

Hydrologie, Changement Climatique, Adaptation, Ressource en Eau en Bourgogne : rapport final du projet HYCCARE Bourgogne

Anne-Cerise Tissot, Philippe Amiotte-Suchet, Etienne Brulebois, Thierry Castel, Vivien Ponnou-Delaffon, Yves Richard, Jean-Marc Brayer, Marjorie Ubertosi, Elsa Martin, Sandrine Petit, et al.

▶ **To cite this version:**

Anne-Cerise Tissot, Philippe Amiotte-Suchet, Etienne Brulebois, Thierry Castel, Vivien Ponnou-Delaffon, et al. (Dir.). Hydrologie, Changement Climatique, Adaptation, Ressource en Eau en Bourgogne : rapport final du projet HYCCARE Bourgogne. pp.1-115, 2016. hal-02166915

HAL Id: hal-02166915

https://institut-agro-dijon.hal.science/hal-02166915

Submitted on 27 Jun 2019

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

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

Programme GICC - Exercice 2012
Programme 190 – 0190-THUR-BSAF
Action 13 sous action 07

Convention 12-MCGOT-GICC-2-CVS-040
2012 – n°CHORUS 2100861291

Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer

Rapport final du projet HYCCARE Bourgogne

(HYdrologie, Changement Climatique, Adaptation, Ressource en Eau en Bourgogne)

HYCCARE
HYDROLOGIE, CHANGEMENT CLIMATIQUE, ADAPTATION, RESSOURCES EN EAU EN BOURGOGNE

Mots-clés : changement climatique ; modélisation ; hydrologie ; bassin versant ; territoire ; ressource en eau ; adaptation ; gouvernance ; collectifs ; gestion de l'eau ; politiques « climat »

Date de diffusion : **Avril 2016**

Auteurs :

TISSOT Anne-Cerise (Coordinatrice)
Alterre Bourgogne
La Bourdonnerie, 2 allée Pierre Lacroute, 21000 Dijon

AMIOTTE-SUCHET Philippe, BRULEBOIS Etienne, CASTEL Thierry, PONNOU-DELAFFON Vivien, RICHARD Yves
UMR 6282 Biogéosciences (CNRS / Université de Bourgogne)
6 bd Gabriel, 21000 Dijon

BRAYER Jean-Marc, UBERTOSI Marjorie
UMR 1347 Agroécologie (INRA / AgroSup Dijon / Université de Bourgogne)
17 rue Sully, BP 86510, 21065 Dijon Cedex

MARTIN Elsa, PETIT Sandrine, VERGOTE Marie-Hélène
UMR 1041 CESAER (INRA / AgroSup Dijon)
26 boulevard Docteur Petitjean, BP 87999, 21079 Dijon Cedex

DONEY Clément, PINSON Stéphanie, STOLLSTEINER Philippe
BRGM
Service des Actions Régionales, Service Géologique Régional Bourgogne Franche-Comté
27 rue Louis de Broglie, 21000 Dijon
Direction D3E (Eau, Environnement et Eco-technologies)
3 avenue Claude Guillemin, 45100 Orléans

BERTRAND François
UMR 7324 CITERES (Université François Rabelais de Tours / CNRS)
MSH Villes et Territoires, BP 60449, 37204 Tours Cedex 03

SOMMAIRE

Introduction **1**

I. HYCCARE : rendre lisible les impacts du changement climatique sur la ressource en eau en Bourgogne **1**

1. Un projet ambitieux qui s'inscrit dans la continuité de travaux menés depuis le début des années 2000 1
2. Un projet pluridisciplinaire qui s'articule autour de deux axes 2
3. Un projet partenarial entre chercheurs, institutionnels et acteurs locaux 6
4. Un projet GICC cofinancé localement sur trois ans et demi 9
5. Des résultats opérationnels attendus et obtenus 11

II. Approche méthodologique : penser le changement climatique, ses impacts et l'adaptation localement et en continu **13**

1. La construction de connaissances hydro-climatiques en continu 13
   a. Approche choisie 13
   b. Modèles utilisés 14
   c. Bassins versants étudiés 15
      Processus de sélection des bassins versants 15
      Représentativité des 13 bassins versant sélectionnés 17
      Sélection de 3 bassins versants pour la modélisation SWAT 19
      Des profils de bassins versants bourguignons pour extrapoler les résultats 20
   d. Configurations d'utilisation du modèle de climat régional 21
   e. Evaluation de la chaîne hydro-climatique 21
      Etapes 21
      Calibration de GR4J 22
      Calibration de Gardenia 23
      Calibration de SWAT 23
      Confrontation débits simulés et observés 24
2. Evaluation de la sensibilité des territoires au changement climatique 25
3. Analyses de la gestion de l'eau et de l'adaptation au changement climatique 26
4. Conclusion : une diversité d'approches sur une sélection de territoires 34

III. Le changement climatique perçu **36**

   a. La place des savoirs locaux 36
   b. Le changement climatique s'incarne localement 36
   c. Une diversité de signaux et d'histoires 37
   d. Conclusion : le savoir appréhende concrètement le changement climatique 39

IV. Le changement climatique d'hier à demain **40**

1. Le changement climatique observé et ses impacts sur la ressource en eau en Bourgogne 40

a. Une rupture dans les températures mais pas ou peu d'évolution des précipitations 40
b. Des débits déjà en baisse 42
2. Simulation du climat passé (1980-2011) et de ses impacts sur la ressource en eau 44
a. Des températures validées, des précipitations difficiles à simuler de manière robuste et nécessitant des post-corrections 44
b. Des simulations de l'évolution de la ressource en eau robustes 46
c. Bilan hydrique : évolutions et sensibilités 47
3. Quelles modalités du changement climatique à venir ? 51
a. Simulation de contrôle ARPEGE-WRF 1980-2005 : température et ETP réalistes, précipitations non validées 51
b. Simulation ARPEGE-WRF 2006-2098 : poursuite du réchauffement par paliers 52
c. Simulation ARPEGE-WRF 2006-2098 : sensibilité des précipitations au réchauffement 53
d. Simulation ARPEGE 2006-2098 : des précipitations également sensibles au réchauffement 55
4. Conclusion : vers un scénario d'évolution du climat et de la ressource en eau 56
V. Pénurie et gouvernance de l'eau, comment s'adapter ? 57
1. Dynamiques territoriales autour de la gestion de l'eau : huit situations 57
a. Les trois bassins versants en SAGE 57
Le bassin versant de la Tille 57
Le bassin versant de l'Arroux-Bourbince 58
Le bassin versant de l'Armançon 61
b. Les cinq bassins versants complémentaires 61
Le bassin versant du Nohain 61
Le bassin versant de la Nièvre 62
Le bassin versant de l'Yonne 62
Le bassin versant du Serein 62
Le bassin versant de la Seille 63
2. L'adaptation à la pénurie d'eau, un chemin inversé du futur à aujourd'hui 64
a. Le bassin versant de la Tille : la pénurie objet de politique publique, gérée par indicateurs 65
b. Le bassin versant de l'Arroux-Bourbince : la pénurie derrière l'abondance 66
c. Le bassin versant de l'Armançon : la pénurie et l'excès 67
d. La pénurie : passé, présent, futur 68
3. Gouvernance de l'eau et adaptation 69
a. L'eau, un secteur très réglementé et une fragmentation des compétences 69
b. Le SAGE, une procédure lourde 70
c. Les contrats, des systèmes de gouvernance hétérogènes, complexes et fragiles 70
d. Trouver la bonne échelle territoriale 71

e. Le recours au contrat, comme fenêtre de discussion et de négociation 72
f. Que veut dire participer ? 72
4. Quelles acceptions de l'adaptation aux changements climatiques? 75
a. Une adaptation à des risques tendanciels, sur le moyen et long terme 75
b. Arrêter le « non durable », l'adaptation sans regret 75
c. Des imaginaires de solutions contrastés 76
VI. Les vertus de l'incertitude et de la co-construction dans la recherche-action 79
1. Ateliers de design territorial et indicateurs hydrologiques : deux exemples de co-construction réussie 79
a. Les ateliers de design territorial 79
Deux territoires, une approche : la co-construction d'ateliers prospectifs et créatifs .. 79
Des objectifs et un fil rouge similaires : de l'appropriation des connaissances à la création collective 80
Bilan : des dynamiques locales stimulées, HYCCARE enrichi 82
b. Les indicateurs hydrologiques 83
2. Évolution du rapport aux acteurs et ses conséquences sur le projet 84
a. Du transfert de connaissance à la co-construction avec les acteurs 84
b. Impacts sur les travaux de recherche 84
3. Incertitude dans la recherche, incertitude dans l'action ? 85
a. Quels besoins de connaissances ? 85
b. Communiquer sur l'incertitude des résultats de recherche 86
c. Agir en tenant compte de l'incertain 86
Conclusion et perspectives 88
LISTE DES VALORISATIONS 89
LISTE DES RÉFÉRENCES CITÉES 92
LISTE DES ACRONYMES 99
LISTE DES FIGURES 101
LISTE DES TABLEAUX 103
LISTE DES ANNEXES 104
RÉSUMÉ 105
SYNTHÈSE 107

Introduction

HYCCARE Bourgogne est un projet de recherche-action retenu dans le cadre du programme Gestion et impacts du changement climatique (GICC). Il a été proposé et conduit par un ensemble de partenaires afin de rendre lisible les impacts du changement climatique sur la ressource en eau en Bourgogne pour les acteurs de ce territoire. Pluridisciplinaire, il a eu pour particularité méthodologique de penser le changement climatique, ses impacts et l'adaptation localement (à une échelle fine de territoire) et en continu. Le changement climatique est-il déjà perçu dans les territoires bourguignons ? Quelles ont été ses modalités d'expression par le passé ? Quels impacts sur la ressource en eau ? Que peuvent nous enseigner les simulations pour l'avenir ? La gestion actuelle de l'eau prend-elle en compte le risque de pénurie, et plus largement le changement climatique ? La gouvernance locale est-elle adaptée pour traiter de ces questions ? Comment les acteurs imaginent-ils s'adapter ? Autant de questions auxquelles HYCCARE Bourgogne a tenté d'apporter des éléments d'éclairage. Si toutes les réponses n'ont pas été apportées, ce projet de recherche-action a montré, via plusieurs travaux co-construits avec les acteurs du territoire, que les incertitudes ne sont pas un frein à l'action mais un élément d'aide à la décision.

I. HYCCARE : rendre lisible les impacts du changement climatique sur la ressource en eau en Bourgogne

Face au changement climatique, les politiques publiques se doivent de mettre en œuvre des stratégies d'adaptation. Cela implique que les effets du changement climatique soient clairement identifiés à l'échelle des territoires et appropriables par les décideurs. Cela implique également de réinterroger les dispositifs de gestion de l'eau à l'aune de ces éléments. C'est tout l'objet du projet de recherche-action HYCCARE Bourgogne, retenu dans le cadre de l'appel à propositions de recherche de 2012 du programme gestion et impacts du changement climatique (GICC). Interdisciplinaire et partenarial, il a été co-construit autour de deux axes : un premier sur la constitution de connaissances sur le changement climatique et ses impacts sur la ressource en eau ; un second autour de l'adaptation de la gestion de l'eau au changement climatique. Ces deux axes ont dialogué et ont adapté leur méthodologie au fur et à mesure de l'avancement des travaux pour arriver à la proposition finale que restitue ce rapport.

1. Un projet ambitieux qui s'inscrit dans la continuité de travaux menés depuis le début des années 2000

Historiquement, les connaissances sur le changement climatique ont essentiellement été construites aux échelles internationales et nationales. Cela est essentiel, car l'enjeu est global, mais cela ne permet pas de mobiliser localement les acteurs. Or c'est au niveau des territoires que les impacts du changement climatique se font et se feront sentir, et donc que l'adaptation est nécessaire. La ressource en eau est un sujet central car sa disponibilité est directement fonction du climat (précipitations, températures et évapotranspiration) et concerne un grand nombre d'activités et d'acteurs sur les territoires, de l'alimentation en eau potable, à l'agriculture en passant par le tourisme ou encore la gestion des risques.

C'est pourquoi Alterre Bourgogne, en partenariat avec l'UMR Biogéosciences[1], AgroSup Dijon, la Chambre d'agriculture de la Nièvre, et l'INRA, a engagé en 2008 un premier travail de spatialisation du changement climatique et de ses effets sur la ressource en eau à partir de l'exemple de l'année 2003. Ce partenariat s'inscrit dans la continuité de plusieurs travaux sur l'adaptation au changement climatique menés en Bourgogne depuis le début des années 2000. Il a permis d'articuler plusieurs modèles de façon interdisciplinaire, de regrouper chercheurs et acteurs, et de commencer à rendre « lisible » le risque auprès des acteurs Bourguignons. Toutefois il n'intégrait ni des simulations sur des décennies futures ni les échanges avec les nappes souterraines.

Forts de ce premier travail, les mêmes partenaires (Alterre Bourgogne, les UMR Biogéosciences et CESAER[2]), rejoints par les UMR Agroécologie[3], Sisyphe[4], le laboratoire CITERES[5] et le BRGM, ont proposé le projet HYCCARE Bourgogne (HYdrologie, Changement Climatique, Adaptation, Ressource en Eau) en réponse à l'appel à proposition GICC de 2012. L'objectif était de mettre à disposition des décideurs locaux les outils qui leur permettront de mieux prendre en compte le risque lié aux impacts du changement climatique sur la ressource en eau. Pour cela, HYCCARE propose de relever deux défis. Un premier défi tient à la construction de connaissances locales sur le changement climatique et ses impacts sur la ressource en eau en Bourgogne. Cela suppose un travail de simulations emboîtées effectuées par plusieurs communautés : climatologues, hydrogéologues et agronomes. Les échelles considérées (de la région aux petits bassins versants) doivent permettre aux acteurs Bourguignons d'appréhender l'aléa climatique, la sensibilité des milieux physiques et l'exposition différentielle des territoires. Le second défi est de préciser les différences territoriales et d'ouvrir localement des espaces de débat intersectoriel sur les collectifs à réunir, le type d'actions à mettre en place et en déduire des éléments de politiques publiques.

2. Un projet pluridisciplinaire qui s'articule autour de deux axes

Pour accompagner la prise en compte du changement climatique dans la gestion de la ressource en eau, le projet HYCCARE Bourgogne a été construit autour de :

- **La construction de connaissances** relatives au changement climatique et à ses impacts sur la ressource en eau, en termes de débits dans les cours d'eau et d'évolution du remplissage de la réserve utile des sols.
  Il s'agit à la fois d'analyser les observations des décennies passées et de réaliser des simulations jusqu'à l'horizon 2100. Ces dernières ont la particularité d'avoir été menées :
  - en continu, afin de mieux comprendre les modalités du changement climatique et de ses impacts ;
  - à une échelle fine pour correspondre aux échelles de gestion de l'eau des territoires.

  Ces simulations impliquent le développement d'une chaîne de modélisation hydro-climatique, les sorties des simulations climatiques servant de données d'entrées pour des simulations hydrologiques.
  Les résultats attendus étaient une meilleure connaissance des modalités d'évolution de l'aléa climatique à l'échelle de la Bourgogne et de la capacité de la ressource en eau à se régénérer à l'échelle de bassins versants. L'échelle spatio-temporelle fine de ces résultats contribue à rendre lisible le risque pour les acteurs du territoire. Des échanges aux différentes phases de ces travaux entre chercheurs et parties prenantes (institutionnels et gestionnaires de la

[1] CNRS / Université de Bourgogne
[2] INRA / AgroSup Dijon
[3] INRA / AgroSup Dijon / Université de Bourgogne
[4] Université Pierre et Marie Curie de Paris
[5] Université François-Rabelais de Tours

ressource) ont permis de prendre en compte les attentes et besoins de ces derniers, de favoriser l'appropriation des résultats et de co-construire des indicateurs.

- **L'analyse socio-économique** des territoires face au changement climatique et à ses impacts sur la ressource en eau.
  Il s'agit d'analyser la prise en compte et la gestion du risque climatique dans les territoires (rôle des connaissances, dynamiques locales, outils de gestion…). Cette recherche a été déclinée sur trois bassins versants choisis dans le périmètre des trois agences de l'eau partenaires du projet et représentant trois situations contrastées d'enjeux autour de la ressource en eau. Les résultats des recherches en climatologie et en hydrologie y ont été mis en débat auprès des gestionnaires de la ressource en eau via des « ateliers du climat » (aussi appelés « ateliers de design territorial »). Ce volet est également alimenté par des enquêtes complémentaires menées sur cinq autres bassins versants ainsi qu'à l'échelle régionale. Il comprend aussi des études de cas pour évaluer la sensibilité des territoires et de l'activité agricole au changement climatique.
  L'analyse des dynamiques autour des impacts et des pistes d'adaptation vise à identifier des leviers pour faire émerger une politique publique autour des questions du changement climatique et de la gestion de l'eau. Cet axe associe ainsi des regards disciplinaires en géographie, en sciences de gestion et en économie.

Le projet HYCCARE Bourgogne s'est ainsi caractérisé par des travaux pluridisciplinaires, une concertation importante des acteurs du territoire au fil des travaux ainsi que par le rapprochement des échelles spatio-temporelle et décisionnelle. Les principaux travaux réalisés dans le cadre de ce projet sont listés dans le Tableau 1.

Plus de 30 personnes ont été impliquées dans les travaux de recherche (cf. Tableau 2) relevant de diverses disciplines : climatologie, hydrogéologie, agronomie, économie, géographie, sciences sociales et de gestion, géomatique... Ce sont des chercheurs mais aussi des stagiaires, doctorants, post-doctorants et CDD. Les principaux laboratoires impliqués sont :

- L'UMR Biogéosciences (CNRS / Université de Bourgogne) avec les équipes CRC (Centre de Recherches de Climatologie) et SEDS (Systèmes, Environnement et Dynamiques Sédimentaires) ;
- L'UMR Agroécologie (INRA / AgroSup Dijon / Université de Bourgogne) ;
- L'UMR CESAER (Centre d'Economie et de Sociologie appliquées à l'Agriculture et aux Espaces Ruraux), INRA / AgroSup Dijon ;
- Le BRGM avec son Service Géologique Régional Bourgogne Franche-Comté et la Direction D3E (Eau, Environnement et Eco-technologies) d'Orléans.

Ont également été associés :

- L'UMR Sisyphe d l'Université Pierre et Marie Curie de Paris ;
- L'UMR CITERES de l'Université François-Rabelais de Tours.

Agence de l'environnement et du développement soutenable, Alterre Bourgogne a coordonné le projet, jouant son rôle reconnu de plate-forme d'échanges et de concertation pour « favoriser le passage à l'action ». Alterre se positionne comme accompagnateur, à l'interface entre le monde de la recherche, celui des institutions et celui des acteurs du territoire.

