

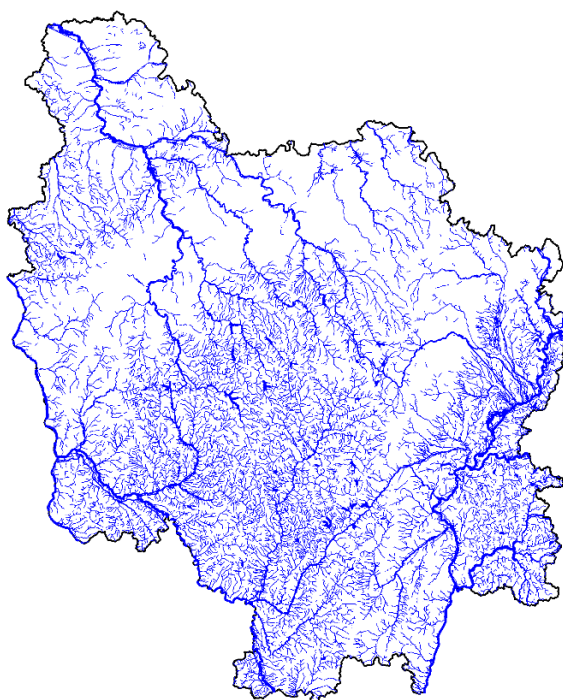


BIOGÉOSCIENCES

RAPPORT DE STAGE

Impact du changement climatique sur la ressource en eau en Bourgogne

**Détermination et analyse d'indicateurs hydrologiques à partir
du modèle GR4J pour la période 2010-2100**



Réseau Hydrographique de la Bourgogne

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

Tuteur Pédagogique: **Yves RICHARD**

Damien ABADIE

Année 2013-2014

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Mr. Philippe Amiotte-Suchet, pour m'avoir permis de réaliser ce stage en me confiant cette étude aussi importante qu'intéressante, pour ses nombreux conseils et corrections afin d'améliorer ce rapport, mais également pour nos longs échanges qui m'ont fait découvrir le monde de la recherche, son fonctionnement et ses enjeux.

Ce rapport n'aurait jamais pu aboutir sans l'aide précieuse et la patience d'Etienne Brulebois qui m'a guidé et dépanné à de très nombreuses reprises pour l'élaboration du script de calculs sur *R*, base de tous mes résultats. Je remercie également Sébastien Couette et Nicolas Navaro pour la réalisation de l'automatisation de ce script.

Enfin, je tiens à remercier mon entourage et mes amis qui ont toujours été là pour me soutenir et me changer les idées quand la fatigue et la pression se faisait sentir.

J'espère par ce rapport avoir fait un peu "avancer la barrière" et que mon travail permettra à d'autres de progresser dans leurs propres travaux.

Table des matières

Présentation de l'organisme d'accueil.....	1
Introduction	2
Problématiques.....	3
I) Contexte et Méthode de l'étude.....	4
1.1) Contexte naturel de la Bourgogne	4
1.1.1) Occupation du sol	4
1.1.2) Topographie et Géologie	5
1.1.3) Climat actuel.....	7
1.1.4) Le réseau hydrographique de Bourgogne.....	7
1.2) Les Bassins versants du projet HYCCARE.....	8
1.2.1) Notions de cycle de l'eau et de Bassin Versant	8
1.2.2) Présentation des Bassins Versants retenus.....	8
1.2.3) Représentativité des bassins versants retenus	9
1.3) Les indicateurs hydrologiques	10
1.3.1) Les différents indicateurs hydrologiques	10
1.3.2) Choix des indicateurs hydrologiques étudiés.....	12
1.3.3) Méthodes de calculs des indicateurs hydrologiques étudiés.....	13
II) Calculs des indicateurs hydrologique sur la période 1980-2011.....	15
2.1) Indicateurs calculés avec les débits observés.....	15
2.1.1) La Tille à Arceau	15
2.1.2) L'Yonne à Corancy	16
2.1.3) L'Ource à Leuglay	17
2.1.4) Discussion des résultats	17
2.2) Indicateurs calculés avec les débits simulés	18
2.2.1) La Tille à Arceau	18
2.2.2) L'Yonne à Corancy	19
2.2.3) L'Ource à Leuglay	19
2.2.4) Discussion des Résultats	20
2.3) Comparaison des résultats.....	20
Conclusion.....	24
Références Bibliographique	25
ANNEXES	I à XII

Table des Figures

Figure 1: Situation de la Bourgogne en France.....	4
Figure 2: Carte Corinne Land Cover (2006) de la Bourgogne	5
Figure 3: Carte Topographique de la Bourgogne.....	6
Figure 4: Carte Géologique de la Bourgogne	6
Figure 5: Carte du réseau hydrographique de Bourgogne	7
Figure 6 : Evolution du Module et des différents indicateurs d'étiage pour la Tille à Arceau calculé à partir des débits observés	16
Figure 7: Evolution du Module et des différents indicateurs d'étiage pour l'Yonne à Corancy calculé à partir des débits observés	16
Figure 8 : Evolution du Module et des différents indicateurs d'étiage pour l'Ource à Leuglay calculé à partir des débits observés	17
Figure 9: Evolution du Module et des différents indicateurs d'étiage pour la Tille à Arceau calculé à partir des débits simulés	18
Figure 10: Evolution du Module et des différents indicateurs d'étiage pour l'Yonne à Corancy calculé à partir des débits simulés	19
Figure 11: Evolution du Module et des différents indicateurs d'étiage pour l'Ource à Leuglay calculé à partir des débits simulés	20
Figure 12: Ratio des Modules observés (Qobs) sur les Modules simulés (Qsim)	21
Figure 13: Ratio des débits biologique minimum observés (QminObs) sur les Modules simulés (QminSim) pour les bassins versants étudiés.....	22

Table des Tableaux

Tableau I : Récapitulatif des grandes occupations de sols en Bourgogne	5
Tableau II : Tableau de synthèse des bassins versants retenus pour l'étude	9
Tableau III : Répartition de l'occupation des sols sur la Bourgogne et les bassins versants étudiés	10
Tableau IV : Répartition de la Géologie sur la Bourgogne et sur les bassins versants étudiés	10
Tableau V : Récapitulatif des modalités de calcul des débits minimum biologique sur les 3 bassins versant étudiés à partir des débits observés (QminObs) et simulés (QminSim)	20
Tableau VI : Récapitulatif de la comparaison des Modules observés (Qobs) et simulés (Qsim)	21
Tableau VII : Récapitulatif de la comparaison des Modules observés (Qobs) et simulés (Qsim) sur les bassins versant étudiés	22
Tableau VIII : Récapitulatif de la comparaison des QMNA5 observés et les QMNA5 simulés (Qsim) sur les bassins versant étudiés	23

Présentation de l'organisme d'accueil

Ce stage a été réalisé au sein du laboratoire de recherche BIOGEOSCIENCES, dirigé par Pascal NEIGE, qui est une Unité Mixte de Recherche (UMR) de l'Université de Bourgogne (uB) situé à Dijon en Côte d'Or.

Le laboratoire se concentre essentiellement sur le domaine des Sciences de la Vie, de la Terre et de l'Environnement. Il est structuré en 4 équipes qui travaillent respectivement dans leur domaine, mais qui sont également capable de collaborer pour avoir une expertise globale sur certains projets. Ces différentes équipes sont :

- L'équipe ECO/EVO (Ecologie Evolutive), sous la responsabilité de Yannick MORET, s'attache à décrire et comprendre les mécanismes responsables de la dynamique adaptative des populations et des communautés. L'équipe travaille sur 3 axes de recherches principaux ; l'écologie évolutive des relations parasite-hôte, l'écologie comportementale, la dynamique de la biodiversité et la gestion des populations naturelles ;

- L'équipe SEDS (Systèmes, Environnements & Dynamique Sédimentaire), sous la responsabilité d'Emmanuelle VENNIN. Cette équipe analyse les systèmes sédimentaires à travers différents axes : la production et le transfert de matières à la surface des continents, les paléoclimats et l'architecture stratigraphique des réservoirs carbonatés.

- L'équipe BioME (Biodiversité, Macroécologie, Evolution), sous la responsabilité de Sophie MONTUIRE travaille sur la compréhension de la structuration de la biodiversité, son maintien, et sa caractérisation face à des perturbations biotiques ou abiotiques. L'équipe a fixé 4 axes thématiques qui sont la biominéralisation, l'émergence et la structuration des phénotypes, l'évolution des traits d'histoire de vie et la macroécologie.

- L'équipe CRC (Centre de Recherche en Climatologie), sous la responsabilité d'Yves RICHARD. L'équipe travaille sur deux thématiques : la dynamique du climat et les impacts climatiques actuels et futurs sur différentes régions du globe.

Le laboratoire emploie environ 120 personnes dont des chercheurs du CNRS, des enseignants chercheurs de l'uB, de l'EPHE, et d'AgroSup; des doctorants, du personnel de recherche (ATER et post-doctorants), ainsi que du personnel technique.

Le stage a débuté le 22 Avril et se terminera le 31 Juillet 2014. Celui-ci se déroule au sein de l'équipe SEDS sous la direction de Philippe Amiotte-Suchet (Maître de Conférences à l'uB) sur un projet en collaboration avec l'équipe du CRC.

Introduction

Le réchauffement climatique est devenu un des enjeux majeurs du XXI^{ème} siècle (*GIEC, 2007*). Même si ces causes sont encore débattu par la communauté scientifique, tous s'accorde à dire que ce phénomène existe. C'est pour cette raison que des études sont menées pour tenter de prévoir son ampleur et ses conséquences sur le climat et sur la ressource en eaux, afin de s'adapter et de gérer au mieux ces impacts.

En effet, 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. A 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 (*GIEC, 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*).

Cette étude a été réalisée 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 différents acteurs de l'eau 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 a été réalisé afin de coupler le modèle climatique local au modèle hydrologique (*Brulebois, 2013*).

L'objectif de ce rapport est d'identifier et de mettre en place des indicateurs hydrologiques qui permettront par la suite aux acteurs de l'eau de pouvoir anticiper et appliquer des mesures préventives sur la gestion de la ressource en eau en Bourgogne pour la période 2010-2100.

Afin d'assurer la cohérence des indicateurs calculés à partir des débits simulés sur la période 2010-2100, il est nécessaire de vérifier cette cohérence avec les débits observés entre 1980 et 2010.

Ce rapport se penchera donc exclusivement sur l'identification d'indicateurs hydrologiques pertinents pour les acteurs de l'eau, sur leurs calculs à partir des débits observés, et sur la comparaison de ces mêmes indicateurs calculés à partir des débits simulés de la période 1980-2010.

La première partie de ce rapport fera l'état des connaissances environnemental de la Bourgogne, présentera les différents bassins versant retenus pour cette études, et dressera une liste (non-exhaustive) des différents indicateurs hydrologiques, avant d'effectuer un choix parmi ceux-ci et d'en définir la méthode de calcul. La deuxième partie établira un comparatif entre les indicateurs obtenus à partir des données observés et ceux obtenus à partir des données simulés, afin de conclure sur leur fiabilité, ou non.

Problématiques

L'intégration du changement climatique dans la politique publique au niveau local est un enjeu primordiale de notre époque afin d'anticiper et de gérer au mieux son impact sur les ressources vitales tels que l'eau.

C'est pour cette raison que le projet HYCCARE-Bourgogne a été lancé par l'organisme ALTERRE BOURGOGNE. Ce projet a pour but de déterminer l'impact du changement climatique sur la ressource en eau en Bourgogne. Pour cela, climatologues et hydrologues travaillent ensemble afin de réaliser des modèles hydro-climatiques qui permettront d'atteindre cet objectif. Dans le cadre d'HYCCARE, il s'agit de coupler un modèle climatique régional qui simule le climat bourguignon à une échelle fine (1 point tous les 3km) à des modèles hydrologiques à l'échelle des bassins versants ([Brulebois, 2013](#)).

Ce rapport utilise les débits simulés grâce à ce couplage afin de calculer des indicateurs hydrologiques qui serviront aux décideurs à mieux prendre en compte le changement climatique et son impact sur la ressource hydraulique en Bourgogne.

Pour cela, plusieurs questions se posent :

- **Quels sont les indicateurs susceptibles d'intéresser les acteurs de l'eau pour la gestion future de la ressource ?**

Les différents types d'indicateurs hydrologiques présentés dans la première partie de ce rapport seront étudiés au cas par cas afin de définir ceux qui semblent primordiaux.

- **Les indicateurs calculés pour les débits futurs seront-ils viables ?**

Afin de vérifier si les indicateurs hydrologiques sélectionnés seront exploitables lorsqu'ils seront modélisés pour la période 2010-2100, ceux-ci seront d'abord calculés pour la période 1980-2011, puis comparés avec les mêmes indicateurs obtenus à partir de débits simulés sur la même période.

- **Si non, pourquoi ? Et comment y remédier ?**

Il est possible que les indicateurs hydrologiques sélectionnés dans ce rapport s'avèrent inexploitable en l'état pour déterminer l'impact du changement climatique sur la ressource en eau. Ce rapport tentera alors d'en identifier la cause et de proposer des pistes à explorer pour remédier à ce problème dans le cadre d'un approfondissement de cette étude.

I) Contexte et Méthode de l'étude

La Bourgogne est une région située au centre-est de la France et constituée de quatre départements: l'Yonne (89), la Côte-d'Or (21), la Nièvre (58), et la Saône-et-Loire (71). Avec ses quatre départements pour environ 31 500 km² de superficie, la Bourgogne est l'une des plus vastes régions de France (*Figure 1*). Elle couvre 6 % du territoire national et compte 2 046 communes.

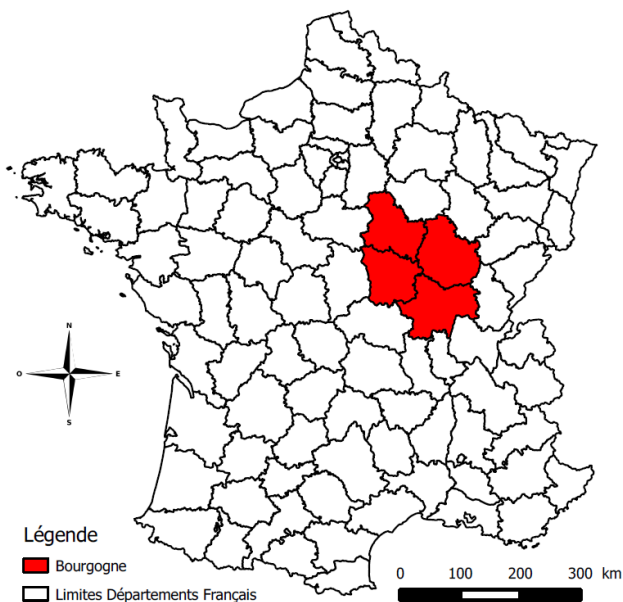


Figure 1: Situation de la Bourgogne en France

1.1) Contexte naturel de la Bourgogne

La ressource en eau et sa disponibilité sont très fortement liées à l'environnement dans lequel les eaux évoluent. Cette partie portera donc sur les différents aspects environnementaux de la Bourgogne afin de mieux comprendre les phénomènes climatiques et hydrologiques de cette région.

1.1.1) Occupation du sol

La base de données Corine Land Cover (CLC), issue du programme de l'Agence Européenne de l'Environnement est utilisée dans ce rapport pour caractériser l'occupation des sols en Bourgogne.

La *Figure 2* de ce rapport présente une carte CLC 2006 de la Bourgogne. Les zones de couleurs rouge à violet représentent les territoires artificialisés, caractéristiques des activités anthropiques de type urbaines ou industrielles, qui présentent un taux de surfaces imperméables important, induisant un ruissellement de la quasi-totalité des précipitations. Les zones de couleurs jaunes représentent les territoires agricoles, qui présentent des sols nus, ce qui induit un ruissellement et/ou une infiltration plus ou moins rapide en fonction de la nature du substrat. Les zones de couleurs vertes représentent les forêts et les milieux semi-naturels (comme les pelouses ou les pâturages). Ces zones sont les plus importantes d'un point de vue hydrologique car elles jouent un rôle de tampon en régulant le débit des cours d'eau lors des événements pluvieux importants. En effet le couvert végétal de ces zones, selon sa densité et sa nature, intercepte une partie des précipitations, alors soustraite à l'écoulement, et en restaure une partie à l'atmosphère sous forme d'évapotranspiration (*Musy et al., 2004*).

