgogne est traversée par un relief de côte, d'axe Nord-Est/Sud-Ouest, issu de l'ouverture du fossé Bressan à l'Oligocène, formant ainsi les coteaux calcaires sur lesquels la viticulture a pu se développer. Ces différents reliefs influencent la répartition des précipitations et des températures. La Bourgogne va subir plusieurs influences climatiques : à l'Ouest du Morvan, un climat océanique dégradé, avec des hivers doux et pluvieux et des étés frais et humides ; à l'Est, dans la plaine de la Saône, un climat plus continental avec également des influences méditerranéennes, aboutissant à des hivers plus froids et secs, et des étés plus chauds ([Chabin et al., 1984](#) ; [Chabin, 1985](#), d'après [Cuccia, 2008](#)).

Les précipitations moyennes annuelles varient fortement selon la situation géographique. Ainsi, elles atteignent environ 850 mm par an en moyenne régionale ([DREAL, 2013](#)), le minimum est visible dans le nord de l'Yonne, où le cumul annuel de précipitations est de l'ordre de 600 à 700mm. Les précipitations sont comprises entre 700 et 900 mm dans la plaine de Saône et en Côte d'Or, et peuvent dépasser localement 1500mm par an sur le massif du Morvan, véritable « château-d'eau » de la région Bourgogne ([Conseil Régional de Bourgogne, 2004](#)). La carte de la pluviométrie en Bourgogne est disponible en annexe n°3.

Dans les années 1960 et 1970, les températures moyennes annuelles sur la région variaient autour de 10°C. Depuis 1987 elles varient autour de 11°C ([Cuccia, 2008](#)).

3.1.2 Description des bassins versants

3.1.2.1 Distribution géographique et représentativité hydroclimatique

Les 12 bassins versants étudiés ont leur exutoire en Bourgogne. Ils occupent une surface de 9549 km² dont 1327km² sont situés en dehors de la Bourgogne (661 km² dans le département du Jura, 135km² dans le département de la Haute-Marne et 531km² dans le département de l'Aube). Ainsi, la surface occupée par les bassins versants reprend 26% du territoire de la Bourgogne.

La Bourgogne est divisée en 3 grands bassins hydrographiques (Loire, Seine et Rhône). Le choix des bassins versants a également suivi une répartition égale entre ces bassins. Le tableau 6 montre la répartition de l'occupation des bassins hydrographiques sur la Bourgogne et sur les bassins versants. Nos bassins versants paraissent répartis équitablement sur ces grands bassins hydrographiques.

Bassin hydrographique	Bourgogne	12 bassins versants
Loire-Bretagne	31 %	31 %
Seine-Normandie	42 %	46 %
Rhône-Méditerranée-Corse	27 %	23 %

Tableau 6 : Répartition des grands bassins hydrographiques sur la Bourgogne et les bassins versants

De plus, les 12 bassins versants sont également bien répartis sur les reliefs de la Bourgogne (figure 10) ce qui assure une bonne représentativité des différents contextes hydroclimatiques présentés précédemment.

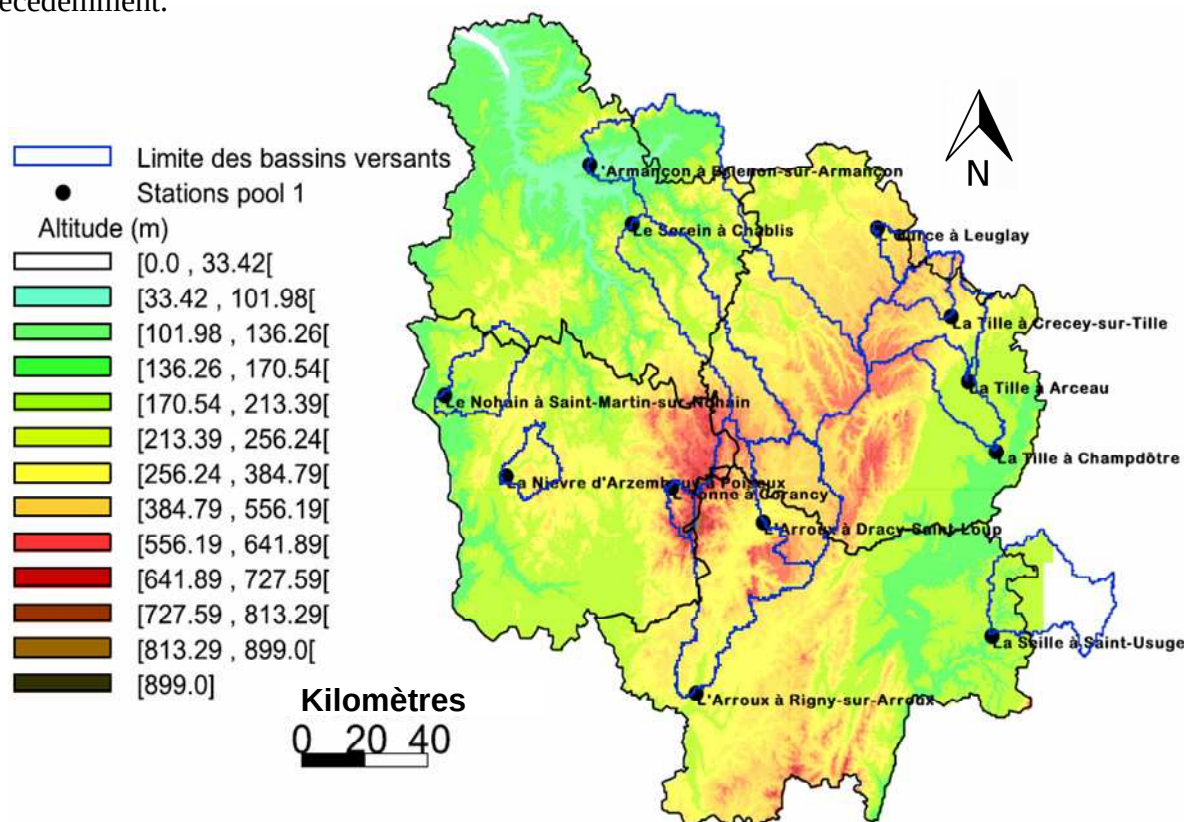


Figure 10 : Altitude en Bourgogne et situation géographique des bassins versants

Concernant les écoulements annuels, ils sont d'environ 372 mm/an sur nos bassins versants. Ces écoulements sont répartis dans l'année selon l'hydrogramme moyen mensuel interannuel présenté dans la figure 11. on observe un étiage principalement durant le mois d'août avec une lame d'eau de 10 mm en moyenne tandis que les mois de décembre et janvier présentent des écoulements mensuels moyens d'environ 60 mm.

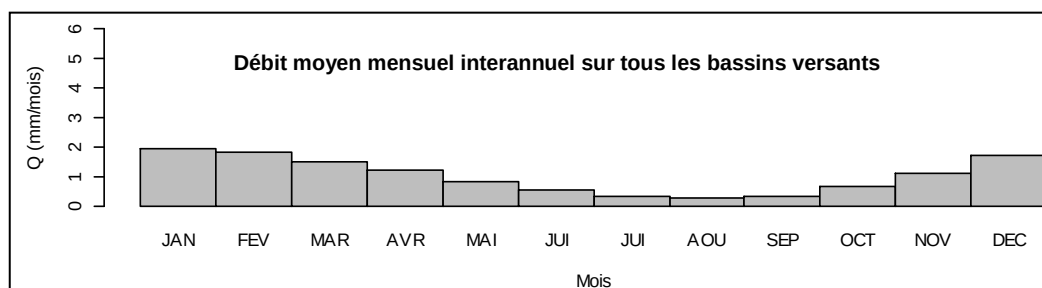
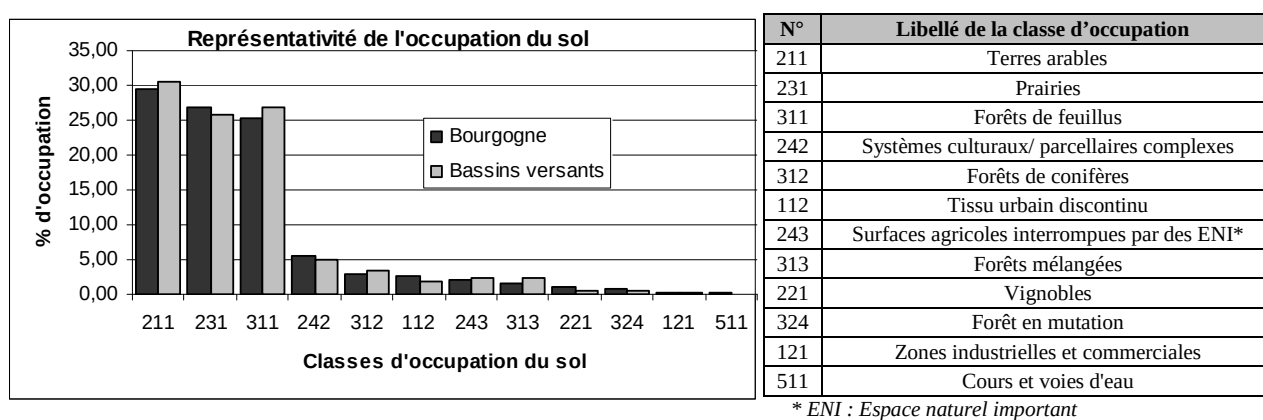


Figure 11 : Hydrogramme mensuel interannuel de l'ensemble des bassins versants

3.1.2.2 Occupation du sol

Le type d'occupation du sol joue un rôle prépondérant dans l'imperméabilité de surface, et donc la proportion de ruissellement et d'infiltration des précipitations. Le couvert végétal, selon sa densité et sa nature, intercepte une partie des précipitations, alors soustraite à l'écoulement (Musy, 2004). La forêt par exemple, grâce à sa frondaison, régule le débit des cours d'eau en tamponnant les événements pluvieux importants. En revanche, un sol nu induit un ruissellement rapide. Le type de sol joue également un rôle puisque ses caractéristiques physiques (infiltrabilité, capacité de rétention, taux d'humidité) régulent les écoulements (Musy, 2004). La base de données Corine Land Cover (2006), issue du programme de l'Agence Européenne de l'Environnement est utilisée pour comparer la répartition de l'occupation du sol de la Bourgogne à celle des bassins versants. Notons que les surfaces hors Bourgogne ont été prises en compte dans l'occupation du sol des bassins versants concernés, et pas dans celle de la Bourgogne. La figure 12 décrit la répartition des différentes classes d'occupation du sol pour la Bourgogne et les bassins versants.



* ENI : Espace naturel important

Figure 12 : Proportion des principales classes d'occupation du sol en Bourgognes et sur les bassins versants étudiés

La répartition de l'occupation du sol des bassins versants suit de très près celle de la région entière. Les 3 classes prépondérantes (terres arables, prairies et forêts de feuillus) occupent 81.7% de la Bourgogne et 83.2% des 12 bassins versants. La somme des 12 principales classes d'occupation représente un cumul de 98.9% sur la Bourgogne et 99.4% sur les bassins versants. La description totale est présente en annexe n°4. Elle indique que les surfaces agricoles représentent un total de 37.4% sur la Bourgogne et 37.8% sur les bassins versants. Viennent ensuite les espaces boisés (30.6% pour la Bourgogne, et 33.3% pour les bassins versants). Les surfaces prairiales sont également bien représentées (26.9% en Bourgogne et 25.9% sur les bassins versants). Les surfaces urbanisées, quant à elles, ne représentent que 3.3% sur la Bourgogne, et encore moins sur les bassins versants (2.3%). La représentativité des 12 bassins versants à l'échelle de la Bourgogne en terme d'occupation du sol est donc très bonne.

3.1.2.3 Substratum géologique

La connaissance du substratum géologique s'avère également très importante pour comprendre le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant. La nature géologique du substratum joue un rôle sur l'écoulement des eaux (souterraines ou superficielles). La nature lithologique induit une perméabilité ainsi qu'une érodabilité spécifique. Mais ces caractéristiques sont modulées par la structure tectonique du substratum (Musy, 2004). La présence de diaclases et de failles permet en effet une infiltration facilitée dans la roche, et une rétention éventuelle.

On peut identifier plusieurs grands contextes hydrogéologiques (figure 13) correspondant à des grands ensembles géologiques et aboutissant à des fonctionnements hydrologiques différents.

Le socle métamorphique et plutonique du Morvan (1) est lié à la présence de reliefs anciens. Ces reliefs ont été érodés et mis à nus. De nature géologique moins tendre que les roches sédimentaires, ces roches ne vont contenir que des nappes superficielles, nombreuses mais peu puissantes. L'accumulation des eaux est alors uniquement possible par la construction de barrages réservoirs.

En périphérie du massif précédent se trouvent les **grès et schistes du Permien/Trias, et les argiles du Jurassique inférieur (Lias) (2)**, ces formations géologiques comprennent des systèmes aquifères très localisés et peu productifs (BRGM, 1970).

Les marnes et les calcaires du Jurassique moyen et supérieur (3) représentent une grande partie des réserves aquifères de la région. Ces formations géologiques abritent des réseaux karstiques parfois très développés et les nappes sous-jacentes peuvent être profondes. Les sources issues de ces nappes présentent des débits élevés (BRGM, 1970).

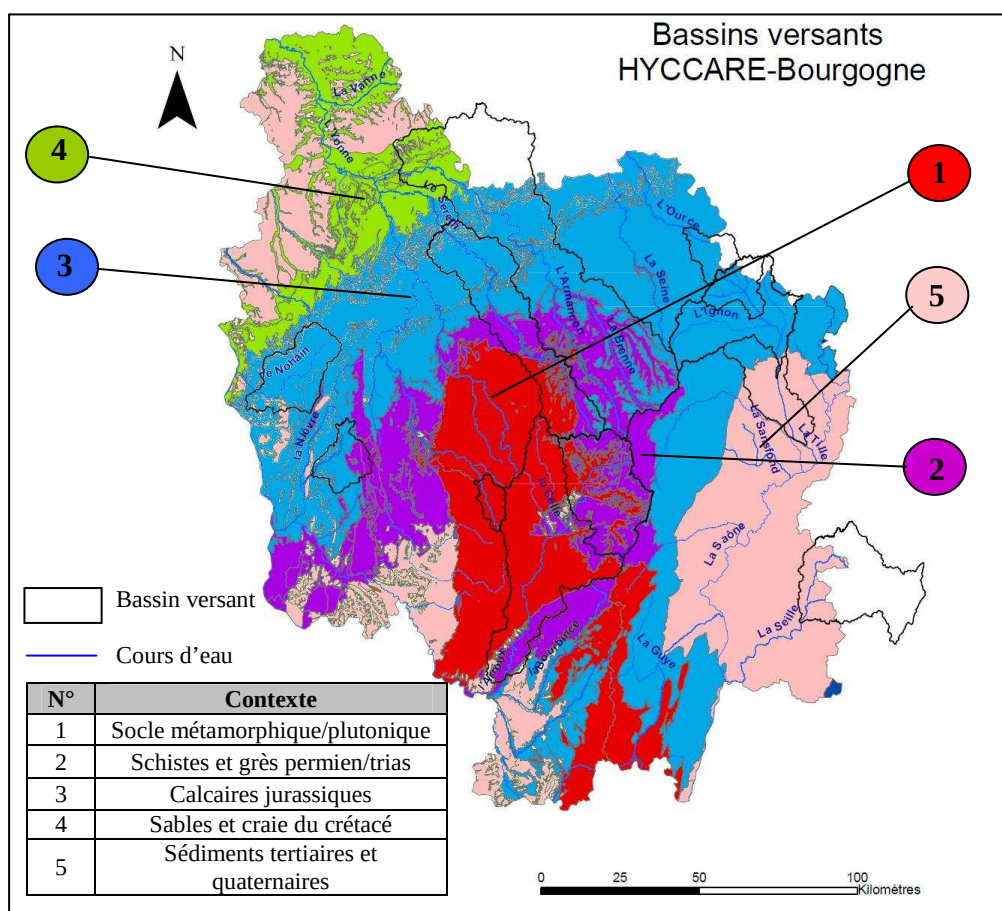


Figure 13 : Grands domaines géologiques de Bourgogne

Les sables et la craie du Crétacé (4) représentent également des réserves remarquables. Les sources issues de ces nappes peuvent néanmoins présenter des débits variables, selon le degré de fracturation et de dissolution de la craie.

Les sédiments récents (du tertiaire et du quaternaire) (5) localisés dans le fossé breton et le bassin de la Loire, sont constitués pour grande partie d'argiles et de marnes. Ils n'accueillent pas d'importantes réserves aquifères. Mais les nappes d'accompagnement des vallées fluviales (Yonne, Saône, et Loire) peuvent accueillir des réserves notables, et permettent le captage de forts débits (BRGM, 1970).

Représentativité des bassins versants

La représentativité des bassins versants va être déterminée à l'aide de la base de données BD LISA (**B**ase de **D**onnées sur les **L**imites des **S**ystèmes **A**quifères) qui correspond à un référentiel hydrogéologique français (Seguin and Mardhel, 2012) à plusieurs échelles de détails (niveau national, régional et local). Nous avons utilisé la base de données à son niveau de détails le plus élevé (local). Elle contient également les ordres de superposition relatifs des formations géologiques. Nous considérons ici la couche la plus superficielle, correspondant donc aux formations affleurantes sur la Bourgogne (ordre de superposition 1). La nature des entités composant l'ordre 1 est alors comparée. Pour plus de lisibilité, nous avons regroupé les différentes entités selon les 5 principaux contextes décrits précédemment (tableau 7).

Formations géologiques		Socle métamorphique et plutonique (1)	Permien/Trias (2)	Jurassique (3)	Crétacé (4)	Sédiments récents (5)	Total
Occupation (%)	Bourgogne	15,3	4,9	44,3	15,5	19,9	100
	12 bassins versants	23,4	8,9	49,9	8	9,8	100

Tableau 7 : Proportion des grands contextes hydrogéologiques sur la Bourgogne et sur les bassins versants

On constate une sur-représentation du socle métamorphique et plutonique ainsi que des schistes et grès du Permien/Trias et une sous-représentation des sables et de la craie du Crétacé et des sédiments récents. Néanmoins, on observe que le principal contexte hydrogéologique de la région Bourgogne (à savoir les calcaires jurassiques) est bien représenté sur nos bassins versants. Au-delà de ces constats, on note également que chaque contexte est bel et bien présent sur la surface des bassins versants.

3.2 Hydroclimatologie de la période 1980-2011 en Bourgogne

La méthodologie de calibration/contrôle nécessite que l'on sous-échantillonne la période entière de disponibilité des données (1980-2011) en sous-périodes de calibration et de contrôle. Il est donc apparu essentiel de décrire ces différentes périodes et de voir en quoi elles présentent des similarités ou des dissemblances. Pour chaque bassin versant les chroniques ont été découpées d'une des manières décrites dans la figure 14. La première année ne servant pas à la simulation, elle peut être reprise dans la sous-période précédente sans compromettre l'indépendance des données entre les sous-périodes consécutives.

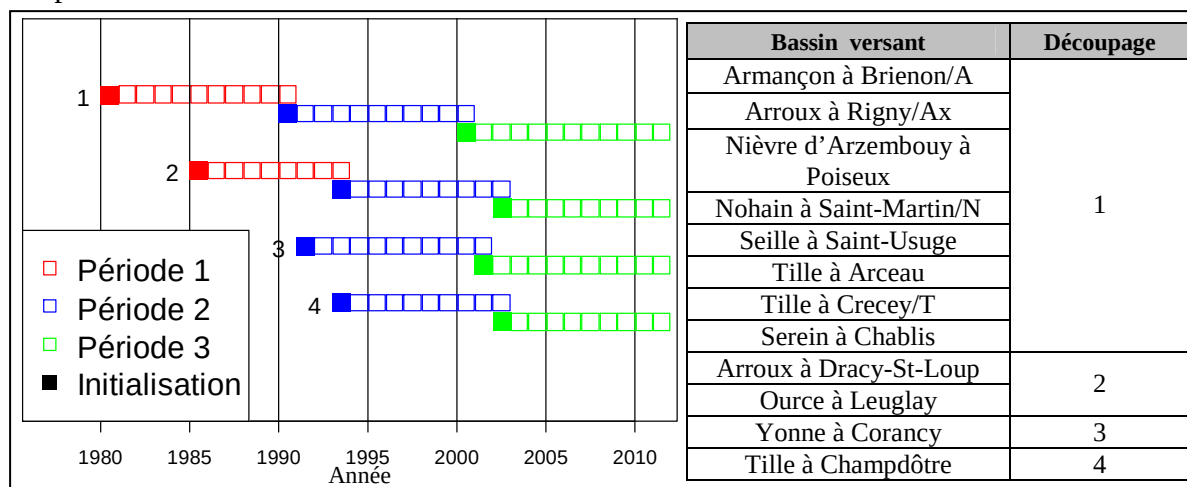


Figure 14: Découpage des périodes et bassins versants associés

3.2.1 Ecoulements et précipitations annuels par période

3.2.1.1 Débit observé et précipitations WRF

Les débits, précipitations et ratios pluie-débit annuels de chaque bassin versant ont été extraits des chroniques et sont représentés sous la forme de courbes de fréquences cumulées, tous bassins versants confondus pour chaque période (P1, P2 et P3) (figure 15). On constate que les débits annuels moyens (figure 15 a) sont plus élevés durant la période 1, tandis que les périodes 2 et 3 ont des distributions de débit similaires.