Tableau 1 : Récapitulatif des principaux travaux constitutifs du projet HYCCARE

Axe	Module	Phases
Axe 1 : construction de connaissances	Connaissance de l'aléa climatique à l'échelle de la Bourgogne	➢ Analyse de l'observé (changement climatique passé) ➢ Calage du modèle et post-corrections ➢ Simulations selon deux trajectoires et analyse
	Évolution des débits à l'échelle des bassins versants	➢ Choix des territoires d'étude (13) ➢ Analyse de l'observé (changement climatique passé) ➢ Calage des modèles et mise en place d'une chaîne de modélisation hydro-climatique ➢ Simulations des débits et analyse ➢ Construction de profils de bassins versant sur la Bourgogne et analyse (cf. Annexe F)
	Évolution du remplissage de la réserve utile des sols à l'échelle des bassins versants	➢ Choix du modèle ➢ Calage du modèle sur les bassins versants (3) ➢ Analyse de l'observé (changement climatique passé) ➢ Simulations et analyse
Axe 2 : analyse socio-économique des territoires	Analyse des impacts (études de cas)	➢ Impacts sur un territoire (bassin de la Tille - Grand Dijon) ➢ Impacts sur la production et la marge agricole ➢ Impacts sur le foncier agricole
	Analyse des territoires de gestion de l'eau	➢ Construction du sujet et choix des territoires d'étude (3) ➢ Entretiens auprès d'acteurs et observation de débats locaux ➢ Travaux prospectifs (ateliers de design territorial) ➢ Analyse
	Intégration dans les politiques de l'eau (cf. Annexe E)	➢ Construction du sujet et choix des territoires d'étude (5) ➢ Bibliographie et entretiens auprès d'acteurs ➢ Analyse
Mise à disposition des données et des connaissances		➢ Réflexion et choix d'outils ➢ Rencontre chercheurs – acteurs de l'eau : co-construction des types de connaissances à mettre à disposition
Coordination du projet		➢ Ingénierie de projet, suivi administratif et financier (y compris rapports) ➢ Création et alimentation de la plateforme collaborative (mise en ligne de documents) et rédaction de newsletters ➢ Organisation et suivi des réunions (COPIL, COS, rencontres chercheurs/acteurs, travaux de groupe etc.) ➢ Organisation d'un séminaire final

Tableau 2 : Récapitulatif des personnels impliqués dans les travaux de recherche d'HYCCARE

Organisme partenaire	UMR ou Service	Nom	Qualification / titre	Financement HYCCARE	Travaux
CNRS / Université de Bourgogne	UMR 6282 Biogéosciences, Equipe CRC	CASTEL Thierry	Maître de Conférences		Connaissance de l'aléa climatique : évolution du climat et scénarios climatiques
		RICHARD Yves	Professeur		
		ROSSI Aurélien	Post-doc	Oui	
		PONNOU-DELAFFON Vivien	CDD	Oui	
	UMR 6282 Biogéosciences, Equipe SEDS	AMIOTTE-SUCHET Philippe	Maître de Conférences, HDR		Connaissance des impacts : évolution de la ressource en eau à l'échelle de bassins versants
		BRULEBOIS Etienne	Stagiaire M2 2013, puis doctorant	Oui	
		ABADIE Damien	Stagiaire M1 2014		
		HAMMOU Lucile	Stagiaire M1 2015		
		RAINAT Yoann	Stagiaire M1 2015		
	UMR 6282 Biogéosciences, Equipe CRC	FOCK Séverine	Stagiaire M1 2013	Oui	
		BONNARD Vincent	Stagiaire M1 2014		
UPMC de Paris	UMR 7619 Sisyphe	LE MOINE Nicolas	Maître de Conférences		
BRGM	Orléans D3E (siège)	STOLLSTEINER Philippe	Ingénieur hydrologue	Oui	
		PINSON Stéphanie	Ingénieur hydrogéologue	Oui	
	Bourgogne	DONEY Clément	Ingénieur hydrogéologue		
AgroSup Dijon	UMR 1347 Agroécologie	UBERTOSI Marjorie	Maître de Conférences		Connaissance des impacts : évolution du remplissage de la réserve utile des sols
		VALLON Sophie	Stagiaire M1 2013	Oui	
		LEGRAS Olivier	Stagiaire M2 2014		
		BACHMANN Jérémy	Stagiaire M2 2015		
		BRAYER Jean-Marc	Ingénieur d'étude		Mise à disposition des données et des connaissances
INRA	UMR 1041 CESAER	PETIT Sandrine	Dr Ingénieur recherche		Analyse de la construction de collectifs autour des questions du changement climatique et des pistes d'adaptation
		VERGOTE Marie-Hélène	Maître de Conférences		
		DE FORNEL Delphine	CDD 2014	Oui	
		PONCET Marion	CDD 2015	Oui	
		MARTIN Elsa	Maître de Conférences		Analyses socio-économiques des impacts
		VAITEVICIUTE Jaùné	Stagiaire puis CDD 2014	Oui	
Université François Rabelais de Tours	UMR 7324 CITERES	BERTRAND François	Chargé de recherche (association ERACLES) associé au laboratoire CITERES	Oui	L'intégration du changement climatique dans les politiques de l'eau
Alterre Bourgogne		TOUSSAINT Hélène	Chargée de mission (2013-2014)	Oui	Coordination et animation du projet
		TISSOT Anne-Cerise	Chargée de mission (2015-2016)		
		DE FORNEL Delphine	Stagiaire M2 2014	Oui	Analyses socio-économiques des impacts
		SEYDOU Coulibaly	Stagiaire M2 2014	Oui	

3. Un projet partenarial entre chercheurs, institutionnels et acteurs locaux

Le projet a été porté par un collectif de chercheurs et de partenaires préoccupés par la gestion de l'eau, réuni par Alterre Bourgogne. La gouvernance du projet a été multiforme afin d'associer les différentes parties prenantes avec :

- **Un comité de pilotage**
  Il est composé des organismes de recherche impliqués (cf. Tableau 2), des partenaires financiers (Ministère de l'écologie, GIP Ecofor, ADEME, AELB, AESN, AERMC) ainsi que d'autres institutionnels de niveau régional (Conseil régional, DREAL, ONEMA, Météo France). Il a été réuni par Alterre environ une fois par an afin d'informer les partenaires de l'état d'avancement du projet et de prendre des décisions lorsque nécessaire.

- **Un comité d'orientation scientifique (COS)**
  Il réunit les organismes de recherche impliqués et Alterre afin de suivre plus finement l'état d'avancement des travaux et d'assurer leur transversalité. Il s'est réuni environ trois fois par an et a constitué un lieu de discussion et de co-construction au fil du projet. Au-delà des réunions du COS, des réunions de travail ont été organisées avec les chercheurs sur divers sujets.

- **Des rencontres régulières avec les acteurs du territoire**
  Selon les sujets et les étapes du projet, elles ont permis de :
  - recueillir les avis et besoins des acteurs du territoire (ex : choix des indicateurs hydrologiques en mars 2015) afin de proposer des résultats opérationnels, adaptés aux réalités de terrain ;
  - co-construire des étapes du projet (ex : préparation des ateliers de design territorial), permettant d'aller jusqu'au bout de la logique de « recherche-action » ;
  - restituer une partie des résultats du projet pour s'assurer de leur appropriation.

Cette gouvernance a permis d'assurer la transversalité du projet et de maintenir un lien fort avec les acteurs du territoire bourguignon tout au long du projet. Le Tableau 3 récapitule les principaux temps d'échanges qui ont rythmé la vie du projet.

Une des particularités du projet HYCCARE est que ses travaux n'ont pas été menés de manière linéaire, en parallèle les uns par rapport aux autres. De nombreux allers-retours ont eu lieu au sein des modules de recherche, entre équipes de recherche, et avec les gestionnaires de l'eau afin d'aboutir à une proposition cohérente, adaptée aux besoins des territoires et tenant compte des résultats obtenus au fur et à mesure du projet (cf. Figure 1).

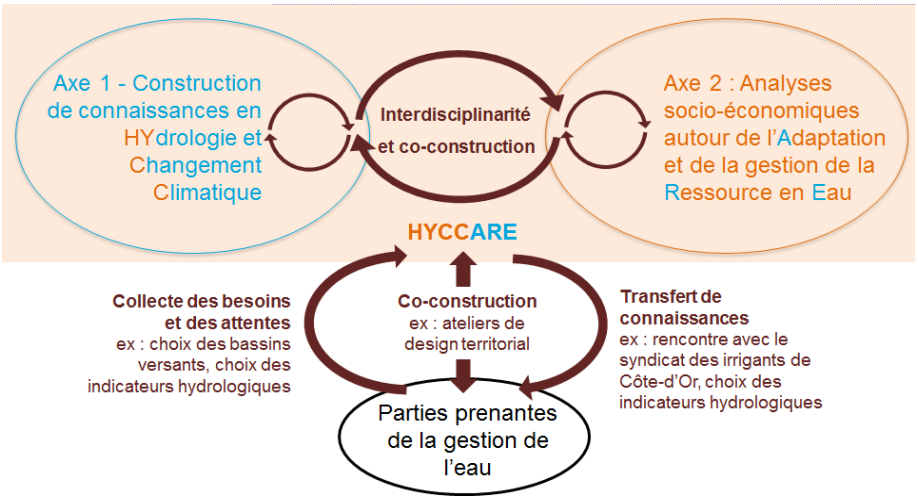


Figure 1 : Schéma des échanges au sein des axes, entre les axes et avec les acteurs du territoire dans le cadre du projet HYCCARE

Tableau 3 : Récapitulatif des principaux temps d'échanges au cours du projet HYCCARE

Date	Chercheurs	Acteurs	**Objet**	Nb de personnes
29/06/12	X	X	Présentation des modules de recherche, échanges (échelle de temps des simulations, périmètres des acteurs, localisation des simulations, vulnérabilité avec entrée agricole), coordination générale	20
6/07/12	X		COS n°1 : choix de l'échelle de temps (120 ans en continu : 1980 – 2100), des trajectoires (RCP 8.5 et 2.6), et du modèle (WRF et forçage EURO-CORDEX)	6
13/11/12	X		COS n°2 : démarrage des travaux de climatologie, critères de sélection des bassins versants, coordination des modules	9
16/01/13	X		COS n°3 : préparation du choix des bassins versants	12
7/02/13	X	X	Choix des bassins versants pour simulations hydro-climatiques : présentations et échanges avec les acteurs	24
Mars		X	Newsletter n°1	80
9/04/13	X		COS n°4 : choix des bassins versant, présentation de la méthodologie des climatologues, calendrier des travaux, organisation des échanges de données climatiques et hydrologiques, coordination des travaux des stagiaires	15
Mai		X	Newsletter n° 2	100
8/07/13	X		COS n°5 : point d'avancement des travaux, nécessité de post-corrections sur les pluies, choix du modèle de bilan hydrique (SWAT), offres de stages et contour des sujets, précisions sur l'orientation de l'axe 2, préparation de la rencontre chercheurs-acteurs du 10 septembre 2013	13
10/09/13	X	X	Présentation par les chercheurs, questions avec la salle, travaux d'échange en sous-groupe (àreprésentation qu'ont les gestionnaires de l'eau du changement climatique, périmètre des acteurs pour les travaux de l'axe 2)	35
19/11/13	X		Préparation des travaux de l'axe 2 sur les 3 bassins versants, calendrier et phases des travaux	7
14/01/14	X		COS n°6 : Tour de table des travaux en cours, préparation et coordination des stages, nécessité de préparer la mise à disposition des données, intérêt d'utiliser le design territorial pour l'axe 2	12
11/02/14	X	X	Présentation du design territorial par un consultant	12
Mars		X	Newsletter n° 3	120
7/03/14	X		Transfert d'une première série de données climatiques au pas de 3 km au BRGM (axe 1)	7
21/03/14	X		Organisation de la collecte de données pour le stage sur la rente foncière	6
10/07/14	X	X	Séminaire scientifique : premiers résultats et prochaines étapes présentation premiers résultats BRGM	18
06/11/14	X	X	Préparation des ateliers de design territorial sur le bassin versant de l'Armançon : présentation du bassin versant, présentation des travaux de modélisation hydro-climatique pour la Bourgogne, discussion des objectifs et des cibles des ateliers	14
24/11/14	X	X	Discussion entre partenaires sur le changement de coordination	7
17/12/14	X		COS n°7 : état d'avancement des travaux, point de calendrier et point budgétaire	12
07/01/15	X	X	1ère session d'ateliers de design territorial sur le bassin versant de l'Armançon	39
13/01/15	X	X	Comité de pilotage: état d'avancement et point budgétaire	15
22/01/15	X	X	2e session d'ateliers de design territorial sur le bassin versant de l'Armançon	35

27/03/15	X	X	Présentation des 1ers résultats de l'axe 1 et discussion sur le choix des indicateurs hydrologiques	19
27/03/15	X	X	Réunion avec le syndicat des irrigants de Côte-d'Or : présentation du projet, de quelques résultats et échanges	13
24/04/15	X		COS n°8 : état d'avancement des travaux et discussion sur les rencontres avec les acteurs passées et à venir	12
20/05/15		X	Présentation du projet HYCCARE à la réunion annuelle des climatologues des centres Météo France d'Auvergne, Bourgogne et Rhône-Alpes	20
26/05/15		X	Présentation du projet HYCCARE à la délégation Allier Loire-amont de l'agence de l'eau Loire-Bretagne	15
29/05/15	X		Finalisation de la synthèse des 1ers résultats de l'axe 1 (recto-verso) et débriefing des ateliers du bassin versant de l'Armançon	8
04/06/15		X	Présentation du projet HYCCARE à l'Assemblée générale d'Alterre	50
08/07/15	X	X	Préparation des ateliers de design territorial sur les bassins versants Tille-Ouche-Vouge : présentation des territoires, présentation du projet HYCCARE et retour d'expérience sur les ateliers menés sur l'Armançon, échange sur les attentes de chacun, 1er cadrage des ateliers (objectifs, cibles, contenus, livrables) et calendrier	16
Juillet		X	Newsletter n°4	
22/09/15	X	X	Préparation des ateliers de design territorial sur les bassins versants Tille-Ouche-Vouge : présentation de l'animatrice, tour de table, rappel des conclusions de la réunion du 08 juillet, élaboration du contenu des deux sessions d'ateliers	12
10/10/15		X	Présentation du projet HYCCARE à la conférence « Changement climatique et impacts sur l'eau et les milieux aquatiques » organisée par FNE Bourgogne	30
15/10/15	X		COS n°9 : état d'avancement des travaux et discussion sur les ateliers de design territorial à venir Présentation travaux BRGM	9
21/10/15	X	X	Présentation du projet HYCCARE à la Commission territoriale Seine-amont du bassin Seine-Normandie	50
13/11/15	X	X	1ère session d'ateliers sur les bassins versants Tille-Ouche-Vouge	37
03/12/15	X	X	2e session d'ateliers sur les bassins versants Tille-Ouche-Vouge	34
04/12/15	X		Transfert des données simulées au pas de 12 km au BRGM (axe 1)	5
10/12/15	X	X	Comité de pilotage: état d'avancement du projet et restitution des travaux du BRGM	17
13/01/16	X	X	Préparation de la réunion de restitution des ateliers Tille-Ouche-Vouge	7
25/01/16	X	X	État d'avancement du projet auprès du secrétariat permanent du programme GICC	11
02/02/16	X	X	Restitution des ateliers des bassins versants Tille-Ouche-Vouge	42
05/02/16	X		COS n°10 : préparation du rapport final (plan) et du séminaire de restitution (programme prévisionnel)	8
10/03/16		X	Présentation du projet HYCCARE au Comité de bassin Loire-Bretagne	50
12/02/16	X		Préparation du rapport final (plan détaillé, calendrier) et du séminaire de restitution (programme revu, calendrier)	10
17/03/16	X		Préparation du rapport final : point d'avancement, révision du plan détaillé	8
22/03/16	X		Préparation du séminaire de restitution : présentation et échanges autour des diaporamas de chacun	8
25/03/16	X	X	Séminaire final de restitution des travaux	130

Le projet a ainsi connu plusieurs inflexions par rapport au projet initial, les plus notables étant :

- Une place plus grande donnée aux observations, considérées comme plus « tangibles » pour les acteurs du territoire et plus robustes que les simulations.
- Des « allers-retours » entre l'observé et le simulé, entre les résultats climatiques et hydrologiques : ces travaux n'ont pas suivi une logique linéaire selon laquelle on observerait le passé puis on simulerait, et on travaillerait sur le climat puis sur les débits.
- Un glissement des questionnements sur l'adaptation : initialement pensés sous l'angle du rôle du collectif et de l'adaptation future, ils ont été élargis au rôle de l'individu et à l'adaptation du futur à aujourd'hui.
- L'apparition du sujet de la complexité de la gestion de l'eau dans les travaux sociologiques.

Les résultats du projet sont ainsi une co-construction pluridisciplinaire issue de processus itératifs et d'échanges avec le terrain, permis par la gouvernance choisie. Ce fonctionnement circulaire fait écho à la problématique initiale, qui s'est renforcée en cours du projet : penser le changement climatique et l'adaptation en continu.

4. Un projet GICC cofinancé localement sur trois ans et demi

Retenu dans le cadre de l'appel à proposition GICC de 2012, HYCCARE Bourgogne a bénéficié de financements du Ministère de l'environnement à hauteur de 52% du budget total (437 827€[6]) mais aussi du soutien local des agences de l'eau Loire-Bretagne (14%), Seine-Normandie (10%) et Rhône Méditerranée Corse (10%), ainsi que de l'ADEME Bourgogne (11%) et du BRGM (3% via de l'autofinancement) comme l'indique la Figure 2. Les subventions ont été attribuées par conventionnement à Alterre Bourgogne (temps de coordination, stages, prestations et frais de communication) ainsi qu'à l'INRA, AgroSup Dijon et l'Université de Bourgogne (frais de recherche et de stages) comme le montre le Tableau 4.

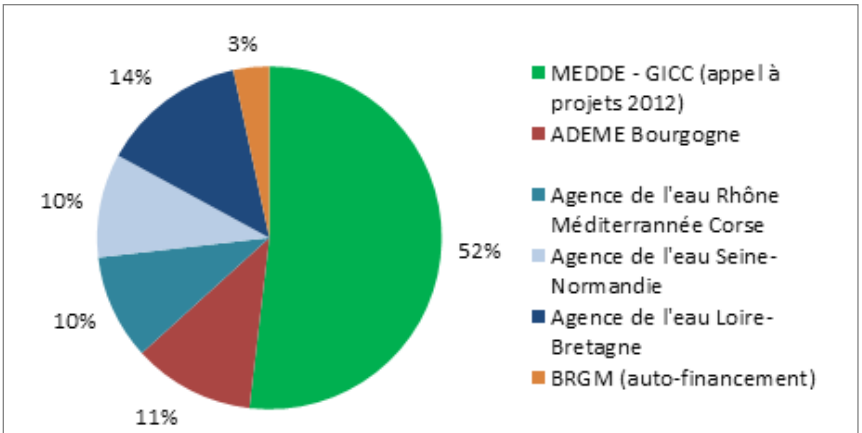


Figure 2 : Répartition des financements d'HYCCARE

Initialement prévu sur trois ans (2013-2015), le projet a été prolongé de six mois avec l'accord de tous les partenaires financiers. Cette demande a émané du collectif de chercheurs fin 2014 du fait de difficultés rencontrées avec les simulations climatiques (cf. page 51). Cela a également permis de donner un nouveau souffle à la coordination suite au changement de personnel à Alterre Bourgogne fin 2014. La fin du projet a ainsi été reportée au 15 avril 2016.