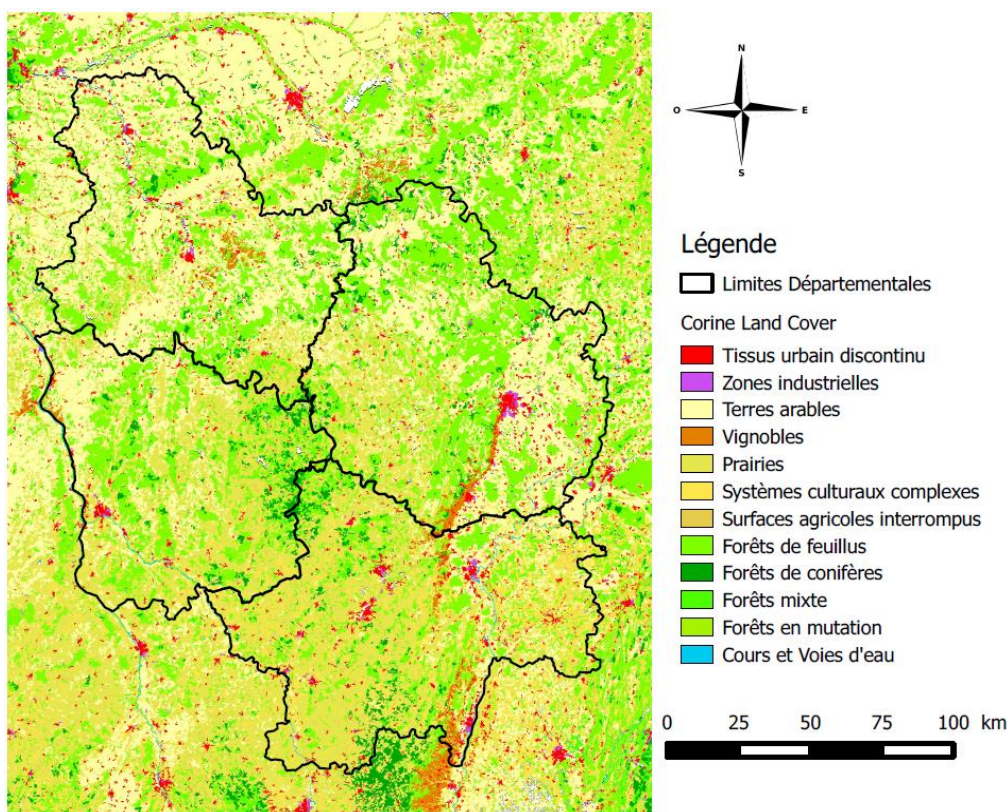


Figure 2: Carte Corinne Land Cover (2006) de la Bourgogne

Le *Tableau I* ci-dessous, nous montre que la Bourgogne présente des espaces essentiellement ruraux et forestiers. La majorité de la surface des bassins versants présentent donc, soit une capacité de tampon sur les débits (forêts), soit des surfaces qui favorisent le ruissèlement (terrains agricoles et surfaces urbaines).

Tableau I : Récapitulatif des grandes occupations de sols en Bourgogne

	Aire (km ²)	Aire (%)
Territoires artificialisés	933	2,90
Territoires agricoles	20708	64,20
Forêts et milieux naturelles	9697	30,10
Zones humides et surface en eaux	896	2,80
Total	32236	100

1.1.2) *Topographie et Géologie*

La Bourgogne présente des reliefs et une géologie variés qui influencent la répartition et le ruissèlement des précipitations.

La Bourgogne est traversée par un relief d'axe Nord-Est/Sud-Ouest, issu de l'ouverture du fossé Bressan, formant ainsi les coteaux calcaires sur lesquels la viticulture a pu se développer.

De part et d'autre de ce relief, la topographie est relativement plate, avec à l'Est la présence du Fossé Bressant et de la plaine de Saône, et à l'Ouest le bassin de l'Yonne (*Figure 3*).

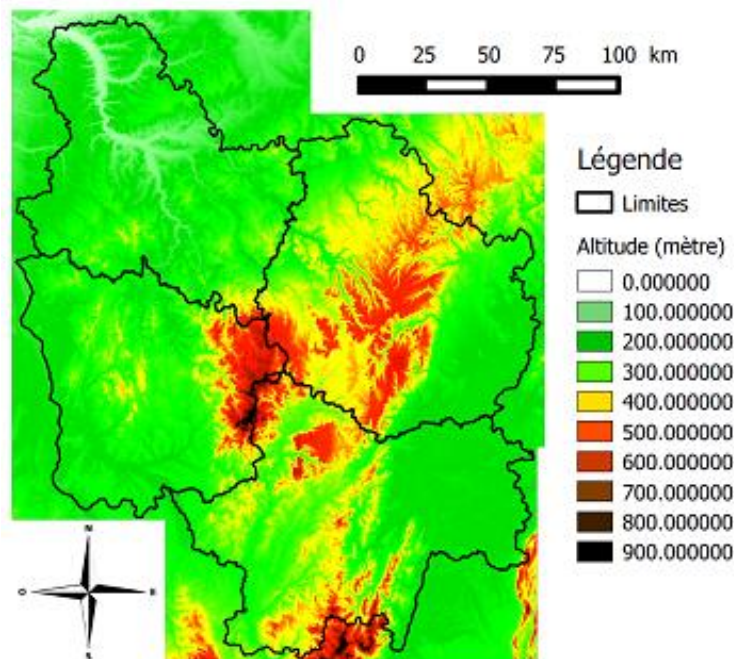


Figure 3: Carte Topographique de la Bourgogne

Cinq grands contextes hydrogéologiques correspondant à de grands ensembles géologiques (Figure 4) peuvent être identifiés ce qui induit des fonctionnements hydrologiques différents d'un ensemble à l'autre (BRGM, 1970) :

- Le socle métamorphique du Morvan lié à la présence d'anciens reliefs érodés. De nature moins poreuse que les roches sédimentaires, ces roches ne vont contenir que des nappes superficielles, nombreuses mais peu importantes. L'accumulation des eaux sur ce substrat n'est alors possible par la construction de barrages réservoirs ;

- Les grès et schistes du Permien/Trias, et les argiles du Jurassique inférieur (Lias), comprennent des systèmes aquifères très localisés et peu productifs ;

- Les marnes et les calcaires du Jurassique moyen et supérieur 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 ;

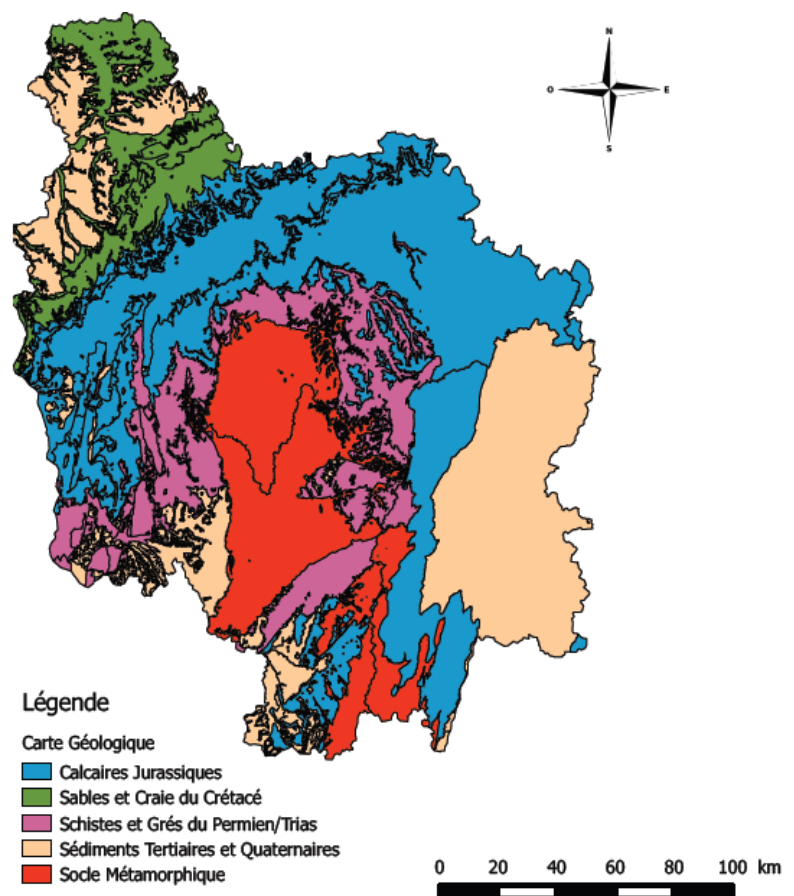


Figure 4: Carte Géologique de la Bourgogne

- Les sables et la craie du Crétacé présentent également des réserves importantes. 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) localisés dans le fossé bressan et le bassin de la Loire, sont composés principalement d'argiles et de marnes, qui ne sont pas des substrats favorables pour accueillir des aquifères. Cependant les nappes d'accompagnement des vallées fluviales (Yonne, Saône, et Loire) sont des réserves d'eau importantes qui permettent le captage de forts débits.

1.1.3) Climat actuel

Le climat dépend de beaucoup de facteurs comme le relief (exposition, au vent ou l'abri du vent, position de haut de versant ou de fond de vallée), de l'occupation et du type de sol (Dôme de chaleur sur les agglomérations, fort albédo sur les terres nues...). Ces facteurs sont très variés sur la Bourgogne ce qui contribue à en faire une région très diversifiée d'un point de vue climatique. En effet la Bourgogne présente un climat océanique dominant et une distribution régionale rappelant celle de la France avec son "massif central" (le Morvan très océanique), son versant occidental océanique, avec des hivers doux et pluvieux et des étés frais et humides, et son versant oriental à la fois continental et méridional aboutissant à des hivers plus froids et secs, et des étés plus chauds. 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*).

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 700 mm. Les précipitations sont comprises entre 700 et 900 mm dans la plaine de Saône et en Côte d'Or, et peuvent dépasser localement 1500 mm par an sur le massif du Morvan. (*Conseil Régional de Bourgogne, 2004*).

1.1.4) Le réseau hydrographique de Bourgogne

Le territoire bourguignon regroupe les bassins versants de trois grands fleuves français, la Seine, la Loire et le Rhône. Les proportions respectives de la surface régionale sont de 44, 28 et 28%. Avec 12 400 km de rivières, le linéaire est important, mais inégalement réparti. Comme le montre la *Figure 5*, le Morvan et l'Auxois présentent un réseau hydrographique dense, lié à des substrats géologiques peu perméables, alors que les plateaux calcaires de l'Yonne et de la Saône possèdent un réseau hydrographique moins dense (*DREAL, 2012*).

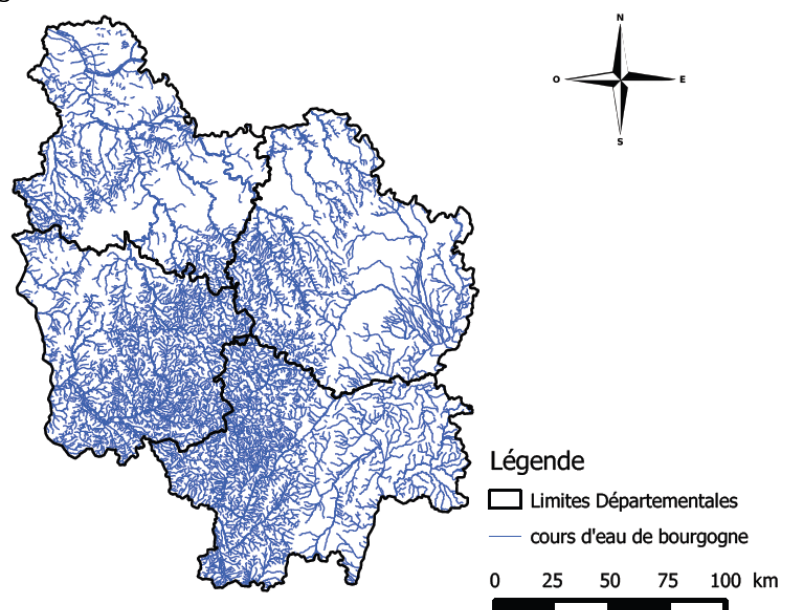


Figure 5: Carte du réseau hydrographique de Bourgogne

1.2) Les Bassins versants du projet HYCCARE

Pour éviter de réaliser les études sur l'ensemble du territoire Bourguignon, plusieurs bassins versant ont été retenus lors de la mise en place du projet HYCCARE, de manière à être le plus représentatif possible de la région.

1.2.1) Notions de cycle de l'eau et de Bassin Versant

Avant toute chose, il est important de définir les notions de cycle de l'eau et de bassin versant afin de cerner ce qui pourra être utilisé ultérieurement comme indicateur hydrologique.

a) Le cycle de l'eau

Le cycle de l'eau est un modèle global représentant le parcours de l'eau dans les grands réservoirs sous forme liquide, solide ou de vapeur. Ces grands réservoirs sont les océans, l'atmosphère, les lacs, les cours d'eau, les nappes d'eaux souterraines et les glaciers. L'eau passe sans cesse d'un réservoir à l'autre avec des temps de séjours variable. Les moteurs de ce cycle sont l'énergie solaire et les flux géothermiques (*Gilli et al., 2012*).

b) Notion de Bassin versant

Le bassin versant (ou bassin hydrologique) est une unité hydrographique qui correspond à une aire à l'intérieur de laquelle toutes les eaux tombées alimentent un même exutoire. Il permet l'étude du cycle de l'eau à une échelle plus local.

Sur chaque bassin, il est possible de faire le bilan hydrique en quantifiant les entrées et les sorties d'eau afin d'évaluer les volumes circulant dans les différents réservoirs du cycle de l'eau à l'échelle local. En considérant que le bilan d'un bassin versant est équilibré, c'est-à-dire que le volume entrant est égal au volume sortant, le bilan hydrologique peut s'écrire de la manière suivante (*Gilli et al., 2012*):

$$P = Q + ET + \Delta R$$

Avec :

P = Précipitations

Q = Ruissèlements de surface et écoulement souterrain

ET = Evapotranspiration

ΔR = Variations des réservoirs (eau souterraine, neige, glace)

1.2.2) Présentation des Bassins Versants retenus

Les bassins versants retenus dans le cadre du projet HYCCARE ont été sélectionnés selon plusieurs critères qui assurent la cohérence des données et des résultats obtenus, ainsi qu'une bonne représentativité de la région (*Brulebois, 2013*).

Ainsi chacun des 13 bassins versants retenu, possède :

- une station hydrométrique de la Banque HYDRO, géré par la DREAL, à son exutoire, avec au moins 20 ans de données disponible sur la période 1980-2010 ;
- une taille comprise entre 10 et 5000 km² pour être pertinent au niveau local sans pour autant compromettre la qualité de la modélisation hydrologique ;
- un débit peu influencé par les activités humaines ;
- un enjeu sur la ressource en eau, et plus particulièrement l'alimentation en eau potable (AEP)
- un suivi administratif par les acteurs locaux (présence de SAGE, contrat de rivière,...).

La région étant la tête de 3 grands bassins versants (Rhône, Seine, Loire), les bassins versants étudiés ont été répartis sur ces 3 grands territoires hydrographiques. Une carte représentant la répartition des différents bassins versant sur le territoire Bourguignon est disponible en Annexe 1. Le *Tableau II* ci-dessous synthétise les données générales pour chaque bassin versant.