En ce qui concerne les précipitations annuelles (Figure 15 b), c'est la période 3 qui se démarque avec des cumuls annuels de précipitations plus forts. Par conséquent, lorsqu'on compare les ratios pluie-débit entre les périodes (figure 15 c), il apparaît un contraste entre la période 1 (qui possède de forts débits et des précipitations similaires aux autres périodes) et la période 3 (qui comprend les plus fortes précipitations). Le rendement (taux de transformation des précipitations en débit) est plus important durant la période 1. La période 2 est intermédiaire mais se rapproche davantage de la période 3.

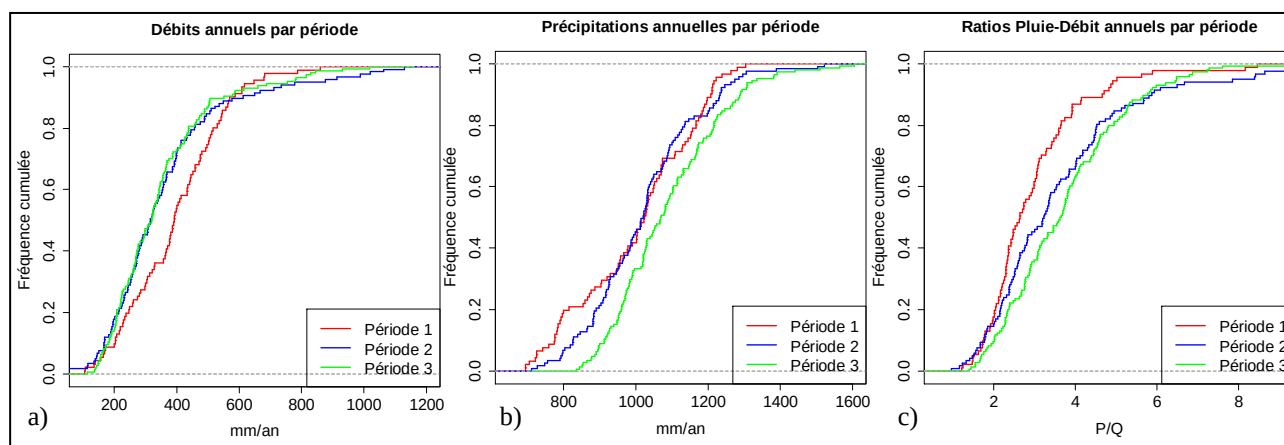


Figure 15: Fréquences cumulées tous bassins versants confondus des a) Débits annuels, b) Précipitations annuelles, c) Ratios pluie-débit annuels, issues des précipitations WRF.

3.2.1.2 Débit observé et précipitations observées

Sur la surface totale des 12 bassins versants, 11 stations d'observation des précipitations (MétéoFrance) possèdent des chroniques non lacunaires sur la période 1980-2011. La position géographique de ces stations est visible dans la figure 6 (paragraphe 2.1.2). Ainsi, on isole 5 bassins versants possédant au moins une station d'observation des précipitations (Tableau 8).

Bassin versant	Nombre de stations
Leuglay	1
St-Usuge	4
Dracy-St-Loup	1
Arceau	1
Brienon/A	4

Tableau 8 : Stations d'observations des pluies par bassin versant

Les mêmes graphes de fréquence cumulée (cf figure 15) sont réalisés avec les débits et les précipitations issues des 5 bassins versants cités plus haut (figure 16). La distribution des débits pour les 5 bassins versants est similaire à celle des 12 bassins versants. La période 1 ressort également comme possédant les débits annuels les plus forts. Par contre, les précipitations annuelles observées (figure 16 b) présentent moins de variations entre les périodes que les précipitations WRF

(cf figure 15 b). De plus, les valeurs de cumuls annuels de précipitations sont comprises entre 700 et 1500mm avec les précipitations WRF et entre 500 et 1300mm avec les précipitations observées. Cependant, lorsqu'on s'attarde sur les ratios « pluie-débit » (figure 16 c), on constate qu'ils sont compris dans la même gamme de variation (entre 1 et 9) et que la période 1 présente des ratios inférieurs aux deux autres périodes, comme dans le cas des précipitations WRF (cf figure 15 c).

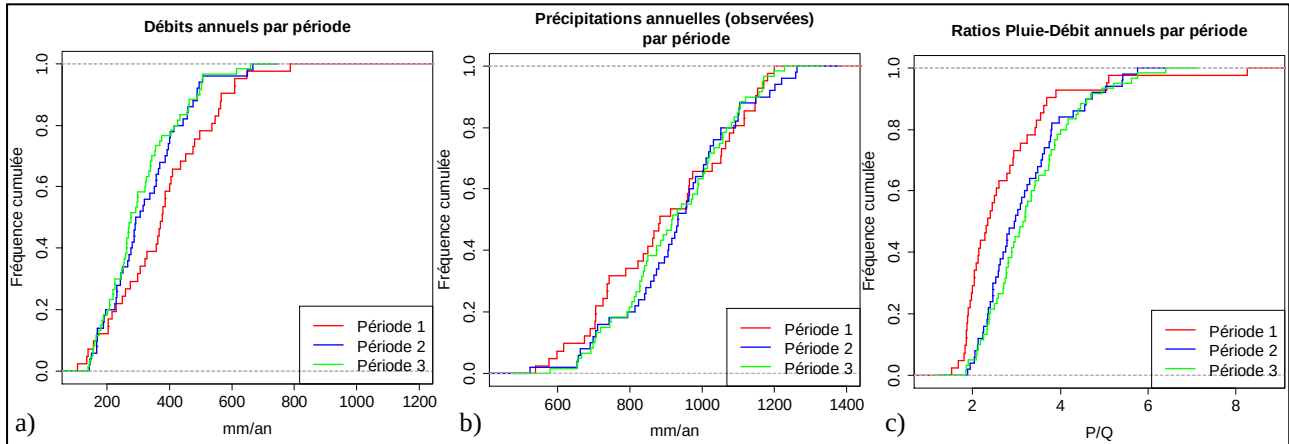


Figure 16: Fréquences cumulées de 5 bassins versants confondus des a) Débits annuels, b) Précipitations annuelles, c) Ratios pluie-débit annuels, issues des précipitations observées.

Pour résumer, la période 1 possède des rendements plus importants que les 2 suivantes : la transformation des précipitations en débit est plus efficace, et ce pour les observations comme pour les simulations climatiques. Un changement dans le taux de transformation des précipitations en débit peut être induit soit par un changement du fonctionnement du bassin versant (variation dans l'occupation du sol), soit par une variation climatique (variation dans l'ETR). Ces changements sont visibles de manière globale sur les 12 bassins versants, on peut donc privilégier l'hypothèse d'une variabilité climatique. Les périodes 2 et 3 (1990-2011) pourraient comprendre des valeurs d'ETR plus fortes que la période précédente (1980-1990).

3.2.2 Saisonnalité par période

Afin de caractériser le fonctionnement hydrologique sur ces périodes, un indice d'irrégularité des précipitations et des débits (Perrin, 2000) a été calculé pour chaque période et chaque bassin versant. La formule de cet indice pour les précipitations est la suivante :

$$I = \frac{P_{mx} - P_{mn}}{\overline{P_m}} \quad \text{Éq. 8}$$

Avec

- P_{mx} : précipitations moyennes mensuelles du mois le plus pluvieux (mm)
- P_{mn} : précipitations moyennes mensuelles du mois le moins pluvieux (mm)
- $\overline{P_m}$: Précipitations moyennes mensuelle (mm)

On réalise ce calcul pour les débits également, et ce pour chaque bassin versant (figure 17).

Tout d'abord, les débits présentent systématiquement des contrastes saisonniers plus forts que les précipitations, quelle que soit la période. Les régimes de précipitations par période et par bassin versant ont un indice de saisonnalité compris entre 0.5 et 1.3 tandis que les régimes de débit ont des indices variant entre 1.4 et 2.5 selon les périodes et les bassins versants.

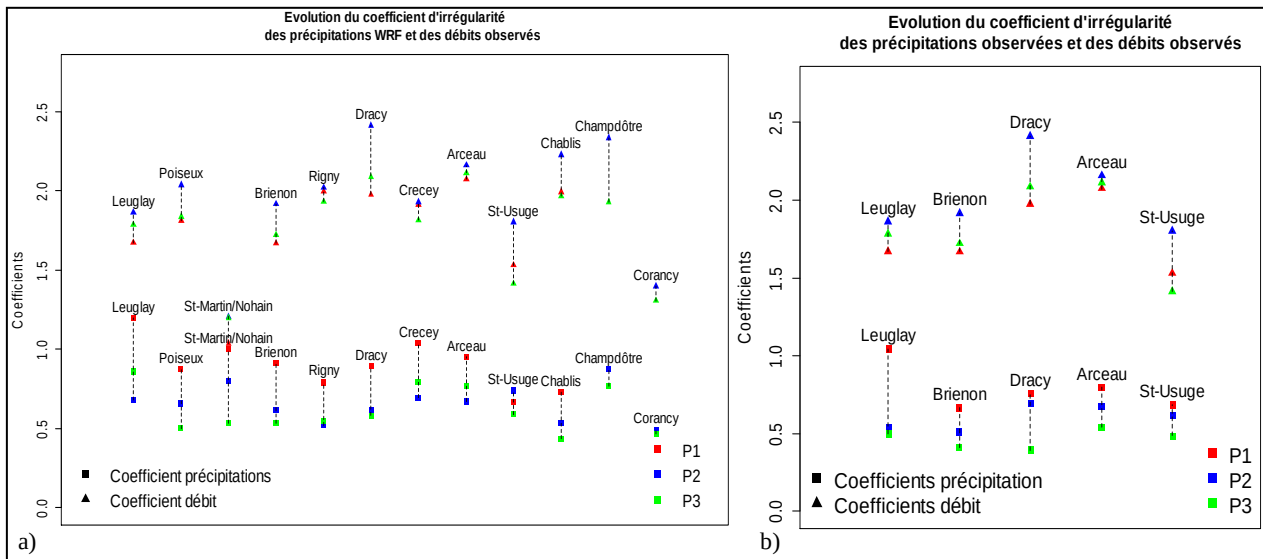


Figure 17: Coefficients d'irrégularité des précipitations et des débits, par période et par bassin versant a) sur les 12 bassins versants, b) sur 5 bassins versants comprenant des précipitations observées

Les débits présentant le plus de saisonnalité sont compris dans les années de la période 2 (1990-2000), pour tous les bassins versants. Les précipitations WRF ou observées ont plus de saisonnalité sur la période 1 (1980-1990). Les contrastes saisonniers des débits ne sont donc à priori pas imputables aux contrastes des régimes de précipitations. Les débits doivent subir des forçages autres que les précipitations (régulation anthropique, variation dans l'ETR). Le fait que les coefficients d'irrégularité soient similaires pour les précipitations WRF et observées montre que le modèle WRF reproduit correctement la saisonnalité des précipitations.

3.3 Première calibration

Nous avons décrit sommairement les bassins versants et leurs écoulements moyens. Les comparaisons entre les précipitations WRF et observées ont montré que les précipitations annuelles WRF possédaient un domaine de variation légèrement supérieur aux précipitations observées. Cependant, les taux de transformation des précipitations en débits sont cohérents entre les simulations et les observations. De plus, les contrastes saisonniers observés sur la période 1 sont visibles aussi bien avec les précipitations simulées qu'observées. A priori, le fonctionnement hydroclimatique semble cohérent. Il apparaît possible d'entamer les travaux de calibration à partir des données issues de la chaîne de modélisation « ERA-Interim → WRF ».

3.3.1 Performances globales du modèle

Une première calibration est effectuée sur chaque bassin versant. Les fonctions objectifs (F.O) utilisées ont été successivement le critère de Nash & Sutcliffe sur les débits (NS), sur la racine des débits (NS R(Q)) et sur le log des débits (NS log (Q)), lesquels sont sensibles respectivement aux débits forts, moyens et faibles. Ce travail vise à balayer de manière assez large la réponse du modèle aux différentes tentatives de calibration. Le nombre total de calibrations est égal au nombre de périodes (3 par bassin versant, excepté pour Corancy et Champdôtre, 2) multiplié par les 3 F.O, soit 102 calibrations. Quatre critères de performance sont calculés pour chaque calibration, soit un total de 408 contrôles. La figure 18 présente les fréquences cumulées des critères de performance journaliers (NS, NS R(Q), NS log(Q) en contrôle sur la période entière de données, tous bassins versants confondus. On y a ajouté le critère fréquentiel (cf § 2.3.2.3) qui est un critère de performance utilisé uniquement en contrôle. Ce graphique permet de quantifier de manière globale la performance du modèle, compte tenu des données insérées en entrée.

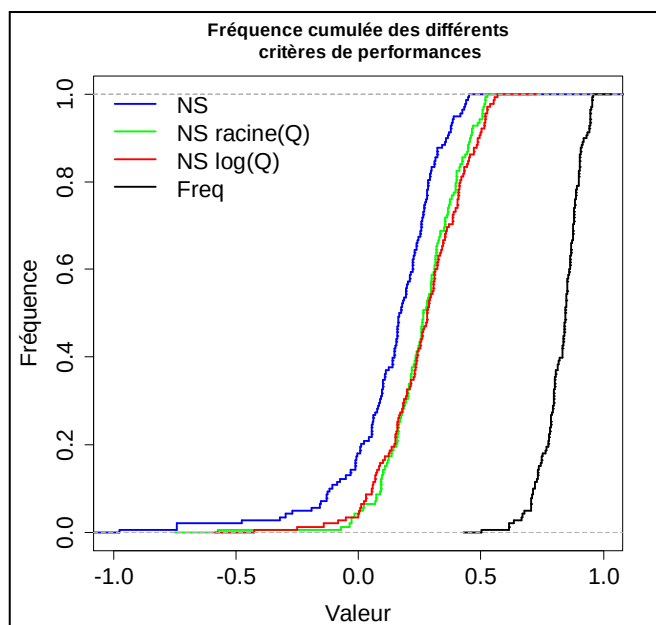


Figure 18 : Fréquences cumulées des critères de performance en contrôle sur la période entière.

Le domaine de variation des critères de NS, NS R(Q) et NS log(Q) est compris entre moins l'infini et 1. Le critère fréquentiel varie entre 0 et 1. On constate que les 3 critères de performance NS sont en quasi-totalité inférieurs à 0,5. Le critère fréquentiel présente une distribution de fortes valeurs, supérieures à 0,5. Le tableau 9 reprend les valeurs moyennes des critères en calibration (34 calibrations par F.O) et en contrôle sur la période entière (102 contrôles par critère de performance). Les valeurs de performance obtenues en contrôle donnent des moyennes inférieures aux valeurs obtenus en général avec GR4J par [Perrin et al., \(2003\)](#). Cette première calibration ne représente donc pas le résultat attendu en termes de performance.

Le critère NS présente une distribution de valeurs systématiquement inférieures aux valeurs des autres critères, et inférieures à 0,3. Cela pourrait signifier que les forts débits sont moins bien simulés que les faibles débits.

Critère	NS	NS R(Q)	NS log(Q)	Fréquentiel
Calibration (moyenne des 34 calibrations par FO)	0,305	0,363	0,393	-
Contrôle (moyenne des 102 contrôles par critère)	0,162	0,289	0,302	0,827
Contrôle sur 429 bassins versants (Perrin et al., 2003)	0.510	0.619	0.575	-

Tableau 9: Valeur des critères de performance en calibration et en contrôle comparées à celles de Perrin et al.(2003)

3.3.2 Performance par bassin versant et par période

Chaque calibration (une par F.O soit 3 calibrations) détermine un jeu de paramètres (X1 à X4) pour chaque période de calibration (2 ou 3 selon les bassins versants). Ce jeu de paramètre est alors appliqué pour simuler le débit sur l'ensemble de la période (1980-2011) et est évalué par le calcul des critères de performance. On analyse alors la qualité de la calibration de chaque période en calculant la moyenne de chaque critère de performance (3 valeurs par critère). Ces valeurs moyennes sont présentées sur la figure 19, par bassin versant et par période de calibration. Les critères de performance et les paramètres fixés lors de ces calibrations sont détaillés dans l'annexe n°5. En premier abord, on constate que les critères sont globalement bas, Mis à part le critère fréquentiel qui donne des valeurs hautes. Cela indique que le critère fréquentiel est peu exigeant et qu'il ne peut, par conséquent, pas être utilisé comme F.O, au risque d'aboutir à une mauvaise calibration des paramètres.

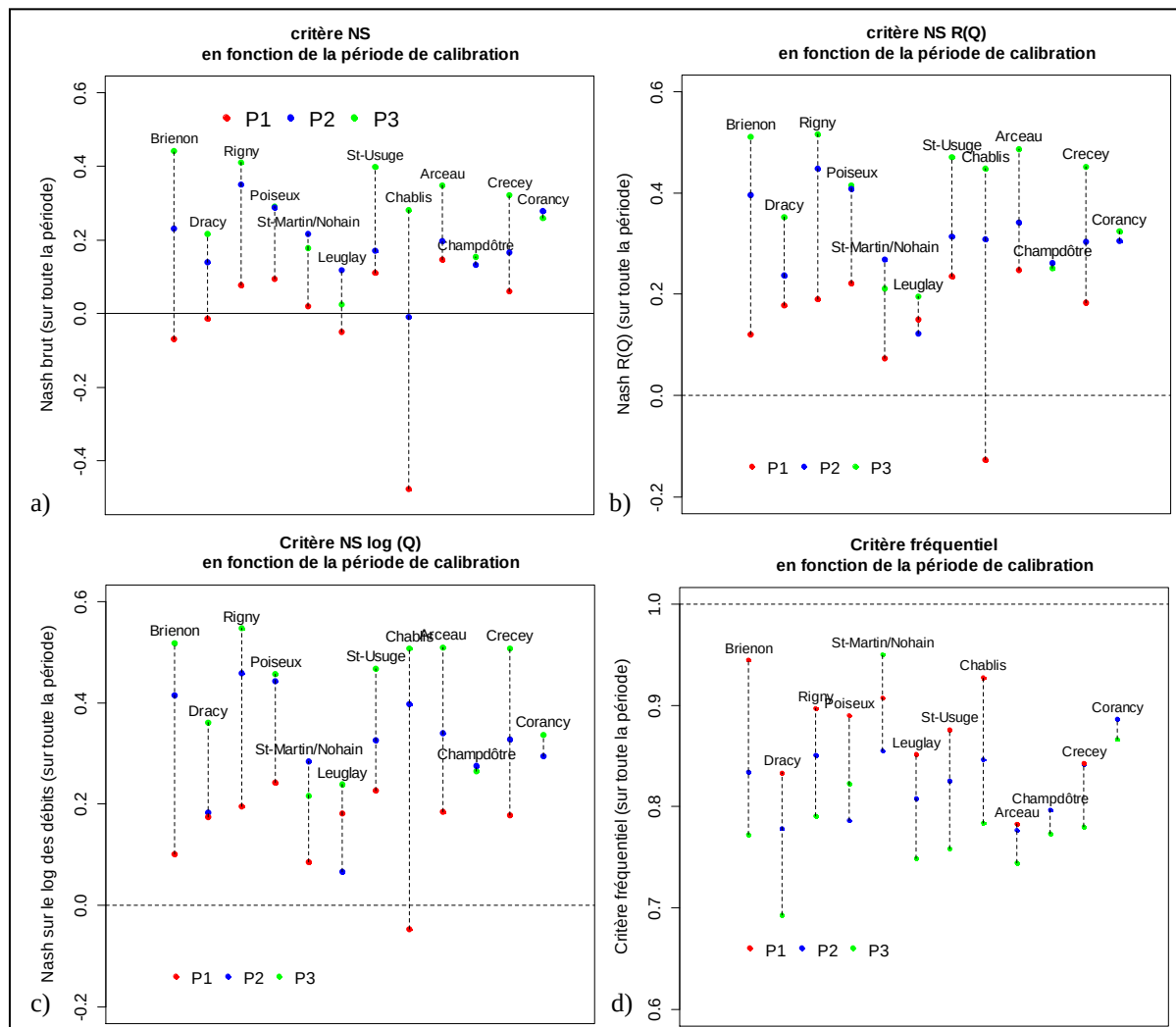


Figure 19: Critères de performance sur la période entière a) NS (Q), b) NS R(Q), c) NS log(Q), d) fréquentiel issus des calibrations avec les précipitations WRF

Dans un deuxième temps, on constate que les performances sont très inégales d'une période de calibration à l'autre. Ces difficultés à reproduire le débit observé selon la période de calibration soulèvent la problématique de non stationnarité des données. En effet, une calibration sur des données non stationnaires aboutirait à un jeu de paramètres qui ne serait pas valable sur toute la période considérée.

A titre d'exemple, la figure 20 présente le débit simulé à partir d'une calibration sur la période entière de données, sur le bassin versant de l'Armançon. La F.O utilisée ici est celle du NS R(Q).