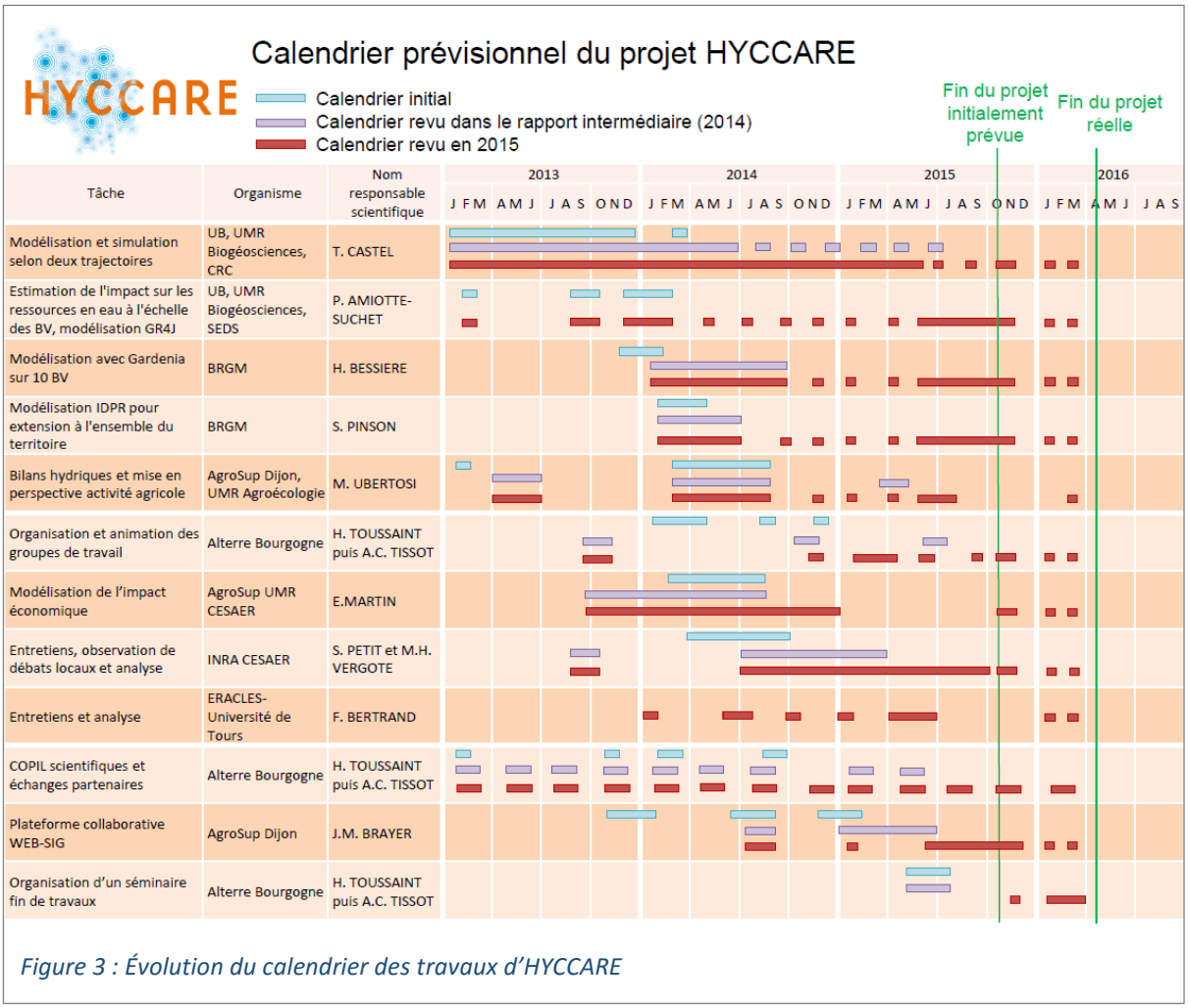
[6] Le montant total du projet a augmenté depuis la réponse à l'appel à proposition de 2012 du fait de l'augmentation des contributions des agences de l'eau (cf. Tableau 4).

Tableau 4 : Financements d'HYCCARE et leur répartition entre partenaires

Structures partenaires	**Alterre Bourgogne**			**Université de Bourgogne**	**AgroSup**	**INRA**	**Total HYCARRE**		
Organismes financeurs	Financements prévus initialement	Financements demandés	Financements accordés	Financements accordés	Financements accordés	Financements accordés	Financements prévus initialement	Financements demandés	Financements accordés
MEDDE - GICC (APR 2012)	78 568,77 €	78 568,77 €	78 500,00 €	79 390,10 €	11 960,00 €	57 169,13 €	227 088,00 €	227 088,00 €	227 019,23 €
ADEME Bourgogne				50 000,00 €			50 000,00 €	50 000,00 €	50 000,00 €
AERMC	30 000,00 €	43 300,00 €	43 300,00 €				30 000,00 €	43 300,00 €	43 300,00 €
AESN	20 000,00 €	43 300,00 €	42 948,00 €				20 000,00 €	43 300,00 €	42 948,00 €
AELB		43 300,00 €	59 800,00 €					43 300,00 €	59 800,00 €
Total financements extérieurs	**128 568,77 €**	**208 468,77 €**	**224 548,00 €**	**129 390,10 €**	**11 960,00 €**	**57 169,13 €**	**327 088,00 €**	**406 988,00 €**	**423 067,23 €**
BRGM (auto-financement)	14 760,00 €	14 760,00 €	14 760,00 €				14 760,00 €	14 760,00 €	14 760,00 €
Total	**143 328,77 €**	**223 228,77 €**	**239 308,00 €**	**129 390,10 €**	**11 960,00 €**	**57 169,13 €**	**341 848,00 €**	**421 748,00 €**	**437 827,23 €**

La Figure 3 illustre comment le calendrier des travaux a été adapté au cours du projet, entre ce qui était initialement prévu, les évolutions constatées lors de l'élaboration du rapport intermédiaire et celles qui ont finalement eu lieu.

Il est à noter que si le projet a démarré avec l'axe 1 (début 2013), la grande majorité des travaux a été conduite de manière concomitante sur 2014 et 2015 : les échanges entre équipes de recherche ont permis une réelle transversalité, voire parfois d'ajuster les travaux les uns par rapport aux autres.



Tâche	Organisme	Nom responsable scientifique
Modélisation et simulation selon deux trajectoires	UB, UMR Biogéosciences, CRC	T. CASTEL
Estimation de l'impact sur les ressources en eau à l'échelle des BV, modélisation GR4J	UB, UMR Biogéosciences, SEDS	P. AMIOTTE-SUCHET
Modélisation avec Gardenia sur 10 BV	BRGM	H. BESSIERE
Modélisation IDPR pour extension à l'ensemble du territoire	BRGM	S. PINSON
Bilans hydriques et mise en perspective activité agricole	AgroSup Dijon, UMR Agroécologie	M. UBERTOSI
Organisation et animation des groupes de travail	Alterre Bourgogne	H. TOUSSAINT puis A.C. TISSOT
Modélisation de l'impact économique	AgroSup UMR CESAER	E.MARTIN
Entretiens, observation de débats locaux et analyse	INRA CESAER	S. PETIT et M.H. VERGOTE
Entretiens et analyse	ERACLES-Université de Tours	F. BERTRAND
COPIL scientifiques et échanges partenaires	Alterre Bourgogne	H. TOUSSAINT puis A.C. TISSOT
Plateforme collaborative WEB-SIG	AgroSup Dijon	J.M. BRAYER
Organisation d'un séminaire fin de travaux	Alterre Bourgogne	H. TOUSSAINT puis A.C. TISSOT

Figure 3 : Évolution du calendrier des travaux d'HYCCARE

5. Des résultats opérationnels attendus et obtenus

Le projet HYCCARE a eu dès le départ vocation à produire des éléments opérationnels, appropriables par les acteurs, son objectif étant d'aider à la prise en compte du changement climatique dans les politiques de gestion de l'eau. Aussi, au-delà des productions scientifiques (cf. page 89), les partenaires du projet ont :

- mis à disposition des connaissances adaptées aux besoins des acteurs via internet (plateforme AGORA, site d'Alterre, GéoBourgogne...) ;
- présenté leurs résultats tout au long du projet (cf. Tableau 3 page 7) et organisé un séminaire final de restitution ouvert à tous les acteurs concernés par la gestion de l'eau et le changement climatique (chercheurs, institutionnels, gestionnaires, collectivités, socioprofessionnels…) ;
- produit des documents de synthèse : synthèse des premiers résultats de l'axe 1, compte-rendu des ateliers du climat du bassin versant de l'Armançon, compte-rendu des ateliers du climat, synthèse du rapport final à destination des responsables des politiques publiques… En outre, un

rappel des résultats sera fait dans un numéro de la publication « Repères » d'Alterre Bourgogne début 2017.

Au-delà des connaissances produites, le projet a également permis de sensibiliser les acteurs de la gestion de l'eau au changement climatique, de décloisonner les secteurs (gestion de l'eau, climat, aménagement du territoire…) et de favoriser les échanges constructifs entre acteurs (chercheurs, institutionnels, gestionnaires de l'eau, agriculteurs…).

Le changement climatique et la ressource en eau : s'adapter ensemble, ici et maintenant





Le séminaire de restitution des travaux d'HYCCARE a été organisé le vendredi 25 mars 2016 à Dijon (Maison des sciences de l'homme). Réunissant environ 130 personnes, d'horizons divers (chercheurs, institutionnels, animateurs, techniciens, élus locaux, associatifs, habitants…), il a permis aux chercheurs du projet de présenter leurs travaux et d'échanger avec les acteurs du territoire. Présentations et tables rondes avec élus locaux, animateurs et institutionnels se sont ainsi succédées tout en laissant la place au débat avec la salle. Les échanges ont été riches autour des résultats du projet et des solutions qui peuvent être mises en œuvre pour s'adapter face au changement climatique et à ses impacts sur la ressource en eau. Une conférence sur la gestion de crise a permis de prendre de la hauteur et de clôturer la journée sur des débats de fond. L'analyse des questionnaires de satisfaction montre que les participants ont largement apprécié cette journée, la diversité des intervenants et des sujets abordés ainsi que la qualité des débats.

II. Approche méthodologique : penser le changement climatique, ses impacts et l'adaptation localement et en continu

Le projet HYCCARE présente deux positions méthodologiques originales et structurantes : d'une part, penser le changement climatique en continu afin d'en connaître les modalités d'évolution et les modes d'adaptation qui en découleraient ; et d'autre part rapprocher les échelles de connaissance et d'action en travaillant pour et sur les territoires bourguignons. Ces deux choix sont présents dans la construction des connaissances hydro-climatiques comme dans l'analyse socio-économique des territoires face au changement climatique et à ses impacts sur la ressource en eau.

1. La construction de connaissances hydro-climatiques en continu

a. Approche choisie

A l'échelle d'un territoire, la connaissance hydro-climatique des effets du changement climatique ainsi que son appropriation par les acteurs et les usagers sont deux préalables à l'action. Savoir que ces effets sont pour partie d'ores-et-déjà perceptibles et mesurés sur « mon » territoire, permet de basculer d'une posture expectative à une posture active, condition nécessaire avant d'envisager d'évaluer les impacts de ces effets, de préparer la décision publique et de supporter les stratégies d'adaptation.

Pour élaborer une connaissance hydro-climatique fine (dans l'espace comme dans le temps) et utile (au regard des acteurs du territoire) deux lignes directrices ont prévalu : 1/ une démarche de (co)construction des connaissances, 2/ une régionalisation dynamique du climat à une maille fine de territoire, effectuée et analysée en continu sur une période de 120 ans. Ce choix a été motivé par la nécessité de :

- prendre en compte le forçage radiatif d'origine anthropique, mais également la variabilité climatique interne naturelle (interannuelle à multi-décennale) afin d'identifier les possibles effets de seuils ;
- raisonner et éprouver des stratégies d'adaptation en continu.

La discrétisation en périodes de 20 ou 30 ans définies *a priori*, généralement opérée dans la projection du changement climatique et de ses impacts constitue, nous semble-t-il, un verrou dans la construction et l'appropriation concertées des stratégies d'adaptation. La contrepartie du choix de la régionalisation dynamique en continu sur 120 ans effectuée dans HYCCARE est que cette méthodologie ne permet pas de réaliser des ensembles. Par conséquent, HYCCARE ne se donne pas pour ambition de documenter ou de quantifier les incertitudes. Il s'est plutôt agi ici de questionner et de documenter les changements déjà observés ainsi que les modalités de l'évolution à venir selon une trajectoire climatique possible, quoique pas plus probable qu'une autre en raison des nombreuses incertitudes qui pèsent sur le climat (Hawkins and Sutton, 2009 ; Moss *et al.*, 2010 ; Deser *et al.*, 2012). Ces incertitudes étant irréductibles, nous avons opté, à l'image de Pielke (2009), pour un renversement du point de vue et pensé l'adaptation et la décision pour qu'elles soient robustes en reconnaissant les limites de ce que nous pourrons connaître sur l'évolution de la ressource en eau. Ceci est d'autant plus vrai que la non-stationnarité (Milly *et al.*, 2008) rend le problème encore plus insoluble. L'alternative proposée est de se concentrer sur la science au-delà des modèles hydro-climatiques (cf. axe 2 du projet), de considérer les changements observés comme des prises sur l'avenir, et de considérer les

simulations régionalisées effectuées dans HYCCARE pour bâtir un scénario « crash-test » d'évolution de la ressource en eau et éprouver la robustesse des stratégies d'adaptation et des décisions publiques (Wilby and Dessai, 2010).

Produire une connaissance cohérente sur l'évolution des éléments du cycle de l'eau (précipitations, évapotranspiration, débit de surface, écoulement profond) au pas de temps journalier à l'échelle de petits bassins versants (quelques centaines à quelques milliers de km²) en terrain complexe est un challenge qui nécessite l'apport de données de haute qualité et de modèles spécifiques à chacun des compartiments étudiés. Pour répondre à ce défi nous avons mis en place une chaîne combinant observations (stations Météo-France, DREAL, BRGM), ré-analyses (ERA-Interim – Dee *et al.*, 2011), simulations (RCP 2.6 et 8.5 CNRM-CM5.1 – Voldoire *et al.*, 2012) et modélisation hydro-climatique régionale (cf. Figure 4).

b. Modèles utilisés

Par rapport à plusieurs travaux antérieurs (cf. projet GICC Explore2070 ; Boé *et al.*, 2007 ; Quintana Segui *et al.*, 2010), une démarche complémentaire de régionalisation climatique a été mise en œuvre. Ces travaux pointaient l'importance de l'incertitude associée au choix des méthodes de désagrégation statistique du climat produit par les Modèles de Circulation Générale (MCG). Dans HYCCARE, cette désagrégation est dynamique. Elle est effectuée avec le modèle non-hydrostatique à aire limitée Weather Research & Forecasting (WRF – Scamarock 2008). Xu *et al.* (2012) et Marteau *et al.* (2015) ont montré que les simulations effectuées à Dijon permettaient de régionaliser, au biais près, le climat à l'échelle de la Bourgogne. Pour cela, WRF implémente l'état de l'art de la physique de l'atmosphère (microphysique des nuages, convection, rayonnement, couche limite) et bénéficie d'un couplage « in-line » avec des modèles d'interaction (Chen and Dudhia, 2001 ; Oleson *et al.* 2008 ; Niu *et al.*, 2011) entre la surface continentale (sol, végétation, lac) et les basses couches de l'atmosphère. Combiné à une méthode de descente d'échelle utilisant des domaines emboîtés (cf. Annexe A), le modèle WRF permet de raffiner par étapes successives la maille à laquelle le climat est résolu.

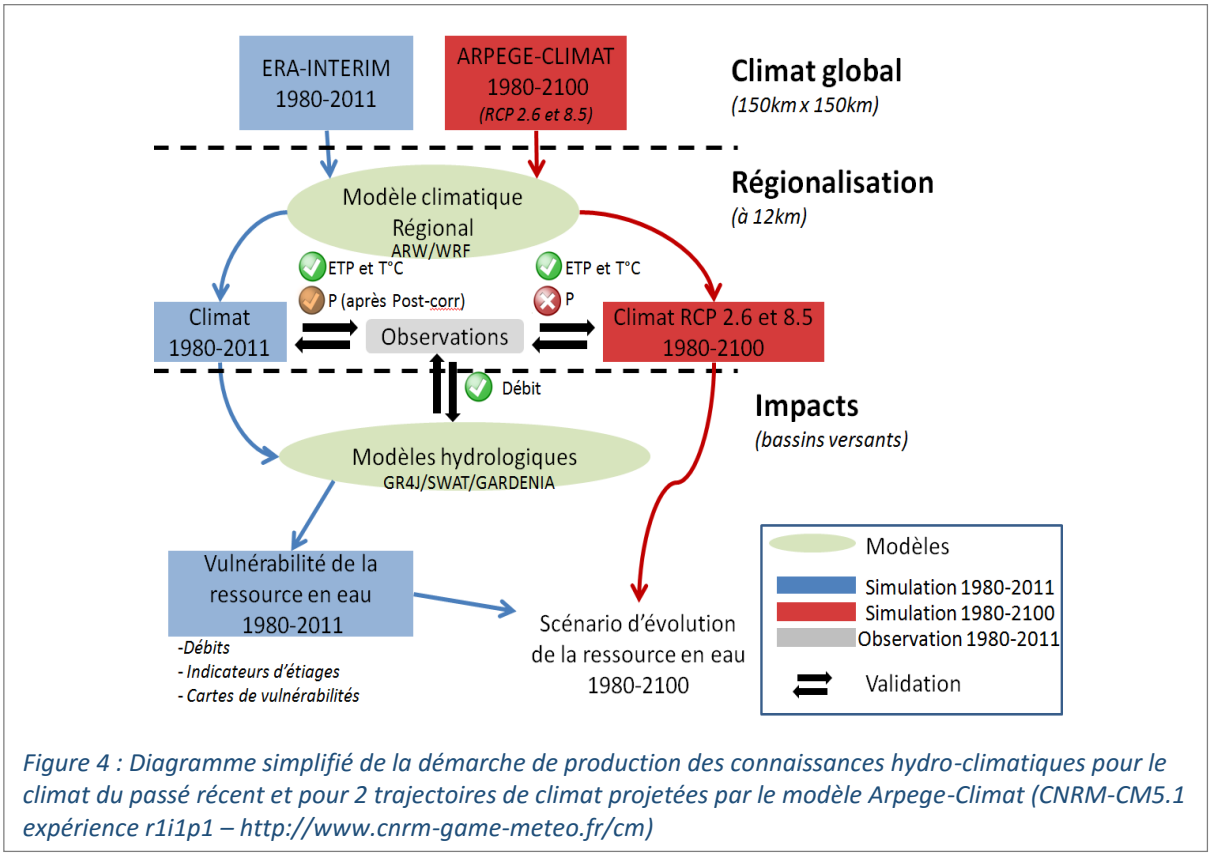


Figure 4 : Diagramme simplifié de la démarche de production des connaissances hydro-climatiques pour le climat du passé récent et pour 2 trajectoires de climat projetées par le modèle Arpege-Climat (CNRM-CM5.1 expérience r1i1p1 – http://www.cnrm-game-meteo.fr/cm)

Cette descente d'échelle s'accompagne d'un changement approprié dans la description des reliefs, du sol et de l'occupation du sol. Nous avons utilisé et adapté les données de l'IGN (BD ALTI®) et de Corinne Land Cover (2006 – http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2006-raster-3) pour décrire finement ces champs. Pour le sol, ce sont les données fournies avec le modèle WRF qui ont été utilisées (Miller and White, 2008).