Tableau II : Tableau de synthèse des bassins versants retenus pour l'étude

Nom du Bassin Versant	Code du Bassin Versant (DREAL)	Surface (km ²)	Département	Bassin Hydrographique
L'Armançon à Brienon-sur-Armançon	H2482010	2977	Yonne	Seine-Normandie
L'Arroux à Dracy-Saint-Loup	K1251810	773	Saône-et-Loire	Loire-Bretagne
L'Arroux à Rigny-sur-Arroux	K1341810	2266	Saône-et-Loire	Loire-Bretagne
L'Yonne à Corancy	H2001020	105	Nièvre	Seine-Normandie
La Nièvre d'Arzembouy à Poiseux	K1954010	235	Nièvre	Loire-Bretagne
La Seille à Saint-Usuge	U3424010	885	Saône et Loire	Rhône-Méditerranée
La Tille à Arceau (intermédiaire)	U1224010	844	Côte d'Or	Rhône-Méditerranée
La Tille à Champdôtre (aval)	U1244040	1256	Côte d'Or	Rhône-Méditerranée
La Tille à Crecey-sur-Tille (amont)	U1204010	230	Côte d'Or	Rhône-Méditerranée
Le Nohain à Saint-Martin-sur-Nohain	K4094010	476	Nièvre	Loire-Bretagne
Le Serein à Chablis	H2342010	1117	Yonne	Seine-Normandie
L'Ource à Leuglay	H0301010	176	Côte d'Or	Seine-Normandie
La Bourbince à Vitry-en-Charollais	K1383010	827	Saône et Loire	Loire-Bretagne

1.2.3) Représentativité des bassins versants retenus

Afin de pouvoir tirer des conclusions sur l'ensemble du territoire Bourguignon à partir de l'étude des bassins versants sélectionnés, il est important de prouver que ceux-ci sont bien représentatifs de la zone d'étude. Le *Tableau II* ci-dessus montre déjà que les différents bassins sont répartis équitablement sur la Bourgogne, entre les différents départements, et les différents grands bassins hydrographiques. Il reste cependant à vérifier que les bassins versants sont bien représentatifs de la Bourgogne au niveau de l'occupation des sols et de la géologie qui sont des facteurs importants dans le fonctionnement du cycle hydrologique. Une première étude de la représentativité des bassins versants a été effectué ([Brulebois, 2013](#)), mais les résultats ne sont basés que sur l'analyse de 12 bassins versant au lieu de 13, c'est pour cette raison que l'ensemble de la représentativité a été recalculée dans ce rapport. Les *Tableaux III et IV*, ci-dessous présentent en détails la répartition de l'occupation du sol et de la géologie sur l'ensemble des bassins versants retenus pour ce projet, en termes de surface et de pourcentage.

Dans le *Tableau III*, la répartition de l'occupation des sols sur bassins versants étudiés par rapport à celle de la Bourgogne est très bonne avec des différences entre la répartition sur la Bourgogne et la répartition sur les bassins versants ($\Delta\%$) inférieur à 3%. La représentativité des bassins versants est donc validée pour ce paramètre.

Les résultats présentés dans le *Tableau IV*, semblent plus mitigés. En effet les $\Delta\%$ varient autour de 5 %, avec des valeurs de $\Delta\%$ pour le Permien/trias et les sédiments du quaternaires, supérieur à 10%. Cela peut s'expliquer par le fait que la géologie est un facteur plus homogène que l'occupation des sols du fait de la différence d'échelle entre ces deux paramètres. De plus, une partie des bassins versants ne se situe pas en Bourgogne (≈ 3200 km²) ce qui biaise légèrement les résultats.

Au vues des différents résultats, il est possible de conclure que les bassins versants sélectionnés pour cette étude sont bien représentatifs du territoire bourguignon, et que les résultats obtenus seront corrélables sur l'ensemble de la région.

Tableau III : Répartition de l'occupation des sols sur la Bourgogne et les bassins versants étudiés

Code CLC*	Surface d'occupation des sols en Bourgogne (km ²)	Surface d'occupation des sols en Bourgogne (%)	Surface d'occupation des sols sur les bassins versants étudié (km ²)	Surface d'occupation des sols sur les bassins versants étudié (%)	Δ% **
112	816,36	2,53	219,94	2,15	0,39
121	117,15	0,36	32,81	0,32	0,04
211	9375,74	29,08	2906,64	28,37	0,71
221	330,11	1,02	42,8	0,42	0,61
231	8528,57	26,46	2973,85	29,03	2,57
242	1787,70	5,55	551,14	5,38	0,17
243	686,52	2,13	232,05	2,27	0,14
311	7976,73	24,74	2647,18	25,84	1,09
312	940,75	2,92	346,01	3,38	0,46
313	506,00	1,57	239,77	2,34	0,77
324	274,04	0,85	52,78	0,52	0,33
511	896,34	2,78	0	0,00	2,78
Total	32236,01	100	10244,97	100	-

* : Les codes CLC correspondent à la Légende de la Figure 2

** : Différences entre la répartition sur la Bourgogne et la répartition sur les bassins versants étudiés

Tableau IV : Répartition de la Géologie sur la Bourgogne et sur les bassins versants étudiés

Couche Géologique	Surface géologique en Bourgogne (km ²)	Surface géologique en Bourgogne (%)	Surface géologique sur les bassins versants étudié (km ²)	Surface géologique sur les bassins versants étudié (%)	Δ% *
Calcaires Jurassiques	11645,05	36,74	3681,96	40,93	4,19
Sables et Craie du Crétacé	2585,87	8,16	313,2	3,48	4,68
Schistes et Grès du Permien/Trias	4585,76	14,47	2302,37	25,60	11,13
Sédiments Tertiaires et Quaternaires	7920,53	24,99	796,71	8,86	16,13
Socles Métamorphique	4959,52	15,65	1900,77	21,13	5,48
Total	31696,73	100	8995,01	100	-

* : Différences entre la répartition sur la Bourgogne et la répartition sur les bassins versants étudiés

1.3) Les indicateurs hydrologiques

1.3.1) Les différents indicateurs hydrologiques

Les indicateurs hydrologiques servent d'outils aux différents acteurs de l'eau. Ils s'y réfèrent pour prendre des décisions, et mener des actions préventives et curatives, notamment face aux événements hydrologiques extrêmes tels que les crues ou les étiages. Chaque acteur a donc ses indicateurs de prédilection en fonction de ses activités et des enjeux qu'il doit gérer.

Cette partie donne des exemples d'indicateurs hydrologiques pour chaque élément du cycle hydrologique. Elle ne constitue pas une liste exhaustive, car chaque acteur peut créer ses propres indicateurs en fonction des spécificités locales de son territoire.

a) Les indicateurs de précipitations

Les indicateurs de précipitations sont des indicateurs météorologiques mais ils constituent la base du cycle hydrologique, et impactent de manière plus ou moins direct l'ensemble des autres indicateurs hydrologiques. Ils comprennent par exemple :

- La fréquence et la durée des précipitations ;
- L'intensité des précipitations ;
- Le type de précipitation (solide ou liquide).

b) Les indicateurs de Stockage

Le stockage constitue la réserve en eau disponible ou potentiellement disponible dans les nappes souterraines et les retenus d'eau. Les indicateurs de stockage sont des éléments très importants pour les gestionnaires de la ressource en eau, et principalement ceux qui ont pour mission de satisfaire les demandes en eau potable. Ces indicateurs portent principalement sur :

- Le volume total
- Les niveaux minimum et maximum
- La vitesse de recharge

c) Les indicateurs d'évapotranspiration

La mesure de l'évapotranspiration permet de quantifier l'eau qui retourne à l'atmosphère via les végétaux. Les indicateurs d'évapotranspiration ont donc un intérêt principalement agronomique car ils permettent de calculer les besoins en eau des cultures ; besoins qui auront un impact plus ou moins important sur la ressource en eau (*Gilli et al., 2012*).

Il existe quatre indicateurs portant sur la mesure de l'évapotranspiration :

- L'évapotranspiration de référence (ET₀) ;
- L'évapotranspiration maximale (ET_m) ;
- L'évapotranspiration potentielle (ET_p) ;
- L'évapotranspiration réelle (ET_r).

d) Les indicateurs de débits

Le débit est le résultat de la combinaison de l'ensemble des éléments du cycle hydrologique. Il peut donc être lui-même considéré, dans la majorité des cas, comme un indicateur de « l'état de santé » d'un bassin versant. C'est pour cette raison que les acteurs de l'eau s'intéressent principalement aux indicateurs de débits extrêmes afin d'anticiper et de gérer aux mieux ces crises. Il existe deux sortes d'indicateurs hydrologiques pour les débits extrêmes ; les indicateurs de crues, et les indicateurs d'étiages.

Les crues ont de très fort impact sur les activités anthropiques situées sur, et aux abords des cours d'eau. C'est pour cette raison que les gestionnaires mettent en place des indicateurs qui leurs permettent d'estimer la fréquence (période de retour) et l'intensité de ces crues (*Roche et al., 2012*). Les indicateurs de crues les plus fréquemment utilisés sont le débit décennal (Q₁₀), le débit centennal (Q₁₀₀), ou encore le débit historique (Q_h) qui correspond au plus fort débit enregistré pour un cours d'eau donné.

Comme les indicateurs de crues, les indicateurs d'étiages sont basés sur l'intensité et la période de retour. Comme il s'agit d'un phénomène annuel qui intervient généralement lors des périodes les plus sèches (de juin à septembre), les indicateurs d'étiages sont calculés sur des pas de temps annuel mensuelle, voir journalier (*Roche et al., 2012*).

Parmi ceux-ci, il y a par exemple :

- Le débit moyen annuel (Module)
- Le débit moyen mensuel minimum de l'année (QMNA), qui peut également se calculer avec une période de retour de 5 ans (QMNA₅)
- Le débit minimum sur d jours consécutifs de l'année (VCNd)

1.3.2) Choix des indicateurs hydrologiques étudiés

Les indicateurs hydrologiques présentés ci-dessus, ne sont pas tous pertinent vis-à-vis des gestionnaires de l'eau en Bourgogne et/ou difficile à quantifier de manière fiable avec les débits simulés sur les différents bassins versant sélectionnés.

D'après le *Ministère de l'Ecologie (2012)*, 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 ».*

C'est le principe du modèle GR4J utilisé dans le cadre du projet HYCCARE-Bourgogne. En effet il s'agit d'une modélisation pluie-débit qui s'attache à quantifier le lien existant entre les écoulements et les précipitations sur un bassin versant en prenant en compte l'évapotranspiration et le stockage (*Brulebois, 2013*). Les données en sortie de cette modélisation sont donc uniquement des débits nets. C'est pour cette raison que ce rapport se penchera uniquement sur les indicateurs hydrologiques concernant les débits.

Afin de gérer au mieux la ressource en eau, les gestionnaires s'intéressent principalement aux valeurs de débits extrêmes qui leur permettent d'anticiper les conditions les plus défavorables, que ce soit au niveau des crues ou des étiages.

Les débits d'étiages constituent à eux seuls une véritable problématique pour les futurs acteurs de l'eau qui devront faire face à des périodes d'étiages plus longues à cause du changement climatique (*Bates et al., 2008*). Ils deviennent donc une question de premier plan pour la disponibilité et la gestion de la ressource en eaux.

Les crues sont des évènements ponctuels, qui ne remettent pas en question la ressource en eau, mais qui ont des conséquences humaines et matériels parfois importants. De plus, elles sont souvent aggravées par des éléments indépendants du cycle hydro-climatique, tels que la modification de la section des cours d'eau par les activités anthropiques (*Ghio, 1988*), ce qui rend leur prévision sur le long terme peu fiable.

Devant les enjeux de la gestion de la ressource en eau et la difficulté de reproduire correctement les crues, ce rapport se penchera uniquement sur les indicateurs d'étiage.

Dans l'*article L.214-18 du code de l'environnement*, disponible en *Annexe 2*, la réglementation impose de toujours maintenir un débit minimum dans la rivière correspondant aux besoins de la vie aquatique: il s'agit du débit minimum biologique.

Or, ce débit n'est jamais connu des décideurs car sa valeur nécessite des études lourdes pour être estimé. En pratique, ceux-ci utilisent des valeurs de débit de crise renforcée en se basant sur le 1/10^{ème} du module ou sur le QMNA₅. (*Boutelet, 2010*).

Le débit minimum biologique peut être défini lors de l'élaboration du Schémas d'Aménagement et de Gestion de l'Eau (SAGE) d'un bassin versant ([Boutelet, 2010](#)). Or aucun des bassins versants étudié ne dispose d'un SAGE donnant une valeur précise du débit minimum biologique.

De plus pour certain bassin versant dont le module est supérieur à 80 m³/sec, il peut y avoir, au cas par cas, une décision du Conseil d'Etat de fixer par décret ce débit minimal à une limite inférieure qui ne doit pas se situer en dessous du vingtième du module ([article L.214-18 du code de l'environnement](#)). Aucun des bassins versant étudiés n'atteignant ce module, ceux-ci ne font pas l'objet d'un décret fixant leur débit minimum biologique.

Dans le cadre de ce rapport, l'indicateur du débit biologique minimum sera calculé en combinant quatre autres indicateurs d'étiage.

Tout d'abord le **Module** qui correspond dans ce rapport au débit moyen annuel année par année afin de prendre en compte la variabilité inter-annuelle de la quantité d'eau écoulée ([Renard, 2006](#)). Cet indicateur sera ensuite décliné en deux autres indicateurs, le **10^{ème} de Module** et le **20^{ème} du Module**.

Le **QMNA₅** qui permet d'avoir une valeur de débit critique qui sera statistiquement dépassé une fois tous les 5 ans. De plus, comme le module, c'est un indicateur qui est déjà utilisé par les acteurs de l'eau en Bourgogne.

1.3.3) Méthodes de calculs des indicateurs hydrologiques étudiés

Les calculs des indicateurs pour ce rapport ont été réalisés à l'aide du logiciel R, dont le script de calcul général est disponible en *Annexe 3*.

Afin d'avoir les résultats les plus représentatif possible, il a été décidé de ne travailler que sur les années avec un minimum de 330 données de débit par an pour les calculs de valeur annuels, et avec un minimum de 25 données de débit par mois pour les calculs de valeurs mensuels.

Dans les grands bassins versant peu sensibles aux variations hydrologiques, les gestionnaires de l'eau utilisent le 10^{ème} du Module comme débit minimum biologique (Qmin). Il s'agit des bassins versants où le QMNA₅ est supérieur au 10^{ème} du Module ([Boutelet, 2010](#)).

Lorsque le débit d'un cours d'eau est faible toute l'année, le 10^{ème} du Module est trop faible pour jouer son rôle de minimum biologique. Ce cas intervient lorsque le QMNA₅ est inférieur au 10^{ème} du Module ([Boutelet, 2010](#)). Il faut alors trouver un seuil de crise renforcée qui ne sera pas systématiquement dépassé afin de ne pas lancer des mesures de restriction qui ne permettront pas de limiter la faiblesse du débit puisque le débit est naturellement faible.

C'est pour cette raison que ce rapport propose de fixer comme seuil de crise renforcée le QMNA₅, sans jamais prendre une valeur inférieure au 1/20^{ème} du module ([Boutelet, 2010](#)).

En résumé :

- Si QMNA₅ > 10^{ème} Module → Qmin = 10^{ème} Module ;
- Si QMNA₅ < 10^{ème} Module → Qmin = QMNA₅ ≥ 20^{ème} Module.

Le Module est le débit moyen annuel, il correspond donc à la somme des débits journaliers (Q_j) disponible sur une année, divisé par le nombre de données additionnées (nQ_j) soit :

$$Module = \frac{\sum Q_j}{nQ_j}$$

Le 10^{ème} de Module et le 20^{ème} de Module s'obtiennent en divisant les valeurs de module respectivement par 10 et par 20.

Pour le QMNA₅, une seule valeur est calculée pour l'ensemble de données étudiées sur chaque bassin versant ; il s'agit d'une valeur critique de référence.