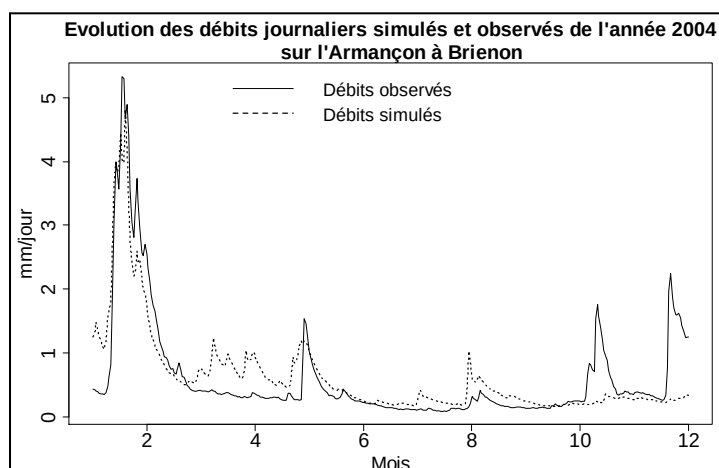


Figure 20 : Débits journaliers simulés et observés sur l'Armançon pour l'année 2004

On constate que les débits simulés sont, à plusieurs reprises, mis en défaut par les observations : sur-estimation des débits printaniers et estivaux, non reproduction des pics de crue en automne-hiver. Cet exemple montre bien que le modèle GR4J ne reproduit pas correctement le régime hydrologique observé.

Au vu de ces résultats, on peut se demander si la faible robustesse des calibrations est liée à des difficultés du modèle à reproduire le débit ou bien à la qualité des données insérées en entrée. Il paraît alors intéressant de tenter une calibration du modèle sur la base de précipitations observées. C'est l'objet du prochain paragraphe.

3.3.3 Calibration avec les précipitations observées

A des fins de comparaison, la même calibration qu'avec les précipitations WRF a été réalisée en insérant les précipitations observées des stations météorologiques. La comparaison des performances du modèle a été effectuée sur l'Armançon à Brienon, qui possède 4 stations d'observation des précipitations, et sur l'Ource à Leuglay, qui ne possède qu'une station, mais dont la surface du bassin versant est restreinte (173km²).

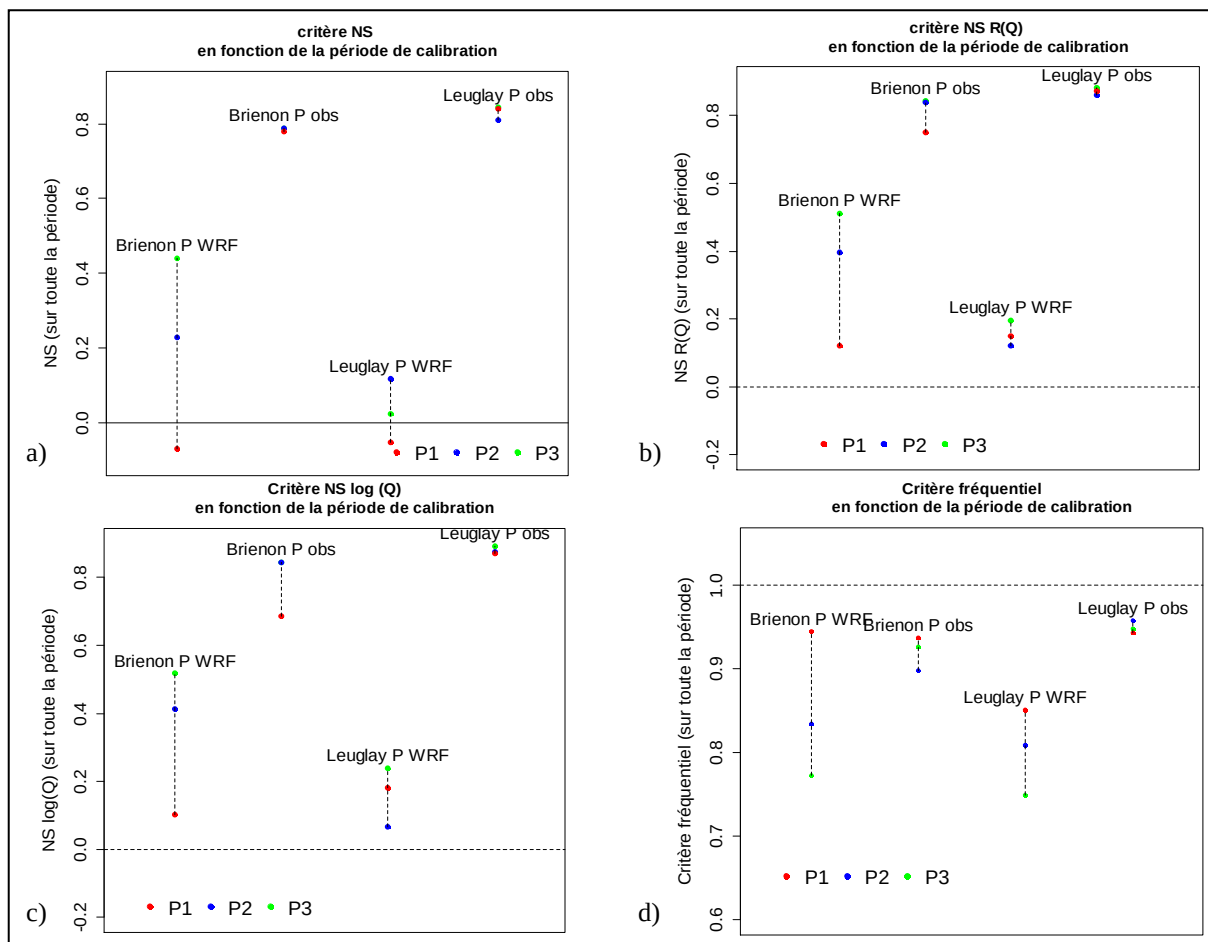


Figure 21 : Comparaisons des critères de performance a) NS (Q), b) NS R(Q), c) NS log(Q), d) fréquentiel, produits par les calibrations avec les précipitations WRF et les précipitations observées pour les 3 périodes.

Les critères de performance sur la période de contrôle complète ont des valeurs plus élevées pour les calibrations avec les précipitations observées que pour celles avec les précipitations WRF (figure 21). Elles sont en outre supérieures aux valeurs de référence en contrôle de [Perrin et al., \(2003\)](#) (tableau 9). De plus, les valeurs des critères de performance sont très homogènes d'une période de calibration à l'autre, ce qui prouve que la calibration est plus robuste avec les

précipitations observées. Ainsi, le jeu de paramètres fixé par la calibration sur la période P1, P2 ou P3 reste valide pour le contrôle sur toute la période de données. Le détail des critères et des paramètres fixés sont présentés dans l'annexe n°6.

3.3.4 Calibration roulante

Afin de vérifier que la faible robustesse du modèle n'est pas liée au choix des périodes de calibration, on procède ici à une calibration dite roulante. Elle consiste à calibrer le modèle non pas sur 2 à 3 périodes de calibration, mais sur une fenêtre de 5 ans roulante. Ainsi, pour un bassin versant comprenant 31 ans de données (1980-2010), il est possible d'isoler 27 périodes de calibration de 5 années consécutives. Cette stratégie permet en outre de calculer un grand nombre de jeux de paramètres dont l'évolution au cours du temps renseigne sur la nature des processus modélisés. Nous présentons les résultats de Briennon-sur-Armançon, où une calibration roulante avec les précipitations observées a également été réalisée, afin de servir de comparaison. Les critères de performances moyens en contrôle sur la période entière sont donnés dans le tableau 10.

	NS (Q)	NS R(Q)	NS log(Q)	Fréquentiel
Précipitations WRF	0,235	0,344	0,346	0,944
Précipitations observées	0,793	0,835	0,828	0,920

Tableau 10 : Critères de performance moyens en contrôle sur la période entière pour la calibration roulante

Les valeurs des paramètres pour chaque calibration sont présentées en annexe n°7.

La figure 22 présente les paramètres issus des 27 calibrations par jeu de données. Chaque paramètre (X1, X2, X3 et X4) est inséré dans un diagramme de fréquence cumulée de distribution.

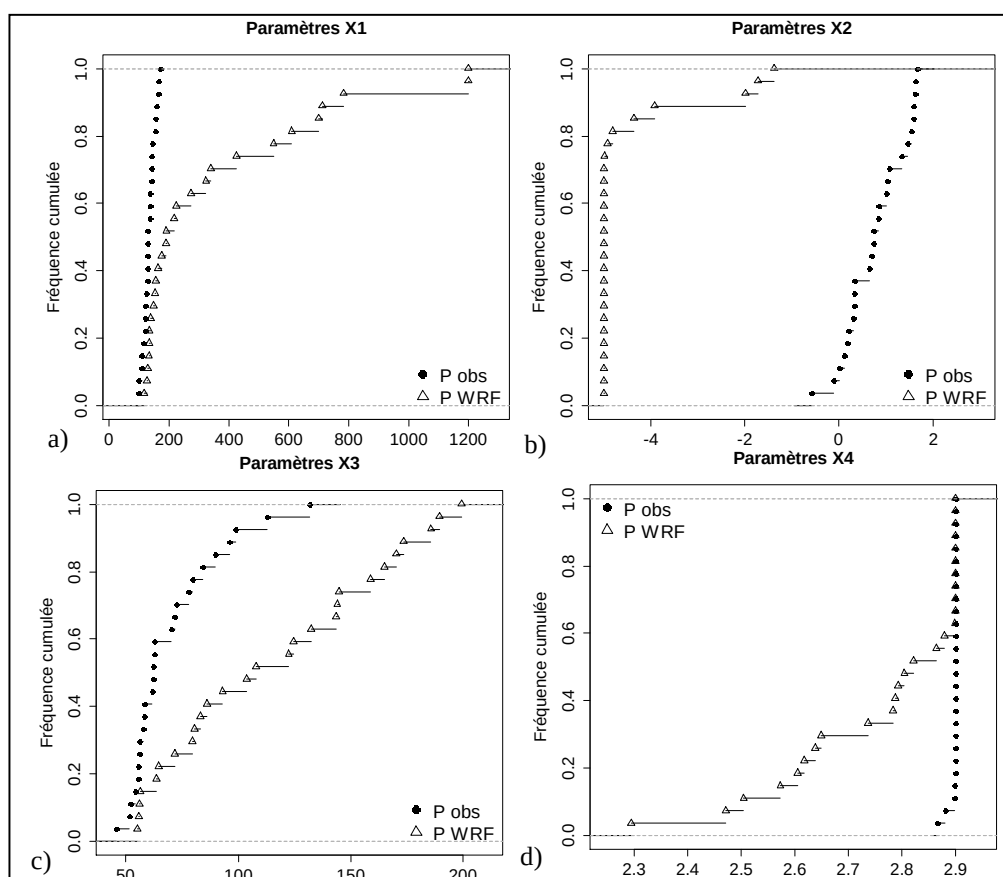


Figure 22 : Fréquences cumulées des paramètres a) X1, b) X2, c) X3, d) X4 fixés durant la calibration roulante avec les précipitations observées et WRF

Au niveau du paramètre X1, définissant le volume du réservoir de production (paramètre prépondérant dans le modèle), on observe de fortes variations de ses valeurs pour les calibrations avec les précipitations WRF. Ces valeurs atteignent même les bornes inférieure et supérieure du paramètre (100 et 1200 mm). Au contraire, les valeurs de X1 obtenues avec les calibrations à partir des précipitations observées restent stables et comprises entre 100 et 170mm.

Les valeurs du paramètre X2 pour les calibrations à partir des précipitations WRF sont pour la plupart égales à la borne inférieure du paramètre (-5 mm/jour). Ce paramètre (coefficient d'échange souterrain), représenterait alors un bassin versant avec de très fortes pertes souterraines. Or, bien que le bassin de l'Armançon à Brienon-sur-Armançon possède un terrain calcaire soumis à des pertes dans sa partie médiane ([SIRTAVA, 2012](#)), la partie basse du bassin, quant à elle, est soutenue à l'étiage par la nappe souterraine et est également alimentée par les résurgences des pertes. La distribution des paramètres issus des calibrations avec les précipitations observées est plus raisonnable, étant donné qu'elle varie entre 0 et 2 mm/jour.

Le paramètre X3 définit le volume du deuxième réservoir (réservoir de routage). Là encore, on observe davantage de variabilité dans la distribution des valeurs de X3 obtenues par calibration avec les précipitations WRF que celles obtenues par les calibrations avec les précipitations observées.

Le paramètre X4, qui représente le temps de base de l'hydrogramme unitaire, est très variable pour les calibrations avec les précipitations WRF, tandis qu'il présente des valeurs systématiquement élevées avec les précipitations observées (2,9 jours). La présence d'un réseau karstique sur le bassin versant pourrait expliquer cet allongement du cycle hydrologique.

3.3.5 Première conclusion sur la tentative de couplage hydroclimatique

Les calibrations effectuées sur les 12 bassins versants forcées par les données issues de la chaîne de modélisation climatique « ERA-Intérim → WRF » n'ont pas abouti à des résultats satisfaisants. D'une part, les valeurs moyennes des critères de performance en calibration comme en contrôle sont apparues faibles, bien inférieures aux valeurs obtenues sur des larges échantillons de bassins versants par [Perrin et al., \(2001 et 2003\)](#) ou [Mathevet \(2005\)](#). D'autre part, le modèle ainsi calibré a présenté une robustesse très limitée et a démontré son incapacité à reproduire correctement les débits sur la période entière de données d'observation. Cette faible robustesse pourrait s'expliquer par la non stationnarité des données climatiques.

Les calibrations forcées par les précipitations observées présentent de bien meilleures robustesse et performance. Cela montre que les précipitations issues de la chaîne de modélisation climatique « ERA-Intérim → WRF » possèdent d'importants biais qui empêchent le modèle GR4J de se calibrer correctement. La calibration roulante sur l'Armançon à Brienon a mis en évidence une forte instabilité des paramètres lors des calibrations forcées par les précipitations WRF, alors que les paramètres fixés grâce aux calibrations avec les précipitations observées présentaient une certaine stabilité.

Au vu de ces résultats, il est important de réaliser un diagnostic de l'influence des précipitations WRF sur le modèle GR4J.

3.4 Influence des précipitations WRF sur la modélisation hydrologique

Cette partie s'attache à identifier la nature des biais existants sur les précipitations WRF et leurs impacts sur la modélisation hydrologique. Ces biais peuvent être aussi bien temporels (problèmes de phasage) que quantitatifs (mauvaise estimation des lames d'eau écoulées). Une tentative de diagnostic sommaire a été réalisée sur la base des bassins versants possédant une ou plusieurs stations d'observations météorologiques, afin de comparer les précipitations reçues en ces points, à celles simulées par la modélisation climatique.

3.4.1 Biais quantitatif et biais saisonnier

La figure 23 (Le Moine et al., 2007) représente dans un espace adimensionnel le rendement des débits en ordonnée et le ratio des précipitations sur l'ETP en abscisse.

Pour un bassin versant fermé (sans gain ni perte, et sans variation de réservoir), le bilan hydrologique s'écrit de la façon suivante :

$$P = Q + ET \quad \text{Éq. 9}$$

Avec

P : Cumul de précipitation annuel (mm)

Q : Cumul de débit annuel (mm)

ET : Cumul de l'évapo-transpiration annuelle (mm).

Si on respecte ce bilan, le ratio «Q/P » varie entre 1 et 1- (ET / P).

En théorie donc, le domaine de validité des cumuls annuels est compris dans l'espace blanc de la figure 23.

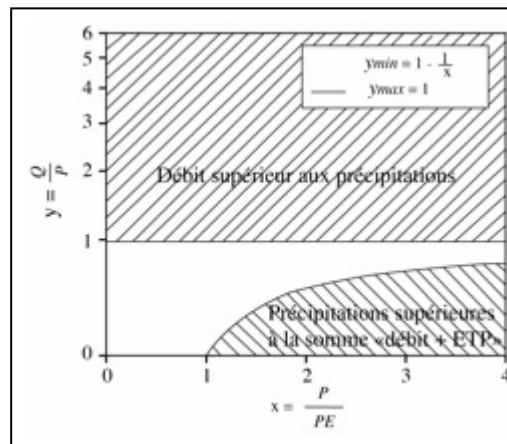


Figure 23 : Représentation adimensionnelle des bassins versants (moyenne des écoulements), d'après Le Moine et al., 2007.

Lorsqu'on réalise ce diagramme avec les valeurs des débits observés, des précipitations WRF et de l'ETP WRF de nos bassins versants (figure 24), on constate en premier abord que certains des bassins versants sont situés en dehors de l'espace de validité décrit précédemment. En effet, les bassins versants de l'Armançon à Briennon/A, l'Arroux à Dracy-Saint-Loup et à Rigny-sur-Arroux, la Nièvre d'Arzembouy à Poizeux et du Serein à Chablis présenteraient a priori une sur-estimation des précipitations ou une sous-estimation de l'évapo-transpiration. L'autre hypothèse serait le caractère non conservatif (existence de pertes significatives) de certains bassins versants. Si cette hypothèse est crédible pour le bassin versant du Serein, de l'Armançon ou encore de la Nièvre d'Arzembouy (présence de karst sur le bassin versant (BRGM, 1970)), elle l'est moins pour l'Arroux, constitué en grande majorité du socle plutonique et métamorphique du Morvan. Une dernière hypothèse qui pourrait être soulevée est la présence de régulation anthropique des débits. Mais le rejet ou le prélèvement d'un volume suffisamment important pour perturber ainsi le cycle hydrologique est peu probable.

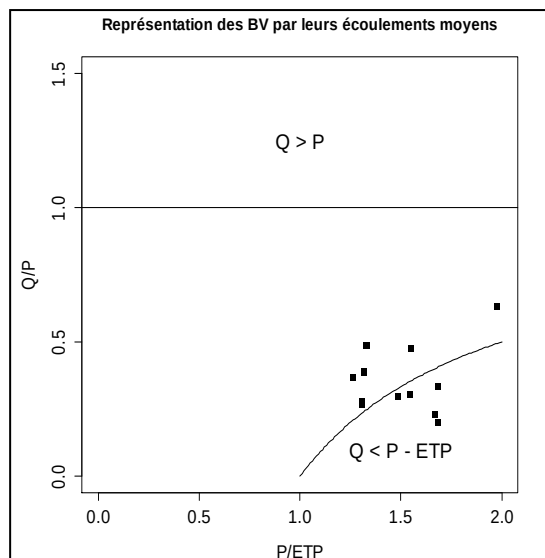


Figure 24 : Représentation adimensionnelle des 12 bassins versants avec le débit observé, les précipitations WRF et l'ETP WRF

Le même graphe est réalisé en ajoutant les points correspondant aux précipitations observées (figure 25). On constate alors que l'Arroux à Dracy-St-Loup, la tille à Arceau et l'Armançon à Brienon/A tendent à retrouver le domaine de validité lorsqu'on utilise les précipitations observées. Cela signifierait que les bilans hydrologiques calculés à partir des précipitations simulées sont erronés en raison d'une sur-estimation des précipitations.

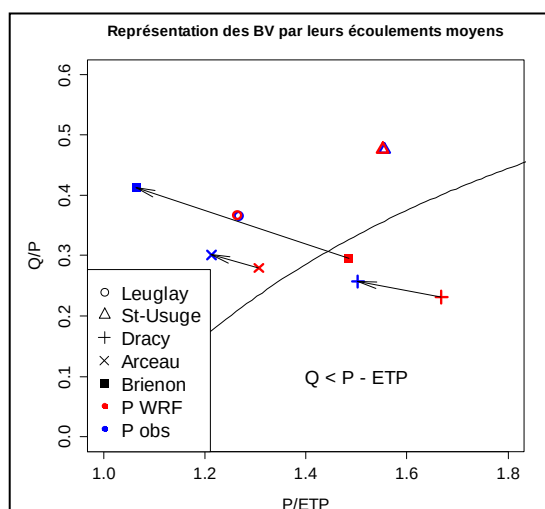


Figure 25 : Représentation adimensionnelle des 5 bassins versants avec le débit observé, les précipitations observées et l'ETP WRF

Notons tout de même la superposition des points pour le bassin de l'Ource à Leuglay ainsi que de la Seille à Saint-Usage. Ces bassins versants semblent recevoir une quantité annuelle de précipitations conforme aux observations (tableau 11).

Moyenne annuelle (mm/an)	Ource	Seille	Arroux à Dracy	Tille à Arceau	Armançon
Précipitations observées	969,4	1044,5	962,6	918,0	739,9
Précipitations WRF	966,9	1042,1	1068,5	988,7	1032,1
Pobs/PWRF	1,00	1,00	0,90	0,93	0,72

Tableau 11: Caractéristiques des cumuls moyens annuels de 5 bassins versants

Si on s'attarde sur le régime mensuel interannuel des précipitations simulées et observées sur l'Ource et l'Armançon, on remarque cependant des biais saisonniers. Sur l'Armançon (figure 26 a), les précipitations WRF sont systématiquement sur-estimées par rapport aux stations d'observation. Et l'erreur la plus importante intervient durant les mois chauds (de mai à septembre). Sur l'Ource à Leuglay (figure 26 b), bien que la moyenne sur l'année soit équivalente aux observations, les écarts mensuels sont élevés. Par rapport à la station d'observation, les précipitations simulées sont sous-estimées en hiver et sur-estimées en été.