Dans le cadre du projet HYCCARE, trois modèles hydrologiques ont été utilisés, à des fins différentes. Afin de simuler le débit en continu sur la période 1980-2100, deux modèles ont été choisis : GR4J (Perrin, 2007) développé par l'IRSTEA, et GARDENIA (Thiéry, 2003) développé et utilisé par le BRGM. Ce sont des modèles de type « pluie-débit » : ils s'attachent à transformer un signal d'entrée (la pluie) en un signal de sortie (le débit), à partir d'équations empiriques. Ils font également partie de la famille des modèles globaux, ce qui signifie qu'ils ne simulent le débit qu'à l'exutoire du bassin versant. Seuls deux paramètres climatiques journaliers, moyennés sur l'emprise du bassin versant, sont nécessaires pour simuler le débit : la pluie et l'évapotranspiration potentielle (ETP). En comparaison à d'autres modèles, ceux-ci possèdent des conceptualisations relativement simples et leur mise en œuvre reste rapide et peu coûteuse en temps de calcul. Il convient tout de même de les calibrer sur chaque bassin versant sur lequel ils sont appliqués.

Ces modèles pluie-débit consistent en plusieurs réservoirs interconnectés. Ils possèdent une fonction de production, qui permet de transformer la pluie "brute" en pluie efficace (fraction de pluie qui s'infiltre et recharge la nappe), et une fonction de transfert, qui calcule les délais de routage de l'eau dans le système. La principale différence entre GR4J et GARDENIA réside dans le fait que le niveau piézométrique (niveau des nappes) est pris en compte dans GARDENIA, ce qui contraint davantage la calibration de ses paramètres.

Afin de simuler les variables hydrologiques et hydro-géologiques de manière spatialisée, et ainsi d'identifier les différences territoriales, le modèle SWAT (Arnold et al., 1998) a été choisi. Il est développé aux États-Unis depuis 1980 par la Texas Agricultural and Mechanical University (TAMU). Le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) est un modèle agro-hydrologique semi-distribué, capable de prendre en compte la variabilité spatiale des données climatiques. Il permet ainsi, à l'échelle de sous-bassins, de simuler les flux d'eau et de matières, à chaque pas de temps, et dans chaque compartiment du cycle de l'eau : eau ruisselée, eau de subsurface, eau souterraine, jusqu'au cours d'eau. Toutefois, il nécessite plusieurs couches d'informations géographiques (occupation du sol, relief, types de sols) et climatiques (vent à 2m de hauteur, température minimum et maximum, précipitations, humidité relative, radiation solaire, au pas de temps journalier), et possède de très nombreux paramètres modifiables par l'utilisateur. La multiplicité des paramètres, ainsi que son temps de calcul plus important que GR4J et GARDENIA, en font un modèle plus complexe à mettre en place et à calibrer.

Ces différents modèles hydrologiques ont tous été utilisés et validés sur un grand nombre de bassins versants à travers le monde, et sont régulièrement appliqués dans le cadre d'études d'impacts du changement climatique.

c. Bassins versants étudiés

Processus de sélection des bassins versants

Le choix des bassins versants sur lesquels a été implémentée la chaîne de modélisation hydro-climatique (cf. Figure 4) résulte d'un compromis entre représentativité des caractéristiques hydro-climatiques, de couverture et d'usage des sols et de disponibilité des données hydrologiques.

Les données hydrologiques journalières utilisées pour la calibration/validation des modèles utilisés dans ce travail proviennent en totalité de la Banque Hydro du Ministère de l'environnement. Les stations hydrométriques retenues dans un premier temps devaient correspondre aux critères suivants :

- Couvrir la période d'observation 1980-2010 imposée par la calibration/validation des modèles climatiques ;
- Permettre une calibration/validation croisée sur au minimum 2 périodes de 10 ans (2 contrôles), mais si possible sur 3 périodes de 10 ans (6 contrôles) ;
- Drainer une superficie de bassin versant de 10 km^2 au minimum (robustesse des modèles) et de 5000 km^2 au maximum (représentativité de la diversité hydrologique du territoire bourguignon) ;
- Proposer des débits fiables, peu ou pas influencés par les activités humaines, sous forme de chroniques continues sur 20 ans minimum (peu ou pas lacunaires).

Il résulte de cette première sélection 61 stations (14 sur le bassin hydrographique de la Loire ; 26 sur celui du Rhône ; 21 sur celui de la Seine) qui ont ensuite été soumises à l'expertise de la DREAL Bourgogne. Au final, 28 stations ont été validées après élimination des stations présentant des débits douteux ou trop influencés. Ce jeu de 28 stations a alors fait l'objet d'une discussion avec les principaux acteurs et gestionnaires de l'eau pour constituer un pool de 10 à 15 stations maximum sur lesquels devait être implémentée la chaîne de modélisation hydro-climatique.

Finalement, un jeu de 13 stations (correspondant à autant de bassins versants, cf. Figure 5) a été arrêté sur la base de la qualité de leurs données hydrologiques, de leur représentativité (reflet de la diversité des situations hydrographiques, hydrogéologiques et d'occupation des sols en bourgogne) et des préoccupations des acteurs locaux (présence d'un syndicat mixte gestionnaire, schéma de gestion et d'aménagement des eau, contrat de rivière, zone de répartition des eaux, …).

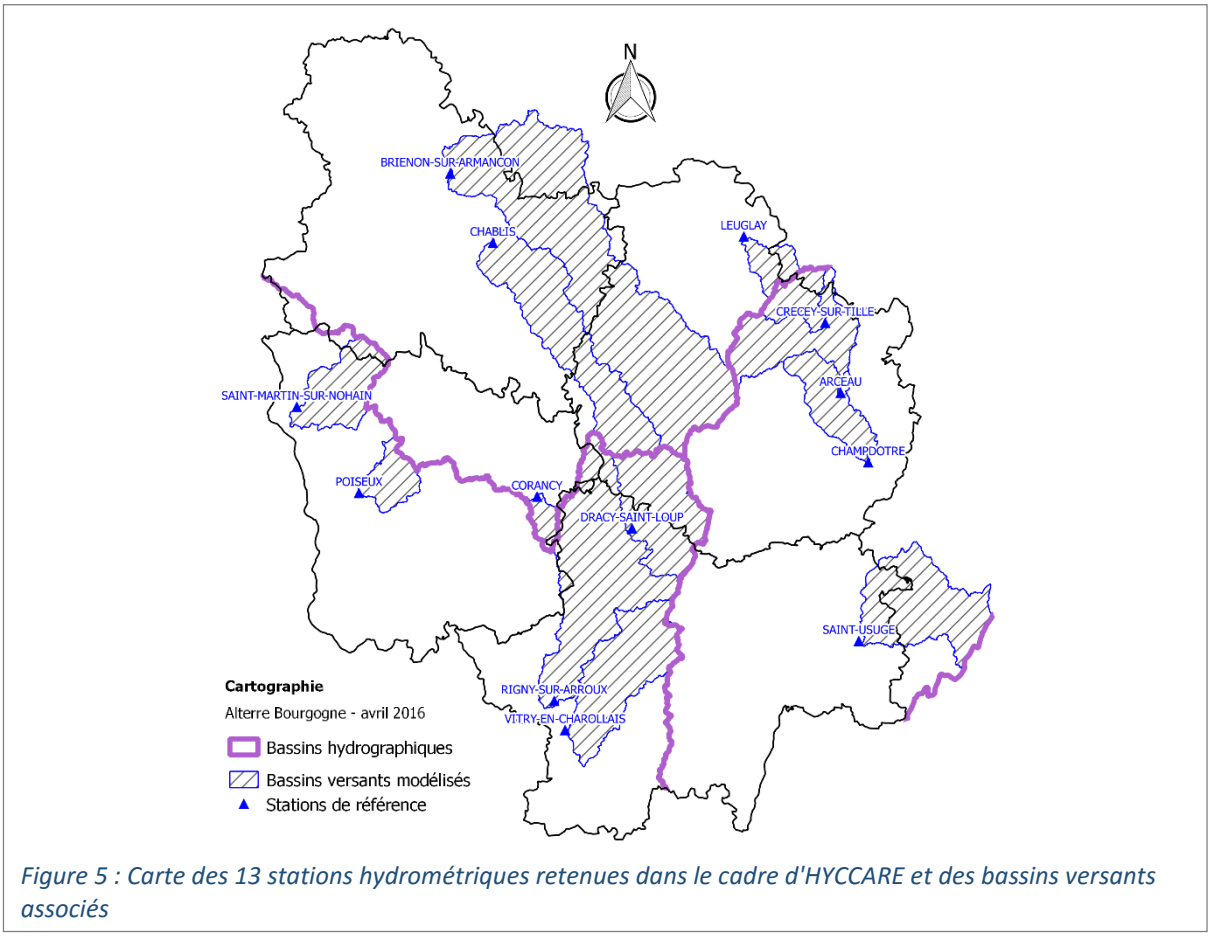


Figure 5 : Carte des 13 stations hydrométriques retenues dans le cadre d'HYCCARE et des bassins versants associés

Représentativité des 13 bassins versant sélectionnés

Concernant leur distribution hydrographique, sur les 13 stations hydrométriques retenues, quatre drainent des bassins versants du bassin du Rhône, quatre drainent des bassins versants de la Seine et cinq drainent des bassins versants de la Loire. La distribution des surfaces drainées est équilibrée entre les trois grands bassins hydrographiques (cf. Tableau 5 et

Tableau 6).

Tableau 5 : Superficie des 13 bassins versants sélectionnés dans le cadre d'HYCCARE et leur distribution relative sur chacun des 3 bassins hydrographiques

		Bassin hydrographique		
	Surface	Loire	Rhône	Seine
	(km²)	En % de la superficie		
13 bassins versants	12169	38	26	36
Territoire bourguignon	31716	31	27	42

Tableau 6 : Superficie relative des grands types d'occupation du sol (Corine Land Cover 2012, niveau 1 ; MEDDE/CGDD/SOeS, 2015) sur chacun des 13 bassins versants sélectionnés et sur l'ensemble du territoire bourguignon

Bassin versant (et grand bassin hydrographique de rattachement)	Surface	Territoires artificialisés	Territoires agricoles*	Forêts & milieux semi-naturels	Surfaces en eau
	Km²	en % de la surface du bassin versant			
La Tille à Crecey-sur-Tille (Rhône)	230	0.5	46.5	53.0	0.0
La Tille à Arceau (Rhône)	844	2.2	47.9	49.7	0.1
La Tille à Champdôtre (Rhône)	**1256**	**4.9**	**53.6**	**41.0**	**0.5**
La Seille à Saint-Usuge (Rhône)	885	2.8	64.6	31.9	0.6
L'Ource à Leuglay (Seine)	176	0.6	49.6	49.9	0.0
L'Armançon à Brienon-sur-Armançon (Seine)	**2977**	**2.3**	**66.6**	**31.0**	**0.1**
Le Serein à Chablis (Seine)	1117	1.4	72.0	26.6	0.1
L'Yonne à Corancy (Seine)	106	0.9	34.9	64.2	0.0
L'Arroux à Dracy-Saint-Loup (Loire)	**773**	**1.7**	**72.5**	**25.5**	**0.2**
L'Arroux à Rigny-sur-Arroux (Loire)	2266	2.3	63.6	33.9	0.2
La Bourbince à Vitry-en-Charollais (Loire)	827	9.3	74.8	15.1	0.8
Le Nohain à Saint-Martin-sur-Nohain (Loire)	476	1.2	72.3	26.5	0.0
La Nièvre d'Arzembouy à Poiseux (Loire)	235	0.4	56.0	43.6	0.0
total 13 bassins versants	12169	2.8	63.8	33.1	0.2
Bourgogne	31716	3.6	65.2	30.7	0.6

* y compris les prairies

En gras : bassins versants sélectionnés pour la modélisation SWAT

L'occupation du sol est, elle aussi, correctement représentée par les bassins versant drainés (cf. Tableau 6), avec des surfaces majoritairement agricoles à l'image du territoire bourguignon (près de 64%). Pris individuellement, les bassins versants montrent une bonne diversité de situations comme l'Yonne à Corancy, majoritairement forestier (64%), l'Ource à Leuglay ou la Tille à Arceau, également distribués entre forêts et agriculture et enfin des bassins versants très largement agricoles comme le Serein à Chablis, l'Arroux à Dracy-Saint-Loup et le Nohain à Saint-Martin-sur-Nohain (plus de 70% de surface agricole).

En termes de géologie, le territoire bourguignon est très varié : puisqu'il intègre les séries sédimentaires jurassiques, crétacés et tertiaires du grand ensemble multicouches du bassin parisien ; le socle granito-gneissique du Morvan ; les formations tertiaires du fossé bressan et du nivernais ; les alluvions des nombreux cours d'eau dont la Saône et la Loire. On ajoutera que les formations calcaires du jurassique (moyen et supérieur) et du Crétacé sont la plupart du temps karstifiées. En conséquence, la Bourgogne est très morcelée sur le plan hydrogéologique et ne bénéficie pas de la présence de grands systèmes aquifères comme dans beaucoup d'autres régions du territoire métropolitain. La superficie relative de chacun des grands ensembles géologiques affleurant sur chaque bassin versant (cf. Tableau 7) permet de vérifier que ces derniers représentent correctement le territoire bourguignon. On notera plus particulièrement que les formations les plus présentes en bourgogne (socle, calcaires du jurassique moyen et supérieur), ainsi que le karst, sont bien représentés par notre échantillon de bassins versants. Les formations tertiaires (Bassin Parisien et Bresse) sont par contre moins bien représentées. Comme pour l'occupation du sol, les 13 bassins versants offrent également une grande diversité de situations hydrogéologiques à intégrer pour la modélisation.

Tableau 7 : Superficie relative des grands ensembles géologiques sur chacun des 13 bassins versants sélectionnés dans le cadre d'HYCCARE et sur le territoire bourguignon

	SBV	Scl	Grs	Tr	Ls	Jm	Js	Cr	Te	Brs	All	Kst
	Km^2	en % de la surface du bassin versant										
La Tille à Crecey-sur-Tille	230	0.0	0.0	0.0	0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	99.8
La Tille à Arceau	844	0.0	0.0	0.0	1	97.6	0.0	0.0	0.0	0.6	1.2	97.5
La Tille à Champdôtre	**1256**	**0.0**	**0.0**	**0.0**	**0**	**73.5**	**0.0**	**0.0**	**0.0**	**18.2**	**7.9**	**73.4**
La Seille à Saint-Usuge	885	0.0	0.0	0.0	0	37.5	0.0	0.0	0.0	62.5	0.0	21.2
L'Ource à Leuglay	176	0.0	0.0	0.0	1	99.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5
L'Armançon à Brienon-sur-Armançon	**2977**	**1.0**	**0.0**	**1.4**	**23**	**26.9**	**18.7**	**12.1**	**12.1**	**0.0**	**4.8**	**15.2**
Le Serein à Chablis	1117	20.6	0.0	5.3	22	17.5	32.4	0.0	0.0	0.0	2.3	24.9
L'Yonne à Corancy	106	100.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
L'Arroux à Dracy-Saint-Loup	**773**	**29.1**	**13.8**	**39.9**	**15**	**0.8**	**0.0**	**0.0**	**1.3**	**0.0**	**0.0**	**0.0**
L'Arroux à Rigny-sur-Arroux	2266	57.7	16.9	16.7	5	0.4	0.0	0.0	3.1	0.0	0.0	0.0

La Bourbince à Vitry-en-Charollais	827	27.0	35.7	0.0	0	19.8	0.0	0.0	17.6	0.0	0.0	0.0
Le Nohain à Saint-Martin-sur-Nohain	476	0.0	0.0	0.0	0	10.5	86.1	0.0	3.3	0.0	0.0	0.1
La Nièvre d'Arzembouy à Poiseux	235	3.1	0.0	1.3	22	73.3	0.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
total 13 bassins versants	12169	17.5	6.4	6.5	10	31.9	10.9	3.0	5.0	6.5	2.3	23.8
Bourgogne	31716	16.5	2.5	2.9	9	26.4	10.7	2.9	13.7	10.8	4.7	21.5

calculé d'après la BD LISA v1, (Seguin et al., 2013)
En gras : bassins versants sélectionnés pour la modélisation SWAT
S : surface - Scl: roche de socle du Morvan et du Massif Central (granites, gneiss,...) - Grs: grès, argilites et schistes du Permo-carbonifère - Tr: grès & argiles du Trias - Ls: marnes du lias - Jm: calcaires du jurassique moyen - Js: calcaires du jurassique supérieur - Cr: crétacé inf. du Bassin Parisien - Te: tertiaire du Bassin Parisien - Brs: formations tertiaires de la Bresse - All: alluvions quaternaires - kst: formations karstiques

Sélection de 3 bassins versants pour la modélisation SWAT

Le modèle semi-distribué SWAT, utilisé notamment pour simuler la variabilité spatiale d'indicateurs comme la recharge des aquifères ou le remplissage de la réserve utile des sols, a été implémenté sur 3 des 13 bassins versants. Les bassins versants de l'Arroux à Dracy-Saint-Loup, de la Tille à Champdôtre et de l'Armançon à Brienon-sur-Armançon ont été choisi pour leur capacité à représenter la diversité de fonctionnement des hydro-systèmes bourguignons d'une part, parce qu'ils constituaient un terrain de choix pour l'analyse socio-économique d'autre part (cf. page 26).

La Tille à Champdôtre est un bassin versant dont le substratum est majoritairement constitué de calcaires du jurassique moyen (près de 75% de sa surface), fortement karstiques, et de formations plutôt argileuses du fossé bressan. Les réservoirs aquifères sont en grandes majorité localisés dans les calcaires karstifiés. L'occupation du sol, comportant peu de prairies, est partagée entre surfaces cultivées (48,5 %) et milieux naturels essentiellement forestiers (41%).