La détermination du QMNA₅ s'effectue de la manière suivante. Après avoir calculé les n valeurs minimum de débit moyen mensuel pour chaque année, celle-ci sont triés par ordre croissant. La fréquence de non-dépassement de chaque débit (i) est alors calculée selon la formule suivante :

$$F(xi) = \frac{i - 0,3}{n + 0,4}$$

Il suffit ensuite de sélectionner le débit associé à la fréquence la plus proche de $F=0,2$ (1/5) pour connaître la valeur de débit moyen minimum mensuelle qui sera statistiquement dépassé 4 années sur 5. Cette valeur fera donc office de QMNA₅.

II) Calculs des indicateurs hydrologique sur la période 1980-2011

Maintenant que les indicateurs hydrologiques ont été déterminés et que leur méthode de calcul a été décrite, il faut désormais savoir si les indicateurs calculés avec des débits simulés sur la période 2010-2100 seront suffisamment fiable pour être exploités par les acteurs de l'eau.

Pour cela les indicateurs hydrologiques seront calculés avec les débits observés sur la période 1980-2010, puis comparé avec les indicateurs calculés à partir des débits simulés par GR4J pour la même période.

Si il existe une bonne corrélation entre les indicateurs obtenus avec les débits observés et ceux obtenus avec les débits simulés, il sera alors possible de conclure que les indicateurs seront fiables sur la période 2010-2100. Dans le cas contraire il faudra tenter d'expliquer pourquoi les résultats sont éloignés et envisager des pistes pour corriger ces écarts.

Trois bassins versants ont été sélectionné afin d'illustrer les différents types de résultats qu'il est possible d'avoir en calculant les indicateurs minimum biologique avec la méthode présenté dans la section précédente. Cette partie du rapport concernera donc uniquement les bassins versant de la Tille à Arceau, de l'Yonne à Corancy, et de l'Ource à Leuglay.

Pour chacun de ses bassins versants, les résultats sont disponibles en *Annexe 4 et 5* sous la forme d'un tableau qui récapitule années par années l'ensemble des indicateurs calculés. Ces données seront présentées graphiquement ce qui permettra de visualiser l'évolution des indicateurs de débit dans le temps. Afin de permettent une meilleure comparaison entre les bassins versant sans être influencé par leur surface, les résultats seront présentés sous forme de débit spécifique (lame d'eau qui s'écoule sur l'ensemble de la surface, en mm/unité de temps).

2.1) Indicateurs calculés avec les débits observés

2.1.1) La Tille à Arceau

Ce bassin versant se situe sur un substrat de Calcaires Jurassiques, et possède une occupation des sols très hétérogène caractéristique de la Bourgogne, constitués essentiellement de zones agricoles et forestières, ainsi que quelques zones urbanisées répartie de manière éparse. La *Figure 6* ci-dessous présente l'évolution dans le temps des différents indicateurs hydrologiques calculés à partir des données observés entre 1980 et 2011 sur le bassin versant de la Tille à Arceau.

Le module de ce cours d'eau oscille entre 135 et 497 mm/an avec des variations qui peuvent être très importantes d'une année sur l'autre.

L'une des principales caractéristique de ce cours d'eau est la faible valeur du QMNA₅ (0,0101 mm/jour) très largement inférieur au 10^{ème} et au 20^{ème} du Module. Ce sont donc les valeurs du 20^{ème} de Module qui font office de débit minimum biologique.

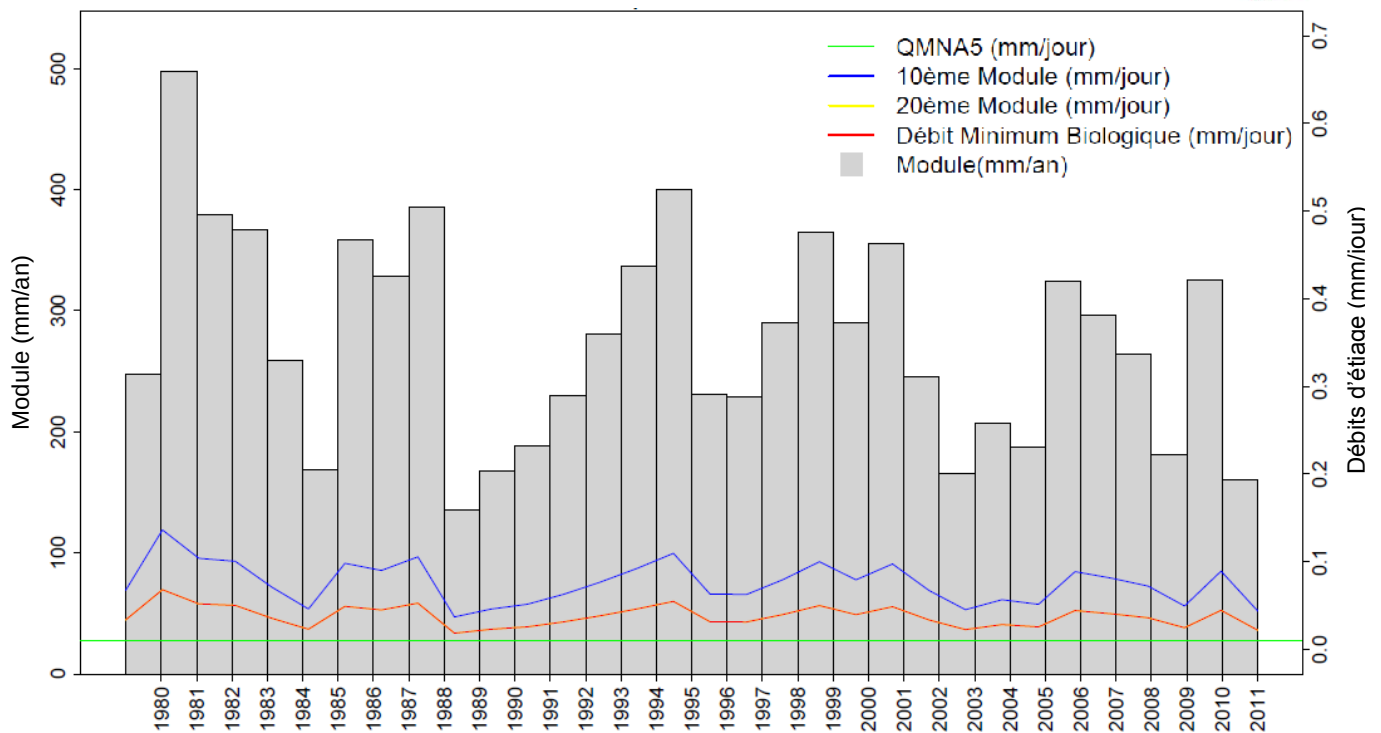


Figure 6 : Evolution du Module et des différents indicateurs d'étiage (Débit minimum biologique, 10^{ème} et 20^{ème} de Module, QMNA5) pour la Tille à Arceau calculé à partir des débits observés ; dans ce cas débit minimum biologique et 20^{ème} de Module sont confondus

2.1.2) L'Yonne à Corancy

Ce bassin versant se situe sur le socle métamorphique du Morvan, et possèdent une occupation des principalement forestières. La Figure 7 ci-dessous présente l'évolution dans le temps des différents indicateurs hydrologiques calculés à partir des données observés entre 1990 et 2011 sur le bassin versant de l'Yonne à Corancy.

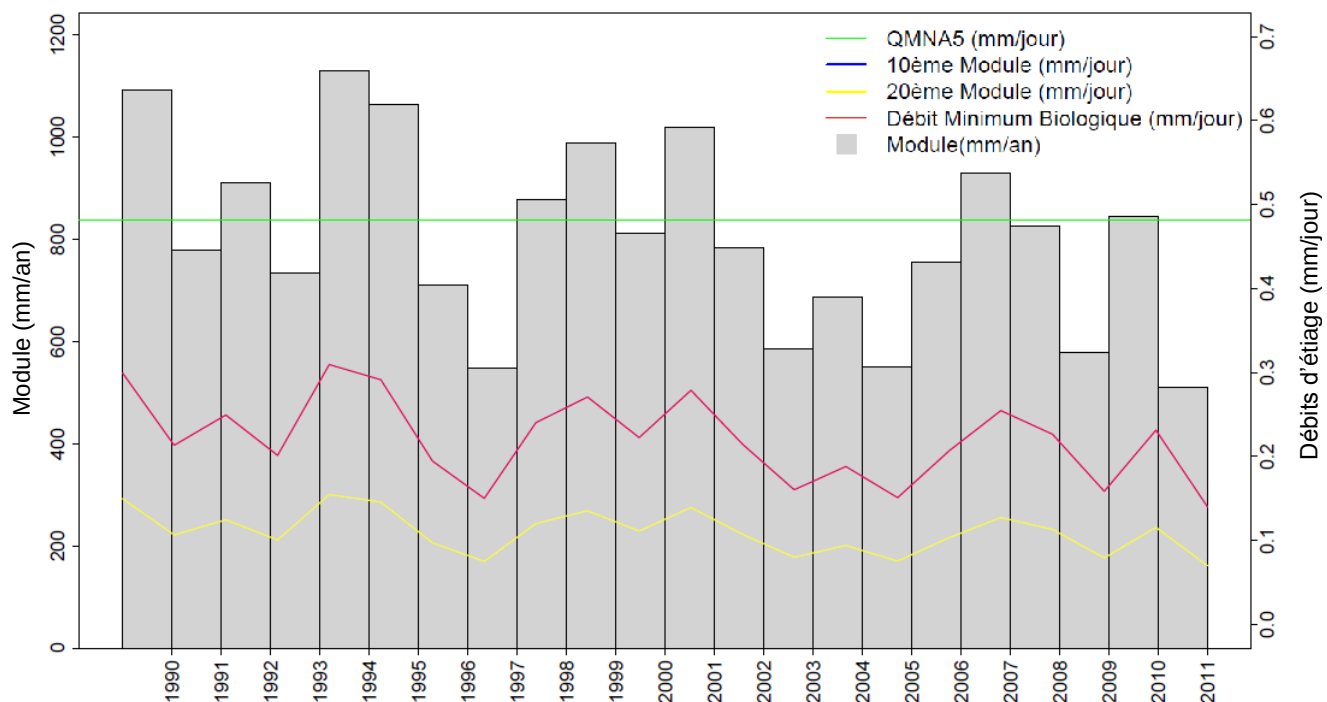


Figure 7: Evolution du Module et des différents indicateurs d'étiage (Débit minimum biologique, 10^{ème} et 20^{ème} de Module, QMNA5) pour l'Yonne à Corancy calculé à partir des débits observés ; dans ce cas débit minimum biologique et 10^{ème} de Module sont confondus

Le module de ce bassin versant oscille entre 510 et 1130 mm/an, et le QMNA₅ est de 0,4812 mm/jour. Les variations du Module sont peu marquées, sauf pour les années de fortes chaleurs (canicule de 2003 par exemple). Le QMNA₅ étant largement supérieur au 10^{ème} du Module, ce sont donc les valeurs du 10^{ème} de Module qui font office de débit minimum biologique.

2.1.3) *L'Ource à Leuglay*

Très proche du bassin versant de la Tille à Arceau, l'Ource à Leuglay présente les mêmes caractéristiques au niveau des précipitations, du substrat géologique, et de l'occupation des sols. Cependant celui-ci sert de bassin de référence en zone karstique pour cette étude, ce qui peut avoir des conséquences sur le débit des cours d'eau (*Brulebois, 2013*). La *Figure 8* ci-dessous présente l'évolution dans le temps des différents indicateurs hydrologiques calculés à partir des données observés entre 1985 et 2011 sur le bassin versant de l'Ource à Leuglay.

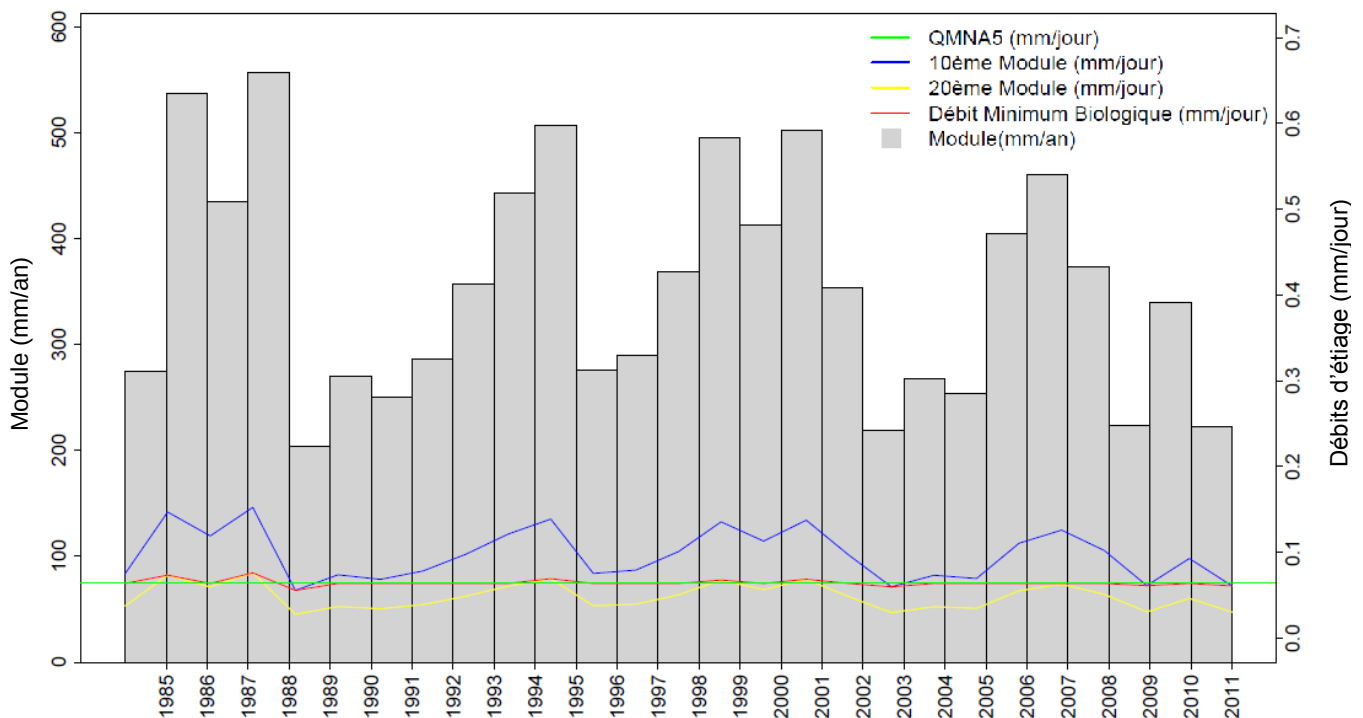


Figure 8 : Evolution du Module et des différents indicateurs d'étiage (Débit minimum biologique, 10ème et 20ème de Module, QMNA5) pour l'Ource à Leuglay calculé à partir des débits observés ; dans ce cas le débit minimum biologique est partiellement confondu avec le QMNA₅

Même si les valeurs du module sont comparables (entre 203 et 550 mm/an), la valeur du QMNA₅ est supérieure à celle de la Tille sur Arceau. Le bassin versant reste cependant sensible au volume d'eau précipité, à l'instar de la Tille à Arceau, ce qui provoque de forte variation du Module. Le niveau du QMNA₅ étant du même ordre que le 10^{ème} et 20^{ème} du Module, le débit minimum biologique ne cesse d'osciller entre ces différentes valeurs.

2.1.4) *Discussion des résultats*

Les résultats obtenus à partir des débits observés sont différents d'un bassin versant à l'autre. En effet chaque bassin versant présente un "résultat type" qu'il est possible d'obtenir en calculant le débit minimum biologique.