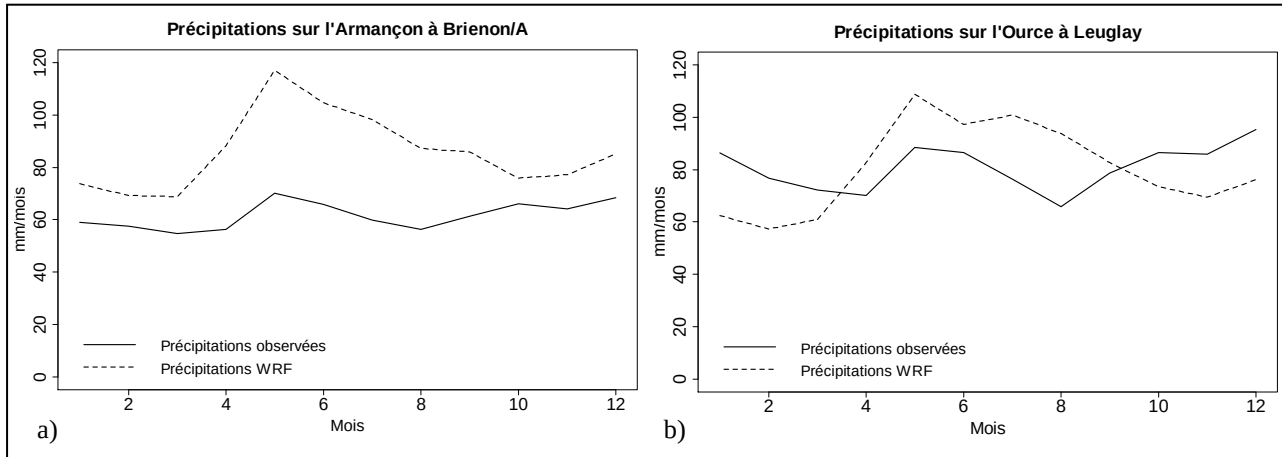


Figure 26: Régimes des précipitations observées et WRF sur a) Brienon , b) Leuglay

Les comparaisons ne permettent pas de conclure quant à la qualité des précipitations WRF.

Notamment parce que les précipitations observées sont ponctuelles alors que les précipitations WRF sont complètement représentatives de la surface du bassin versant.

Une manière de lever définitivement le doute sur la qualité des précipitations WRF est de comparer les débits modélisés par GR4J calibré sur la base des précipitations observées ou des précipitations WRF aux débits observés. Ce travail a été réalisé pour les bassins versants de l'Ource à Leuglay et de l'Armançon à Brienon-sur-Armançon.

3.4.2 Influence des précipitations sur les débits modélisés

La modélisation des précipitations en climatologie est un exercice difficile, soumis à de nombreux biais possibles (Castel et al., 2010). Nous avons vu précédemment que les critères de Nash étaient exigeants en termes de reproduction des débits. Ainsi, leur pas de temps journalier oblige à comparer débits simulés et observés jour après jour. Une erreur de phasage des précipitations simulées pourrait mettre le modèle en difficulté pour reproduire le débit observé. Cependant, en cas d'erreur systématique, la variation des paramètres de GR4J lui permettra de compenser ce biais (le paramètre d'échange souterrain X2 joue d'ailleurs un rôle primordial dans cette compensation) (Oudin, 2004).

Afin de pallier la présence d'éventuelles erreurs de phasage des précipitations journalières, on réalise des calibrations du modèle hydrologique sur la base d'un critère mensuel, afin de ne prendre en compte que les erreurs au pas de temps mensuel. Le modèle fonctionne donc au pas de temps journalier, mais on agrège les sorties sur un pas de temps plus long pour calculer la F.O. Ainsi, chaque jeu de paramètres testé par le modèle verra son efficacité quantifiée par le calcul d'un critère de Nash sur la moyenne mensuelle du débit, appelé NS M (Q).

Nous présenterons ici les résultats de ces calibrations avec la F.O au pas de temps mensuel, ainsi qu'un essai de correction des précipitations WRF sur la base d'un coefficient constant au cours du temps.

3.4.2.1 Calibration à partir des précipitations observées et simulées

Un premier test de calibration est réalisé sur le bassin versant de l'Armançon à Brienon-sur-Armançon avec les précipitations observées (moyenne journalière des 4 stations d'observation présentes sur le bassin), puis les précipitations WRF (tableau 12). Les valeurs des critères et des paramètres issus du même exercice sur l'Ource sont disponibles en annexe n°8. Les valeurs de la F.O pour la période de calibration considérée doivent être supérieures aux valeurs du critère en contrôle sur les autres périodes (lecture horizontale) et aux valeurs du critère en contrôle sur la même période (lecture verticale) comme cela a été développé précédemment (paragraphe 2.3.2.2). C'est le cas ici.

							Contrôle					
Paramètres fixés							NS M (Q)			FREQ		
		X1	X2	X3	X4	P1	P2	P3	P1	P2	P3	
Calibration	P observées	P1	155,632	1,42	35,436	2,683	0,911	0,802	0,681	0,844	0,859	0,858
		P2	150,944	0,934	57,552	2,894	0,824	0,933	0,922	0,790	0,821	0,804
		P3	164,478	0,628	52,847	2,002	0,767	0,919	0,936	0,769	0,8	0,781
	P WRF	P1	170,372	-1,261	100,042	1,114	0,721	-0,084	-0,091	0,819	0,831	0,787
		P2	215,632	-5,00	102,389	2,892	0,574	0,303	0,347	0,738	0,768	0,756
P3		331,206	-4,996	82,938	2,107	0,477	0,274	0,363	0,714	0,743	0,735	

0,123 Valeur de la F.O en contrôle sur la période de calibration

Tableau 12 : Résultats des calibrations avec la F.O NS (M) pour le bassin versant de l'Armançon

On constate comme attendu que les performances en calibration/contrôle sont plus élevées avec les précipitations observées et la descente de critères de performance lors des contrôles est très faible, signe d'une bonne robustesse. Ce n'est pas le cas avec les précipitations WRF. Le critère fréquentiel présente également, dans une moindre mesure, une diminution entre les calibrations à partir des précipitations observées et WRF.

Au niveau des jeux de paramètres fixés, on observe de grandes variations dans les paramètres issus des calibrations effectuées avec les précipitations WRF alors que les paramètres issus des calibrations réalisées avec les précipitations observées sont plus stables.

Les jeux de paramètres issus des calibrations sur la période entière ont été appliqués à la simulation des débits. Les régimes hydrologiques correspondants (cumuls mensuels interannuels) du bassin versant de l'Armançon et de l'Ource sont présentés en figure 27.

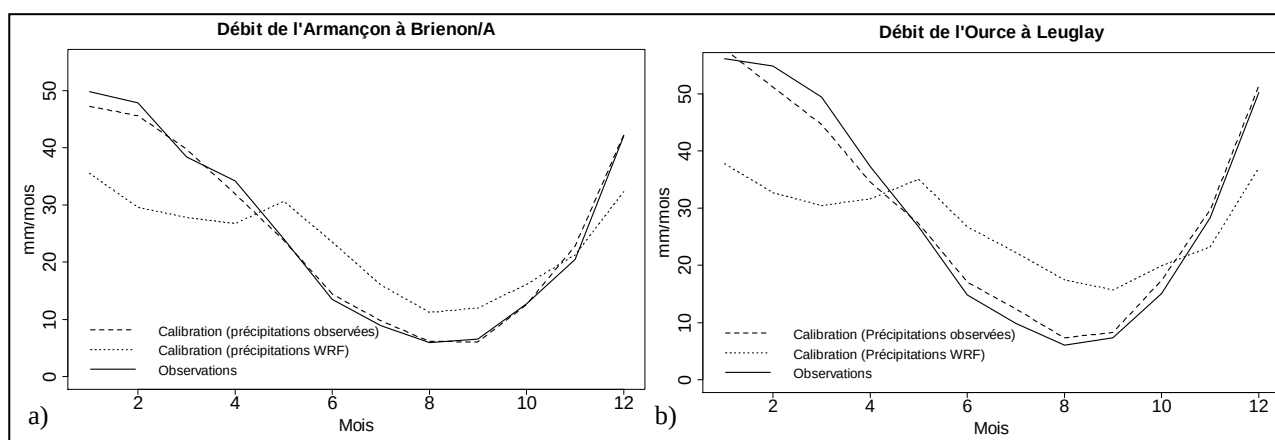


Figure 27 : Régime hydrologique mensuel interannuel a) Armançon à Brienon ; b) Ource à Leuglay

Le régime hydrologique modélisé à partir des précipitations WRF présente des erreurs importantes, comparé au débit observé, sur l'Armançon comme sur l'Ource. Les débits moyens des mois de

décembre à avril sont fortement sous-estimés, tandis qu'on observe de fortes sur-estimations durant les mois de mai à octobre.

Ces incohérences dans le régime hydrologique proviennent de la surestimation globale des précipitations WRF (voir figure 26). Le modèle GR4J cherche à évacuer l'eau « excédentaire », de manière régulière en utilisant sa fonction d'échange (voir dans le tableau 12 le paramètre X2 fortement négatif) et en augmentant la taille des réservoirs (paramètres X1 et X3). En tamponnant ainsi les fortes précipitations qu'on lui impose, GR4J perd le signal hydrologique et n'est plus capable de reproduire le régime hydrologique du bassin versant.

A l'inverse, le régime hydrologique modélisé avec les précipitations observées est très proche du régime observé. Ce constat permet de conclure à une bonne implémentation du modèle. Il indique également que les données de précipitations observées en un seul point du bassin versant permettent une paramétrisation de GR4J cohérente avec les données de débits observées. Enfin, cela montrerait aussi que l'ETP issue des simulations WRF (utilisée dans chacune de ces calibrations) est bien reproduite.

La figure 27 conduit aux mêmes conclusions pour le bassin versant de l'Ource. On notera que même avec une seule station, le régime hydrologique est bien reproduit par GR4J.

Le signal reproduit par le modèle forcé avec les précipitations WRF n'a aucune signification hydrologique, que ce soit sur l'Armançon ou sur l'Ource. La variation au cours de l'année des écarts entre les précipitations WRF et observées laisse supposer une saisonnalité dans le biais sur les précipitations WRF. Cette saisonnalité se retrouve également dans les écarts entre les débits modélisés à partir des précipitations WRF et les débits observés.

3.4.2.2 Tentative de correction sommaire des précipitations WRF

A priori, on observe une sur-estimation des précipitations WRF. Afin de mieux identifier le biais, on réalise une correction sommaire et systématique des précipitations. Elle est réalisée à l'aide d'un coefficient constant, obtenu en faisant le ratio du cumul annuel moyen des précipitations observées sur les précipitations WRF. Cette correction ne concerne que le bassin versant de l'Armançon, étant donné que c'est celui possédant le biais annuel le plus important sur la lame d'eau précipitée (cf tableau 11). Ainsi, on affecte aux précipitations journalières WRF du bassin versant de l'Armançon à Brienon, le coefficient de 0.72 pour l'ensemble des jours de l'année. Le tableau 13 présente les résultats des calibrations effectuées avec les précipitations WRF ainsi corrigées.

WRF x 0.72						Contrôle					
						Paramètres fixés				NS M (Q)	
Calibration		X1	X2	X3	X4	P1	P2	P3	P1	P2	P3
	P1	100,010	2,481	100,770	1,998	0,751	0,193	0,182	0,826	0,766	0,721
	P2	115,253	0,625	88,928	2,867	0,617	0,413	0,472	0,753	0,791	0,778
	P3	166,347	0,397	49,321	1,999	0,570	0,389	0,488	0,740	0,769	0,760

0,123 Valeur de la F.O en contrôle sur la période de calibration

Tableau 13 : Résultats des calibrations à partir des précipitations WRF corrigées (critère NSM)

On observe une amélioration des performances pour chaque période pour les critères (mis à part le fréquentiel pour la calibration sur P1.). Globalement, on gagne 0,12 point en contrôle sur le critère NS mensuel (NS M(Q)) lorsqu'on passe des calibrations avec les précipitations WRF à celles avec les précipitations WRF corrigée. Le gain sur le critère fréquentiel est encore plus faible.

Les paramètres se rapprochent de ceux fixés lors des calibrations avec les précipitations observées :

- les paramètres de réservoirs (X1 et X3) tendent à diminuer ;

- Le paramètre d'échange (X2) redevient positif (signe qu'on ne fournit plus de précipitations en trop grande quantité).

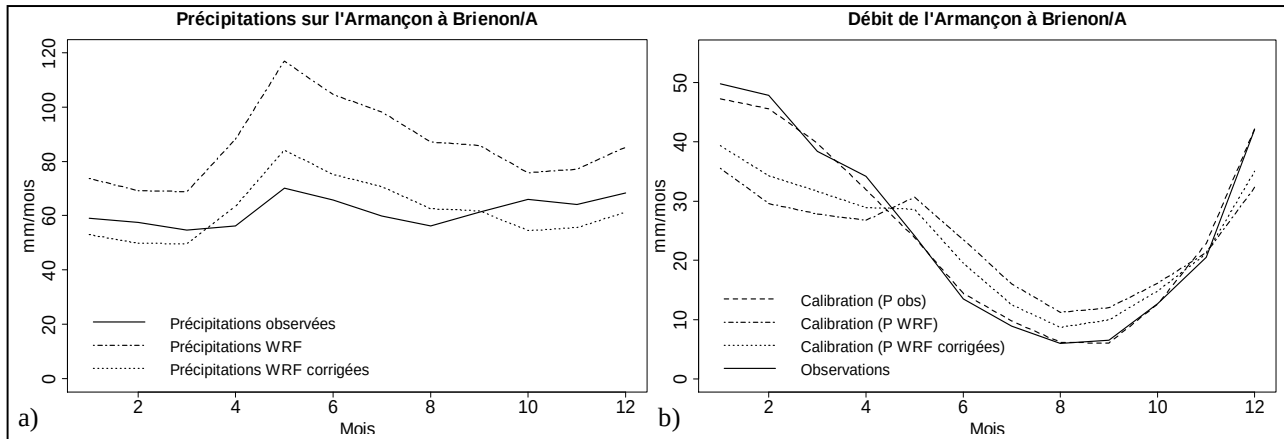


Figure 28: Variation mensuelle interannuelle a) des précipitations ; b) du débit observé et modélisé selon les différentes modalités, sur l'Armançon à Brienon/A

On conclut de ces calibrations avec les précipitations WRF corrigées que l'amélioration des performances n'est pas très importante, et pour cause, cette correction des précipitations ne consiste qu'en une homothétie de la courbe des précipitations initiales, comme on peut le voir sur la figure 28 a. Si les précipitations des mois chauds se rapprochent des observations, elles restent sur-estimées de 10 à 15mm pendant que les précipitations des mois froids sont sous-estimées d'une dizaine de mm.

Concernant le régime hydrologique (figure 28 b), une amélioration de la reproduction est obtenue pour la calibration avec les précipitations corrigées. Par contre, le régime hydrologique modélisé à partir des précipitations WRF corrigées n'est toujours pas cohérent avec le régime hydrologique modélisé à partir des précipitations observées.

La mauvaise reproduction du régime hydrologique ne paraît donc pas liée à une sur-estimation systématique des précipitations mais bien à un biais quantitatif dont l'importance varie au cours de l'année.

3.4.3 Conclusion

En l'état, les précipitations WRF rendent difficile une calibration correcte du modèle hydrologique. Dans les calibrations effectuées avec les précipitations WRF, le modèle GR4J détermine des paramètres peu cohérents. Son bon fonctionnement est néanmoins avéré grâce aux calibrations effectuées sur les précipitations observées (reproduction assez crédible du régime hydrologique observé). De plus, les données d'ETP fournies par WRF semblent convenir pour la modélisation hydrologique.

Afin de valider les calibrations réalisées avec les précipitations WRF, il aurait fallu aboutir à des paramètres stables, ainsi qu'à des performances plus élevées et peu différentes en calibration et en contrôle. Au vu des écarts relativement forts entre précipitations observées et WRF au cours d'une année moyenne, il est fort probable qu'un exercice de modélisation au pas de temps mensuel (GR2M), ne donne pas de résultats plus satisfaisants. Les calibrations effectuées avec les précipitations WRF corrigées n'améliorent pas la reproduction du débit. Il est donc nécessaire de travailler sur une correction saisonnière des précipitations avant de recommencer des tests de calibration.

3.5 Influence des ETP simulées sur la modélisation hydrologique

Le même exercice de diagnostic est effectué sur l'ETP. Les données d'ETP WRF et d'ETP ponctuelles issues de stations synoptiques Météo France sont comparées. Puis des calibrations de GR4J sont effectuées avec les deux ETP en entrée. Afin de s'affranchir du biais lié à la mauvaise qualité des précipitations WRF, la calibration de GR4J sera réalisée avec les précipitations observées. Les bassins versants possédant une station d'observation des précipitations et une station synoptique proche sont ceux de la Tille à Arceau et de l'Ource à Leuglay (cf figure 6). Nous utilisons donc l'ETP des deux stations synoptiques correspondantes : Dijon pour la Tille à Arceau et Châtillon-sur-Seine pour l'Ource à Leuglay. Ces données sont comparées avec les 2 points de la grille WRF les plus proches (voir tableau 14 et figure 29) et non l'ETP globale du bassin versant.

	Chatillon s/S	Dijon
ETP synoptique annuelle (mm/an)	687,1	798,6
ETP WRF annuelle (mm/an)	714,3	736,7
Distance (km) entre station synoptique et point WRF	11,8	3,2

Tableau 14: Comparaison des ETP synoptiques et WRF

Les valeurs d'ETP WRF ne possèdent pas de biais quantitatifs importants (les cumuls annuels moyens sont très similaires, comparés à ceux des précipitations) (cf tableau 11). De plus, les régimes (figure 29 a et b) sont très proches entre les ETP WRF et synoptiques.

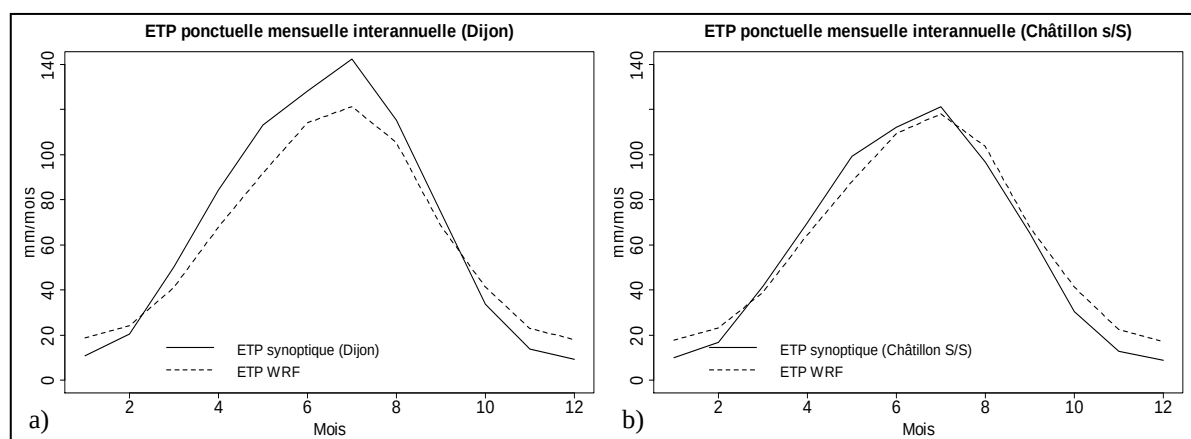


Figure 29 : Comparaisons entre l'ETP synoptique et l'ETP WRF a) Dijon ; b) Châtillon-sur-Seine

Une calibration est réalisée successivement avec les deux données d'ETP, en utilisant le NS M (Q) comme F.O. Les régimes hydrologiques issus de ces calibrations sont présentés figure 30. Les débits reproduits à partir des calibrations forcées par les ETP WRF et synoptiques sont très proches des débits observés. Mis à part une légère sur-estimation lors des mois chauds et une légère sous-estimation durant les mois froids, le signal est bien reproduit. En outre, cette reproduction ne semble pas moins bonne avec l'ETP WRF. Ces résultats montrent que les données d'ETP, calculées à partir des différentes variables produites par WRF, reproduisent correctement la réalité, et que la physique du climat est bien modélisée par le modèle climatique régional.