Le bassin de l'Arroux à Dracy-Saint-Loup possède quant à lui un substratum principalement composé de roches détritiques du trias et du permo-carbonifère, de roches de socle (gneiss et granites) et des marnes du lias. Les aquifères sont limités aux grès du permo-carbonifères et du trias et aux fines couches d'altération du socle (arène granitique). D'un point de vue de l'occupation du sol, le bassin de l'Arroux à Dracy-Saint-Loup comporte peu de surfaces de culture (16%) et est majoritairement occupé par la prairie et la forêt (56 et 25 % respectivement).

L'Armançon a l'intérêt de présenter un territoire plus vaste (près de 3000 km^2) et donc logiquement plus diversifié tant sur le plan de son substratum géologique que sur celui de son occupation du sol. Les aquifères sont nombreux et localisés principalement dans les calcaires et les craies du jurassique au tertiaire assez largement karstifiés. Une part non négligeable du territoire est occupée par les formations marneuses peu aquifères du Lias. Les sols sont majoritairement occupés par les activités agricoles, dont une part non négligeable de prairies (cf. Tableau 8).

Tableau 8 : superficie relative des grandes catégories d'occupation du sol sur les 3 bassins versants sélectionnés pour la modélisation SWAT (d'après la BD Corine land Cover 2012 ; MEDDE/CGDD/SOeS, 2015)

	Surface	Territoires artificialisés	Surfaces cultivées	Prairies	Forêts	Plans d'eau
	Km²	en % de la surface du bassin versant				
La Tille à Champdôtre	1256	4.9	48.5	5.1	41.0	0.5
L'Armançon à Brienon-sur-Armançon	2977	2.3	45.7	20.8	31.1	0.1
L'Arroux à Dracy-Saint-Loup	773	1.7	16.4	56.1	25.5	0.2

Des profils de bassins versants bourguignons pour extrapoler les résultats

Afin de pouvoir extrapoler les résultats obtenus sur les bassins versants sélectionnés à l'ensemble de la Bourgogne, un travail de typologie des bassins versants a été mené par le BRGM. Il s'agit d'identifier différentes classes de bassins versants à partir d'une sélection d'indicateurs caractérisant leur fonctionnement. L'analyse a abouti à cinq classes réparties sur l'ensemble de la zone d'étude comme le montre la Figure 6. Ainsi les résultats obtenus sur un bassin versant étudié seraient extrapolables aux bassins versants appartenant à la même classe. La méthodologie et les résultats de ce travail sont présentés en Annexe F. Ils ne figurent pas en détail dans ce rapport car le travail d'extrapolation n'a pas pu être finalisé du fait du retard pris par les simulations climatiques, et plus généralement par le projet.

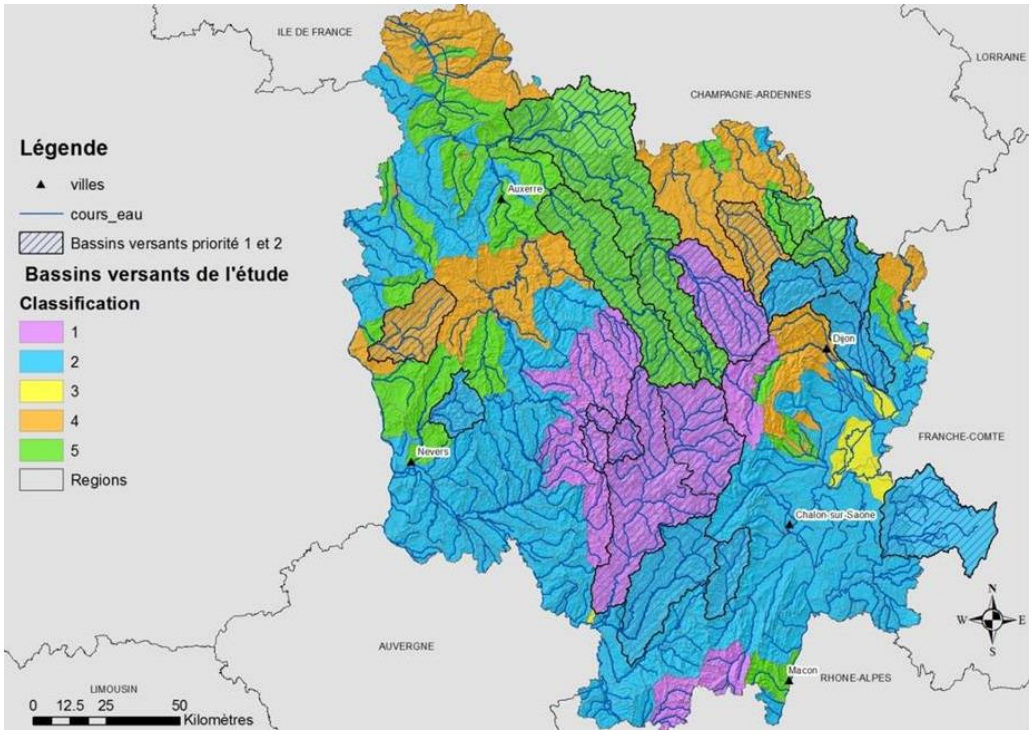


Figure 6 : Carte présentant les bassins versants selon la typologie du BRGM (5 grands types de fonctionnement hydrologique identifiés)

d. Configurations d'utilisation du modèle de climat régional

La résolution dynamique du climat par WRF a été produite à la maille de 12 km[7] et en continu pour trois types de configurations :

- Configuration 1 : sur 30 ans (1980-2011) avec les données de forçage des réanalyses ERA-Interim toutes les six heures ;
- Configuration 2 : sur 25 ans (1980-2005) avec les données de forçage historique du MCG Arpege-Climat ;
- Configuration 3 : sur 93 ans pour le climat projeté (2006-2098) avec les données de forçage des trajectoires RCP2.6 et 8.5 (Moss et al. 2010, Taylor et al. 2012) simulées par le MCG Arpege-Climat (expérience r1i1p1).

La première de ces trois configurations a permis l'évaluation de la chaîne hydro-climatique (Rossi *et al.*, 2014 et Brulebois *et al.*, 2014), détaillée dans le paragraphe suivant. Le modèle WRF y est forcé latéralement toutes les 6h avec les ré-analyses ERA-Interim.

Pour les configurations 2 et 3, il convenait de régionaliser les simulations et projections climatiques issues d'un MCG et non plus de réanalyses bénéficiant d'assimilation. En conséquence, le climat est ici virtuel : même si les années sont écoulées (1980-2005), aucune comparaison avec l'observation, si ce n'est en termes purement statistiques, n'est possible. Le modèle WRF est alimenté latéralement par le MCG ARPEGE forcé par des concentrations de GES observées (1980-2005) ou définies selon deux trajectoires radiatives (2.6 et 8.5), dites RCP dans le cinquième rapport du GIEC (IPPC, 2013), ce sur la période 2006-2098. Les modalités (saisonnalité, distribution statistique, ...) du climat simulé par la chaîne ARPEGE-WRF ont été comparées aux modalités du climat observé. L'évolution des températures, de l'ETP et des précipitations ont été analysées sur l'ensemble de la période 1980-2098.

Concernant températures et ETP, les modalités (saisonnalité, distribution statistique, …) simulées par la chaîne de modélisation ARPEGE-WRF sur la période de contrôle (1980-2005) sont conformes à celles produites par ERA-WRF. Ceci permet d'analyser les valeurs simulées de température et d'ETP sur le siècle à venir, période 2006-2098, avec une certaine confiance (nonobstant les incertitudes liées aux trajectoires...). En revanche, concernant les précipitations, un biais est identifié : elles sont surestimées en saison chaude. Nous avons développé et appliqué des méthodes de post-corrections pour rectifier ce biais. Mais ce biais, fonction de la température, est non constant au cours du XXI^{e} siècle, tandis qu'une correction statistique, par essence, s'applique de manière constante dans le temps. Nous n'accordons donc pas de confiance suffisante dans la simulation des précipitations effectuées sur 2006-2098, même post-corrigées. Pour 2006-2098, les simulations de température et d'ETP produites par HYCCARE sont informatives. Nous avons adossé deux ateliers territoriaux sur ces séries et reportons les principaux résultats dans ce rapport. En revanche, les simulations de précipitations et de débits n'ont pas été et ne sont pas présentées. En cela HYCCARE témoigne de la difficulté d'utiliser des précipitations simulées pour produire une évolution robuste des débits simulés.

e. Evaluation de la chaîne hydro-climatique

Etapes

Pour évaluer la chaîne hydro-climatique, trois étapes sont à distinguer :

[7] Dans le projet soumis la résolution des simulations climatiques était envisagée à la maille de 3km. Cette résolution a été abandonnée au profit de la résolution 12 km. Ce choix pragmatique (économie de temps de calcul) fut étayé par plusieurs publications récentes montrant que la simulation des précipitations à haute résolution (< 5km) n'apportait pas une plus-value significative comparativement à des résolutions de 10-12km (Kendon et al., 2012 ; Chan et al., 2013 ; Boulard, 2016). En effet, le seul gain significatif de la très haute résolution et de la prise en compte explicite de la convection en mode non-hydrostatique, est géographique, ce principalement grâce à une meilleure prise en compte du relief (Tselioudis et al., 2012).

- Confrontation entre variables (température et précipitations) simulées (ERA-WRF) et observées (Météo France brutes ou préalablement interpolées selon des méthodes empruntant à la géostatistique) ;
- Paramétrisation de modèles hydrologiques (GR4J, Gardenia, SWAT) à partir du climat (précipitations et ETP) observé et simulé et des débits et niveaux piézométriques observés ;
- Simulations hydro-climatiques puis confrontation entre débits simulés et observés.

L'étape 1 a permis de mesurer la qualité du climat simulé et les biais associés, par comparaison directe avec les observations aux stations. Cette qualité est déclinée aux pas de temps annuel et interannuel ainsi qu'à plusieurs échelles spatiales (Bourgogne entière et infra Bourgogne). Le calage des paramètres des modèles hydrologiques à partir de quatre jeux de données climatiques (observées ponctuellement, interpolées selon des méthodes empruntant à la géostatistique à la maille 12 km, produits mixtes entre observations et réanalyses -SAFRAN- et simulées par la chaîne ERA-WRF) réalisé à l'étape 2 a conduit à évaluer la capacité et la robustesse des modèles hydrologiques à reproduire les débits observés. Indirectement, cette calibration est une première évaluation de la qualité des précipitations et de l'ETP simulées par WRF lorsque ce dernier est alimenté latéralement par des réanalyses (ERA). Enfin la confrontation entre débits observés et simulés à partir d'un même jeu de calage a eu pour objet de préciser les biais des simulations WRF forcées par ERA et la nécessité de mettre en place une post-correction des précipitations simulées dynamiquement selon cette chaîne.

Parallèlement à cette phase, les données observées du climat et des débits des cours d'eau pour la période 1961-2011 ont été analysées afin de caractériser les modalités du réchauffement climatique en Bourgogne et ses impacts sur la ressource en eau (Brulebois *et al*., 2015).

L'étape 2 concerne la paramétrisation des modèles hydrologiques pour chacun des bassins versants. Le calage est réalisé à partir des chroniques de débits des stations hydrométriques, ainsi que des niveaux piézométriques de l'aquifère pour le modèle GARDENIA, définies auparavant comme les exutoires des bassins versants étudiés. Il consiste à modifier les paramètres du modèle afin que celui-ci reproduise au mieux les débits, et éventuellement niveaux piézométriques, observés. Après chaque modification de paramètre, la performance du modèle est testée grâce au calcul d'un critère de performance tel que le R^2 ou le critère de Nash (Nash, 1970). Lorsque la performance du modèle est jugée satisfaisante, le modèle est dit calibré. Afin d'éviter une paramétrisation aberrante du modèle, qui consisterait en une bonne reproduction des débits pour de mauvaises raisons, la modification des paramètres doit se faire dans un domaine de variation raisonnable.

Calibration de GR4J

Afin de prendre en compte l'incertitude liée aux différents jeux de données de précipitations disponibles (observé ponctuellement, observations interpolées, SAFRAN, et ERA-INTERIM/WRF), des calibrations de GR4J ont été réalisées successivement sur ces qautre jeux de données. De plus, plusieurs fonctions objectifs (FO) à optimiser ont été utilisées durant ces calibrations : critère de Nash et Sutcliff sur les débits, ses variantes sur le logarithme et la racine carrée des débits (respectivement sensibles aux débits faibles et aux débits moyens), ainsi qu'un critère basé sur la fréquence de distribution des débits. A chaque fois, la même évapotranspiration potentielle (ETP) a été utilisée (ETP issue de ERA-INT/WRF). Ainsi, pour chacun des bassins versants, 16 jeux de paramètres de GR4J ont été déterminés (4 jeux de pluies que multiplient 4 FO). Lors de la projection des modèles sur le siècle à venir, ce sont ces différents jeux de paramètres qui seront utilisés pour projeter GR4J. Cela permettra d'obtenir non pas une trajectoire d'évolution des débits, mais un « faisceau », prenant ainsi en compte l'incertitude liée à la qualité des données utilisées en calibration, et à la FO. La Figure 7 montre les différentes valeurs que prend le paramètre X3 de GR4J (paramètre définissant le volume du réservoir de routage, en mm) lors de ces multi-calibrations sur les 13 bassins versants, et la performance du modèle associé à cette calibration. On voit que pour l'ensemble des bassins versants, la performance du modèle reste satisfaisante (une grande majorité des calibrations montre un coefficient NS supérieur à 0.5), quel que soit le type de précipitations utilisé et la FO choisie. On remarque également que la

distribution du paramètre calibré, ici X3, est similaire quel que soit le jeu de précipitation, ce qui rassure quant à la fiabilité des données de précipitations.

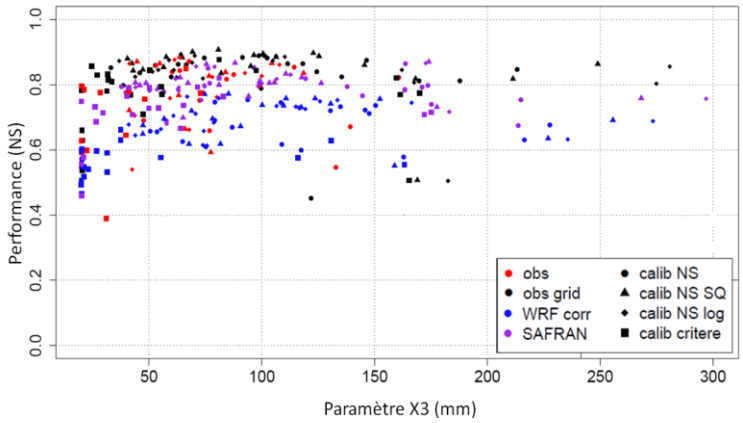


Figure 7 : Performance de GR4J (critère NS) en fonction de la valeurs du paramètre X3 de GR4J, calibrée lors des multi-calibrations

Calibration de Gardenia

Le logiciel GARDENIA est un modèle global qui permet d'établir un bilan hydrologique, de simuler le cycle de l'eau depuis les précipitations sur le bassin versant jusqu'au débit à l'exutoire d'une rivière (ou d'une source) ou au niveau ponctuel d'un aquifère (niveau piézométrique).

C'est la phase de calage, sur les observations (pluie, niveau piézométrique, débit du cours d'eau et débit de prélèvement), qui permet d'obtenir la fonction de transfert, entre la pluie, le niveau piézométrique et les débits. Cette phase de calage du modèle est réalisée automatiquement par le logiciel Gardenia sous contrôle de l'utilisateur.

La modélisation, avec Gardenia, des relations pluie/débit, pluie/niveau ou pluie/niveau/débit fait intervenir une dizaine de paramètres globaux (réserve utile, temps de tarissement, etc.) définis pour un bassin versant. Ces paramètres doivent être ajustés sur une période d'observation commune des pluies et des débits (ou/et des niveaux). Les paramètres de calage sont optimisés afin de simuler au mieux les débits d'étiage et/ou les niveaux piézométriques sur la période commune de suivi et ainsi obtenir un coefficient d'ajustement maximal. Les données mesurées d'entrée et de calage (pluie, ETP, débit) sont les mêmes que celles utilisées pour GR4J auxquelles ont été ajoutés les données journalières des niveaux piézométriques de dix ouvrages de suivi des nappes superficielles situés dans les bassins versants modélisés.

Calibration de SWAT

L'implémentation puis la calibration du modèle SWAT est plus complexe et nécessite davantage d'expertise. Plusieurs couches d'informations géographiques ont été nécessaires. Elles proviennent de différentes bases de données (BD) :

- Occupation du sol : Corine Land Cover 2006 (résolution : 1/100 000)
- Type de sol : BD Donesol de l'IGCS (1/250 000)
- Modèle numérique de terrain (MNT) : BD Alti de l'IGN (résolution de 25m)
- Données climatiques : issues de la désagrégation de ERA-INTERIM par WRF (température, radiation solaire, humidité relative, vent) et de l'interpolation des données observées (précipitations)

Un important travail préalable de traitement de données a été réalisé pour construire les paramètres pédologiques nécessaires (réserve utile, conductivité hydraulique, etc.) qui n'existaient pas initialement dans la BD Donesol. Le module ArcSWAT, disponible sous le logiciel ArcGIS a été utilisé

pour mettre en forme ces différentes couches d'informations et créer les fichiers de paramétrisation nécessaires au fonctionnement du modèle.

La calibration nécessite tout d'abord d'identifier les paramètres sensibles du modèle (qui peuvent varier d'un bassin à l'autre). Puis une calibration manuelle est effectuée sur ces paramètres, dans un domaine de variation qui doit rester cohérent. Cette calibration peut être ensuite affinée ensuite par une méthode itérative automatique, via le logiciel SWAT-CUP (Abbaspour et al., 2007), toujours en cherchant à optimiser une fonction objectif.

Confrontation débits simulés et observés

L'étape 3 est la confrontation entre les débits observés et simulés par la chaîne de modélisation hydro-climatique. Cette validation consiste à appliquer ces modèles déjà calibrés à une autre période et de calculer leur performance à l'aide des mêmes critères de performances. La méthode de validation la plus répandue est celle du Split Sampling Test (SST) décrite par (Klemeš, 1986). Elle consiste à diviser la période de disponibilité des données observées en au moins trois sous-périodes. On pourra ainsi calibrer le modèle successivement sur trois sous-périodes différentes, et le valider à chaque fois sur les deux autres sous-périodes restantes.

La Figure 8 montre la reproduction des débits observés de l'Armançon à Brienon-sur-Armançon par les trois modèles hydrologiques, alimentés par les données climatiques issues de la désagrégation dynamique de ERA-INTERIM par le modèle ARW/WRF.