Il en ressort que les bassins versant sur substrat calcaire, à savoir la Tille à Arceau et l'Ource à Leuglay, présentent un QMNA₅ faible ce qui induit des débits minimum biologique proche ou égal au 20^{ème} du Module, qui est la valeur minimum que peut prendre cette indicateur. Bien que proche

géographiquement, ces deux bassins versant présentent des valeurs de QMNA₅ très différentes. Cette discontinuité hydraulique peut s'expliquer par de forts contrastes au niveau de la conductivité hydraulique lié à la présence d'un réseau karstique dans cette zone (BRGM, 2009).

En revanche, le bassin versant de l'Yonne à Corancy situé sur un substrat granitique et métamorphique, présente un QMNA₅ élevé, ce qui permet au débit minimum biologique d'être égal aux valeurs du 10^{ème} de Module, valeurs maximums que peut prendre cet indicateur.

2.2) Indicateurs calculés avec les débits simulés

Maintenant que les résultats des différents indicateurs hydrologiques obtenus à l'aide des débits observés ont été présentés, cette section va présenter les résultats des mêmes indicateurs hydrologiques mais cette fois ci obtenus à partir des débits simulés sur la même période.

Les tableaux récapitulatifs de l'ensemble des résultats obtenus à partir des débits simulés sont disponible en Annexe 5.

2.2.1) La Tille à Arceau

La Figure 9 ci-dessous présente l'évolution dans le temps des différents indicateurs hydrologiques calculés à partir des données simulées entre 1980 et 2011 sur le bassin versant de la Tille à Arceau.

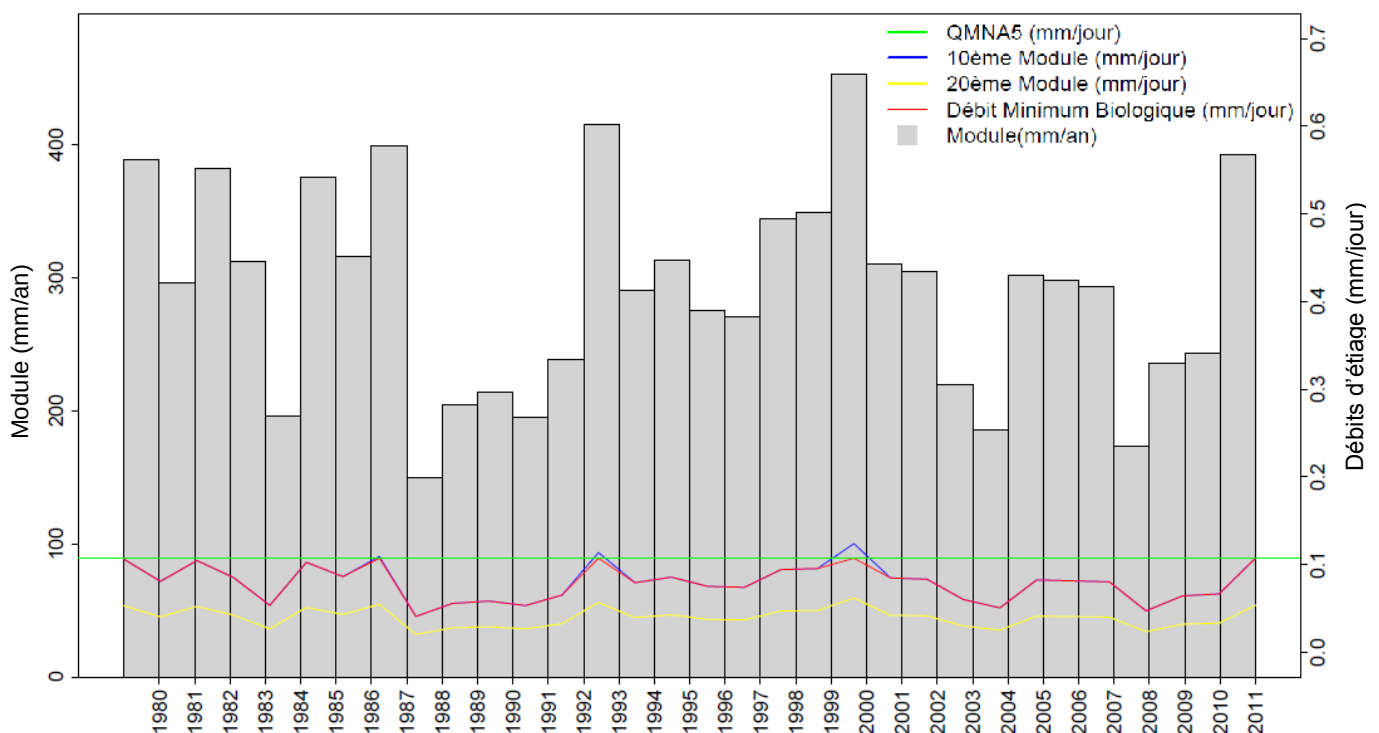


Figure 9: Evolution du Module et des différents indicateurs d'étiage (Débit minimum biologique, 10ème et 20ème de Module, QMNA5) pour la Tille à Arceau calculé à partir des débits simulés ; dans ce cas débit minimum biologique et 10ème de Module sont confondus

Le Module obtenus à partir des débits simulés varie entre 150 et 452 mm/an et le QMNA₅ à pour valeur 0,1074 mm/jour. La sensibilité du bassin versant aux variations de précipitation a été dans l'ensemble bien retranscrite par le modèle.

Le seuil du QMNA₅ étant élevé, le débit minimum biologique a pris principalement les valeurs du 10^{ème} du Module.

2.2.2) L'Yonne à Corancy

La Figure 10 ci-dessous présente l'évolution dans le temps des différents indicateurs hydrologiques calculés à partir des données simulées entre 1980 et 2011 sur le bassin versant de l'Yonne à Corancy.

Le Module obtenu à partir des débits simulés varie entre 480 et 1186 mm/an et le QMNA5 à pour valeur 0,6198 mm/jour. Les variations du module au cours du temps ne sont pas trop importantes. Le seuil du QMNA5 étant très élevé, le débit minimum biologique correspond au 10^{ème} du Module.

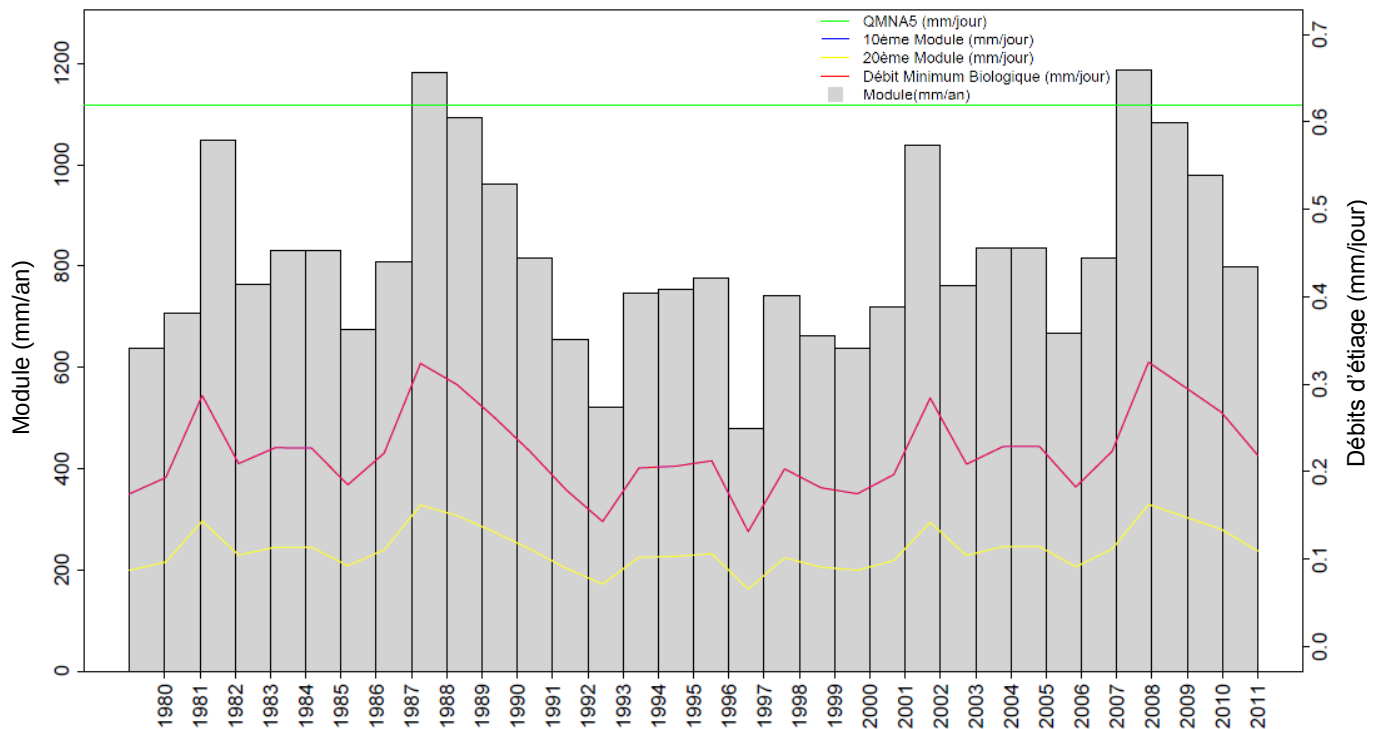


Figure 10: Evolution du Module et des différents indicateurs d'étiage (Débit minimum biologique, 10ème et 20ème de Module, QMNA5) pour l'Yonne à Corancy calculé à partir des débits simulés ; dans ce cas débit minimum biologique et 10ème de Module sont confondus

3.2.3) L'Ource à Leuglay

La Figure 11 ci-dessous présente l'évolution dans le temps des différents indicateurs hydrologiques calculés à partir des données simulées entre 1980 et 2011 sur le bassin versant de l'Ource à Leuglay.

Le Module obtenu à partir des débits simulés varie entre 185 et 601 mm/an et le QMNA5 à pour valeur 0,1477mm/jour. Le seuil du QMNA5 étant élevé, le débit minimum biologique a pris principalement les valeurs du 10^{ème} du Module.

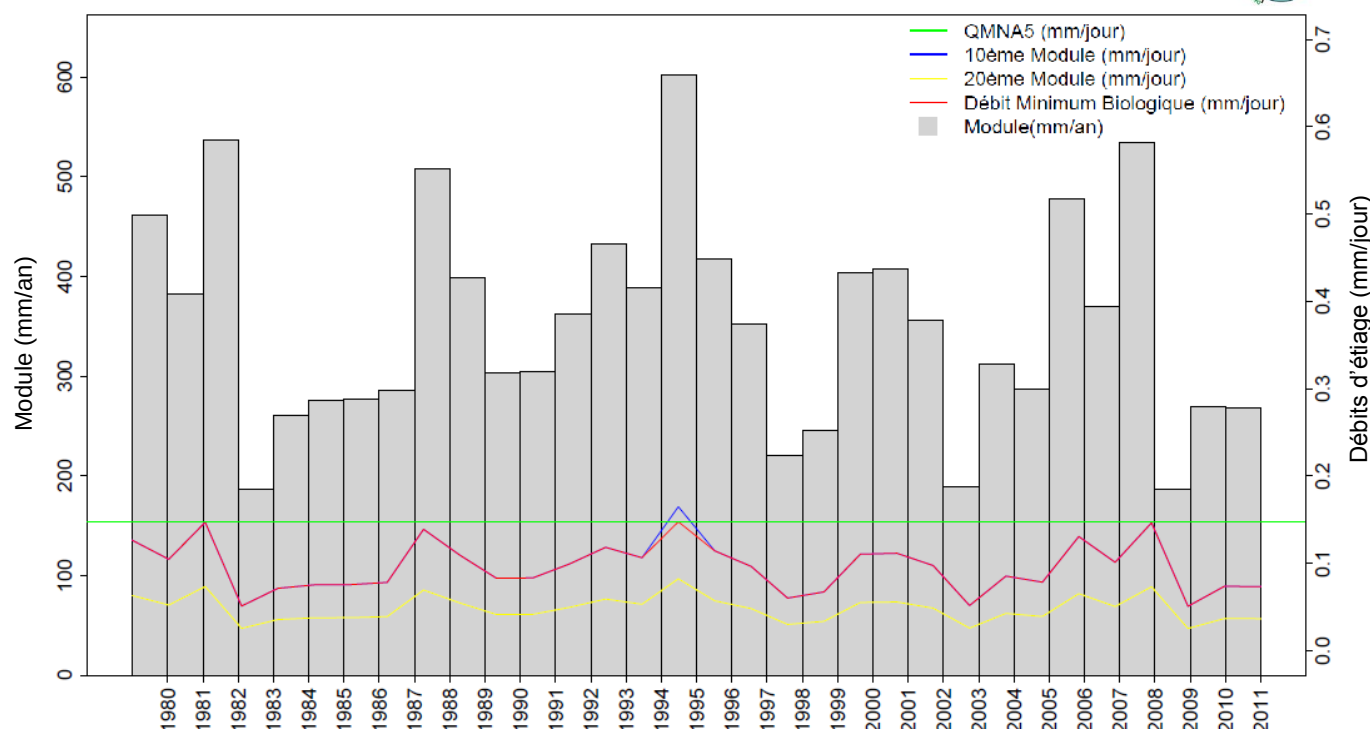


Figure 11: Evolution du Module et des différents indicateurs d'étiage (Débit minimum biologique, 10ème et 20ème de Module, QMNA5) pour l'Ource à Leuglay calculé à partir des débits simulés ; dans ce cas débit minimum biologique et 10ème de Module sont confondus

2.2.4) Discussion des Résultats

Les résultats obtenus à partir des débits simulés sont similaires entre les bassins versants. En effet, le QMNA₅ calculé pour chaque bassin versant est supérieur aux valeurs du 10^{ème} de Module, ce qui implique que les valeurs du débit minimum biologique de chaque bassin versant sont égales aux valeurs du 10^{ème} du Module.

2.3) Comparaison des résultats

Les différents indicateurs obtenus à partir des débits observés et simulés ayant été calculés, il est désormais possible de les comparer. Le Tableau V, fait la synthèse des modalités de calculs utilisées pour déterminer le débit minimum biologique sur les différents bassins versants.

Tableau V : Récapitulatif des modalités de calcul des débits minimum biologique sur les 3 bassins versants étudiés à partir des débits observés (QminObs) et simulés (QminSim)

	La Tille à Arceau	L'Yonne à Corancy	L'Ource à Leuglay
QminObs	20 ^{ème} Module	10 ^{ème} Module	10 ^{ème} &20 ^{ème} Module / QMNA ₅
QminSim	10 ^{ème} Module	10 ^{ème} Module	10 ^{ème} Module

Le Tableau V montre qu'il existe des disparités entre les débits minimum biologique obtenus à l'aide des débits observés et ceux obtenus à l'aide des débits simulés avec le modèle GR4J. Ces disparités peuvent avoir plusieurs origines :

- Une mauvaise simulation des débits par le modèle
- Un biais dans la détermination et le calcul du Module
- Un biais dans la détermination et le calcul du QMNA₅

La Figure 12 ci-dessous, présente les données obtenues en réalisant le ratio des Modules observés (Qobs) sur les Modules simulés (Qsim) de chaque bassin versant étudié. Le tableau de comparaison des ratios entre les Modules observés et simulés qui a permis la réalisation de la Figure 12 est disponible en Annexe 6. Plus le ratio est proche de 0, plus la valeur de Qsim est proche de la valeur de Qobs. Lorsque le ratio est positif, cela signifie que Qsim est inférieur à Qobs. A l'inverse, lorsque le ratio est négatif, cela signifie que Qsim est supérieur à Qobs.