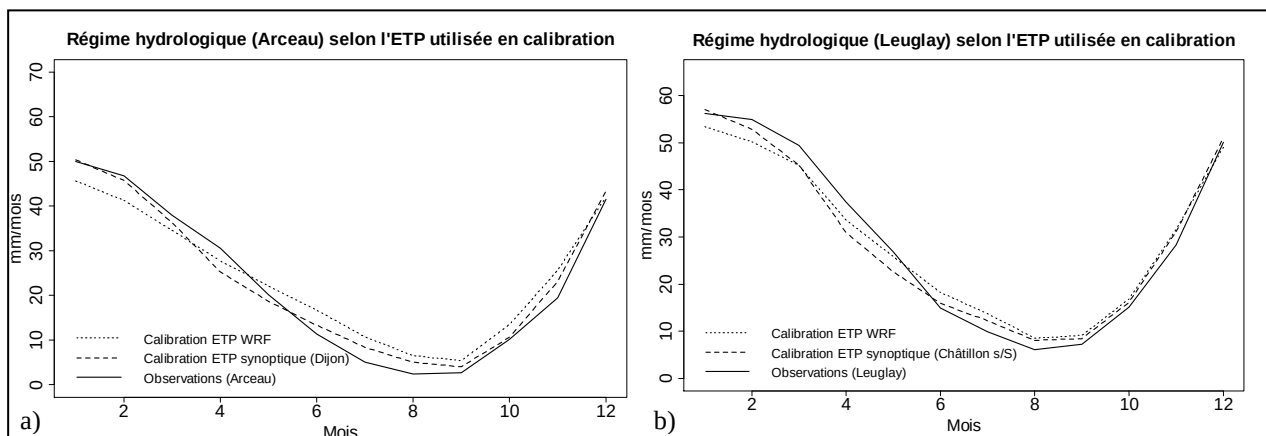


Figure 30 : Régimes hydrologiques issus des calibrations forcées par l'ETP synoptique et WRF a) sur la Tille à Arceau, b) sur l'Ource à Leuglay

Partie 4 : Discussions

4.1 Couplage hydroclimatique à l'échelle locale

Dans l'optique de réaliser une étude d'impact du changement climatique, il est envisagé ici d'utiliser des précipitations simulées par un modèle climatique pour forcer le modèle GR4J. L'enjeu de cette étude est la calibration pour ensuite modéliser les débits grâce à GR4J, à partir de données de précipitations simulées et spatialisées, plutôt que des données observées et ponctuelles utilisées habituellement avec ce modèle.

Des calibrations du modèle ont donc été réalisées à partir des chroniques de débits observées, des précipitations et de l'ETP simulés par WRF. Notons que ces précipitations sont des sorties brutes et n'ont pas encore fait l'objet de post-correction. Le premier constat que nous faisons est la mauvaise performance du modèle avec ces données en entrée, ainsi que la faible robustesse des calibrations.

Les causes possibles d'une mauvaise calibration sont multiples : la mauvaise qualité des données en entrée, la non stationnarité du climat sur la période de calibration ou encore une trop forte sensibilité du modèle hydrologique aux erreurs sur les données introduites.

Concernant la qualité des données en entrée, les calibrations effectuées sur des précipitations observées ont présenté de très bonnes robustesse et performance, et ont permis la modélisation de débits très proche du débit observé. Ce premier résultat nous amène à penser que : i) le modèle GR4J a bien été implémenté et est adapté pour simuler le débit sur nos bassins versants ; ii) les données d'ETP simulées par WRF sont correctement reproduites et permettent une bonne simulation des débits ; iii) en revanche, les données de précipitations WRF empêcheraient la bonne calibration du modèle.

Il existerait donc a priori un biais sur ces précipitations WRF, que nous avons tenté d'identifier afin d'orienter les travaux de post-correction. D'une façon générale, il y a sur-estimation des précipitations WRF par rapports aux précipitations observées. Cette sur-estimation est à l'origine de la mauvaise qualité des calibrations. Les calibrations effectuées sur les précipitations WRF corrigées par un coefficient uniforme dans le temps ont présenté des résultats légèrement supérieurs mais insuffisants. En effet, bien que le régime hydrologique issu de ces précipitations WRF corrigées présente des sur-estimations moins fortes durant les mois chauds et des sous-estimations moins fortes durant les mois froids, le régime hydrologique observé n'est toujours pas correctement reproduit (cf figure 28 b), ce qui nous amène à penser que le biais quantitatif existant sur ces précipitations est variable dans l'année. Malgré que la mauvaise qualité des précipitations explique les difficultés de calibration rencontrées, il est nécessaire d'analyser les autres causes possibles de cette mauvaise calibration.

4.2 Possibilité de non stationnarité des données

Nous avons vu lors de la description de l'hydroclimatologie sur la période 1980-2011 que la transformation des précipitations en débit (traduite par le ratio P/Q) diminuait entre la période 1 (1980-1990) et les périodes consécutives (1990-2000 et 2000-2011). Or Cuccia (2008) a mis en évidence une rupture dans l'évolution des températures à l'échelle de la Bourgogne sur les cinquante dernières années. En effet, entre 1961 et 1987, les températures sont plutôt stables, stabilité brutalement rompu en 1988, année à partir de laquelle les températures montrent une augmentation significative. Si on observe les débits des cours d'eau de nos bassins versants sur la même période (avant et après 1988), on observe une nette diminution de la moyenne annuelle des débits (tous bassins versants confondus), alors que les précipitations (WRF comme observées) restent stables (tableau 15). Ce changement est également visible saisonnièrement. Ainsi, les coefficients d'irrégularité (cf équation n°9) des précipitations observées et des débits observés sont également différents après 1988. On constate que le contraste saisonnier des débits est en moyenne plus accentué après 1988 ce qui n'est pas le cas pour les précipitations WRF. On note tout de même une légère augmentation moyenne de cette saisonnalité pour les précipitations observées, qui reste inférieure à l'augmentation de la saisonnalité des débits. Enfin, on notera que les coefficients d'irrégularité des précipitations WRF ne changent pas après 1988. En conclusion, il y a un changement dans le dynamisme hydroclimatique à partir de l'année 1988.

BV	Caractéristiques hydroclimatiques	12 bassins versants (P WRF)	
		1980-1988	1989-2011
12 bassins versants	Débit (mm/an)	424	355
	Irrégularité des débits	2,79	3,02
	Précipitations (mm/an)	1010	1053
	Irrégularité des précipitations	1,66	1,67
5 bassins versants	Débit observé (mm/an)	430	315
	Irrégularité des débits	2,98	3,23
	Précipitations observées (mm/an)	935	926
	Irrégularité des précipitations observées	1,56	1,71
	Précipitations WRF (mm/an)	995	1027
	Irrégularité des précipitations WRF	1,71	1,69

Tableau 15 : Caractéristiques hydroclimatiques avant et après 1988

La moyenne des taux de transformation des précipitations en débit a été calculée chaque année pour les 12 bassins versants ainsi que les 5 bassins versants possédant des données de précipitations observées (figure 31). Les taux de transformation des précipitations en débit présentent également une rupture après 1988. Les ratios sont globalement plus forts après 1988, et la variabilité interannuelle augmente elle aussi.

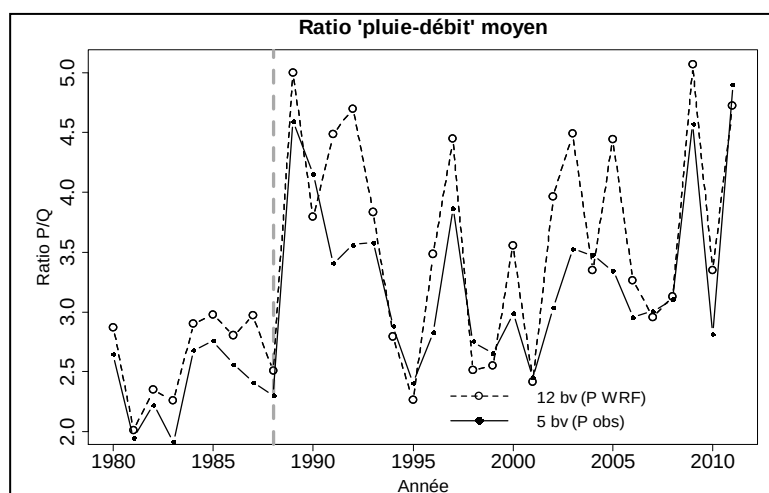


Figure 31 : Ratio pluie-débit moyen par an

Ce phénomène peut être dû à un changement dans le fonctionnement des bassins versants, mais comme ce changement est global (sur les 12 bassins versants), on peut vraisemblablement invoquer une origine climatique. Le seul facteur qui pourra jouer est alors l'ETR, via une augmentation des températures (ce qui est le cas sur la période). Ces différents constats nous amène à l'hypothèse que le climat sur la période de référence (1980-2011) n'est pas stationnaire. C'est une limite à la tentative de calibration sur cette même période. Mais on a constaté lors des calibrations avec les précipitations observées (cf tableau 12) que la diminution de performance entre la calibration et les contrôles était faible, et que les débits alors simulés correspondaient bien aux débits observés. On peut donc conclure que la non-stationnarité du climat sur notre période de référence n'a que peu d'influence sur la qualité de la calibration et la validité des paramètres.

4.3 *Etude de sensibilité aux erreurs sur les précipitations*

Afin de déterminer la sensibilité du modèle GR4J à une erreur sur les précipitations, une étude de sensibilité, basée sur l'utilisation de scénarios d'erreur des précipitations, a été réalisée.

Etudes de sensibilité statiques et dynamiques (Andréassian, 2002)

Dans le cadre d'une étude de sensibilité statique, on calibre le modèle avec un jeu de données de référence qu'on estime non biaisé puis on transpose directement le jeu de paramètres sur une simulation avec un jeu de données biaisé. L'analyse de la sensibilité se fait sur l'écart entre la courbe simulée et la courbe de référence. Dans une étude de sensibilité dynamique en revanche, on calibre le modèle avec le jeu de données de référence, puis de nouveau avec le jeu de données biaisé. Cette méthode, plus réaliste, permet au modèle de s'adapter au biais. C'est la méthode que nous avons choisie ici.

Scénarios d'erreurs infligés aux précipitations

Nous avons choisi de travailler sur deux types de biais (quantitatif et déphasage), dont les précipitations WRF pourraient faire l'objet. Le biais quantitatif se résume à un coefficient multiplicateur des précipitations appliqué de manière systématique (par jour) aux précipitations observées sur le bassin versant considéré (précipitations de référence). Le coefficient prendra des valeurs de biais négatif (0.5, 0.8), et positif (1.25, 1.50, 1.75 et 2). Le biais de déphasage consiste en un décalage des précipitations observées dans le temps (de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 60 et 90 jours). Ces biais prennent des importances extrêmes (précipitations réduites de moitié ou doublées, décalage de 3 mois des valeurs) dans le but d'analyser les limites d'adaptation de GR4J face à l'ampleur des biais. Les bassins versants utilisés seront ceux de l'Armançon et de l'Ource, précédemment utilisés dans les études de comparaison avec les précipitations observées. Les valeurs des critères et des paramètres issus de ces exercices de sensibilité sont disponibles en annexe n°9.

4.3.1 Sensibilité aux erreurs quantitatives

La figure 32 présente les régimes hydrologiques issus des calibrations forcées par les précipitations biaisées quantitativement (selon les différents scénarios d'erreur précédemment décrits). Aucun des scénarios ne reproduit le débit issu des précipitations WRF, aussi bien sur l'Armançon (figure 32 a) que sur l'Ource (figure 32 b). Si l'on s'intéresse au domaine de variation du régime hydrologique issu des précipitations WRF, on constate que ce dernier recoupe la plupart des régimes simulés à partir des précipitations biaisées. Pour la courbe issue des précipitations WRF, on remarque donc, durant les mois chauds, un rapprochement des tendances avec les courbes à forts biais positifs ($\times 1.75$ et $\times 2$) et durant les mois froids un rapprochement avec les courbes de biais négatifs (0.5 à 0.8).

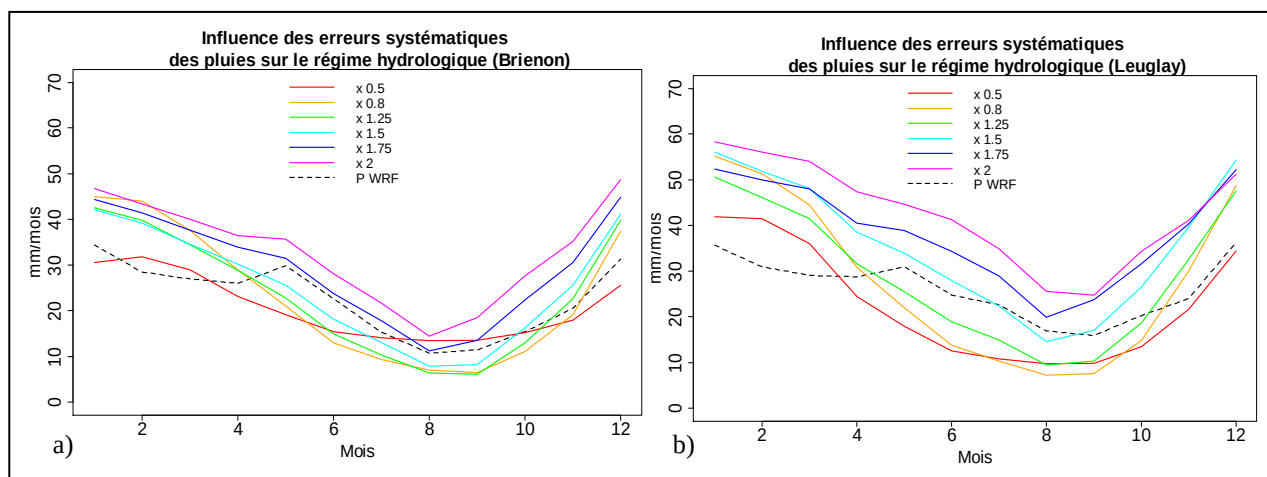


Figure 32 : Influence de l'erreur quantitative sur les régimes hydrologiques a) sur Brienon, b) sur Leuglay

L'évolution des régimes n'est pas reliée au coefficient d'erreur de manière linéaire. Les biais positifs semblent aboutir à des régimes hydrologiques plus complexes (avec des ruptures comme en mai) que les régimes générés par les biais négatifs, dont les tendances sont plus lissées. De plus, lorsqu'on diminue les précipitations (biais négatifs), les débits produits recoupent tout de même des courbes issues de scénarios positifs (grâce à une compensation via le paramètre d'échange X2).

On peut également constater un effet du bassin versant : la plus grande surface du bassin versant de l'Armançon a pour conséquence une atténuation des variations entre les différents régimes modélisés alors que le bassin versant de l'Ource, plus petit et donc plus réactif, montre de plus grands écarts entre les régimes modélisés.

4.3.2 Sensibilité aux erreurs de phasage

Pour les erreurs de phasage, le régime WRF ne reproduit toujours pas l'une des courbes de scénario d'erreur (figure 33). Le régime issu des précipitations WRF est plus complexe que les régimes avec un biais de déphasage. On se rapproche davantage de cette complexité avec les scénarios d'erreurs quantitatives systématiques (notamment le seuil visible en mai).

En ce qui concerne GR4J, on constate qu'il supporte bien ce type d'erreur, puisque les courbes +5j à +30j sont toutes proches les unes des autres. Les principales différences commencent à s'observer avec un décalage de 40 jours.

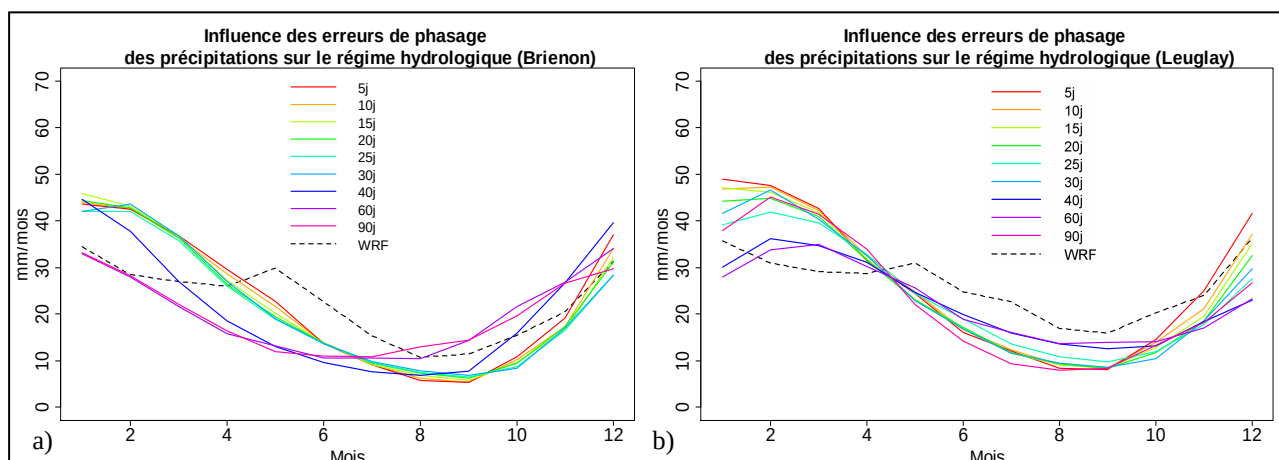


Figure 33 : Influence de l'erreur de phasage sur les régimes hydrologiques a) sur Brienon, b) sur Leuglay

Enfin, nous pouvons également noter encore une fois l'influence du bassin versant, au vu de la diminution de la variation des courbes entre l'Ource et l'Armançon, là aussi, vraisemblablement reliée à la grande surface du bassin versant de l'Armançon (comparée à celle de l'Ource).

4.4 Incertitudes et limites liées à la modélisation

Il existe un bon nombre d'approximations qu'il convient de garder à l'esprit lorsqu'on analyse les résultats d'une simulation. Il est en effet très difficile de représenter fidèlement toute la diversité des processus et des écoulements d'un bassin versant (Roche et al., 2012 ; Le Moine, 2008). De par l'utilisation d'un modèle global cette étude possède des limites qu'il convient de préciser.

Le bassin versant considéré comme unité élémentaire est le bassin versant topographique. Les limites ne correspondent qu'aux limites topographiques du bassin versant et ne permettent pas de prendre en compte les circulations souterraines. Bien que ces circulations soient estimées par la fonction d'échange du modèle GR4J, elles restent difficiles à vérifier (Le Moine, 2008). En d'autres termes, si GR4J met en évidence l'existence des circulations souterraines, leur quantification est toujours périlleuse.

La non prise en compte de la variabilité spatiale des variables climatiques est une autre limite. Dans cette étude, le choix s'est porté sur une moyenne arithmétique des différentes données en entrées (moyenne des différents points de simulation inclus dans le contour du bassin versant).

Les ouvrages de régulation du débit n'ont pas été pris en compte (les données de prélèvement ou de rejet sont annuelles la plupart du temps). C'est pourquoi nous avons choisi parmi les stations hydrométriques disponibles celles dont le débit était le moins influencé par des ouvrages de régulation.

Enfin, l'étude d'impact proposée ici ne prend pas en compte le caractère évolutif du bassin versant. Le jeu de paramètre qui sera fixé pour chaque bassin versant sera celui appliqué sur la période future (jusqu'à 2100). Cela implique que le fonctionnement hydrologique du bassin versant ne variera pas dans le temps. Par exemple, on fait l'hypothèse que l'occupation du sol, qui influence l'ETP, ne varie pas dans le temps. Cette hypothèse est lourde et peut être sujette à de nombreuses critiques.

4.5 Indicateurs hydrologiques de l'impact du changement climatique

Ce présent rapport ne discute pas de l'impact du changement climatique. Néanmoins, il a fallu une réflexion sur la manière de produire l'étude d'impact, notamment au niveau des différents indicateurs qui pourront être utilisés. Ils devront répondre à plusieurs critères. Ils devront d'abord être sensible au changement climatique afin d'être pertinent. Ils devront également pouvoir être repris de manière aisée par les différents acteurs et gestionnaires de l'eau afin que ceux-ci puissent s'approprier les résultats de cette étude et effectuer des prises de décisions efficaces.

Les différents descripteurs hydrologiques pourront être regroupés en trois catégories, selon les types de débits qu'ils caractérisent : les débits moyens et le régime hydrologique global ; les débits d'étiage ; les débits de crue.

En premier lieu, il s'agira de définir une période sur laquelle des descripteurs pourront être calculés et comparés aux valeurs en temps présent. Dans plusieurs études d'impact à long terme, les données ne sont pas réellement disponibles de manière continue (ICC-HYDROQUAL, 2010 ; MEDDTL, 2011a ; Habets et al., 2011). Dans notre étude, nous aurons à disposition les données journalières de manière continue sur la période 1980-2100. Nous pourrions donc prendre de larges fenêtres de comparaison. On propose de définir alors 3 périodes de 30 ans : le temps présent, sur une fenêtre 1980-2010 ; le milieu du siècle (2025-2055) et la fin de siècle (2070-2100).

Les débits moyens et le cycle hydrologique global

Afin d'effectuer des comparaisons sur les débits moyens, plusieurs descripteurs pourront être utilisés. Tout d'abord, il est possible de comparer les régimes hydrologiques mensuels interannuels sur les 3 périodes de comparaison, pour caractériser l'évolution de la saisonnalité des débits. De manière plus globale, on pourra également tracer l'évolution sur toute la période de la lame d'eau totale écoulée pendant l'année. Il est également possible de comparer sur les 3 périodes les

fréquences cumulées des débits, afin de visualiser l'évolution de la distribution des débits. Enfin, en prenant les valeurs moyennes sur la période de référence (présent), nous réaliserons des cartes des anomalies sur les moyennes de débits mensuels, afin d'identifier les territoires impactés.