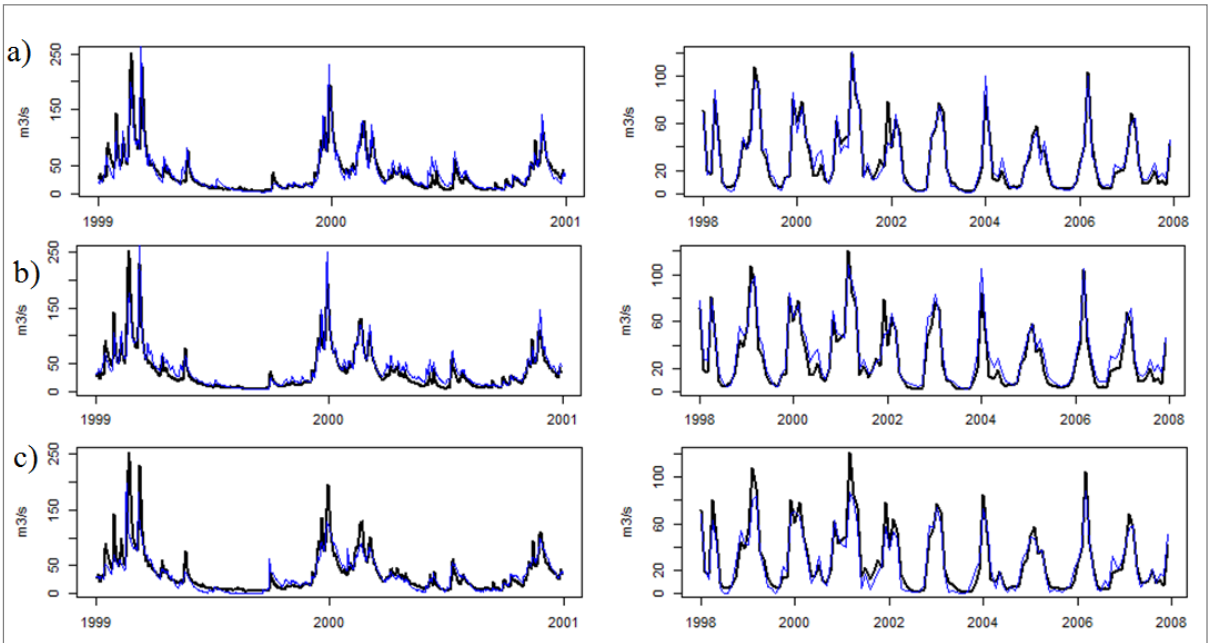


Figure 8 : Débits journaliers (à gauche) et mensuels (à droite) de l'Armançon à Brienon-sur-Armançon, observés (noir) et simulé (bleu). a) par GARDENIA, b) par GR4J, c) par SWAT.

Au pas de temps journalier ou mensuel, on constate une bonne reproduction des débits de l'Armançon par les trois modèles, malgré quelques légers biais (biais sec en hiver pour SWAT et GR4J par exemple). Les performances obtenues par les trois modèles hydrologiques sur le bassin de l'Armançon (cf. Tableau 9) montrent leur bonne capacité à reproduire les débits journaliers observés, avec des critères de performances satisfaisants, et ce sur l'ensemble des bassins versants étudiés dans HYCCARE.

Tableau 9 : Performance des modèles hydrologiques (Critère de Nash-Sutcliff) sur la période entière d'observation (1980-2011), alimentés par la désagrégation dynamique de ERA-INTERIM et les précipitations observées interpolées

Modèle	Pas de temps		
	An	Mois	Jour
GARDENIA	0.80	0.93	0.79
GR4J	0.77	0.92	0.87
SWAT	0.73	0.86	0.77

2. Evaluation de la sensibilité des territoires au changement climatique

Initialement envisagée sous l'angle de la confrontation entre futurs besoins en eau et offre potentielle à travers l'application Strateau (complexe et finalement peu pertinente à cette échelle), l'analyse de la sensibilité des territoires au changement climatique a été abordée à travers des études de cas selon une double approche territoriale et sectorielle.

L'approche territoriale a été développée à travers une étude de cas (stage) relative à la gestion de l'eau potable sur un territoire urbanisé (agglomération dijonnaise et bassin versant de la Tille) en contexte de changement climatique. Cette étude a fait l'objet d'une analyse poussée du territoire et d'entretiens auprès d'acteurs locaux. Les résultats ont alimenté l'axe 2 présenté ci-après.

L'approche sectorielle s'est principalement déclinée au travers de l'évaluation des impacts du changement climatique sur le prix du foncier agricole, en mobilisant l'approche Ricardienne. Cette dernière a été proposée pour la première fois et testée sur données américaines par Mendelsohn et al. (1994). Elle repose sur l'analyse de l'effet des modifications climatiques sur la rente foncière. Cette dernière est théoriquement un bon proxy de la valeur ajoutée dégagée par l'activité agricole car, en situation de marchés de concurrence pure et parfaite, la rente foncière est égale au rendement net de l'usage le plus élevé de la terre. La mise en œuvre empirique de l'approche Ricardienne est très proche de la méthode des prix hédoniques qui consiste à décomposer le prix des terres agricoles en différents attributs, ou éléments indissociables les caractérisant (Rosen, 1974). Le climat est considéré comme un attribut productif.

Au final, l'équation de prix hédonique utilisé est la suivante : $\ln Pi = \alpha + x'i\,\beta + z'i\,\theta + \varepsilon i$

où p_i est le vecteur des prix moyens communaux par hectare, x_i est le vecteur des variables liées aux conditions pédo-climatiques et z_i le vecteur des variables explicatives externes pour la commune i ; ε_i représente le terme d'erreurs normalement distribuées.

Plusieurs types de fonctions sont utilisés dans les études mobilisant la méthode de prix hédoniques : linéaire, semi-logarithmique ou logarithmique. La forme fonctionnelle la plus fréquemment utilisée est semi-logarithmique. Cavailhès et Wavresky (2003) ayant par ailleurs montré que cette forme était particulièrement appropriée pour le cas de la Côte-d'Or, c'est celle qui a été retenue. Le modèle a été estimé à l'aide de Moindres Carrés Ordinaires (MCO). Pour que cette stratégie d'estimation soit efficiente, il faut que les termes d'erreur, ε_i, soient indépendants et identiquement distribués (d'espérance nulle et sphérique). Un test de White permet de vérifier si c'est le cas. Des écarts-types robustes à l'hétéroscédasticité seront produits pour les modèles où ce ne serait pas le cas.

3. Analyses de la gestion de l'eau et de l'adaptation au changement climatique

Au démarrage du projet, s'est posée la question de l'échelle d'appréhension de la gestion de l'eau. Nous avons opté pour des bassins versants engagés dans des schémas d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE) car ceux-ci doivent se doter d'un volet changement climatique.

Cette planification de la gestion de l'eau sur le long terme nous a paru être une manière de relier les problématiques de l'eau et de l'adaptation au changement climatique. Les SAGE sont pilotés par des commissions locales de l'eau (CLE), instance regroupant gestionnaires et usagers de l'eau dont la composition est fixée par arrêté préfectoral. A travers la liste de leurs membres, nous avions accès aux principaux « acteurs de l'eau » (cf. encadré ci-contre). SAGE et CLE visent à décliner une gestion dite « intégrée » de l'eau (Vieillard-Coffre, 2001).

Nous avons retenu les bassins versants de la Tille, de l'Arroux-Bourbince, de l'Armançon, tous trois dotés de SAGE (cf. Figure 9), car ils se situent chacun sur des territoires d'agences de l'eau différents (Rhône Méditerranée Corse, Loire-Bretagne, Seine-Normandie) et ont été retenus pour la modélisation hydro-climatique[8].

En première approche, ils nous semblaient recouvrir des enjeux différents : pour la Tille, les enjeux étaient centrés autour de l'eau potable dans un contexte d'urbanisation d'une agglomération s'étendant sur l'espace rural environnant ; pour l'Arroux, ressortaient des préoccupations autour de l'eau potable, quantité et qualité, et le maintien des zones humides ; enfin pour l'Armançon, le risque inondation était central côtoyant des problèmes de qualité d'eau, de maintien des zones humides et de drainage agricole. L'analyse montrera que ces trois territoires sont aussi contrastés en termes d'avancement de la procédure SAGE.

> Le SAGE est un instrument essentiel de la mise en œuvre de la directive cadre sur l'eau (DCE). Il a été créé par la loi sur l'eau du 3 janvier 1992. Il décline à une échelle plus locale le Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE). Il concerne un bassin versant hydrographique ou une nappe. Il repose sur une démarche volontaire de concertation avec les acteurs locaux. L'animation du SAGE est assurée par la « structure porteuse » (collectivité ou groupement de collectivités territoriales, institution interdépartementale, syndicat intercommunal, syndicat mixte, etc.). La CLE, présidée par un élu local, est l'instance décisionnelle ; elle se compose de trois collèges : les collectivités territoriales, les usagers (agriculteurs, industriels, propriétaires fonciers, associations, ...), l'Etat et ses établissements publics.
> *Source : www.gesteau.eaufrance.fr/presentation/sage*

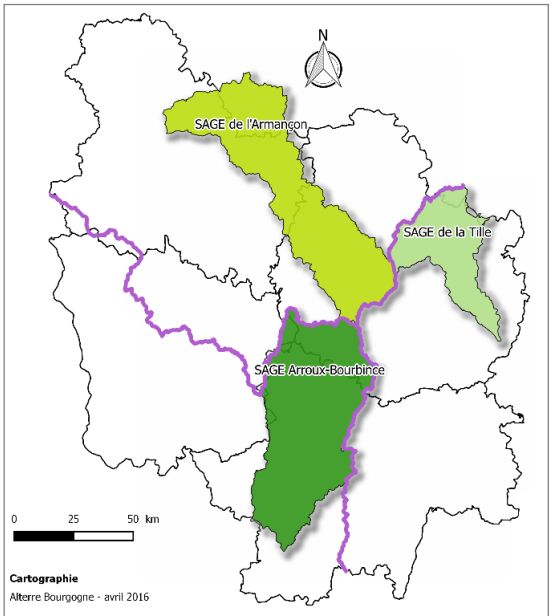


Figure 9 : Carte des trois bassins versants en SAGE étudiés dans le cadre d'HYCCARE

En termes de méthodologie, nous avons eu recours à trois principales sources d'information : le dépouillement de l'abondante documentation composée de diagnostics et de programmes de gestion qui constituent l'armature des SAGE ; l'entretien semi-directif auprès des « acteurs de l'eau » ; l'observation de réunion (CLE, bureau de CLE, commission de CLE). Le Tableau 10 détaille les entretiens réalisés (57). Le guide d'entretien comprenait

[8] Les bassins versants de la Vouge et de l'Ouche sont deux autres bassins bourguignons partageant avec celui de la Tille d'avoir sur une partie de leur territoire l'agglomération dijonnaise. Ils sont dotés de SAGE mais n'ont pas été retenus comme terrain pour les études climatologiques et hydrologique. En effet leur caractère influencé aurait biaisé les résultats des modélisations hydrologiques.

quatre parties : (i) ce qu'évoque le changement climatique pour l'interlocuteur, (ii) les situations de crise en matière de ressource en eau qu'il a en mémoire, (iii) les problèmes récurrents pour la ressource en eau sur le bassin versant concerné, (iv) l'implication dans la CLE, ses modalités de fonctionnement, les débats tenus. Ce guide d'entretien a permis d'analyser les représentations que les personnes ont du changement climatique et de ses effets, de mettre en évidence la perception de situations de pénurie et enfin de discuter des modalités de la participation dans les lieux de gouvernance de l'eau. Le Tableau 11 résume les principales caractéristiques des trois bassins versants et de leurs démarches de SAGE.

Par rapport au protocole initialement imaginé, nous avons opéré trois « glissements ». Nous avons constaté que les réunions des CLE étaient peu fréquentes et nous n'avons pu observer qu'un nombre restreint de débats. Premier ajustement, l'analyse a donc porté principalement sur le recueil d'information en entretiens individuels, mis en regard avec la documentation technique produite par les SAGE. Le second glissement porte sur le changement climatique ; aujourd'hui les SAGE sont peu avancés sur la question de l'adaptation au changement climatique. Le projet HYCCARE a davantage initié une telle réflexion à travers les ateliers de design territorial qu'analysé des dynamiques existantes autour de l'adaptation. Ce qui nous a conduit à repenser la manière de traiter l'adaptation au changement climatique en tant que situation future. Notre posture a alors été d'appréhender l'adaptation au changement climatique à l'aune de situations présentes, qui engagent une organisation et des acteurs, face à la pénurie d'eau. Enfin, le troisième ajustement a porté sur le cas du bassin versant Arroux-Bourbince dont la procédure SAGE a été suspendue suite à la défaite du président de la CLE lors des élections municipales de 2014. Nous avons donc cherché à comprendre les raisons de l'« échec » de la démarche.

En complément de l'analyse de ces trois bassins versants en SAGE, cinq autres territoires présentant des démarches de type contrat de milieu (contrat de rivière, contrat territorial, contrat global), à des degrés divers d'avancement (en cours d'élaboration, en révision, en cours de mis en œuvre, non reconduit) ont été investigués (cf. Figure 10 et Annexe E). Là encore, les cinq bassins versants retenus (l'Yonne amont, la Nièvre, le Serein, le Nohain et la Seille) recoupent ceux choisis pour la modélisation hydro-climatique. Cet échantillon est marqué par une diversité de problématiques locales auxquelles sont confrontés les acteurs (continuité, morphologie, pénurie ponctuelle d'eau…), et par des degrés de structuration et d'institutionnalisation variable des démarches locales autour de l'eau. Le Tableau 12 résume les principales caractéristiques des cinq bassins versants et de leurs démarches territoriales.

A partir des enquêtes conduites auprès d'acteurs de ces démarches locales, l'analyse de ces situations bourguignonnes doit permettre de mieux comprendre : 1/comment les effets des changements climatiques sont perçus et documentés ; 2/ comment les implications de ces changements climatiques sont jugés appréhendables dans le cadre des démarches existantes ; 3/ *in fine*, quelles conceptions de l'adaptation apparaissent derrière les discours de ces acteurs spécialistes de la gestion de l'eau et des milieux aquatiques, dans un contexte réglementaire où il n'y a encore aucune injonction à traiter de cette question. La démarche est donc exploratoire (sur chaque terrain, de un à trois entretiens conduits) et prospective (recueil de discours sur des dynamiques à venir). Ces éléments doivent permettre de mettre en contexte et de relativiser les observations recueillies au sein des trois terrains en SAGE étudiés plus en profondeur, supposés plus avancés en termes de maturation et de construction de la politique.

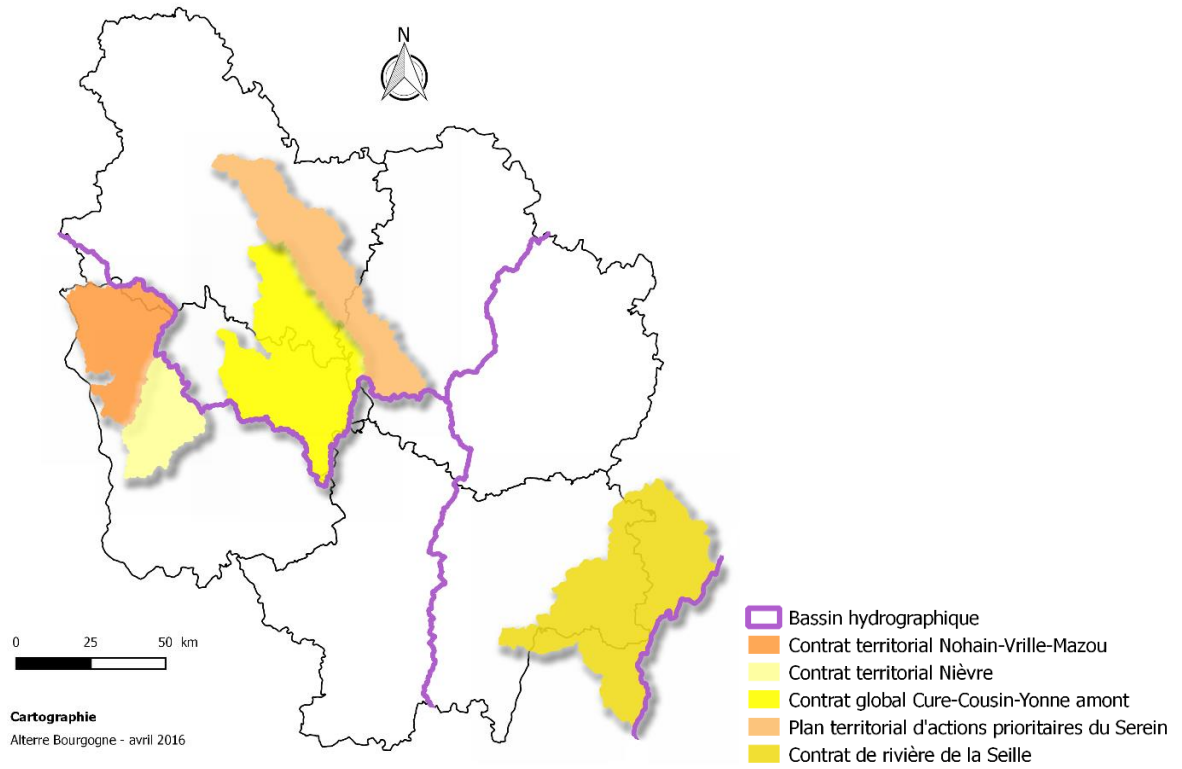


Figure 10 : Carte des cinq bassins versants complémentaires étudiés dans le cadre d'HYCCARE

Tableau 10 : Entretiens réalisés dans le projet HYCCARE pour l'axe 2 par François Bertrand, Delphine De Fornel, Marion Poncet, Sandrine Petit, Marie-Hélène Vergote, Hélène Toussaint.