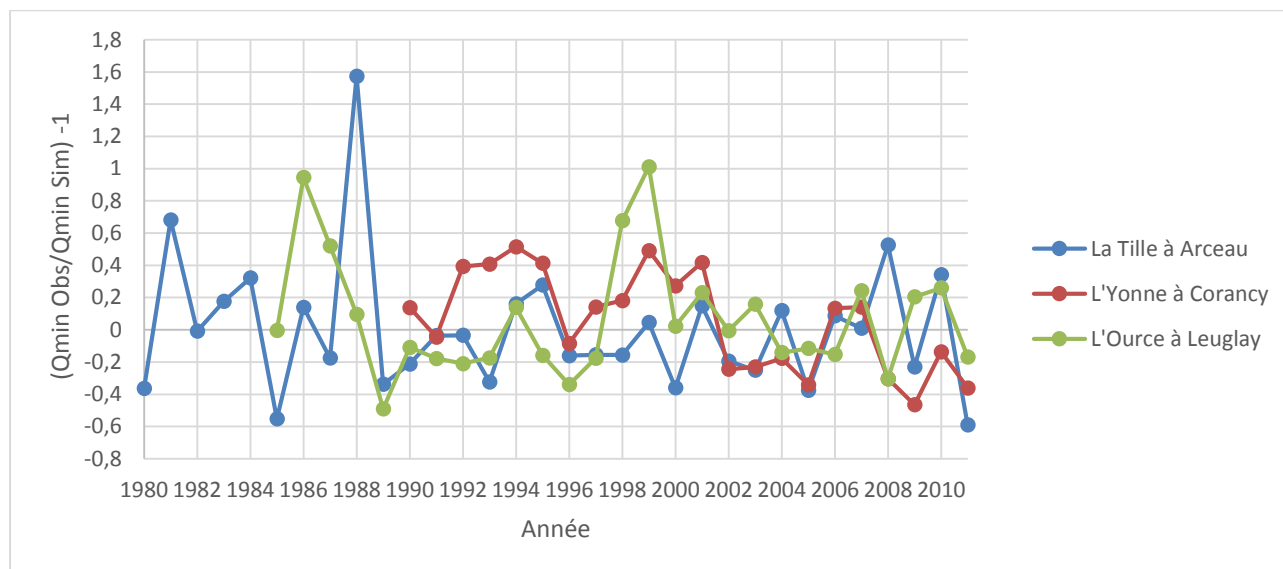


Figure 12: Ratios des Modules observés (Qobs) sur les Modules simulés (Qsim) pour les bassins versants étudiés

D'après la Figure 12, les ratios obtenus pour chaque bassin versant tendent à se rapprocher de la valeur 0, ce qui suggère que les valeurs issues de la modélisation GR4J sont représentatives des valeurs observées. Afin de vérifier cette hypothèse, ce ratio est appliqué au cumul de Qobs et Qsim pour l'ensemble des bassins versants (Tableau VI).

Tableau VI : Récapitulatif de la comparaison des Modules observés (Qobs) et simulés (Qsim) sur les bassins versant étudiés

	La Tille à Arceau	L'Yonne à Corancy	L'Ource à Leuglay
Moyenne Qobs (mm/an)	276,6250	805,5000	354,9259
Moyenne Qsim (mm/an)	291,5938	794,0000	349,4074
Ratio cumulé*	-0,0513	0,0145	0,0158
Ratio Min	-0,5903	-0,4654	-0,4912
Ratio Max	1,5733	0,5147	1,0122

* : $(\Sigma Q_{obs}/\Sigma Q_{sim})-1$

S'il y avait eu une différence importante entre les débits observés et les débits simulés par le modèle GR4J, cela se serait ressenti dans les résultats du calcul des Modules qui se basent directement sur la valeur des débits.

Or, les Modules simulés sont très proches des Modules observés avec un ratio cumulé pour chaque bassin versant proche de 0, ce qui permet de dire que les débits issus du modèles GR4J sont acceptables et ne sont pas responsables de la différence entre les débits minimum biologiques

observés et les débits minimum biologiques simulés. Si les débits issus des simulations GR4J ne sont pas responsables des différences entre les débits minimum biologiques simulés et observés, la cause doit se trouver dans l'élément qui détermine la valeur du débit minimum biologique, à savoir le QMNA₅.

De la même manière que pour les Modules, les débits minimum biologiques observés (QminObs) et simulés (QminSim) sont comparés à l'aide du ratio QminObs/QminSim, afin de déterminer l'impact de la valeur du QMNA₅ sur les valeurs de QminSim. La Figure 13, ainsi que les Tableaux VII et VIII ci-dessous, présentent les données obtenues en réalisant le ratio des QminObs par les QminSim de chaque bassin versant. Le tableau de comparaison des ratios entre les débits minimum biologiques observés et simulés qui a permis la réalisation de la Figure 13 et des Tableaux VII et VIII est disponible en Annexe 7.

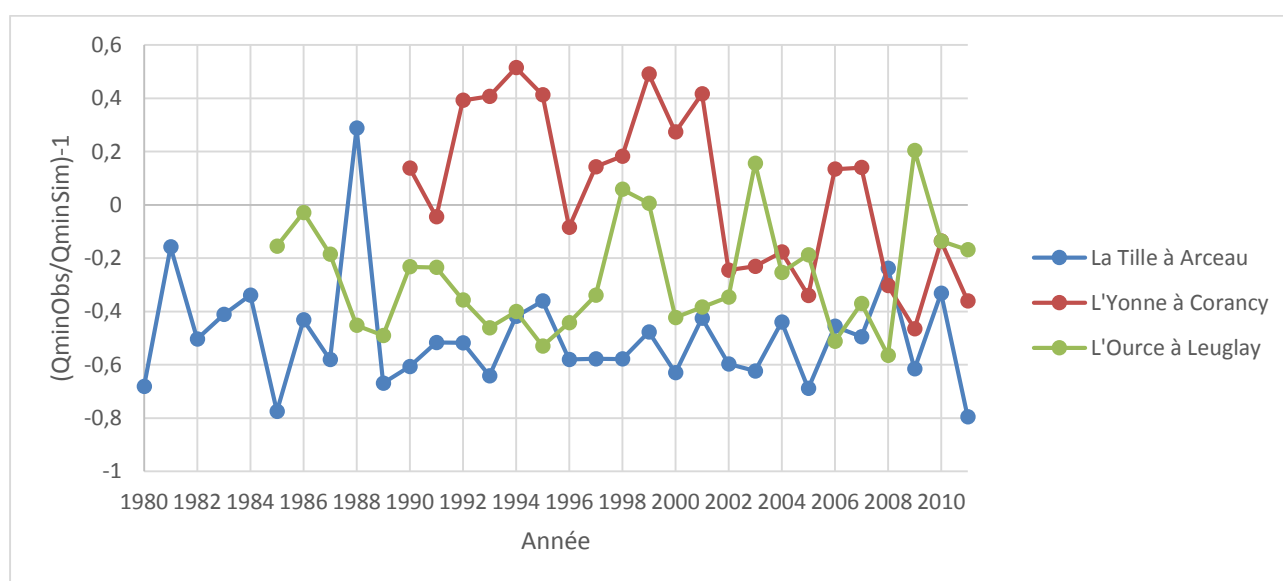


Figure 13: Ratio des débits biologiques minimum observés (QminObs) sur les Modules simulés (QminSim) pour les bassins versants étudiés

Tableau VII : Récapitulatif de la comparaison des Modules observés (Qobs) et simulés (Qsim) sur les bassins versant étudiés

	La Tille à Arceau	L'Yonne à Corancy	L'Ource à Leuglay
QminObs Moyen	0,0379	0,2207	0,0645
QminSim Moyen	0,0791	0,2207	0,0951
Ratio*	-0,5211	0,0146	-0,3215
Ratio Min	-0,7952	-0,4651	-0,5645
Ratio Max	0,2878	0,5149	0,2043

* : $(\Sigma Q_{minObs} / \Sigma Q_{minSim}) - 1$

Tableau VIII : Récapitulatif de la comparaison des QMNA5 observés et les QMNA5 simulés (Qsim) sur les bassins versant étudiés

	La Tille à Arceau	L'Yonne à Corancy	L'Ource à Leuglay
QminObs	0,0101	0,4812	0,0638
QminSim	0,1074	0,6198	0,1477
Ratio*	-0,9060	-0,2236	-0,5680

* : (QMNA₅ Observé/QMNA₅ Simulé)-1

Il est possible de constater sur la *Figure 13*, ainsi que sur les *Tableau VII et VIII*, que le QminSim est surestimé par rapport au QminObs sur les bassins versants de la Tille à Arceau et l'Ource à Leuglay, et que le QMNA₅ est également surestimé sur l'ensemble des bassins versants étudiés.

De plus, les *Tableaux VII et VIII* montrent que plus les valeurs de QMNA₅ simulés s'éloignent des valeurs de QMNA₅ observés, plus les valeurs de QminSim s'éloignent des valeurs de QminObs.

Il ressort également de façon très nette que les bassins versants situés sur un substrat Calcaires qui présentent des débits de base faible, sont beaucoup plus fortement impactés par la différence entre le QMNA₅ simulés et le QMNA₅ observés, et par conséquent subissent un plus grand écart entre le QminSim et le QminObs. Les débits simulés sur les bassins versant présentant un substrat qui favorisent les circulations souterraines sont donc trop biaisé pour rendre ce calcul de QMNA₅ fiable.

Une deuxième explication est également possible pour expliquer les différences entre les débits d'étiages observés et simulés. En effet la cause de ses différences se trouve peut-être dans la méthode de calculs du Module. Il s'agit d'une variable hydrologique qui correspond à un débit moyen à une échelle de temps annuelle ou pluriannuelle. Le choix de prendre un module correspondant au débit moyen sur une seule année n'était peut-être pas le plus pertinent.

Il est donc nécessaire de tester une nouvelle façon de calculer le module afin de voir si cela à une incidence bénéfique sur la fiabilité des résultats. Par exemple en prenant un module correspondant à une moyenne des débits sur une période de 5 ans, cela permettrait de moins subir les variabilités climatiques interannuelles.

Conclusion

Le calcul d'indicateur hydrologique est quelques choses d'essentiel pour aiguiller les acteurs de l'eau dans la gestion de la ressource en eau sur le long terme en prenant en compte le changement climatique. Pour cela, les gestionnaires de l'eau ont besoin d'indicateurs qui leur permettent d'intervenir et de prendre des mesures afin de répondre aux besoins des usagers tout en prenant en compte les contraintes environnementales. C'est le cas des indicateurs de débits extrêmes (crues et étiages) qui permettent aux acteurs de l'eau de gérer les situations les plus défavorables pour les activités humaines. Le débit minimum biologique est un indicateur d'étiage qui est un des plus utilisé par les gestionnaires de l'eau, car il leur permet de gérer la ressource en eaux tout en respectant le code de l'environnement qui impose de maintenir le débit d'un cours d'eau à un seuil minimum afin de ne pas détériorer les écosystèmes aquatiques.

Dans ce travail, il a été décidé de s'attacher à définir une méthode de calcul pour le débit minimum biologique sur la base de débits moyen journalier. Cet indicateur d'étiage nécessite le calcul d'autres indicateurs pour pouvoir être déterminé.

Afin de vérifier que les indicateurs sélectionnés seront viable lorsqu'ils seront calculés pour la période 2010-2100, 13 bassins versants représentatifs de la région Bourgogne ont été sélectionnés pour pouvoir quantifier ses indicateurs à partir de données observées sur la période 1980-2011 et les comparer aux débits simulés sur la même période.

Or pour les bassins versants qui ont servi d'exemple pour ce rapport, la comparaison entre les débits minimum biologiques observés et simulés présente de forte disparité, ce qui montre qu'en l'état les indicateurs hydrologiques qui ont été déterminé ne sont pas suffisamment viable pour être utilisés par les futurs gestionnaires de l'eau.

Ces divergences entre les débits minimum biologiques observés et simulés peuvent s'expliquer par des biais dans le calcul du QMNA₅, liés aux difficultés du modèle hydrologique utilisé à quantifier avec précision les circulations souterraines entre les bassins versants. En effet les différences les plus importantes entre les indicateurs observés et simulés se retrouvent sur les bassins versants présentant un substrat calcaire karstique, les rendant sujet à des apports ou à des pertes extérieur.

Le changement climatique à un impact sur l'ensemble du système hydrologique, c'est pour cette raison qu'il est nécessaire d'approfondir et de compléter cette étude en calculant, à l'aide d'outils plus adaptés, d'autres indicateurs hydrologiques, comme les indicateurs d'évapotranspiration ou les indicateurs qualitatifs, qui permettront aux acteurs de l'eau de gérer la ressource dans les meilleurs conditions.

Références Bibliographique

- Bates, B. C., Z. W. Kundzewicz, S. Wu et J. P. Palutikof. Le changement climatique et l'eau, document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. 2008, Secrétariat du GIEC, Genève, 236 pages.
- Boutelet, M. Suivis judiciaire et administratif des infractions aux arrêtés préfectoraux de limitation des usages de l'eau en Côte d'Or au cours de la période 2002-2005. Dijon : Université de Bourgogne, 2010, 122 pages.
- BRGM. Atlas des eaux souterraines de la France. Paris: Editions du BRGM, 1970.
- BRGM. Karst de Haute Marne Préalocalisation de Piezomètre pour le réseau de surveillance DCE. BRGM/RP-57118-FR, 2009, 170 pages.
- Brulebois, E. Analyse du couplage entre une modélisation climatique régional distribuée et une modélisation pluie-débit globale (GR4J). Climatologie. Dijon : Université de Bourgogne, 2013, 78 pages.
- 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 01/05/14).
- 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 01/05/14).
- 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 01/05/2014).
- DREAL Bourgogne. Profil Environnemental Régional de la Bourgogne **[en ligne]** 2012. Disponible sur http://www.per-bourgogne.fr/files/pdf/0_PER_2012.pdf (consulté le 01/05/2014)
- Ghio, M. Les activités humaines augmentent-elles les crues? **[en ligne]** 1995. Disponible sur http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/geo_00034010_1995_num_104_581_13871 (consulté le 09/05/14)
- 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.
- Gilli, E. Mangan, C. Mudry, J. Hydrologie Objets, méthodes, applications. Paris : Dunod, 2012, 340 pages. ISBN 978-2-10-057639-5.
- Habets, F., Boe, J., Deque, M., Ducharme 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 GICCRExHySS #13. **[en ligne]** Agence de l'eau Seine-Normandie, 2011, 48p. Disponible sur http://www.sisyphe.upmc.fr/piren/webfm_send/1010 (consulté le 05/05/14).
- MINISTERE DE L'ECOLOGIE, DU DEVELOPPPEMENT DURABLE, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT. Article L.214-18 du code de l'environnement **[en ligne]** 2006. Disponible sur http://www.legifrance.org/affichCodeArticle.do;jsessionid=54F0F5A6266090DCADCB5DE105F85ABD.tpdjo14v_1?idArticle=LEGIARTI000006833152&cidTexte=LEGITEXT000006074220&dateTexte=20140609 (consulté sur 26/05/14)