Les débits d'étiage

Les débits d'étiages pourront être caractérisés par le calcul des fréquences de non dépassement des moyennes des débits minimaux sur 10 jours (VCN10), de périodes de retour 2, 5, et 10 ans, sur les 3 fenêtres de comparaison ([MEDDTL, 2011 b](#)). On analysera également la date d'occurrence de la VCN10 dans l'année, et l'évolution de sa valeur pendant toute la période de 120 ans. Cet indice permet de qualifier l'évolution de la saisonnalité.

Les débits de crue

Les débits de crue pourront de la même manière être caractérisés par les fréquences de non dépassement des débits journaliers maximaux, avec les périodes de retour 2, 10 et 20 ans. Et ce sur les trois périodes de comparaisons ([MEDDTL, 2011 b](#)).

Conclusion

L'enjeu de cette étude était la calibration d'un modèle hydrologique global (GR4J) à partir de données climatiques simulées (plutôt qu'avec des données observées utilisées habituellement). L'utilisation ainsi détournée de GR4J a pour objectif la simulation de l'impact du changement climatique sur les débits des bassins versants de Bourgogne. La calibration à partir des simulations climatiques est nécessaire pour conserver une calibration correcte du modèle sur la période 1980-2100. Les données climatiques utilisées proviennent de la désagrégation dynamique d'un GCM par un RCM (modèle WRF) à l'échelle de 3km sur 3km. Par la suite, ces modèles « calibrés », c'est-à-dire, possédant un jeu de paramètres fixés et valides, permettront la simulation des débits sur la période 1980-2100 selon deux scénarios d'émissions de GES.

Tout d'abord, les 12 bassins versants ont montré une bonne représentativité à l'échelle de la Bourgogne, au niveau du contexte géographique, de l'occupation du sol, et du contexte géologique. Le modèle a été calibré pour chaque bassin versant à l'aide des débits observés, des précipitations WRF et de l'ETP WRF sur la période 1980-2011 selon une stratégie de calibration/contrôle optimale (3 sous-périodes de calibration pour 6 sous-périodes de contrôle). Les différents critères de performances utilisés conduisent tous à la même conclusion : la performance et la robustesse du modèle calibré ne sont pas satisfaisantes. La cause principale est la mauvaise qualité des précipitations simulées WRF. Les calibrations à partir des précipitations observées ont permis de reproduire correctement le régime hydrologique observé, prouvant que le modèle GR4J a bien été implémenté et est adapté à nos bassins versants.

Les études de sensibilité que nous avons réalisées montrent que le biais existant sur les données de précipitations WRF correspondrait plutôt à une mauvaise estimation des quantités plutôt qu'à une erreur de distribution temporelle des précipitations. Cette erreur quantitative sur les précipitations n'étant pas constante durant le cycle hydrologique (sur-estimation durant les mois chauds et sous-estimations durant les mois froids), la méthode de post-correction des précipitations devra prendre en compte la saisonnalité de ce biais.

Néanmoins, on a constaté grâce aux calibrations à partir des précipitations observées que l'ETP WRF a permis de reproduire le cycle hydrologique correctement. On en déduit que la physique du climat sur le territoire bourguignon semble bien reproduite par le modèle climatique WRF.

L'analyse des précipitations et des débits sur la période de référence (1980-2011) a montré une évolution du fonctionnement hydroclimatique des bassins versants (notamment entre la période 1980-1990 et les périodes consécutives : 1990-2000 et 2000-2010). Cependant, les calibrations à partir des précipitations observées ont montré que cette non-stationnarité du climat n'a que peu d'influence sur la performance de GR4J.

Les différents obstacles semblent donc franchissables pour aboutir à des calibrations de qualité à partir de simulations climatiques. La capacité du modèle climatique WRF à reproduire les variables climatiques est très rassurante. De plus, le modèle GR4J s'adaptant assez bien à une non-stationnarité sur la période d'apprentissage, on peut espérer qu'il en sera de même sur la période 1980-2100. Le biais existant sur les précipitations n'étant que quantitatif, la diminution des écarts saisonniers entre les précipitations WRF et observées devrait donc permettre à GR4J de reproduire correctement le régime hydrologique.

La suite de ce travail consistera donc à tester la performance et la robustesse des calibrations à partir des précipitations WRF post-corrigées, pour confirmer la validité de cette méthodologie. Les modélisations hydrologiques pourront alors être réalisées sur la période 1980-2100 à partir de ces précipitations post-corrigées et du modèle calibré.

Références bibliographiques

- ALTERRE BOURGOGNE. Adaptation au changement climatique: Evaluation de la réserve en eau des sols. **[en ligne]** 2010. Disponible sur http://www.alterre-bourgogne.org/arkothèque/client/alterre_bourgogne/ressources/detail_ressource.php?ref=76&titre=adaptation-au-changement-climatique-evaluation-de-la-reserve-en-eau-des-sols (consulté le 01/04/13).
- ALTERRE BOURGOGNE. HYCCARE Bourgogne, Réponse à l'appel à projet de recherche GICC 2012. ALTERRE BOURGOGNE, 2012, 23p.
- ANDREASSIAN, V. Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants. **[en ligne]** Thèse en hydrologie, Paris : Université Paris 6, 2002, 276p. Disponible sur http://www.cemagref.fr/webgr/Download/Rapports_et_theses/2002-ANDREASSIAN-THESE.pdf (consulté le 01/05/13).
- ANDREASSIAN, V., PERRIN, C., MICHEL, C., USART-SANCHEZ, I., LAVABRE, J. Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models. J. Hydrol. 2001, vol n°250, pp. 206–223.
- ANDREWS, F., Hydromad Tutorial **[en ligne]** 2011. Disponible sur <http://hydromad.catchment.org/downloads/tutorial.pdf> (consulté le 01/04/13).
- BATES, B.C., KUNDZEWICZ, Z.W., WU, S., PALUTIKOF, J.P., 2008. Le changement climatique et l'eau, document technique n°6. Genève : Secrétariat du GIEC, 2008, 228p.
- BOE, J. Changement global et cycle hydrologique: Une étude de régionalisation sur la France. **[en ligne]** Thèse en physique du climat, Toulouse : Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2007, 278p. Disponible sur <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00256811/> (consulté le 01/04/13).
- BOE, J., TERRAY, L., MARTIN, E., HABETS, F. Projected changes in components of the hydrological cycle in French river basins during the 21st century. Water Resour. Res. 2009, vol n°45, n/a–n/a.
- BRGM. Atlas des eaux souterraines de la France. Paris, Editions du BRGM, 1970.
- CASTEL, T., RICHARD, Y., POHL, B., CRETAT, J., THEVENIN, D., CUCCIA, C., BOIS, B., ROUCOU, P., Assessment of Dynamic Downscaling of the Continental East French Regional Climate at high-resolution using the ARW/WRF model. **In** : Assoc. Int. Clim. XXIIIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Rennes : France 2010, vol n°23, pp. 107-112.
- CUCCIA, C. Changement climatique en Bourgogne depuis 1961: Etude des variations de températures et de précipitations **[en ligne]** Rapport de stage de Master 2 Géobiosphère. Dijon : Université de Bourgogne, 2008, 52p. Disponible sur http://climatologie.u-bourgogne.fr/documents/theses_master/2008/Cuccia_2008.pdf (consulté le 01/07/13).
- CONSEIL REGIONAL DE BOURGOGNE. Pluviométrie en Bourgogne **[en ligne]** 2004, Disponible sur www.region-bourgogne.fr/download.php?voir=0&document_id=813 (consulté le 01/08/13).
- DUCHARNE, A. Importance of stream temperature to climate change impact on water quality. Hydrol Earth Syst Sci., 2008, vol n°12, pp. 797–810.
- DREAL Bourgogne, Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement **[en ligne]** disponible sur : <http://www.bourgogne.developpement-durable.gouv.fr/l-eau-en-bourgogne-r126.html> (consultée le 01/08/2013).
- FAO. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Document technique n°56 **[en ligne]** FAO irrigation and drainage paper, 1998, 326p. Disponible sur www.kimberly.uidaho.edu/ref-et/fao56.pdf (consulté le 01/04/13).
- GIEC. Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Genève, Suisse, 2007, 114p.

- GNOUMA, R. Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques. **[en ligne]** Thèse en génie civil. Lyon : CEMAGREF de Lyon, 2006, 445p. Disponible sur http://docinsa.insa-lyon.fr/these/2006/gnouma/00_couverture.pdf (consulté le 01/04/13).
- HABETS, F., BOE, J., DEQUE, M., DUCHARNE, A., GASCOIN, S., HACHOUR, A., MARTIN, E., PAGE, C., SAUQUET, E., TERRAY, L., THIERY, D., OUDIN, L., VIENNOT, P., THERRY, S. Programme PIREN-SEINE Impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant de la Seine. Résultats du projet GICC-RExHySS #13. **[en ligne]** Agence de l'eau Seine-Normandie, 2011, 48p. Disponible sur http://www.sisyphe.upmc.fr/piren/webfm_send/1010 (consulté le 01/04/13).
- ICC-HYDROQUAL. Impact du Changement Climatique sur l'hydrosystème Loire : HYDROlogie, regime thermique, QUALité des eaux, Action 1 : Evolution hydroclimatique de la Loire et de ses affluents sous changement climatique. Rapport final **[en ligne]** 2010, 107p. Disponible sur http://www.plan-loire.fr/fileadmin/pce/PF_RDI/ProjetsRecherche/Docs/ICC-HYDROQUAL/ICC-HYDROQUAL_action_1_Hydrologie.pdf (consulté le 01/04/13).
- KAROLY, D.J., BRAGANZA, K., STOTT, P.A., ARBLASTER, J.M., MEEHL, G.A., BROCCOLI, A.J., DIXON, K.W. Detection of a Human Influence on North American Climate. Science, 2003, vol n° 302, pp. 1200–1203.
- KLEMES, V. Dilettantism in hydrology: Transition or destiny? Water Resour. Res, 1986a, vol n°22, pp. 177S–188S.
- KLEMES, V. Operational testing of hydrological simulation models. Hydrol. Sci. J, 1986b, vol n° 31, pp. 13–24.
- LE MOIGNE, P. Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système SAFRAN. **[en ligne]** Centre national de recherches météorologiques, 2002. Disponible sur <http://www.ija.csic.es/gt/obster/safranbn.pdf> (consulté le 01/07/13).
- LE MOINE, N. Le bassin versant de surface vu par le souterrain : une voie d'amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit? **[en ligne]** Thèse en géosciences et ressources naturelles. Paris : Université Pierre et Marie Curie, 2008, 348p. Disponible sur <http://hydrologie.org/SOU/081128LEMOINE.pdf> (consulté le 01/03/13).
- LE MOINE, N., ANDREASSIAN, V., PERRIN, C., MICEHL, C. How can rainfall-runoff models handle intercachment groundwater flows? Theoretical study based on 1040 French catchments. Water Resour. Res, 2007, vol n° 43, n/a–n/a.
- LEGATES, D.R., MCCABE, G.J. Evaluating the use of "goodness-of-fit" Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water Resour. Res, 1999, vol n° 35, pp. 233–241.
- MATHEVET, T. Quels modèles pluie-débit globaux au pas de temps horaires? Développements empiriques et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants. Thèse en science de l'eau. Paris: ENGREF, 2005, 463p.
- MILLY, P.C.D., DUNNE, K.A., VECCHIA, A.V. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. Nature, 2005, vol n°438, pp. 347–350.
- MINISTERE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPPEMENT DURABLE, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT. Explore 2070 Eau et changement climatique, Climat de la Métropole Rapport d'étape n°3, 2011a, 152p.
- MINISTERE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPPEMENT DURABLE, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT. Explore 2070 Eau et changement climatique, Hydrologie de la Métropole Rapport d'étape n°3, 2011b, 102p.
- MINISTERE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPPEMENT DURABLE, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT. Explore 2070 Eau et changement climatique, Hydrologie de surface A1 Rapport de synthèse. **[en ligne]** 2012, 163p. Disponible sur <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/Synthèse%20étude%20hydrologie%20de%20surface%20explore%202070.pdf> (consulté le 01/06/13).
- MOSS, R.H., EDMONDS, J.A., HIBBARD, K.A., MANNING, M.R., ROSE, S.K., VAN VUUREN, D.P., CARTER, T.R., EMORI, S., KAINUMA, M., KRAM, T., MEEHL, G.A., MITCHELL, J.F.B., NAKICENOVIC, N., RIAHI, K., SMITH, S.J., STOUFFER, R.J., THOMSON, A.M., WEYANT, J.P., WILBANKS, T.J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature, 2010, vol n°463, pp. 747–756.
- MUSY, A. Hydrologie 1. Une science de la nature. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2004, 314p.
- OUDIN, L. Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. **[en ligne]** Thèse en science de l'eau. Paris : Engref, 2004, 495p. Disponible sur <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/49/98/16/PDF/memoire.pdf> (consulté le 01/05/13).
- PAYRAUDEAU, S. Modélisation distribuée des flux d'azote sur des petits bassins versants méditerranéens. **[en ligne]** Thèse en sciences de l'eau. Montpellier : ENGREF, 2002, 450p. Disponible sur <http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/04/65/78/PDF/tel-00005633.pdf> (consulté le 01/05/13).
- PERRIN, C. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. **[en ligne]** Thèse en mécanique des milieux géophysiques et environnement. Grenoble : INPG, 2000, 291p. Disponible sur http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/04/68/55/PDF/Memoire_These_Perrin_2000.pdf (consulté le 01/04/13).

- PERRIN, C., MICHEL, C., ANDREASSIAN. Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR) **[en ligne]** Antony : Cemagref, 2007. Disponible sur <http://fresno.cemagref.fr/webgr/Modeles/Descriptions.htm>, consulté le 01/03/13).
- PERRIN, C., MICHEL, C., ANDREASSIAN, V. Does a large number of parameters enhance model performance ? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. J. Hydrol., 2001, vol n°242, pp. 275-301.
- PERRIN, C., MICHEL, C., ANDREASSIAN, V. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. J. Hydrol, 2003, vol n°279, pp. 275–289.
- PLANTON, S., TERRAY, L. Détection et attribution à l'échelle régionale: le cas de la France. Météorologie, 2007, vol n° 58, pp. 25-29.
- ROCHE, P.A., MIQUEL, J., GAUME, E. Hydrologie quantitative, Processus, modèles et aide à la décision. France, Paris : Springer, 2012, 590p.
- ROJAS SERNA, C. Quelle connaissance hydrométrique minimale pour définir les paramètres d'un modèle pluie débit ? **[en ligne]** Thèse en science de l'eau. Engref, Paris, 2005, 320p. Disponible sur http://www.cemagref.fr/webgr/Download/Rapports_et_theses/F2005-ROJAS-SERNA-THESE.pdf (consulté le 01/05/13).
- ROSSI, A. Analyse spatio-temporelle de la variabilité hydrologique du bassin versant du Mississippi: rôle des fluctuations climatiques et déduction de l'impact des modifications du milieu physique. **[en ligne]** Thèse en hydrologie. Rouen : Université de Rouen, 2010, 333p. Disponible sur <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00690189/> (consulté le 01/05/13).
- SAUQUET, E., DUPEYRAT, HENDRICKX, PERRIN. IMAGINE 2030, climat et aménagements de la Garonne : quelles incertitudes sur la ressource en eau en 2030? Rapport final **[en ligne]** 2010, 149p. Disponible sur <http://cemadoc.cemagref.fr/cemoa/PUB00028876> (consulté le 01/04/13).
- SEGUIN, J.J., MARDHEL, V. Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA (version beta) Présentation du référentiel. Principe de construction et mise en oeuvre. BRGM, 2012, 164p. Disponible sur <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-61034-FR.pdf> (consulté le 01/05/13).
- SIMMONS, A., UPPALA, S.M., DEE, D.P., KOBAYASHI, S. ERA-Interim : New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. **[en ligne]** ECMWF : 2006, ECMWF Newsletter n°110, pp. 26-35. Disponible sur http://www.ecmwf.int/publications/newsletters/pdf/110_rev.pdf (consulté le 01/07/13).
- SIRTAVA. Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin versant de l'Armançon. Rapport environnemental. **[en ligne]** Tonnerre (France) : SIRTAVA, 2012, 104p. Disponible sur http://www.bassin-armancon.fr/fic_bdd/pdf_fr_fichier/13684661830_Rapport_environnemental_SAGEarmancon.pdf (consulté le 01/08/13).
- SKAMAROCK, W., KLEMP, J.B., DUDHIA, J., GILL, D.O., BARKER, D.M., WANG, W., POWERS, J.G.A. Description of the Advanced Research WRF Version 3. Technical report. **[en ligne]** Boulder, Colorado, USA : NCAR, 2008, 125p. Disponible sur http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf (consulté le 01/07/13).
- STOTT, P.A., TETT, S.F.B., JONES, G.S., ALLEN, M.R., INGRAM, W.J., MITCHELL, J.F.B. Attribution of twentieth century temperature change to natural and anthropogenic causes. Clim. Dyn, 2001, vol n°17, pp. 1–21.
- THIERY, D. Logiciel GARDENIA, version 6, Guide d'utilisation **[en ligne]** BRGM, 2003, 11p. Disponible sur <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-52832-FR.pdf> (consulté le 01/06/13).
- VOLDOIRE, A., SANCHEZ-GOMEZ, E., SALAS Y MELIA, D., DECHARME, B., CASSOU, C., SENESI, S., VALCKE, S., BEAU, I., ALIAS, A., CHEVALLIER, M., DEQUE, M., DESHAYES, J., DOUVILLE, H., FERNANDEZ, E., MADEC, G., MAISONNAVE, E., MOINE, M.-P., PLANTON, S., SAINT-MARTIN, D., SZOPA, S., TYTECA, S., ALKAMA, R., BELAMARI, S., BRAUN, A., COQUART, L., CHAUVIN, F. The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation. Clim. Dyn, 2012, vol n°40, pp. 2091–2121.
- VON STORCH, H. On the Use of "Inflation" in Statistical Downscaling. J. Clim., 1999, vol n°12, pp. 3505–3506.
- XU, Y., CASTEL, T., RICHARD, Y., CUCCIA, C., BOIS, B. Burgundy regional climate change and its potential impact on grapevines. Clim. Dyn, 2012, vol n°39, pp. 1613–1626.
- ZWIERS, F.W., ZHANG, X. Toward Regional-Scale Climate Change Detection. J. Clim, 2003, vol n°16, pp. 793–797.