Entretiens	**Bassin versant de la Tille**	**Bassin versant de l'Armançon**	**Bassin versant de l'Arroux-Bourbince**	**Bassins versants sans SAGE**
Nombre Institution des personnes enquêtées **Au total : 57 entretiens réalisés et retranscrits**	Réalisés : 18 entretiens auprès de : – Service technique, élu du Grand Dijon [2] – Président de syndicat eau assainissement [1] – Président de syndicat rivière [1] – Elu communauté de communes [1] – Animateurs de SAGE [4] – FD pêche 21 [1] – Association consommateurs [1] – Conseil départemental 21 [1] – Chambre d'agriculture, syndicat des irrigants [3] – UNICEM [1] – Agence de l'eau RMC [1] – Lyonnaise des eaux [1]	Réalisés : 16 entretiens auprès de : – FD de pêche [1] – Associations (environnement, tourisme, hydroélectricité) [3] – VNF [1] – Chambre d'agriculture, élu [1] – Syndicat de rivière (SIRTAVA, SIAVA, SIVU) [3] – Syndicat d'eau potable [2] – Président CLE [1] – Communes, maire [1] – Sous-préfecture [1] – Associations syndicales libres [1] – Agence de l'eau Seine-Normandie [1]	Réalisés : 13 entretiens auprès de : – Ancien président CLE [1] – Présidents SIBVB, SINETA [2] – Maires/élus commune amont, aval-Creusot Montceau-les-Mines, élu Pays Charolais Brionnais, PNR Morvan [4] – FD pêche 71 [1] – VNF [1] – Animateur syndicat [1] – Agence de l'eau Loire Bretagne [1] – DDT 71 [1] – Association des moulins 71 [1] – + échanges avec animateurs du SAGE et chargée de mission de la Chambre d'agriculture Refus : – Sous-préfecture – Lafarge – Aperam	Réalisés : 10 entretiens auprès de : – Contrat rivière Nohain Vrille Mazou : animatrice et élue [2] – Contrat rivière des Nièvres : animatrice et élu [2] – Contrat Global Cure Yonne : animatrice [1] – BV Serein : responsable AESN et son assistant [1] – Contrat rivière de la Seille : coordinatrice, agence de l'eau RMC [3] – Conseil régional de Bourgogne [1]

Tableau 11 : Caractéristiques des bassins versants de la Tille, de l'Arroux, et de l'Armançon et déclinaison des SAGE sur ces territoires

	Bassin versant de la Tille	**Bassin versant de l'Arroux-Bourbince**	**Bassin versant de l'Armançon**
Principaux affluents	La Tille s'écoule sur 88km. Elle a pour principaux affluents l'Ignon (44km), la Norges (34km), la Venelle (33km), l'Arnison (18km), le Crône (14km)	- La Lacanche, la Drée, le Mesvrin, le Pontin, la Bourbince ; Le Ternin, la Celle, le Méchet et la Braconne	- Armançon, Brenne, Armance, Ozerain, Oze, Landion, Vau (qui ne représentent dans leur ensemble qu'un tiers des cours d'eau du BV) - 1255 km de cours d'eau
Agence de l'eau concernée	Rhône Méditerranée Corse	Loire-Bretagne	Seine-Normandie
Départements concernés ; superficie ; densité et nombre de communes	Côte-d'Or (110 communes), Haute-Marne (7 communes) **TOTAL : 117 communes, 78 000 habitants et 61 habitants/km²** **Superficie : 1276 km²**	Côte-d'Or Saône-et-Loire (79% surface BV) Nièvre **TOTAL : 179 communes ;** **204 300 habitants 52 hab/km² Superficie : 3177 km²**	- Cote-d'Or : 150 communes, 25 hab/km² - Yonne : 88 communes, 37 hab/km² - Aube : 41 communes, 19 hab/km² **TOTAL : 279 communes, 107 907 habitants et 29hab/km².** **Superficie : 3100 km²**
Principaux enjeux du SAGE selon les entretiens et documents SAGE	Le bassin versant de la Tille est classé en ZRE. Zones où l'urbanisation a conduit à d'importants travaux d'aménagements de cours d'eau. Les enjeux tels que formulés par les documents du SAGE : - Préserver et reconquérir la qualité de la ressource en eau - Atteindre l'équilibre quantitatif entre les besoins des usages et les milieux - Préserver et restaurer les fonctionnalités des milieux aquatiques - Rechercher une véritable adéquation entre l'aménagement du territoire et la gestion des eaux.	Eau potable (peu de ressources souterraines, eaux superficielles utilisées en AEP), gestion des zones humides, connexion canal du centre – rivière Bourbince ; étiages sévères en amont été, risque d'inondation à l'aval faible.	En amont : atomisation des systèmes d'alimentation en eau potable (1 commune = 1 captage), étiages sévères (support karstique) et à secs fréquents, bétail (boisson + piétinement). En aval : crues, risque inondation, ruissellement, pollutions agricoles Sur le bassin versant : continuité écologique (ouvrages touristiques et électriques) et impact fort du canal et des 3 barrages/retentions d'eau (surtout le barrage de Pont)
CLE (date d'installation, renouvellement, nb membres, commissions thématiques)	L'arrêté préfectoral fixant la composition de la CLE du SAGE du bassin de la Tille date du 12 juillet 2012 et désigne 51 membres La CLE a été installée le 21 septembre 2012. Trois commissions thématiques ont été créées : - commission milieux aquatiques, - commission cadre de vie aménagement du territoire, - commission ressource en eau	Dossier préliminaire 2009, recrutement animateur 2009 ; arrêté périmètre du SAGE 17 mai 2010. Création de la CLE le 5 octobre 2010, 48 membres (24 élus ; 14 usagers ; 10 représentants de l'Etat) dont 17 membres du bureau modifiée en juin 2011 ; Essai sans succès de constitution d'une nouvelle CLE après les élections municipales de mars 2014. 4 commissions thématiques :	- 1ere constitution de la CLE avec 48 membres : 9 octobre 2000 - Dernier renouvellement : 26 août 2014. - Actuellement 4 commissions thématiques : C. agricole, C. urbaine, C. milieux aquatiques et humides, C. inondation

		Ressources en eau ; Biodiversité, patrimoine associé aux milieux aquatiques ; Pêche Loisirs Tourisme ; Communication C'est surtout la commission Biodiversité qui a été active	
Etat d'avancement du SAGE	Le SAGE est en cours d'élaboration - périmètre arrêté le 2 septembre 2011 - L'état initial transmis lors de l'installation de la CLE en septembre 2012 - Adoption de l'Etat des lieux du SAGE de la tille le 17/12/2013 sur la base de l'adoption du diagnostic partagé et du scénario tendanciel et de l'adoption des volumes prélevables et répartition entre usages - Adoption de la stratégie du SAGE et projet de gestion quantitative de la ressource en eau, le 10 décembre 2014. - Rédaction du PGAD et règlement en cours	SAGE : déc.2013 finalisation de l'état initial Elections municipales de mars 2014 : le président de la CLE n'est pas réélu ; la présidence devient vacante. Arrêt du contrat de l'animateur : déc.2014 Arrêt du contrat de l'animatrice : 30/06/2015 Suspension du SAGE en juin 2015 par décision du Préfet. Signatures le 29 juin 2015 à la mairie de St Sernin-du-Bois du contrat territorial de la Bourbince et du contrat territorial Arroux Mesvrin Drée.	- SAGE initié en 1996, ouvert par procédure en 1998. - Périmètre arrêté en 1998 puis 2000 et 2008. - Elaboration du SAGE du 2ème semestre 2007 au 1er trimestre 2010. - Validation par la CLE du SAGE (PAGD+règlement) le 25 mai 2010. - 2012 : SAGE soumis à enquête publique - Approuvé par arrêté inter-préfectoral le 6 mai 2013. - 29/12/2015 : création du Le Syndicat Mixte du Bassin Versant de l'Armançon a été créé par arrêté interpréfectoral du 29 décembre 2015. Il fait suite aux 3 syndicats : SIRTAVA , SIAVA (vallée de l'Armançon de l'Aube) et SIVU (Du Créanton et de la Brumance).
Structure porteuse du SAGE	**EPTB Saône-Doubs**	**SIBVB** : Syndicat intercommunale du bassin versant de la Bourbince (de 1996 à 2012 SIEAB, Syndicat intercommunal d'étude et d'aménagement de la Bourbince)	**SIRTAVA** : Syndicat Intercommunal pour la réalisation des Travaux d'Aménagement de la Vallée de l'Armançon (créé en 1981) puis **Syndicat mixte du bassin versant de l'Armançon**

Tableau 12 : Caractéristiques des cinq bassins versants complémentaires et des démarches de gestion de l'eau en cours sur ces territoires

Territoires de gestion enquêtés (bassin modélisé)	**Contrat territorial Nohain Vrille Mazou** (BV Nohain)	**Contrat territorial des Nièvres** (BV Nièvre)	**Contrat global Cure Cousin Yonne Amont** (BV Yonne amont)	**Bassin du Serein** (BV du Serein)	**Contrat de rivière de la Seille** (BV de la Seille)
Superficie	Environ 1 000 km²	630 km²	2 073 km²	1 400 km²	2 260 km²
Nb. de communes	34 communes concernées	49 communes (regroupe 8 ComCom et 1 CA)	103 communes (Parc cet hors Parc)		218 communes
Population		42 000 hab.	41 738 hab.	37 000 hab.	134 625 habitants
Départements concernés	Nièvre	Nièvre	Nièvre, Yonne et Côte d'Or	Yonne et Côte d'Or	Saône-et-Loire, Jura, Ain (à cheval sur 3 régions, avec 12 structures gestionnaires)
Agence de l'eau	AELB	AELB	AESN	AESN	AERMC
Action collective ou politique de l'eau	Contrat territorial Nohain Vrille Mazou	Contrat territorial des Nièvres	Contrat Global Cure Cousin Yonne amont	Contrat prioritaire PTAP (Plan Territorial d'Action Prioritaire)	Contrat de rivière de la Seille
Stade de mise en œuvre	En cours d'élaboration phase de diagnostic (07-2014), signature prévue début juin 2016	En cours d'élaboration phase de diagnostic (07-2014), signature prévue début 2016	Evaluation ex-post pour reconduite (10-2014)	En cours d'émergence (en octobre 2014)	En cours de mise en œuvre (en septembre 2015)
Ancienneté de l'action collective	1ère génération de contrat, en cours d'élaboration	1ère génération de contrat, en cours d'élaboration A l'invitation du préfet, le CG 58 a engagé une première phase d'étude en 2006 (rendu 2009)	Le contrat global s'est déroulé de juillet 2009 à juin 2014. Auparavant, un Contrat Territorial (2003-2008), un contrat rural en 2000 et une action sur les milieux depuis la création du PNR en 1970.	Rien sur la partie aval, la partie amont était couverte jusqu'alors par le contrat global Auxois Morvan 2009-2013 porté par le SIAEPA (mais les enjeux ne nécessitent pas un contrat global)	2nd Contrat de rivière (approuvé en février 2012) Continuation du 1er contrat de rivière (janvier 2002 – juillet 2008) puis animation EPTB
Principaux enjeux pris en compte par l'action collective étudiée (suivant dispositifs agences)[1]	**Qualité de la ressource** (agriculture et STEP) **Continuité écologique**	**Ouvrages hydrauliques** Qualité de certains **captages** et des **milieux**	**Continuité des cours d'eau** (enjeu de longue date, élargi aux gros ouvrages depuis la DCE) **Qualité : nombreuses STEP de petites tailles**, gérées au niveau communal **Très nombreux captages de très petites tailles**, avec une très faible interconnexion des réseaux	**Disponibilité eau potable** **Restauration hydromorphologique** Caractéristiques et enjeux très différents entre aval et amont (Cf. le PTAT Seine Amont 2013-2018 et la fiche de l'unité hydrographique du bassin du Serein)	**Qualité des eaux** **Qualité des milieux aquatiques** **Inondabilité** des lieux habités

Types d'action envisagées ou mises en œuvre	Action sur la qualité des milieux, (berges, hydromorphologie…) Actions sur la continuité écologique (périmètre de financement de l'AELB)	Protection élargie de captage Biodiversité et qualité des milieux (restauration physique des lits et ripisylves, réintroduction de méandres…)	Assainissement (zonage, Amélioration et création STEP, réseaux d'assainissement, branchements et réhabilitation ANC…) Protection captages (création captage, mise aux normes, système épuratif, interconnexion, diagnostic réseau, suppression des problèmes, …) Etude BAC, désherbage municipal, traitement effluents divers activités… Continuité écologique, ZH, ripisylve, biodiversité, suivi des milieux	Cf. PTAT, commun à l'ensemble du sous-bassin Seine Amont	Assainissement et qualité de l'eau (bien avancé) Réduction des pollutions agricoles (mise aux normes des bâtiments d'élevage mis en œuvre en partie lors du 1er contrat) Restauration et entretiens des milieux (ripisylve) (en cours) Restauration morphologique des cours d'eaux (problématique) Préservation des prairies humides (problématique)
Acteur porteur de l'action collective	Elaboration du contrat de rivière par l'association du Pays « Bourgogne Nivernaise »	Elaboration du contrat de rivière par la Communauté de Communes « Nièvre et Forêt », par conventionnement (pour des raisons de portage politique, d'importance démographique et d'enjeux – présence d'un important site industriel)	L'animation du contrat est portée par le syndicat mixte du PNR Morvan	Pour l'instant animation par la DT Seine Amont. Un syndicat de rivière du BV du Serein a été créé en avril 2014 (fusion des 2 syndicats hydrauliques Haut Serein et Bas Serein dans le cadre du SDCI) avec compétences Milieux, Rivières et Zones Humides et sensibilisation-information sur inondations	Animation technique par l'EPTB Saône-Doubs depuis 2009 (syndicat mixte Saône et Doubs intégré dans l'EPTB) Un comité de rivière Seille a été créé en mars 2009.
Articulation avec autres politiques (dires d'acteurs)	SRCE, PCET et A21 du Conseil départemental, A21 de Cosne-Cours-sur-Loire	SRCE, SCoT Grand Nevers, charte départementale sur la gestion et la valorisation de la ressource en eau (CD 58)	Schéma de cohérence climat du Morvan (Plan climat du PNR adopté en 2009)	PPRI dans le chablisien (aval du BV)	

4. Conclusion : une diversité d'approches sur une sélection de territoires

Les territoires occupent une place centrale dans les travaux d'HYCCARE car ils en sont à la fois le support et la cible. Une attention particulière a donc été donnée pour mieux connaître les bassins versants bourguignons et choisir ceux à approfondir. Parmi les différents critères utilisés, deux ont prévalu : leur représentativité et la cohérence des choix entre les différents travaux de recherche (modélisation hydro-climatique, territoires en SAGE, territoires en contrat…). Ainsi douze des treize bassins versants sélectionnés ont fait l'objet d'études dans les deux axes du projet. La Figure 11 et le Tableau 13 rendent compte de cette pluralité de travaux sur un même territoire. Trois d'entre eux ont particulièrement été analysés : ceux de la Tille, de l'Armançon et de l'Arroux.

Cette superposition des terrains d'études a favorisé les échanges entre disciplines et la mise en perspective des différents résultats les uns par rapport aux autres. Elle a également permis de présenter aux acteurs des travaux concernant leur propre territoire, notamment lors des ateliers du climat (cf. page 79), ce qui favorise leur appropriation et leur mise en débat.

Toutefois le projet n'a pas pu aller aussi loin qu'initialement prévu dans cette logique de dialogue entre travaux et d'apport de connaissances multiples sur certains territoires, les projections climatiques sur les précipitations ne permettant pas de présenter celles sur les débits ni de réaliser celles sur le remplissage de la réserve utile des sols. Enfin, l'extrapolation des résultats à d'autres territoires sur la base des travaux de classification des bassins versants bourguignons (cf. Annexe F) est un autre chantier qui resterait à conduire.

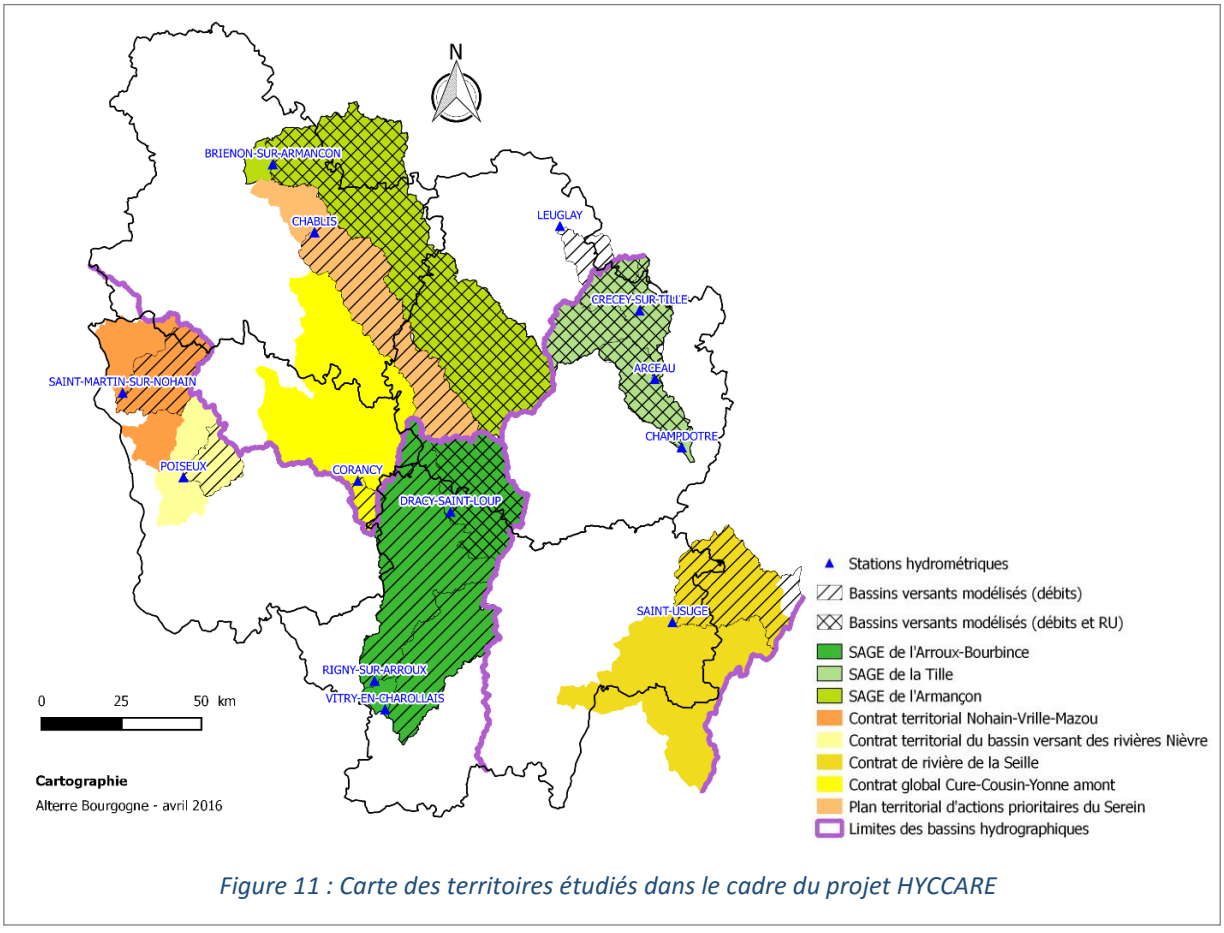


Figure 11 : Carte des territoires étudiés dans le cadre du projet HYCCARE

Tableau 13 : Travaux réalisés sur les treize bassins versants sélectionnées dans le cadre du projet HYCCARE

Tâches	Calibration		Analyse Débits obs	Analyse Eau des sols	Projection P, T, ETP	Projection débits	Entretiens SAGE	Entretiens autres BV	Design territorial
Période	1980-2011		1969-2009	1980-1995	1980-2100	1980-2100	-		-
Modèles utilisés	GR4J, GARD.	SWAT	-	-	ARW/WRF	GR4J, GARDENIA	-		-
Tille à Crecey-sur-Tille									
Tille à Arceau									
Tille à Champdôtre									
Arroux à Dracy-Saint-Loup									
Arroux à Rigny-sur-Arroux									
Armançon à Brienon-sur-Armançon									
Bourbince à Vitry-en-Charollais									
Ource à Leuglay									
Nohain à Saint-Martin-sur-Nohain									
Nièvre d'Arzembouy à Poiseux									
Seille à Saint-Usuge									
Yonne à Corancy									
Serein à Chablis									

Tâche réalisée sur ce bassin
Tâche réalisée mais non présentée
Tâche non réalisée sur ce bassin

III. Le changement climatique perçu

Comment les acteurs de l'eau perçoivent-ils le changement climatique en Bourgogne ? Comment appréhender le changement climatique comme question d'aujourd'hui et à une échelle locale ? Ces réflexions ont été alimentées par le contact régulier avec les acteurs de l'eau via des entretiens, des réunions, des ateliers… Elles constituent un des résultats majeurs d'HYCCARE : le changement climatique s'incarne déjà localement.

a. La place des savoirs locaux

Avec le recours à des modèles, la science du climat est devenue une discipline complexe, très instrumentée et de plus en plus internationale, loin d'être une science de l'observation et de l'intuition (« a guessing science ») (Harper, 2008). Les modèles climatiques régionaux permettent d'envisager plus précisément des impacts, mais ils ne lèvent pas toutes les incertitudes. « Est-ce que des personnes à un niveau local peuvent observer le changement climatique »[9] ? (Reyes-Garcia et al. 2016). Peuvent-elles être des alliés pour mieux comprendre le changement climatique ? Car elles mobilisent deux compétences : l'attachement au lieu et une présence continue dans la durée.