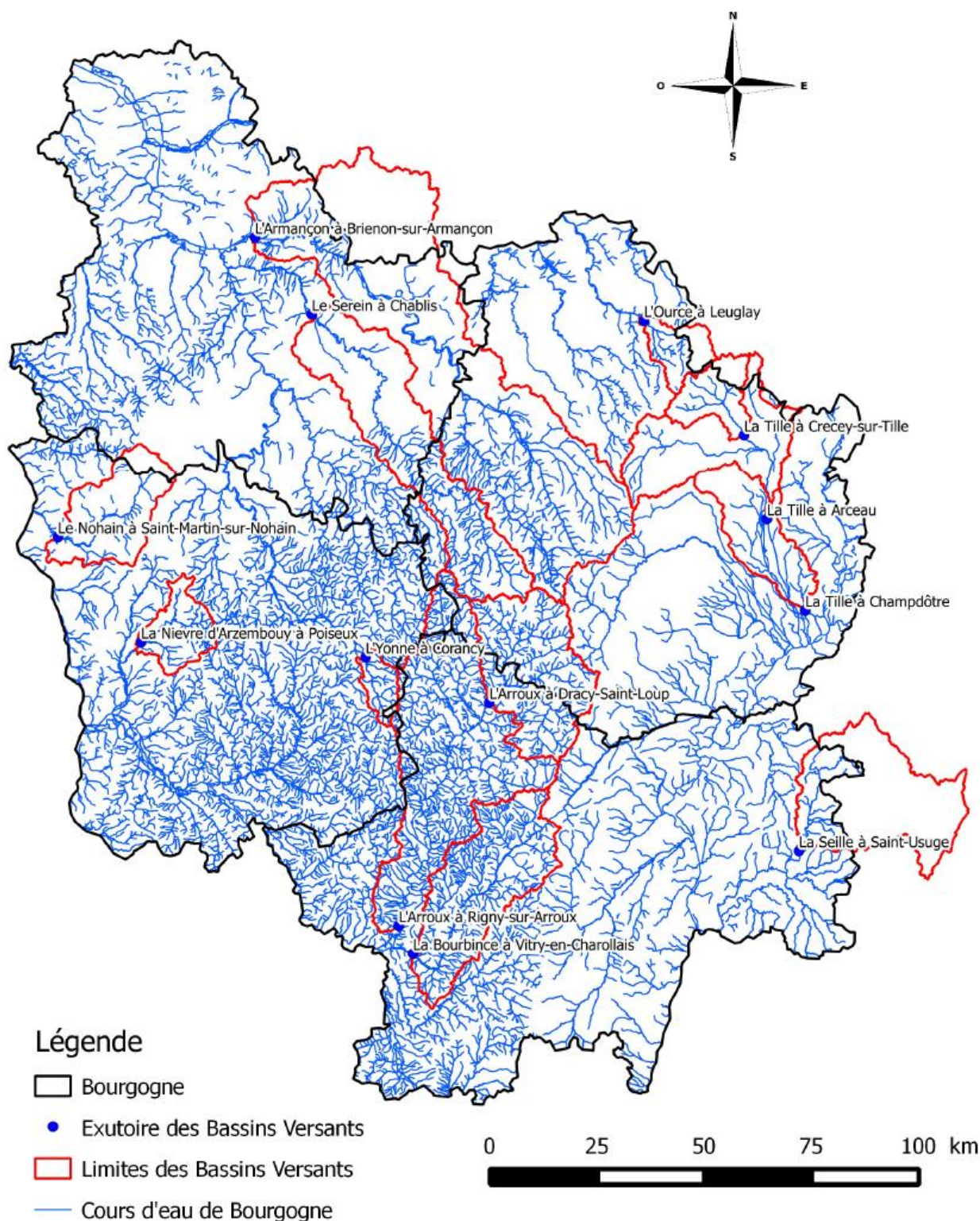
- MINISTERE DE L'ECOLOGIE, DU DEVELOPPPEMENT DURABLE, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT. Explore 2070 Eau et changement climatique, Hydrologie de surface A1 Rapport de synthèse. [en ligne] 2012, 163p. Disponible sur <http://www.developpementdurable.gouv.fr/IMG/Synthèse%20étude%20hydrologie%20de%20surface%20explore%202070.pdf> (consulté le 15/05/14).
- Musy, A. et Higy C. Hydrologie (1. Une science de la nature). Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 2004, 314 pages.
- Renard, B. Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologique en France. Thèse en hydrologie. Grenoble : INP Grenoble, 2006, 364 pages.
- Roche, P-A., Miquel, J., Gaume, E. Hydrologie Quantitative Processus, modèles et aide à la décision. Paris : Springer, 2012, 590 pages. ISBN 978-2-8178-0106-3.
- 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 01/05/14).

ANNEXES

Liste des Annexes

Annexe 1 : Carte des bassins versants étudiés.....	I
Annexe 2 : Article L.214-18 du code de l'environnement	II
Annexe 3 : Script de calcul des indicateurs hydrologique sur R	III
Annexe 4 : Récapitulatif des résultats pour les bassins versants étudiés obtenus avec les données Observés	V
Annexe 4.1 : Résultats des indicateurs hydrologiques observés pour la Tille à Arceau.....	V
Annexe 4.2 : Résultats des indicateurs hydrologiques observés pour l'Yonne à Corancy	VI
Annexe 4.3 : Résultats des indicateurs hydrologiques observés pour l'Ource à Leuglay.....	VII
Annexe 5: Récapitulatif des résultats pour les bassins versants étudiés obtenus avec les données simulés	VIII
Annexe 5.1 : Résultats des indicateurs hydrologiques simulés pour la Tille à Arceau.....	VIII
Annexe 5.2: Résultats des indicateurs hydrologiques simulés pour l'Yonne à Corancy	IX
Annexe 5.3 : Résultats des indicateurs hydrologiques simulés pour l'Ource à Leuglay	X
Annexe 6 : Détails et comparaison des données de Modules observés et simulés.....	XI
Annexe 7 : Détails et comparaison des données de débits minimum biologiques observés et simulés	XII

Annexe 1 : Carte des bassins versants étudiés



Annexe 2 : Article L.214-18 du code de l'environnement

Article L.214-18

Créé par Loi n°2006-1772 du 30 décembre 2006 - art. 6 JORF 31 décembre 2006

I.- Tout ouvrage à construire dans le lit d'un cours d'eau doit comporter des dispositifs maintenant dans ce lit un débit minimal garantissant en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces vivant dans les eaux au moment de l'installation de l'ouvrage ainsi que, le cas échéant, des dispositifs empêchant la pénétration du poisson dans les canaux d'amenée et de fuite.

Ce débit minimal ne doit pas être inférieur au dixième du module du cours d'eau en aval immédiat ou au droit de l'ouvrage correspondant au débit moyen interannuel, évalué à partir des informations disponibles portant sur une période minimale de cinq années, ou au débit à l'amont immédiat de l'ouvrage, si celui-ci est inférieur.

Pour les cours d'eau ou parties de cours d'eau dont le module est supérieur à 80 mètres cubes par seconde, ou pour les ouvrages qui contribuent, par leur capacité de modulation, à la production d'électricité en période de pointe de consommation et dont la liste est fixée par décret en Conseil d'Etat pris après avis du Conseil supérieur de l'énergie, ce débit minimal ne doit pas être inférieur au vingtième du module du cours d'eau en aval immédiat ou au droit de l'ouvrage évalué dans les mêmes conditions ou au débit à l'amont immédiat de l'ouvrage, si celui-ci est inférieur. Toutefois, pour les cours d'eau ou sections de cours d'eau présentant un fonctionnement atypique rendant non pertinente la fixation d'un débit minimal dans les conditions prévues ci-dessus, le débit minimal peut être fixé à une valeur inférieure.

II.- Les actes d'autorisation ou de concession peuvent fixer des valeurs de débit minimal différentes selon les périodes de l'année, sous réserve que la moyenne annuelle de ces valeurs ne soit pas inférieure aux débits minimaux fixés en application du I.

En outre, le débit le plus bas doit rester supérieur à la moitié des débits minimaux précités.

Lorsqu'un cours d'eau ou une section de cours d'eau est soumis à un étiage naturel exceptionnel, l'autorité administrative peut fixer, pour cette période d'étiage, des débits minimaux temporaires inférieurs aux débits minimaux prévus au I.

III.- L'exploitant de l'ouvrage est tenu d'assurer le fonctionnement et l'entretien des dispositifs garantissant dans le lit du cours d'eau les débits minimaux définis aux alinéas précédents.

IV.- Pour les ouvrages existant à la date de promulgation de la loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques, les obligations qu'elle institue sont substitués, dès le renouvellement de leur concession ou autorisation et au plus tard le 1er janvier 2014, aux obligations qui leur étaient précédemment faites. Cette substitution ne donne lieu à indemnité que dans les conditions prévues au III de l'article L. 214-17.

V.- Le présent article n'est applicable ni au Rhin ni aux parties internationales des cours d'eau partagés.

Annexe 3 : Script de calcul des indicateurs hydrologique sur R

Glossaire du Script R :

- nBV: nom du bassin versant
- data: dates du fichier au format date (2ème colonne)
- Q: débit du fichier (3ème colonne)
- QA: débit moyen annuel
- an_ok: années avec plus de 330 données
- Mod10: 1/10ème du module
- Mod20: 1/20ème du module
- QM: Débit moyen mensuel
- QMNA: Débit moyen mensuel minimum sur l'année
- tQMNA: Débit moyen mensuel minimum sur l'année trié par ordre croissant
- frQMNA: Fréquence de non-dépassement des débits
- QMNA5: Débit mensuel minimum pour une période de retour de 5ans
- Qmin: Débit d'étiage retenu pour le cours d'eau

Etape I) Lecture des données et initialisation du script

#Ouverture des données

```
nBV<-read.table(nBV_i,header=T,sep=";")
```

```
surface<-read.csv("surface.csv",sep="," ,header=T)
```

#Transformation en série temporelle

```
library(zoo)
```

```
library(hydroTSM)
```

#Tranformation en fichier ZOO

```
data<-local({
```

```
timeseq <- seq(as.POSIXct("1980-01-01",tz="GMT"),
```

```
as.POSIXct("2011-12-31",tz="GMT"),by = "day")
```

```
len<- length(timeseq)
```

```
P<-nBV$X1.P.P
```

```
E<-nBV$X1.P.E
```

```
Q<-nBV$Q
```

```
as.zooreg(zoo(cbind(P = P, E = E, Q = Q), order.by = timeseq)))
```

#Ajustement et association des dates aux débits

```
data<-na.trim(data)
```

```
Q<-data$Q
```

Etape II) Calcul du module du Bassin Versant pour les années avec plus de 330 valeurs de débit

#Calcul des valeurs de débits moyens annuels

```
QA<-daily2annual(Q,FUN=mean,na.rm=TRUE)
```

#Vecteur des années disponibles

```
an<-as.numeric(substr(index(QA),0,4))
```

```
#Boucle pour chaque année disponible avec condition Q>330
an_ok<-c()
for (i in 1:length(an)){
  ifelse(length(as.vector(extract(Q,trgt=an[i])))>330,an_ok<-c(an_ok,an[i]),an_ok<-c(an_ok,NA))}
  ifelse(length(which(is.na(an_ok)==TRUE))==0,
  QA,QA<-QA[-which(is.na(an_ok)==TRUE)])

#Calcul du 10ème du Module
Mod10<-c(QA/10)

#Calcul du 20ème du Module
Mod20<-c(QA/20)

Etape III) Calculs des valeurs de QMNA5 avec au moins 25 valeurs de débit par mois
#Aggrégation mensuel des débits
QM<-matrix(NA,12,length(QA))
QJA<-c()
for (i in 1:length(as.vector(QA))){
  QJA<-extract(Q,trgt=as.vector(an_ok)[i])

#Calcul des débits moyen mensuel
QMA<-c()
for (j in 1:12){
  ifelse(length(as.vector (extract(QJA,trgt=j))))>25,
  QMA<-c(QMA,mean(extract(QJA,trgt=j),na.rm=T)),QMA<-c(QMA,NA))}
  QM[,j]<-QMA}
colnames(QM)<-as.vector(an_ok)
rownames(QM)<-month.abb

#Calcul du débit mensuel minimum par an
QMNA<-c()
for (i in 1:dim(QM)[2]){
  QMNA<-c(QMNA,min(QM[,i],na.rm=T))}

#Trie des données
tQMNA<-c(sort(QMNA))

#Calcul des fréquences de non-dépassement
frQMNA<-(seq(1:length(tQMNA))-0.3)/(length(tQMNA)+0.4)

#Calcul du QMNA5
QMNA5<-tQMNA[which(frQMNA==min(abs(frQMNA-0.2))+0.2)]

#IV) Déduction du débit d'étiage annuel
Qmin<-ifelse(QMNA5<Mod10,(ifelse(QMNA5>Mod20,QMNA5,Mod20)),Mod10)
```

Annexe 4 : Récapitulatif des résultats pour les bassins versants étudiés obtenus avec les données Observés

Annexe 4.1 : Résultats des indicateurs hydrologiques observés pour la Tille à Arceau

	Code station : U1224010	Nom du BV: La Tille à Arceau	Surface du BV : 844 km ²	QMNA5 = 0.0101 mm/mois
Année	Débit moyen annuel (mm/an)	10ème Module (mm/jour)	20ème Module (mm/jour)	Débit Minimum Biologique (mm/jour)
1980	247	0.0678	0.0339	0.0339
1981	498	0.1364	0.0682	0.0682
1982	379	0.104	0.052	0.052
1983	367	0.1005	0.0503	0.0503
1984	259	0.0711	0.0355	0.0355
1985	168	0.0462	0.0231	0.0231
1986	359	0.0983	0.0491	0.0491
1987	329	0.0901	0.045	0.045
1988	386	0.1056	0.0528	0.0528
1989	135	0.0371	0.0185	0.0185
1990	168	0.046	0.023	0.023
1991	188	0.0516	0.0258	0.0258
1992	230	0.063	0.0315	0.0315
1993	281	0.0769	0.0385	0.0385
1994	337	0.0924	0.0462	0.0462
1995	400	0.1096	0.0548	0.0548
1996	231	0.0633	0.0316	0.0316
1997	229	0.0627	0.0313	0.0313
1998	291	0.0796	0.0398	0.0398
1999	365	0.1001	0.05	0.05
2000	290	0.0794	0.0397	0.0397
2001	356	0.0975	0.0488	0.0488
2002	246	0.0673	0.0336	0.0336
2003	165	0.0453	0.0227	0.0227
2004	207	0.0567	0.0284	0.0284
2005	188	0.0515	0.0257	0.0257
2006	324	0.0887	0.0444	0.0444
2007	297	0.0813	0.0406	0.0406
2008	264	0.0723	0.0361	0.0361
2009	181	0.0496	0.0248	0.0248
2010	326	0.0893	0.0446	0.0446
2011	161	0.0441	0.022	0.022

Annexe 4.2 : Résultats des indicateurs hydrologiques observés pour l'Yonne à Corancy

	Code station : H2001020	Nom du BV: L'Yonne à Corancy	Surface du BV : 106 km ²	QMNA5 = 0.4812 mm/mois
Année	Débit moyen annuel (mm/an)	10ème Module (mm/jour)	20ème Module (mm/jour)	Débit Minimum Biologique (mm/jour)
1990	1093	0.2995	0.1498	0.2995
1991	779	0.2134	0.1067	0.2134
1992	911	0.2495	0.1248	0.2495
1993	735	0.2014	0.1007	0.2014
1994	1130	0.3095	0.1548	0.3095
1995	1064	0.2915	0.1457	0.2915
1996	710	0.1946	0.0973	0.1946
1997	548	0.1503	0.0751	0.1503
1998	877	0.2404	0.1202	0.2404
1999	989	0.2709	0.1354	0.2709
2000	812	0.2226	0.1113	0.2226
2001	1018	0.2789	0.1395	0.2789
2002	784	0.2147	0.1073	0.2147
2003	586	0.1605	0.0802	0.1605
2004	687	0.1882	0.0941	0.1882
2005	551	0.1511	0.0755	0.1511
2006	755	0.2069	0.1035	0.2069
2007	930	0.2547	0.1274	0.2547
2008	827	0.2266	0.1133	0.2266
2009	579	0.1587	0.0793	0.1587
2010	845	0.2314	0.1157	0.2314
2011	511	0.1400	0.0700	0.1400

Annexe 4.3 : Résultats des indicateurs hydrologiques observés pour l'Ource à Leuglay