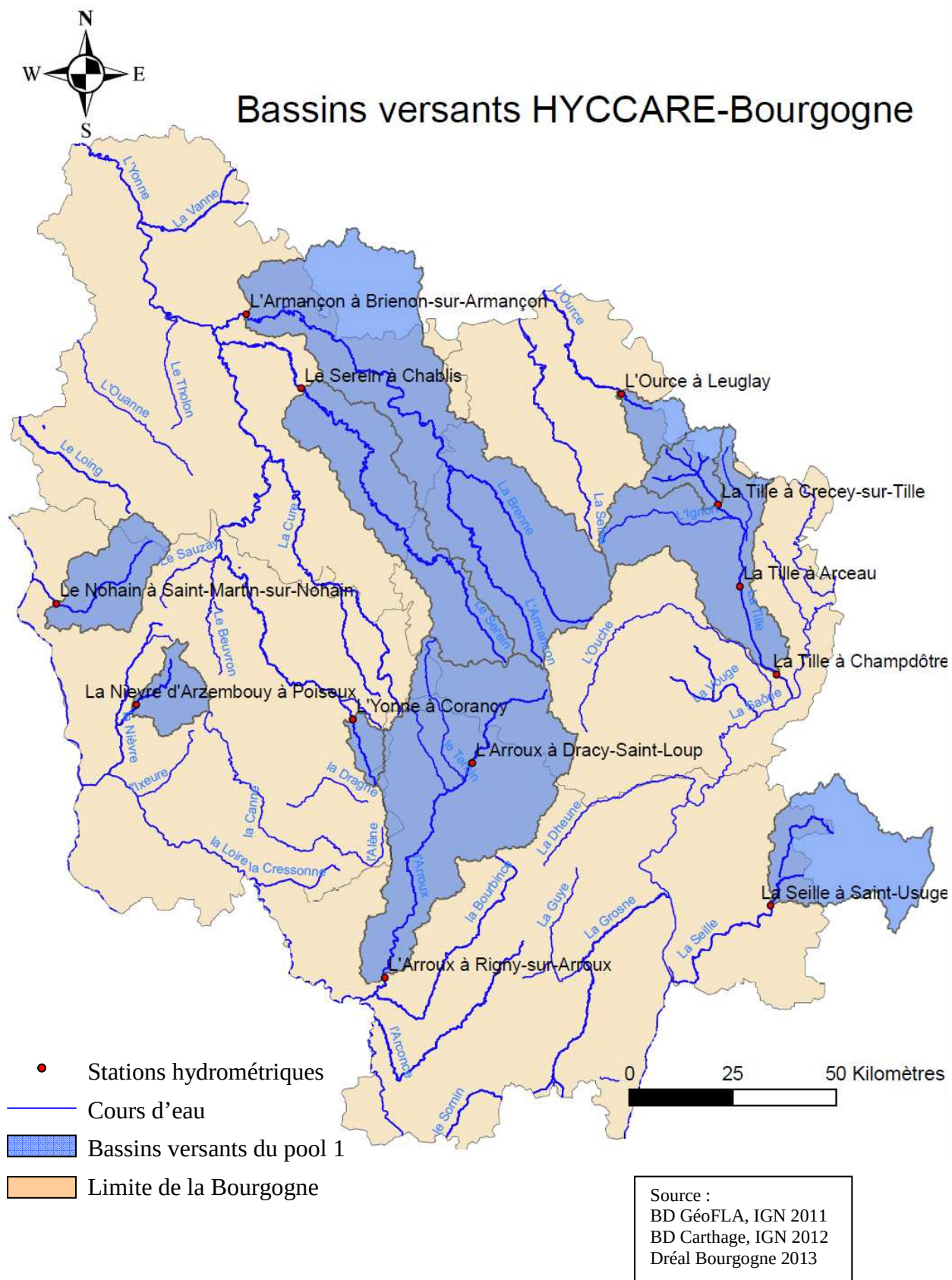
Logiciels utilisés : ArcGIS 9.3, QGIS 1.8.0, gvSIG 2.0.0, R 2.15.3, Rstudio 0.97.336

ANNEXES

Liste des annexes

Annexe 1 : Situation géographique des bassins versants	1
Annexe 2 : Caractéristiques moyennes des bassins versants	2
Annexe 3 : Contexte pluviométrique de la région Bourgogne	4
Annexe 4 : Description complète de l'occupation du sol sur la Bourgogne et les bassins versants	5
Annexe 5 : Résultats des premières calibrations	6
Annexe 6 : Résultats des calibrations sur précipitations observées	10
Annexe 7 : Résultats des calibrations roulantes sur le bassin versant de l'Armançon à Brienon sur Armançon	11
Annexe 8 : Résultats des calibrations sur le critère NS mensuel (bassin versant de l'Ource à Leuglay)	12
Annexe 9 : Résultats des calibrations sur les scénarios d'erreurs des précipitations sur les bassins versants de l'Ource à Leuglay et de l'Armançon à Brienon sur Armançon.....	13
Références bibliographiques	14

Annexe 1 : Situation géographique des bassins versants



Annexe 2 : Caractéristiques moyennes des bassins versants

Cours d'eau		Nohain	Nievre d'Arzembouy	Armançon	Serein	Ource	Yonne
Station hydrométrique		St-Martin /N	Poiseux	Brienon/A	Chablis	Leuglay	Corancy
ETP (mm/an)	Max.	779,5	745,7	758,4	733,7	835,0	714,2
	moyenne	705,1	670,3	694,9	669,8	762,9	638,1
	Min.	646,3	610,7	628,5	608,8	692,6	573,3
P (mm/an)	Max.	1188,1	1307,9	1322,7	1509,8	1267,6	1607,0
	moyenne	939,5	1040,6	1036,9	1132,5	973,9	1296,1
	Min.	711,7	775,6	7256,0	800,6	694,5	978,2
Q (mm/an)	Max.	860,6	529,5	546,3	432,4	558,1	1129,8
	moyenne	458,4	318,1	298,1	229,4	360,2	816,6
	Min.	208,8	165,2	139,7	106,3	203,3	548,5
Surface (km²)		473	224	2982	1119	173	106
Coeff Irrégularité QNETI ¹	P	0,70	0,54	0,56	0,49	0,59	0,43
	Q	1,08	1,85	1,69	2,01	1,67	1,31
		5	142	0	0	108	40
STRAHLER ²		4	4	5	4	3	2
MILLER ³		0,27	0,25	0,14	0,13	0,24	0,25
Altitude (m)	Max.	382	443	599	596	511	900
	moyenne	237	302	282	310	412	587
	Min.	157	204	88	129	276	331
Cours d'eau		Tille			Arroux		Seille
Position		amont		aval	amont	aval	
Station hydrométrique		Crecey/T	Arceau	Champdotre	Dracy-St-L	Rigny/A	St-Usage
ETP (mm/an)	Max.	827,5	819,1	813,4	704,3	720,9	735,3
	moyenne	759,4	757,0	740,1	637,4	652,8	672,0
	Min.	688,8	688,7	532,1	572,5	584,5	609,4
P (mm/an)	Max.	1283,4	1288,4	1276,0	1391,6	1381,6	1268,3
	moyenne	1002,1	991,7	1011,2	1066,3	1104,5	1046,6
	Min.	705,2	694,1	792,7	775,4	793,8	722,5
Q (mm/an)	Max.	680,2	497,7	393,8	410,3	544,7	787,6
	moyenne	385,2	280,5	258,8	249,7	347,0	492,8
	Min.	199,3	135,3	144,2	139,8	205,0	104,9
Surface (km²)		231	846	1258	776	2277	937
Coeff Irrégularité QNETI	P	0,62	0,62	0,57	0,57	0,52	0,46
	Q	1,85	2,02	2,01	2,10	1,94	1,52
		0	142	117	164	0	0
STRAHLER		3	4	5	5	5	4
MILLER		0,21	0,18	0,17	0,24	0,19	0,21
Altitude (m)	Max.	527	591	591	566	897	222
	moyenne	413	396	349	406	406	199
	Min.	273	225	187	293	233	179

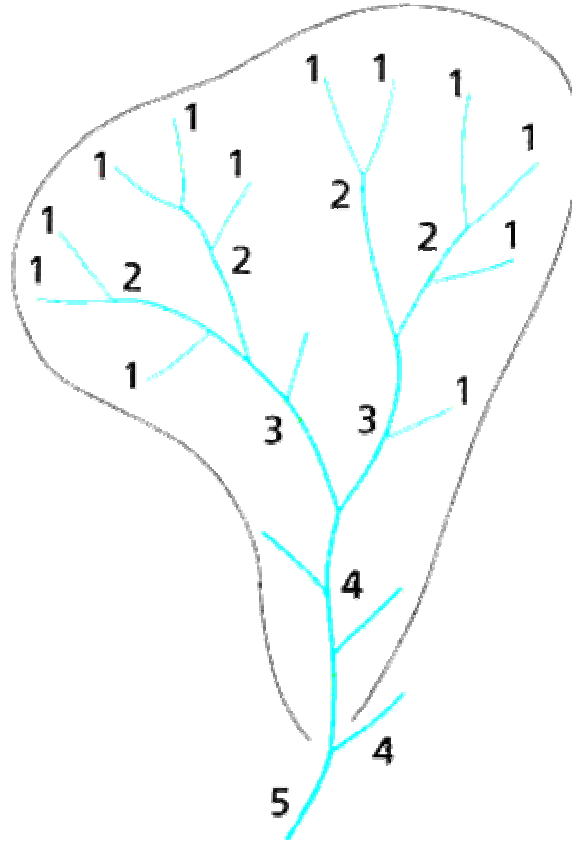
Annexe 2 : Caractéristiques moyennes des bassins versants

¹QNETI

Nombre de jours par an ayant un débit moyen inférieur à ¼ du module (= débit moyen interannuel)

²Ordre de Strahler (1957)

La rencontre de deux affluents d'ordre n donne un confluent d'ordre n+1. L'ordre de la dernière confluence est affectée au bassin versant total et indique le niveau de ramification du réseau hydrographique.



³Indice de circularité de Miller (Miller, 1953)

Indice de circularité du bassin versant. Il consiste au rapport entre la surface d'un bassin versant sur la surface du cercle de même périmètre. Un bassin versant parfaitement rond aura un indice de 1.

Il est calculé comme suit :

$$C = 4\pi \frac{A}{P^2}$$

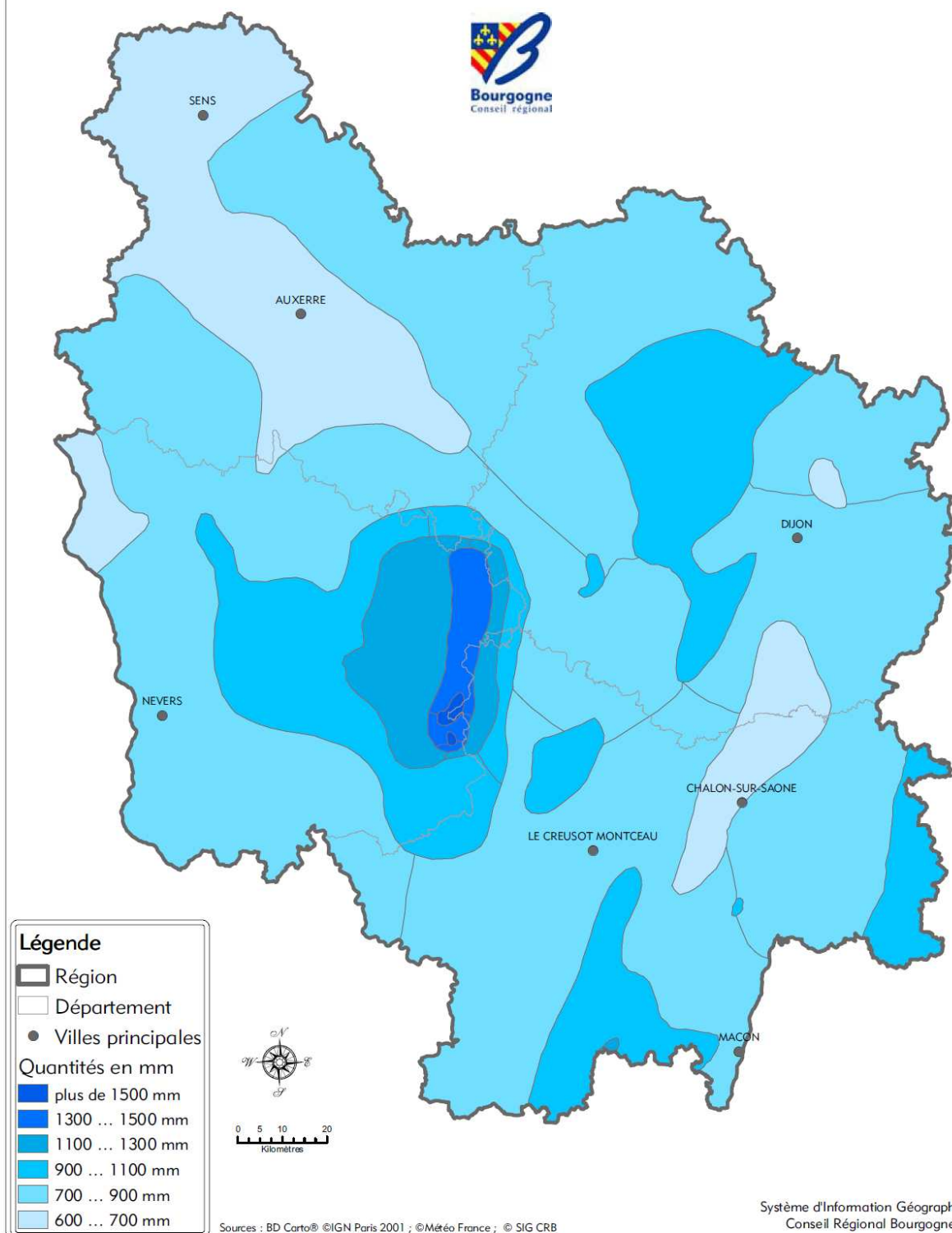
Avec

C : indice de circularité de Miller (sans unité)

A : Aire du bassin versant (m²)

P : Périmètre du bassin versant (m).

Pluviométrie en Bourgogne



Annexe 4 : Description complète de l'occupation du sol sur la Bourgogne et les bassins versants

Code CLC *	Libellé*	Bourgogne			Bassins versants		
		Aire (km²)	%	Cumul	Aire (km²)	%	Cumul
211	Terres arables	9376	29,58	29,58	2897	30,51	30,51
231	Prairies	8529	26,91	56,49	2457	25,88	56,39
311	Forêts de feuillus	7977	25,17	81,65	2544	26,80	83,19
242	Systèmes cultureux et parcellaires complexes	1788	5,64	87,29	470	4,95	88,14
312	Forêts de conifères	941	2,97	90,26	335	3,53	91,67
112	Tissu urbain discontinu	816	2,57	92,84	166	1,75	93,41
243	Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants	687	2,17	95,00	220	2,32	95,73
313	Forêts mélangées	506	1,60	96,60	230	2,43	98,16
221	Vignobles	330	1,04	97,64	43	0,45	98,61
324	Forêt et végétation arbustive en mutation	274	0,86	98,50	52	0,55	99,16
121	Zones industrielles et commerciales	117	0,37	98,87	23	0,24	99,40
511	Cours et voies d'eau	90	0,28	99,16	0	0,00	99,40
512	Plans d'eau	83	0,26	99,42	20	0,21	99,61
131	Extraction de matériaux	42	0,13	99,55	14	0,15	99,76
142	Equipements sportifs et de loisirs	35	0,11	99,66	8	0,09	99,85
122	Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés	23	0,07	99,73	3	0,04	99,88
322	Landes et broussailles	23	0,07	99,81	4	0,04	99,92
321	Pelouses et pâturages naturels	16	0,05	99,86	4	0,05	99,97
111	Tissu urbain continu	11	0,03	99,89	2	0,02	99,99
124	Aéroports	11	0,03	99,93	0	0,00	99,99
222	Vergers et petits fruits	9	0,03	99,96	0	0,00	99,99
141	Espaces verts urbains	6	0,02	99,97	0	0,00	99,99
331	Plages, dunes et sable	4	0,01	99,99	0	0,00	99,99
133	Chantiers	2	0,01	99,99	0	0,00	100,00
411	Marais intérieurs	2	0,01	100,00	1	0,01	100,00

* Classe d'occupation du sol : Base de données Corine Land Cover (2006) niveau 3

Annexe 5 : Résultats des premières calibrations

BV	Période de calibration	Critères en contrôle sur toute la période				Jeu de paramètres fixé associé			
		NS	NS R(Q)	NS log(Q)	Freq	X1	X2	X3	X4
Armançon à Brienon/A	P1	-0,130	0,071	0,054	0,930	119,50	-2,30	196,23	2,90
	P2	0,245	0,398	0,413	0,797	168,26	-5,00	136,29	2,59
	P3	0,450	0,519	0,527	0,615	667,42	-5,00	130,29	2,73
	DATA	0,324	0,375	0,347	0,788	229,88	-5,00	192,46	2,90
	P1	-0,085	0,114	0,099	0,948	119,50	-2,30	196,23	2,90
	P2	0,223	0,390	0,409	0,842	168,26	-5,00	136,29	2,59
	P3	0,434	0,505	0,513	0,799	667,42	-5,00	130,29	2,73
	DATA	0,282	0,402	0,404	0,877	229,88	-5,00	192,46	2,90
	P1	0,009	0,175	0,150	0,956	130,26	-3,36	187,09	2,90
	P2	0,220	0,400	0,420	0,865	181,68	-5,00	98,68	2,80
	P3	0,439	0,509	0,514	0,903	282,94	-5,00	56,02	2,90
	DATA	-0,152	0,143	0,165	0,888	212,89	-5,00	110,14	2,25
Arroux à Dracy-St-L	P1	0,085	0,135	0,029	0,734	209,73	-5,00	87,22	2,25
	P2	0,185	0,201	0,071	0,706	302,87	-4,98	67,56	2,28
	P3	0,257	0,335	0,281	0,501	1156,78	-5,00	50,34	2,32
	DATA	0,056	-0,035	-0,250	0,633	394,13	-5,00	77,61	2,27
	P1	-0,006	0,212	0,236	0,859	210,37	-5,00	41,67	2,50
	P2	0,147	0,255	0,208	0,787	276,77	-5,00	44,22	2,39
	P3	0,221	0,366	0,385	0,735	344,36	-5,00	30,25	2,41
	DATA	-0,127	0,072	0,032	0,764	297,04	-5,00	42,35	1,57
	P1	-0,120	0,187	0,261	0,909	173,65	-5,00	33,01	2,52
	P2	0,089	0,257	0,269	0,844	264,57	-5,00	32,05	2,56
	P3	0,168	0,355	0,416	0,845	194,55	-5,00	24,25	2,60
	DATA	-0,192	0,095	0,146	0,870	229,11	-5,00	28,41	2,67
Arroux à Rigny/A	P1	0,006	0,094	0,084	0,852	125,58	-1,16	107,69	2,35
	P2	0,369	0,435	0,407	0,768	235,49	-5,00	156,60	2,82
	P3	0,431	0,514	0,518	0,706	234,05	-5,00	132,58	2,31
	DATA	0,222	0,247	0,184	0,801	160,81	-4,93	153,41	2,28
	P1	0,070	0,202	0,215	0,904	133,04	-2,07	83,86	2,36
	P2	0,355	0,462	0,483	0,867	260,68	-5,00	82,42	2,90
	P3	0,415	0,527	0,568	0,804	233,76	-5,00	73,70	2,40
	DATA	0,210	0,294	0,286	0,870	178,50	-5,00	94,52	2,39
	P1	0,159	0,277	0,289	0,934	134,42	-3,31	86,48	2,24
	P2	0,325	0,446	0,485	0,919	263,18	-4,98	59,65	2,90
	P3	0,382	0,504	0,554	0,863	217,14	-5,00	57,60	2,61
	DATA	0,173	0,297	0,313	0,907	179,83	-5,00	76,00	2,80

Pour chaque bassin versant, les calibrations ont été effectuées successivement sur les 3 F.O : NS (Q), NS R(Q) et NS log(Q). La cellule en gras encadrée en noir représente la période et la F.O utilisée pour la calibration.

Annexe 5 : Résultats des premières calibrations

BV	Période de calibration	Critères en contrôle sur toute la période				Jeu de paramètres fixé associé			
		NS	NS R(Q)	NS log(Q)	Freq	X1	X2	X3	X4
Nièvre d'Arzembouy à Poiseux	P1	0,076	0,224	0,253	0,881	147,85	-2,60	77,67	1,39
	P2	0,291	0,417	0,457	0,797	345,70	-5,00	66,28	2,21
	P3	0,292	0,423	0,470	0,842	269,09	-5,00	69,85	1,82
	DATA	0,228	0,352	0,385	0,878	230,77	-5,00	77,45	1,56
	P1	0,097	0,204	0,215	0,902	145,06	-2,53	92,63	1,32
	P2	0,310	0,414	0,431	0,712	283,42	-4,98	115,45	2,10
	P3	0,316	0,424	0,446	0,745	262,11	-4,67	114,98	1,38
	DATA	0,240	0,316	0,307	0,807	229,41	-4,23	104,56	2,05
	P1	0,111	0,235	0,257	0,887	137,14	-3,18	92,57	1,36
	P2	0,264	0,396	0,442	0,851	394,70	-5,00	50,04	2,10
	P3	0,260	0,398	0,452	0,882	256,00	-5,00	58,36	2,00
	DATA	0,215	0,355	0,396	0,898	237,63	-5,00	68,73	2,00
Nohain à Saint-Martin/N	P1	0,100	0,195	0,225	0,835	217,33	3,00	280,72	2,45
	P2	0,175	0,219	0,231	0,881	1199,99	-0,25	300,00	2,51
	P3	0,146	0,171	0,172	0,958	287,69	2,19	300,00	2,37
	DATA	0,377	0,368	0,356	0,956	354,85	2,38	300,00	2,52
	P1	-0,008	0,021	0,023	0,946	764,58	3,00	143,74	2,29
	P2	0,239	0,295	0,313	0,836	1200,00	0,66	299,76	2,62
	P3	0,198	0,235	0,241	0,947	316,91	2,32	299,98	2,52
	DATA	0,366	0,362	0,352	0,951	282,93	2,68	299,99	2,42
	P1	-0,033	0,003	0,008	0,942	751,88	3,00	138,83	2,25
	P2	0,235	0,290	0,306	0,850	1191,37	0,51	277,43	2,50
	P3	0,194	0,229	0,234	0,944	305,73	2,37	300,00	2,33
	DATA	0,312	0,327	0,324	0,901	1199,96	1,42	155,77	2,18
Ource à Leuglay	P1	0,054	0,162	0,163	0,789	100,01	-0,96	274,40	2,41
	P2	0,061	-0,018	-0,142	0,664	1200,00	0,65	126,42	2,20
	P3	0,055	0,092	0,059	0,678	194,83	-1,46	299,72	2,76
	DATA	0,139	0,088	0,002	0,779	154,82	-0,86	300,00	2,34
	P1	-0,051	0,154	0,193	0,864	105,24	-1,89	156,26	2,47
	P2	0,193	0,203	0,160	0,844	130,29	-1,26	276,70	2,06
	P3	0,093	0,248	0,310	0,748	170,89	-5,00	295,81	2,16
	DATA	0,109	0,108	0,068	0,853	151,04	-1,59	168,56	2,28
	P1	-0,155	0,134	0,187	0,901	124,49	-1,22	97,23	2,45
	P2	0,100	0,180	0,183	0,917	165,18	-0,15	111,39	2,00
	P3	-0,074	0,246	0,347	0,820	203,20	-5,00	178,86	2,00
	DATA	0,054	0,093	0,076	0,886	152,54	-1,50	122,84	2,08