	Code station : H0301010	Nom du BV: L'Ource à Leuglay	Surface du BV : 176 km ²	QMNA5 = 0.0638 mm/mois
Année	Débit moyen annuel (mm/an)	10ème Module (mm/jour)	20ème Module (mm/jour)	Débit Minimum Biologique (mm/jour)
1985	275	0.0753	0.0376	0.0638
1986	537	0.1471	0.0735	0.0735
1987	435	0.1192	0.0596	0.0638
1988	557	0.1525	0.0762	0.0762
1989	203	0.0557	0.0279	0.0557
1990	270	0.0739	0.0369	0.0638
1991	250	0.0686	0.0343	0.0638
1992	286	0.0784	0.0392	0.0638
1993	357	0.0978	0.0489	0.0638
1994	443	0.1214	0.0607	0.0638
1995	507	0.1388	0.0694	0.0694
1996	276	0.0755	0.0378	0.0638
1997	290	0.0794	0.0397	0.0638
1998	369	0.1010	0.0505	0.0638
1999	495	0.1356	0.0678	0.0678
2000	413	0.1132	0.0566	0.0638
2001	502	0.1376	0.0688	0.0688
2002	354	0.0969	0.0484	0.0638
2003	219	0.0599	0.0300	0.0599
2004	268	0.0734	0.0367	0.0638
2005	254	0.0696	0.0348	0.0638
2006	404	0.1107	0.0554	0.0638
2007	460	0.1260	0.0630	0.0638
2008	373	0.1023	0.0512	0.0638
2009	224	0.0613	0.0307	0.0613
2010	339	0.0930	0.0465	0.0638
2011	223	0.0610	0.0305	0.0610

Annexe 5: Récapitulatif des résultats pour les bassins versants étudiés obtenus avec les données simulés

Annexe 5.1 : Résultats des indicateurs hydrologiques simulés pour la Tille à Arceau

	Code station : U1224010	Nom du BV: La Tille à Arceau	Surface du BV : 844 km ²	QMNA5 = 0.1074 mm/mois
Année	Débit moyen annuel (mm/an)	10ème Module (mm/jour)	20ème Module (mm/jour)	Débit Minimum Biologique (mm/jour)
1980	388	0.1064	0.0532	0.1064
1981	296	0.081	0.0405	0.081
1982	382	0.1047	0.0524	0.1047
1983	312	0.0855	0.0427	0.0855
1984	196	0.0537	0.0268	0.0537
1985	375	0.1027	0.0514	0.1027
1986	315	0.0864	0.0432	0.0864
1987	399	0.1094	0.0547	0.1074
1988	150	0.041	0.0205	0.041
1989	204	0.0559	0.0279	0.0559
1990	213	0.0585	0.0292	0.0585
1991	195	0.0534	0.0267	0.0534
1992	238	0.0653	0.0326	0.0653
1993	415	0.1138	0.0569	0.1074
1994	290	0.0795	0.0398	0.0795
1995	313	0.0858	0.0429	0.0858
1996	275	0.0753	0.0376	0.0753
1997	271	0.0742	0.0371	0.0742
1998	345	0.0944	0.0472	0.0944
1999	349	0.0956	0.0478	0.0956
2000	453	0.124	0.062	0.1074
2001	310	0.0849	0.0424	0.0849
2002	305	0.0834	0.0417	0.0834
2003	220	0.0603	0.0301	0.0603
2004	185	0.0507	0.0254	0.0507
2005	301	0.0826	0.0413	0.0826
2006	298	0.0816	0.0408	0.0816
2007	294	0.0804	0.0402	0.0804
2008	173	0.0474	0.0237	0.0474
2009	235	0.0645	0.0322	0.0645
2010	243	0.0667	0.0333	0.0667
2011	393	0.1076	0.0538	0.1074

Annexe 5.2: Résultats des indicateurs hydrologiques simulés pour l'Yonne à Corancy

	Code station : H2001020	Nom du BV: L'Yonne à Corancy	Surface du BV : 106 km ²	QMNA5 = 0.6198 mm/mois
Année	Débit moyen annuel (mm/an)	10ème Module (mm/jour)	20ème Module (mm/jour)	Débit Minimum Biologique (mm/jour)
1980	637	0.1746	0.0873	0.1746
1981	706	0.1934	0.0967	0.1934
1982	1048	0.2871	0.1436	0.2871
1983	764	0.2093	0.1046	0.2093
1984	830	0.2274	0.1137	0.2274
1985	829	0.2273	0.1136	0.2273
1986	675	0.185	0.0925	0.185
1987	808	0.2213	0.1107	0.2213
1988	1182	0.3238	0.1619	0.3238
1989	1093	0.2996	0.1498	0.2996
1990	961	0.2632	0.1316	0.2632
1991	816	0.2235	0.1117	0.2235
1992	654	0.1792	0.0896	0.1792
1993	522	0.1431	0.0715	0.1431
1994	746	0.2043	0.1021	0.2043
1995	753	0.2063	0.1032	0.2063
1996	776	0.2125	0.1062	0.2125
1997	480	0.1315	0.0658	0.1315
1998	742	0.2033	0.1016	0.2033
1999	663	0.1817	0.0908	0.1817
2000	638	0.1748	0.0874	0.1748
2001	718	0.1968	0.0984	0.1968
2002	1038	0.2843	0.1421	0.2843
2003	762	0.2086	0.1043	0.2086
2004	835	0.2288	0.1144	0.2288
2005	836	0.229	0.1145	0.229
2006	666	0.1825	0.0913	0.1825
2007	815	0.2234	0.1117	0.2234
2008	1187	0.3252	0.1626	0.3252
2009	1083	0.2967	0.1484	0.2967
2010	978	0.268	0.134	0.268
2011	799	0.2188	0.1094	0.2188

Annexe 5.3 : Résultats des indicateurs hydrologiques simulés pour l'Ource à Leuglay

	Nom du BV: L'Ource à Leuglay	Code station : H0301010	Surface du BV : 176 km ²	QMNA5 = 0.1477 mm/mois
Année	Débit moyen annuel (mm/an)	10ème Module (mm/jour)	20ème Module (mm/jour)	Débit Minimum Biologique (mm/jour)
1980	462	0.1265	0.0632	0.1265
1981	382	0.1047	0.0524	0.1047
1982	537	0.1472	0.0736	0.1472
1983	187	0.0512	0.0256	0.0512
1984	261	0.0715	0.0357	0.0715
1985	276	0.0755	0.0377	0.0755
1986	276	0.0757	0.0379	0.0757
1987	286	0.0783	0.0391	0.0783
1988	508	0.1391	0.0695	0.1391
1989	399	0.1093	0.0547	0.1093
1990	303	0.0831	0.0415	0.0831
1991	304	0.0834	0.0417	0.0834
1992	362	0.0992	0.0496	0.0992
1993	432	0.1185	0.0592	0.1185
1994	389	0.1065	0.0533	0.1065
1995	602	0.1649	0.0825	0.1477
1996	418	0.1144	0.0572	0.1144
1997	352	0.0966	0.0483	0.0966
1998	220	0.0603	0.0301	0.0603
1999	246	0.0674	0.0337	0.0674
2000	404	0.1106	0.0553	0.1106
2001	408	0.1117	0.0558	0.1117
2002	356	0.0976	0.0488	0.0976
2003	189	0.0518	0.0259	0.0518
2004	312	0.0855	0.0427	0.0855
2005	287	0.0785	0.0393	0.0785
2006	477	0.1308	0.0654	0.1308
2007	370	0.1013	0.0506	0.1013
2008	535	0.1465	0.0733	0.1465
2009	186	0.0509	0.0255	0.0509
2010	269	0.0738	0.0369	0.0738
2011	268	0.0734	0.0367	0.0734

Annexe 6 : Détails et comparaison des données de Modules observés et simulés

Année	La Tille à Arceau			L'Yonne à Corancy			L'Ource à Leuglay		
	Qobs (mm/an)	Qsim (mm/an)	Ratio*	Qobs (mm/an)	Qsim (mm/an)	Ratio*	Qobs (mm/an)	Qsim (mm/an)	Ratio*
1980	247	388	-0,3634	-	-	-	-	-	-
1981	498	296	0,6824	-	-	-	-	-	-
1982	379	382	-0,0078	-	-	-	-	-	-
1983	367	312	0,1762	-	-	-	-	-	-
1984	259	196	0,3214	-	-	-	-	-	-
1985	168	375	-0,552	-	-	-	275	276	-0,0036
1986	359	315	0,1396	-	-	-	537	276	0,9456
1987	329	399	-0,1754	-	-	-	435	286	0,5209
1988	386	150	1,5733	-	-	-	557	508	0,0964
1989	135	204	-0,3382	-	-	-	203	399	-0,4912
1990	168	213	-0,2112	1093	961	0,1373	270	303	-0,1089
1991	188	195	-0,0359	779	816	-0,0453	250	304	-0,1776
1992	230	238	-0,0336	911	654	0,3929	286	362	-0,2099
1993	281	415	-0,3228	735	522	0,4080	357	432	-0,1736
1994	337	290	0,1620	1130	746	0,5147	443	389	0,1388
1995	400	313	0,2779	1064	753	0,4130	507	602	-0,1578
1996	231	275	-0,16	710	776	-0,0850	276	418	-0,3397
1997	229	271	-0,1549	548	480	0,1416	290	352	-0,176
1998	291	345	-0,1565	877	742	0,1819	369	220	0,6772
1999	365	349	0,0458	989	663	0,4917	495	246	1,0121
2000	290	453	-0,3598	812	638	0,2727	413	404	0,02227
2001	356	310	0,1483	1018	718	0,4178	502	408	0,2303
2002	246	305	-0,1934	784	1038	-0,2447	354	356	-0,0056
2003	165	220	-0,25	586	762	-0,2309	219	189	0,1587
2004	207	185	0,1189	687	835	-0,1772	268	312	-0,141
2005	188	301	-0,375	551	836	-0,3409	254	287	-0,1149
2006	324	298	0,0872	755	666	0,1336	404	477	-0,1530
2007	297	294	0,0102	930	815	0,1411	460	370	0,2432
2008	264	173	0,5260	827	1187	-0,3032	373	535	-0,3028
2009	181	235	-0,2297	579	1083	-0,4653	224	186	0,2043
2010	326	243	0,3415	845	978	-0,1359	339	269	0,2602
2011	161	393	-0,5903	511	799	-0,3604	223	268	-0,1679
Total	8852	9331	-0,0513	17721	17468	0,0144	9583	9434	0,015
Moyenne	276,625	291,5937	-	805,5	794	-	354,925	349,407	-
Minimum	135	150	-0,5903	511	480	-0,4653	203	186	0,4912
Maximum	498	453	1,5733	1130	1187	0,5147	557	602	1,0121

¹ : Module observé (mm/an)

² : Module simulé (mm/an)

³ : (Qobs/Qsim)-1

Annexe 7 : Détails et comparaison des données des débits minimum biologiques observés et simulés

	La Tille à Arceau			L'Yonne à Corancy			L'Ource à Leuglay		
	QminObs ¹	QminSim ²	Ratio ³	QminObs ¹	QminSim ²	Ratio ³	QminObs ¹	QminSim ²	Ratio ³
1980	0,034	0,106	-0,681	-	-	-	-	-	-
1981	0,068	0,081	-0,158	-	-	-	-	-	-
1982	0,052	0,105	-0,503	-	-	-	-	-	-
1983	0,050	0,086	-0,412	-	-	-	-	-	-
1984	0,036	0,054	-0,339	-	-	-	-	-	-
1985	0,023	0,103	-0,775	-	-	-	0,064	0,076	-0,155
1986	0,049	0,086	-0,432	-	-	-	0,074	0,076	-0,029
1987	0,045	0,107	-0,581	-	-	-	0,064	0,078	-0,185
1988	0,053	0,041	0,288	-	-	-	0,076	0,139	-0,452
1989	0,019	0,056	-0,669	-	-	-	0,056	0,109	-0,490
1990	0,023	0,059	-0,607	0,300	0,263	0,138	0,064	0,083	-0,232
1991	0,026	0,053	-0,517	0,213	0,224	-0,045	0,064	0,083	-0,235
1992	0,032	0,065	-0,518	0,250	0,179	0,392	0,064	0,099	-0,357
1993	0,039	0,107	-0,642	0,201	0,143	0,407	0,064	0,119	-0,462
1994	0,046	0,080	-0,419	0,310	0,204	0,515	0,064	0,107	-0,401
1995	0,055	0,086	-0,361	0,292	0,206	0,413	0,069	0,148	-0,530
1996	0,032	0,075	-0,580	0,195	0,213	-0,084	0,064	0,114	-0,442
1997	0,031	0,074	-0,578	0,150	0,132	0,143	0,064	0,097	-0,340
1998	0,040	0,094	-0,578	0,240	0,203	0,182	0,064	0,060	0,058
1999	0,050	0,096	-0,477	0,271	0,182	0,491	0,068	0,067	0,006
2000	0,040	0,107	-0,630	0,223	0,175	0,273	0,064	0,111	-0,423
2001	0,049	0,085	-0,425	0,279	0,197	0,417	0,069	0,112	-0,384
2002	0,034	0,083	-0,597	0,215	0,284	-0,245	0,064	0,098	-0,346
2003	0,023	0,060	-0,624	0,161	0,209	-0,231	0,060	0,052	0,156
2004	0,028	0,051	-0,440	0,188	0,229	-0,177	0,064	0,086	-0,254
2005	0,026	0,083	-0,689	0,151	0,229	-0,340	0,064	0,079	-0,187
2006	0,044	0,082	-0,456	0,207	0,183	0,134	0,064	0,131	-0,512
2007	0,041	0,080	-0,495	0,255	0,223	0,140	0,064	0,101	-0,370
2008	0,036	0,047	-0,238	0,227	0,325	-0,303	0,064	0,147	-0,565
2009	0,025	0,065	-0,616	0,159	0,297	-0,465	0,061	0,051	0,204
2010	0,045	0,067	-0,331	0,231	0,268	-0,137	0,064	0,074	-0,136
2011	0,022	0,107	-0,795	0,140	0,219	-0,360	0,061	0,073	-0,169
Total	1,212	2,531	-0,521	4,855	4,786	0,015	1,742	2,567	-0,321
Moyenne	0,038	0,079	-0,496	0,221	0,218	0,057	0,065	0,095	-0,268
Minimum	0,019	0,041	-0,795	0,140	0,132	-0,465	0,056	0,051	-0,565
Maximum	0,068	0,107	0,288	0,310	0,325	0,515	0,076	0,148	0,204

¹ : Débit Biologique Minimum observé (mm/jour)

² : Débit Biologique Minimum simulé (mm/jour)

³ : (QminObs/QminSim)-1

Impact du changement climatique sur la ressource en eau en Bourgogne
Détermination et analyse d'indicateurs hydrologiques à partir du modèle GR4J
pour la période 2010-2100

Résumé :

Le réchauffement climatique est devenu un des enjeux majeurs du XXIème siècle. C'est pour cette raison que des études sont menées pour tenter de prévoir son ampleur et ses conséquences sur le climat et sur la ressource en eaux, afin de s'adapter et de gérer au mieux ces impacts.

Le projet HYCCARE-Bourgogne a été lancé par l'organisme ALTERRE BOURGOGNE afin de déterminer l'impact du changement climatique sur la ressource en eau en Bourgogne. Dans le cadre de ce projet, l'objectif de ce rapport est d'identifier et de mettre en place des indicateurs hydrologiques qui permettront par la suite aux acteurs de l'eau de pouvoir anticiper et appliquer des mesures préventives sur la gestion de la ressource en eau en Bourgogne pour la période 2010-2100.

Devant les enjeux de la gestion de la ressource en eau, ce rapport se penchera uniquement sur les indicateurs d'étiage et plus particulièrement sur ceux qui permettent de calculer le débit minimum biologique d'un cours d'eau qui est un des indicateurs les plus utilisés par les gestionnaires de l'eau car il leur permet de gérer la ressource tout en respectant la réglementation imposée par le code de l'environnement. Afin de vérifier la fiabilité des indicateurs étudiés lorsqu'ils seront simulés sur la période 2010-2100, ce rapport se base sur le calcul de ces indicateurs à partir des débits observés, et sur la comparaison de ces mêmes indicateurs calculés à partir des débits simulés par le modèle hydrologique GR4J sur la période 1980-2010.

La méthodologie développée ici a permis de mettre en évidence la qualité des données hydrauliques en sortie du modèle GR4J, ainsi que d'identifier les biais qui pouvaient faire diminuer la fiabilité des indicateurs simulés.

Mots-clés : Indicateur hydrologique, Etiage, Changement Climatique