Annexe 5 : Résultats des premières calibrations

BV	Période de calibration	Critères en contrôle sur toute la période				Jeu de paramètres fixé associé			
		NS	NS R(Q)	NS log(Q)	Freq	X1	X2	X3	X4
Seille à Saint-Usage	P1	0,184	0,266	0,243	0,803	227,55	0,30	62,93	2,50
	P2	0,148	0,260	0,253	0,776	183,46	0,42	63,75	2,90
	P3	0,388	0,449	0,428	0,613	173,63	-0,33	299,98	2,21
	DATA	-0,742	-0,028	0,150	0,727	251,84	0,16	94,59	2,47
	P1	0,159	0,285	0,303	0,869	193,97	-0,09	51,97	2,36
	P2	0,162	0,298	0,322	0,835	218,68	-0,14	47,33	2,90
	P3	0,378	0,465	0,471	0,783	190,37	-2,28	108,41	2,23
	DATA	0,008	0,160	0,198	0,821	204,28	-0,49	62,81	2,50
	P1	-0,013	0,158	0,137	0,956	130,94	-3,36	187,14	2,90
	P2	0,204	0,382	0,403	0,865	184,95	-5,00	98,42	2,87
	P3	0,426	0,496	0,502	0,879	205,32	-4,94	75,94	2,90
	DATA	-0,296	0,119	0,160	0,889	161,82	-4,99	121,76	2,90
Serein à Chablis	P1	-0,130	0,072	0,054	0,948	120,31	-2,30	195,29	2,90
	P2	0,254	0,400	0,414	0,842	175,07	-5,00	137,20	2,90
	P3	0,448	0,518	0,526	0,799	756,55	-5,00	132,11	2,90
	DATA	0,282	0,402	0,404	0,878	226,82	-5,00	196,78	2,90
	P1	-0,977	-0,572	-0,428	0,948	134,95	-2,56	175,34	2,90
	P2	-0,012	0,310	0,390	0,792	426,57	-5,00	35,81	2,74
	P3	0,285	0,452	0,500	0,710	715,94	-5,00	29,59	2,73
	DATA	-0,475	-0,070	-0,001	0,778	431,34	-5,00	47,31	1,38
	P1	-0,321	0,122	0,233	0,886	234,45	-5,00	48,72	2,82
	P2	-0,269	0,218	0,385	0,904	306,89	-5,00	24,02	2,53
	P3	0,109	0,373	0,494	0,844	316,69	-5,00	25,16	2,90
	DATA	-0,742	-0,028	0,150	0,882	275,32	-5,00	32,95	2,73
Tille à Arceau	P1	0,159	0,189	0,060	0,731	100,02	-4,29	235,87	2,90
	P2	0,229	0,311	0,240	0,704	164,61	-2,99	149,15	2,44
	P3	0,385	0,486	0,431	0,669	222,55	-5,00	153,63	2,90
	DATA	0,126	0,102	-0,050	0,721	157,09	-4,99	217,33	2,90
	P1	0,140	0,258	0,197	0,782	140,21	-3,80	123,63	2,90
	P2	0,208	0,365	0,369	0,789	163,10	-4,52	101,98	2,76
	P3	0,357	0,505	0,539	0,750	239,71	-5,00	85,16	2,85
	DATA	0,043	0,158	0,089	0,802	167,86	-5,00	113,83	2,90
	P1	0,141	0,295	0,296	0,835	178,22	-4,87	83,66	2,90
	P2	0,152	0,350	0,409	0,839	184,71	-5,00	70,58	2,90
	P3	0,297	0,468	0,557	0,814	244,90	-4,99	49,54	2,90
	DATA	-0,013	0,167	0,157	0,846	192,08	-5,00	71,39	2,43
Tille à Champdôtre	P2	-0,168	-0,315	-0,468	0,641	1174,46	-5,00	299,92	2,90
	P3	-0,004	0,032	-0,002	0,467	1199,98	-5,00	280,50	2,90
	DATA	-0,182	-0,354	-0,530	0,556	1199,99	-4,99	288,10	2,90
	P2	-0,183	-0,309	-0,440	0,672	841,87	-5,00	297,68	2,90
	P3	-0,160	-0,083	-0,036	0,638	1200,00	-5,00	82,09	2,42
	DATA	-0,180	-0,278	-0,394	0,608	1199,96	-5,00	164,42	2,84
	P2	-0,231	-0,331	-0,428	0,706	530,13	-4,99	300,00	2,90
	P3	-0,252	-0,190	-0,131	0,740	1199,99	-5,00	49,20	2,39
	DATA	-0,204	-0,219	-0,254	0,704	1199,12	-5,00	77,84	2,90

Annexe 5 : Résultats des premières calibrations

		Critères en contrôle sur toute la période				Jeu de paramètres fixé associé			
BV	Période de calibration	NS	NS R(Q)	NS log(Q)	Freq	X1	X2	X3	X4
Tille à Crecey	P1	0,102	0,163	0,126	0,800	100,01	-0,05	240,11	2,90
	P2	0,180	0,281	0,280	0,796	148,69	0,00	163,66	2,30
	P3	0,342	0,454	0,485	0,712	198,48	-1,78	203,80	2,57
	DATA	0,062	0,018	-0,082	0,746	141,10	0,01	288,28	2,45
	P1	0,053	0,183	0,180	0,843	128,07	-0,14	144,08	2,90
	P2	0,159	0,309	0,341	0,853	151,71	-0,88	124,43	2,44
	P3	0,323	0,458	0,519	0,795	177,34	-4,73	176,07	2,43
	DATA	-0,034	0,092	0,073	0,855	136,47	-1,80	160,25	2,55
	P1	0,024	0,206	0,228	0,886	145,06	-0,64	102,39	2,90
	P2	0,157	0,318	0,363	0,877	154,06	-1,68	112,78	2,53
	P3	0,301	0,443	0,519	0,835	190,30	-5,00	142,19	2,00
	DATA	-0,105	0,102	0,108	0,898	139,91	-2,21	123,65	2,86
Yonne à Corancy	P2	0,266	0,280	0,263	0,862	381,76	2,02	300,00	1,36
	P3	0,268	0,336	0,352	0,850	254,82	0,18	300,00	1,31
	DATA	0,272	0,300	0,293	0,856	354,22	1,11	299,99	1,32
	P2	0,283	0,314	0,306	0,894	406,17	1,13	298,41	1,31
	P3	0,256	0,320	0,333	0,873	236,95	-0,45	299,99	1,32
	DATA	0,279	0,324	0,328	0,898	335,70	0,24	299,99	1,30
	P2	0,285	0,321	0,315	0,903	427,68	0,81	299,98	1,33
	P3	0,253	0,315	0,327	0,878	233,36	-0,62	299,96	1,33
	DATA	0,275	0,329	0,338	0,912	355,94	-0,37	299,98	1,38
Caractéristiques moyennes de la première calibration									
		NS	NS R(Q)	NS log(Q)	Freq	X1	X2	X3	X4
	Moyenne	0,115	0,234	0,237	0,820	337,67	-2,93	147,17	2,43
	Ecart-type	0,233	0,200	0,225	0,095	308,67	2,52	91,08	0,47
	Max	0,450	0,527	0,568	0,958	1200,00	3,00	300,00	2,90
	Min	-0,977	-0,572	-0,530	0,467	100,01	-5,00	24,02	1,30

Annexe 6 : Résultats des calibrations sur précipitations observées

Critères en contrôle sur toute la période						Jeu de paramètres fixé associé			
BV	Période de calibration	NS	NS R(Q)	NS log(Q)	Freq	X1	X2	X3	X4
Armançon à Brienon	P1	0,73	0,69	0,62	0,91	129,18	2,21	71,35	2,90
	P2	0,81	0,85	0,84	0,83	147,94	1,34	78,85	2,90
	P3	0,82	0,85	0,84	0,90	142,95	0,88	84,04	2,90
	DATA	0,84	0,82	0,79	0,90	128,33	1,54	85,64	2,90
	P1	0,80	0,78	0,73	0,95	144,54	1,67	59,85	2,90
	P2	0,79	0,84	0,85	0,92	132,24	0,60	68,65	2,90
	P3	0,79	0,85	0,85	0,94	102,53	0,38	105,60	2,90
	DATA	0,86	0,87	0,86	0,96	134,46	0,90	67,68	2,88
	P1	0,81	0,78	0,72	0,95	217,88	1,41	43,62	2,90
	P2	0,77	0,83	0,84	0,94	103,83	0,28	94,92	2,90
	P3	0,76	0,83	0,84	0,94	100,00	-0,43	141,66	2,90
	DATA	0,82	0,86	0,87	0,92	100,00	-0,47	147,62	2,90
Ource à Leuglay	P1	0,83	0,85	0,84	0,91	234,16	0,46	68,53	2,45
	P2	0,81	0,86	0,87	0,94	176,71	-0,48	109,13	2,45
	P3	0,85	0,88	0,89	0,94	130,38	-1,12	115,03	2,33
	DATA	0,83	0,85	0,84	0,91	203,74	0,06	92,61	2,44
	P1	0,83	0,88	0,88	0,95	197,34	0,13	65,57	2,49
	P2	0,81	0,86	0,88	0,96	167,87	-1,01	103,88	2,43
	P3	0,84	0,88	0,89	0,95	173,42	-1,03	95,52	2,33
	DATA	0,85	0,89	0,89	0,96	177,06	-0,54	88,99	2,43
	P1	0,86	0,89	0,90	0,97	179,85	-0,22	71,19	2,47
	P2	0,81	0,86	0,88	0,97	170,05	-1,04	98,17	2,30
	P3	0,84	0,88	0,90	0,96	168,82	-1,13	85,06	2,30
	DATA	0,84	0,88	0,88	0,97	175,58	-0,73	86,43	2,36
Caractéristiques moyennes de la calibration avec les précipitations observées									
		NS	NS R(Q)	NS log(Q)	Freq	X1	X2	X3	X4
Moyenne		0,82	0,85	0,84	0,93	155,79	0,15	88,73	2,65
Ecart-type		0,03	0,04	0,07	0,03	36,48	0,98	23,72	0,25
Maximum		0,86	0,89	0,90	0,97	234,16	2,21	147,62	2,90
Minimum		0,73	0,69	0,62	0,83	100,00	-1,13	43,62	2,30

Annexe 7 : Résultats des calibrations roulantes sur le bassin versant de l'Armançon à Brienon sur Armançon

Période de calibration	Années correspondantes	Calibrations forcées par WRF				Calibrations forcées par les observations			
		X1	X2	X3	X4	X1	X2	X3	X4
1	1980-1984	117,06	-1,99	189,60	2,90	144,20	1,59	62,26	2,90
2	1981-1985	125,88	-1,37	173,74	2,90	154,30	1,66	57,91	2,90
3	1982-1986	162,70	-1,72	143,63	2,90	166,04	1,54	56,01	2,90
4	1983-1987	138,58	-3,92	144,83	2,90	157,81	1,58	51,60	2,90
5	1984-1988	148,66	-4,92	185,87	2,64	141,94	1,62	55,54	2,90
6	1985-1989	153,96	-4,36	165,23	2,79	129,88	1,63	55,90	2,90
7	1986-1990	133,69	-5,00	170,33	2,62	128,07	1,47	51,97	2,90
8	1987-1991	155,17	-5,00	144,10	2,90	136,22	1,34	45,62	2,90
9	1988-1992	1200,0	-5,00	55,65	2,47	136,56	0,75	55,34	2,86
10	1989-1993	191,22	-5,00	71,70	2,78	123,59	0,33	54,25	2,90
11	1990-1994	216,88	-5,00	79,57	2,74	128,53	0,34	58,45	2,90
12	1991-1995	323,41	-5,00	83,21	2,61	109,55	0,21	70,05	2,90
13	1992-1996	339,50	-5,00	86,09	2,57	136,95	0,65	62,69	2,90
14	1993-1997	273,35	-5,00	103,65	2,50	141,75	0,75	57,80	2,90
15	1994-1998	190,41	-5,00	124,75	2,90	100,00	0,01	98,97	2,90
16	1995-1999	132,98	-4,81	132,47	2,29	121,41	0,84	89,71	2,90
17	1996-2000	175,41	-5,00	122,49	2,82	100,00	-0,12	131,87	2,90
18	1997-2001	134,99	-5,00	199,55	2,90	114,38	1,01	79,55	2,90
19	1998-2002	128,86	-4,99	158,99	2,90	120,59	1,07	84,01	2,90
20	1999-2003	425,24	-5,00	108,04	2,90	130,21	1,02	96,35	2,90
21	2000-2004	699,28	-5,00	80,53	2,88	155,90	0,85	72,81	2,90
22	2001-2005	223,79	-5,00	93,10	2,90	162,45	0,70	71,62	2,88
23	2002-2006	549,31	-5,00	55,11	2,79	110,23	-0,58	112,77	2,90
24	2003-2007	609,96	-5,00	63,50	2,90	170,94	0,33	61,55	2,90
25	2004-2008	1200,0	-5,00	64,64	2,86	122,22	0,30	77,93	2,90
26	2005-2009	782,17	-5,00	56,30	2,65	141,38	0,18	62,12	2,90
27	2006-2010	711,21	-5,00	56,10	2,80	128,17	0,12	62,70	2,90

Annexe 8 : Résultats des calibrations sur le critère NS mensuel sur le bassin versant de l'Ource à Leuglay

							Contrôle					
			Paramètres fixés				NS M (Q)			FREQ		
			X1	X2	X3	X4	P1	P2	P3	P1	P2	P3
Calibration	P observées	P1	231,192	0,311	59,049	2,068	0,881	0,928	0,890	0,817	0,857	0,822
		P2	238,227	-0,176	64,735	1,602	0,868	0,952	0,922	0,803	0,834	0,797
		P3	160,680	-0,768	108,745	1,197	0,856	0,940	0,924	0,802	0,836	0,799
	P WRF	P1	109,743	-0,293	83,478	1,100	0,436	0,037	-0,011	0,815	0,810	0,814
		P2	168,437	-0,111	299,999	1,100	0,377	0,155	0,125	0,793	0,762	0,725
		P3	168,465	-2,408	254,923	1,100	0,339	0,131	0,152	0,762	0,749	0,749

0,123 Valeur de la F.O en contrôle sur la période de calibration

Annexe 9 : Résultats des calibrations sur les scénarios d'erreurs des précipitations sur les bassins versants de l'Ource à Leuglay et de l'Armançon à Briennon-sur-Armançon

Scénarios d'erreurs quantitatives

Briennon	Critères de performance sur toute la période				Paramètres associés			
Coefficients	NS	NS R(Q)	NS log(Q)	Freq	X1	X2	X3	X4
0,50	0,35	-0,66	0,64	0,46	100,00	2,02	20,15	1,89
0,80	0,80	0,46	0,90	0,79	100,00	2,32	62,77	2,70
1,00	0,81	0,43	0,96	0,81	127,62	0,87	70,64	2,90
1,25	0,81	0,49	0,93	0,81	169,25	-1,85	114,06	2,90
1,50	0,53	-0,75	0,74	0,50	260,78	-5,00	101,30	2,90
1,75	0,72	0,30	0,79	0,57	460,94	-5,00	57,72	2,88
2,00	0,60	0,10	0,75	0,26	626,16	-5,00	34,51	2,90

Leuglay	Critères de performance sur toute la période				Paramètres associés			
Coefficients	NS	NS R(Q)	NS log(Q)	Freq	X1	X2	X3	X4
0,50	0,47	0,03	0,52	0,47	100,00	1,77	21,27	2,12
0,80	0,79	0,46	0,87	0,77	137,70	1,18	48,52	2,42
1,00	0,82	0,49	0,96	0,81	176,67	-0,54	89,55	2,42
1,25	0,82	0,50	0,93	0,81	256,35	-5,00	104,21	2,37
1,50	0,80	0,53	0,88	0,77	486,94	-5,00	62,48	2,61
1,75	0,73	0,33	0,80	0,57	1103,89	-5,00	28,84	2,58
2,00	0,59	-0,15	0,78	0,26	1199,99	-5,00	20,97	2,59

Scénarios d'erreurs de phasages

Briennon	Critères de performance sur toute la période				Paramètres associés			
Décalage (jours)	NS	NS R(Q)	NS log(Q)	Freq	X1	X2	X3	X4
0	0,824	0,486	0,964	0,813	127,62	0,87	70,64	2,90
5	0,791	0,447	0,962	0,697	187,02	0,88	50,62	1,10
10	0,712	0,368	0,952	0,523	187,50	0,98	67,03	1,10
15	0,544	0,265	0,940	0,414	138,70	1,23	143,69	1,10
20	0,462	0,227	0,949	0,333	102,17	1,18	242,00	1,10
25	0,323	-0,037	0,923	0,274	101,34	0,98	280,53	1,10
30	0,289	0,068	0,906	0,240	100,54	1,21	290,04	1,10
40	0,212	0,003	0,906	0,210	100,04	0,97	299,77	2,31
60	0,155	-0,134	0,836	0,138	613,60	1,19	66,22	2,21
90	0,110	-0,366	0,814	0,094	762,64	1,22	69,31	2,21

Leuglay	Critères de performance sur toute la période				Paramètres associés			
Décalage (jours)	NS	NS R(Q)	NS log(Q)	Freq	X1	X2	X3	X4
0	0,874	0,593	0,966	0,829	176,67	-0,54	89,55	2,42
5	0,791	0,450	0,962	0,615	253,39	-0,59	89,47	1,10
10	0,628	0,326	0,943	0,392	283,74	-0,75	117,14	1,10
15	0,476	0,220	0,934	0,281	219,32	-1,94	209,54	1,10
20	0,354	0,081	0,922	0,214	197,44	-3,27	299,65	1,10
25	0,266	-0,058	0,905	0,133	413,16	-1,35	175,27	1,10
30	0,197	-0,054	0,928	0,118	209,71	-3,28	300,00	2,11
40	0,463	-0,240	0,836	0,466	828,37	-1,33	160,30	1,16
60	0,037	-0,548	0,847	0,004	992,05	-1,26	152,48	2,22
90	0,101	-0,488	0,930	0,070	141,36	-4,91	300,00	2,54

Références bibliographiques

- CONSEIL REGIONAL DE BOURGOGNE. Pluviométrie en Bourgogne **[en ligne]** 2004, Disponible sur www.region-bourgogne.fr/download.php?voir=0&document_id=813 (consulté le 01/08/13).
- MILLER, V.C. A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee. Tech. Report n°3, New-York, USA, Columbia University, Dept of Geology, 1953.
- STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. Transactions of the American Geophysical Union, 1957, vol n°38, pp. 913–921.

Impact du changement climatique sur la ressource en eau

Analyse du couplage entre une simulation climatique régionale distribuée et une modélisation pluie-débit globale

Résumé

Le projet HYCCARE-Bourgogne (Hydrologie, Changement Climatique, Adaptation et Ressource en Eau en Bourgogne) répond à un appel d'offre du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, dans le cadre du programme GICC (Gestion et Impact du Changement Climatique). Il va notamment s'attacher à améliorer les connaissances de l'impact du changement climatique sur la ressource en eau, et ce, de manière locale (Axe 1 du projet). Cette construction de connaissance commence par une modélisation climatique haute résolution (maille de 3km), qui sera ensuite utilisée pour forcer une modélisation hydrologique pluie-débit globale (modèle GR4J). La modélisation hydrologique nous permettra alors de quantifier l'impact du changement climatique sur les débits d'une dizaine de bassins versants de Bourgogne. Ce rapport fait état de la tentative de calibration du modèle hydrologique, pour chaque bassin versant, avec les simulations climatiques sur le temps présent (au lieu des données observées utilisées habituellement). Cela dans le but de projeter le modèle calibré dans une simulation des débits soumis au changement climatique (sur la période 1980-2100).

La méthodologie développée ici a permis de caractériser la qualité des données climatiques en entrée du modèle ainsi que d'identifier quels étaient les principaux obstacles au couplage hydroclimatique entre le modèle climatique et le modèle hydrologique.

Mots-clés : modélisation hydrologique, changement climatique, GR4J, calibration.

Impact of the climate change on the water resources

Coupling analysis between a spatial regional climate simulation and a globalized rainfall-runoff model

Summary

HYCCARE-Bourgogne plan responds to a call for tender from the « Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie ». Its first goal is to improve the knowledge of climate change impact on water resources in Burgundy. This knowledge begins with the high-resolution climate simulation (with a 3 km grid). These results will be used to calibrate the rainfall-runoff model (GR4J). The hydrological simulation will permit to quantify climate change impact on runoff of several watersheds of Burgundy.

This report presents a calibration test of the hydrological model with climate simulations of present day instead of usual data observed data.

The second step will consist on the simulation of the impact of climate change on runoff, using the hydrological model calibrated during the precedent step (over the period 1980-2100).

This methodology shows the quality of climate data input and permits to identify the main difficulties to the hydroclimatic coupling between the climatic and the hydrological model.

Key-words : hydrological modeling, climate change, GR4J, calibration