Des recherches, de plus en plus nombreuses à partir de 2010, mobilisent les savoirs locaux pour décrire avec davantage de précision les changements environnementaux. Une telle compétence est déniée par d'autres recherches qui s'en remettent exclusivement aux experts du climat et aux modèles, comme le montre Rudiak-Gould (2013). De plus, les gens peinent à croire eux-mêmes à leurs observations face à des modèles complexes hors de leur portée (Swim, 2009).

Reyes-Garcia et al. (2016), à partir d'un sondage dans le Web of science et Scopus, ont fait une analyse quantitative et qualitative des publications, relevant 98 études de cas faisant état d'indicateurs locaux du changement climatique au nombre de 746. Les corpus de savoirs scientifiques et profanes ne se recouvrent que partiellement, et si les savoirs locaux offrent une perspective de long terme, les changements ne peuvent être datés précisément (op.cit.).

Le projet HYCCARE s'inscrit dans une posture de rencontre voire d'hybridation des savoirs, expérimentée à deux reprises dans les ateliers de design territorial. D'emblée, il nous a semblé que chacun avait une compétence pour aborder ce sujet complexe. La construction d'une connaissance partagée entre chercheurs et observateurs de terrain permet d'initier un débat sur les impacts du changement climatique à une échelle locale et des actions d'adaptation.

b. Le changement climatique s'incarne localement

Nos résultats montrent que le changement climatique n'est plus une réalité lointaine, future et globale, ni un « phénomène statistique abstrait » (Weber, 2016). Il s'incarne localement comme un changement en cours avec des effets visibles aujourd'hui. Pour les gens, il n'est donc pas une prédiction mais un regard rétrospectif sur des transformations. Ainsi dans les ateliers de design territorial, le changement climatique est le début de beaucoup d'histoires et d'un foisonnement d'observations. Il est représenté par un ensemble de signes, symboles, histoires[10] (Luke, 2015). Les signes évoqués portaient sur le climat lui-même et une multitude d'impacts observés concernant la faune, la flore, l'habitat (ce dernier aspect n'ayant pas été relevé parmi les 746 indicateurs de la base de données de Reyes-Garcia et al. 2016). Ces citations ne se référaient pas seulement à des phénomènes extrêmes comme certaines études tendent à le montrer (Reyes-Garcia *et al.*, 2016). Dans les entretiens, le changement climatique est reconnu cependant quelques personnes en dénient les causes humaines.

[9] "Can local people observe climate change?"
[10] "clusters of signs, symbols, and stories"

Pour la plupart de nos interlocuteurs, le changement climatique est une réalité reconnue. Nous notons mêmes que chez les agriculteurs, les pêcheurs et pour les représentants de voies navigables de France (VNF) ces changements sont documentés. Les agriculteurs attestent de dates plus précoces de moissons. Les Fédérations de pêche pratiquent des relevés de températures d'eau en période estivale par le biais de sondes placées dans les cours d'eau :

> « *On prend les trente jours les plus chauds et sur ces trente jours, chaque jour on a une moyenne et on fait la moyenne de ces trente jours-là, et en fait on arrive à une valeur. Et cette valeur-là, on sait que quand elle dépasse 17 degrés, chaque fois qu'on prend 0,5 degré de cette valeur, on peut diviser par deux ou par trois les quantités de truites* ».

Enfin, VNF enregistre des niveaux d'eau dans les retenues, les biefs et le canal, données qui, d'année en année, alimentent un logiciel permettant de revenir sur les particularités. VNF est particulièrement inquiet par rapport aux sécheresses printanières qui empêchent de stocker suffisamment d'eau pour alimenter le canal pendant la saison de plaisance :

> « *Donc dans tous les cas, quand nos réservoirs sont pleins, ils sont pleins. Et aujourd'hui on a un problème de capacité de stockage qui n'a pas été faite pour durer plus de 15 à 20 semaines, voilà. Et… et… le phénomène le plus embêtant, ce n'est pas quand nos réservoirs ne sont pas pleins, parce que cette année, on est à 80 %, actuellement, on a eu des difficultés à remplir, on a été arrêté l'année dernière, parce qu'on n'avait plus d'eau hein. On a arrêté la navigation dès le début septembre, parce qu'on n'avait plus d'eau* ».

Pour cet interlocuteur, les années difficiles ont été 2003, 2005, 2011 et 2014, c'est-à-dire « les 10 dernières années », attestant d'un changement de régime déjà à l'œuvre.

c. Une diversité de signaux et d'histoires

La richesse et la diversité des observations s'est particulièrement exprimée alors des ateliers de design territorial ce qui a permis de tenter une classification que le Tableau 14 illustre. Nous avons distingué, comme dans d'autres travaux (Reyes-Garcia et al., 2016), les changements qui concernent le climat proprement dit (« observations météorologiques ») et les impacts sur des dynamiques physiques, biologiques et sociales. Certains événements exceptionnels et extrêmes ont été rapportés comme des crues centennales. Des récurrences (hivers plus doux par ex.) sont observées ainsi que des modifications irréversibles (par exemple, verdissement du bâti, composition des populations de poissons).

Tableau 14 : Classement des observations du changement climatiques exprimées par les participants aux ateliers du design de l'Armançon

Observations locales du changement climatique	Phénomènes extrêmes/ rares/ nouveaux	- Orages décalés, notamment tardifs, en novembre - Tempêtes : deux tempêtes centenaires en 20 ans - La tempête de 1999 - C'est la première année qu'il y a de l'eau dans ma cour - Été 2003
	Saisons	- Saisons moins marquées - Pas d'hiver dans le nord de l'Yonne - Sensation qu'il y a moins de neige - Nuits froides en été - Chaud la journée et froid la nuit - Étés plus chauds et pluies diluviennes - Hausse des températures, excès de chaleur - Sécheresse = manque de précipitations - Un été sans eau
Indicateur local d'impact sur les cours d'eau		- Crues - Crues centennales - Crue à Noyers - En mai 2013 : une crue centenaire de l'Armançon qui, heureusement a été courte - Montée brusque de l'Armançon - Montées fréquentes de l'Armançon - An Nord de l'Yonne : rivières à sec

		- Débordement de l'Armançon en novembre 2014, les vaches étaient dans l'eau - L'eau a traversé la route en février 2014 - Asecs de rivières dans l'Yonne - Eau plus polluée - Réchauffement des eaux : avant les eaux étaient claires en hiver et « fermentaient » en été, aujourd'hui ce n'est plus comme ça - abaissement des nappes phréatiques
Indicateur local d'impact sur la faune	Faune aquatique	- Introduction de la truite arc en ciel aux dépens de la truite fario - On ne va pas pêcher le même poisson - Changements dans le renouvellement des poissons - on trouve davantage de certains poissons et d'autres plus du tout
	mammifères	- Impact sur la fécondité des animaux - Gestation des animaux perturbée (chasseurs)
	oiseaux	- Il y a moins d'oiseaux et des oiseaux qu'on ne voyait pas - Date de migration moins bien réglées qu'avant - On voit des oiseaux du sud qui arrivent chez nous (colonies d'aigrettes)
	insectes	- Moins d'insectes en mai ce qui a entrainé la mort d'hirondelles - Les abeilles se maintiennent moins bien. Les abeilles sont bizarres, c'est étrange, elles peinent ; les abeilles ne butinent pas au bon moment (est-ce une question de température ?) - Hécatombe chez les abeilles sauvages et tous les butineurs
Indicateur local d'impact sur la flore	Végétation	- Repousses de végétation en août - Bourgeons en novembre - Arbres fleurissent plusieurs fois - La végétation a un mois d'avance - Fleurs qui n'arrêtent pas de fleurir - les Arums ont refleuri en novembre 2014 - Les plantes réagissent différemment, les plantes peinent - en hiver les arbres continuent à grossir. Les jeunes arbres ne supportent plus la croissance et on voit les pointes baissées - l'hiver 2014 a été le premier à l'issue duquel il n'a pas été nécessaire de racheter des géranium (pas de pertes dues au gel)
	Cultures	- Les tomates, les concombres ont du mal à pousser (relier aux nuits froides en été) - Orges ont souffert du ruissellement - Davantage de parasites des cultures - Invasion d'espèces - Date des vendanges plus précoce
Indicateur local d'impact sur l'habitat/ l'habiter		- Il y a plus d'humidité dans la maison - Réduction des coûts de chauffage - Mousse et algues sur les murailles et rochers à Semur, plus d'humidité ? le phénomène s'est accéléré depuis 2 ans - le patrimoine bâti verdit à Semur en Auxois, plus de mousses; un phénomène qui s'accélère depuis 1992. - On voit aussi des trottoirs avec des pavés verts
Changement dans les attitudes		- faire des réserves d'eau - il faut jardiner tôt le matin - il faut récupérer l'eau de pluie - il y a des systèmes d'alerte de la population pour les crues, les orages, les canicules - cultiver un potager sur la recommandation de ses enfants jeunes adultes - le changement climatique abordé pour la première fois dans des réunions de quartier (suite au soulèvement des bouches d'égout) - « la majorité de la population s'en fiche royalement » - En été il faut protéger : un abri mis en place pour des ânes a permis de protéger d'autres animaux

Le changement climatique, n'étant plus si éloigné, il devient un registre d'interprétation de changements de l'environnement physique et biologique, et même du bâti. Le changement climatique est un « objet chevelu » (Latour, 1999) car connecté à une grande variété d'observations : présence d'espèces nouvelles, disparition d'autres, changements de température brutaux, stérilisation du pollen des fleurs, moisissure sur les bâtiments :

> « *Il y a moins de neige* » ; « *On voit des oiseaux du sud qui arrivent chez nous (colonies d'aigrettes)* » ; « *le patrimoine bâti verdit à Semur-en-Auxois* ».

Il est également l'occasion d'exprimer des transformations dans l'environnement que les personnes constatent, voire déplorent :

> « *L'aménagement du territoire favorise les inondations* » ; « *la disparition des zones humides* » ;
> « *trop de prélèvements dans les cours d'eau qui diminuent leur niveau et réchauffent l'eau* » ;
> « *les ouvrages hydrauliques accentuent le réchauffement des eaux* » ;

« *Aujourd'hui, on a de vrais problèmes, qui ne sont pas liés exclusivement d'ailleurs au changement climatique, qui sont liés aussi à nos propres pratiques. Par exemple, l'imperméabilisation des sols, et les surfaces utilisées pour l'imperméabilisation, pour la construction, etc… vous regardez, il y a 50 ans, l'agglomératio*n dijonnaise, et maintenant, l'agglomération elle fait 10 fois plus de surface qu'il y a 50 ans. »

et d'exprimer des inquiétudes :

« *Je ne veux pas revivre 2003* ».

Sur la Tille mais peut-être pas seulement, on appréhende une tension accentuée sur l'eau :

« Parce que dans 20 ans*, nos projections nous amènent à dire que ça va être compliqué »*

« L'enjeu pour chacun des personnes qui sont là, c'est de récupérer le maximum pour la partie qu'il défend. Les agriculteurs pour eux, les industriels pour eux, les carriers, les machins… les collectivités, chacun essaye de se dire : moi, il me faut, il me faudrait 50 000 m3 de plus, il me faudrait. Voilà. C'est… le jeu c'est ça. […] donc comme on sait qu'on va avoir des états de tension de plus en plus importants, on peut le penser, dans les années qui viennent, c'est sûr que la mesure évidente de précaution c'est de récupérer le maximum. »

d. Conclusion : le savoir appréhende concrètement le changement climatique

Nos résultats rendent compte d'un savoir local sur le climat (Reyes-Garcia, 2016) différent d'un savoir sur le temps qu'il fait (Pinton, 2009) car attestant de changement pluriannuels. Quel rôle ce savoir local peut-il avoir pour mieux comprendre le changement climatique et ses impacts ? Ce n'est pas que l'affaire d'un passage d'une échelle globale à une échelle locale c'est-à-dire « scaling climate » (Jonsdottir, 2013). Les savoirs locaux élargissent le champ du problème. Dans les ateliers et les entretiens que nous avons conduit, de nombreux changements environnementaux ont été évoqués sans qu'il soit possible de les rattacher précisément à des effets du climat. Le climat entre comme causalité dans les cadres culturels locaux et les savoirs situés des gens font exister différentes natures. Les experts ne peuvent plus être les porte-parole exclusifs d'une seule nature (Jondsottir, 2013). La diversité des signes de perturbation, que l'on pourrait appeler la « part ambiguë » du changement climatique, se retrouve dans des contextes culturels et géographiques très différents, par exemple les Iles Marshall étudiées par Rudiak-Gould (2012). Rudiak-Gould (2012) se demande "*if Marshallese conceptions of climate change are too wide, perhaps scientific conceptions are too narrow*".

Le caractère « chevelu » (Latour, 1999) du changement climatique invite à une recherche pluridisciplinaire où les disciplines de sciences physiques sont appelées à interagir avec les disciplines biologiques au vu de l'abondance des indicateurs biologiques relevés et avec les sciences sociales quand nos interlocuteurs évoquent des modes de vie différents. Travailler les complémentarités entre savoir local et savoir scientifique c'est créer un cadre pour un savoir hybride (Reyes-Garcia et al. 2016). Notre étude met en exergue le rôle particulier de certains « observateurs » (agriculteurs, pêcheurs, gestionnaires de VNF) des changements dont ils gardent des traces datées et quantifiées. Si le panel de personnes enquêtées regroupe probablement une frange de population sensibilisée, il semble que le changement climatique prend une véritable consistance chez elles, ce qui signifierait un basculement par rapport à l'effacement des enjeux environnementaux après les controverses et l'échec de Copenhague dans un contexte de crise économique, dont s'inquiétait D. Boy en 2013 à travers les résultats du sondage ADEME de l'époque.

IV. Le changement climatique d'hier à demain

Le changement climatique est donc bien perçu dans les territoires, mais est-il possible de le mesurer ? Comment s'est-il caractérisé en Bourgogne ? La ressource en eau a-t-elle déjà été impactée ? Les observations, incontournables pour calibrer les modèles, constituent aussi un élément de comparaison pour analyser les simulations réalisées. Ces dernières visent à mieux comprendre les modalités du changement climatique : on ne cherche pas à savoir finement quel climat connaîtra la Bourgogne en 2100, on cherche à savoir quel sera le chemin jusqu'en 2100. Les températures vont-elles augmenter progressivement ou par paliers ? Plutôt le jour ou la nuit ? Y-aura-t-il des différences saisonnières ou territoriales ? etc. Le même type de question se pose sur l'évolution des pluies et de la ressource en eau. Toutes les réponses à ces questions ne peuvent pas être apportées dans le cadre d'HYCCARE. Mais le projet a bien permis de mieux connaître les modalités du changement climatique et ainsi d'éclairer sur la manière de penser l'adaptation.

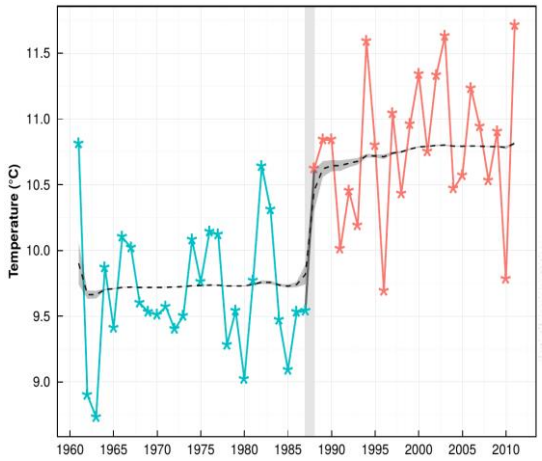
1. Le changement climatique observé et ses impacts sur la ressource en eau en Bourgogne

a. Une rupture dans les températures mais pas ou peu d'évolution des précipitations

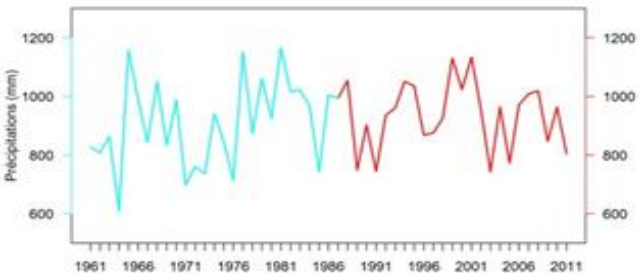
L'analyse de l'évolution des températures moyennes annuelles depuis 1961 (date à partir de laquelle le réseau de stations Météo France est suffisamment dense) fait clairement ressortir un réchauffement abrupt autour des années 1987/1988 (cf. Figure 12a). Cette rupture, détectée systématiquement par plusieurs méthodes statistiques fréquentistes (Bai and Perron, 2003) et bayésiennes (Rugieri, 2013), est partagée par les températures maximales (Tmax) et minimales (Tmin) et par plus de 75% des stations. Cela se traduit pour la Bourgogne par un réchauffement annuel moyen de +1.1°C en moyenne (Castel *et al*., 2014 ; Richard *et al*., 2014), valeur proche de ce qui a été observé à l'échelle de la France (Brulebois *et al*., 2015).

Excepté pour les températures maximales de SON (Septembre-Octobre-Novembre) qui ne montrent pas de différences significatives entre les deux périodes, un réchauffement significatif est systématiquement observé sur les Tmin et Tmax. Il présente une saisonnalité marquée (cf. Tableau 15). Les Tmax se sont plus réchauffées que les Tmin au printemps et en été. En l'hiver c'est l'inverse. L'amplitude du réchauffement a été maximale au printemps, forte en été et modérée en hiver. Le réchauffement est observé pour toutes les stations avec de légères nuances géographiques (cf. Figure 13). Par exemple le Châtillonnais se serait moins réchauffé que la majorité des stations, élément susceptible de renvoyer à des spécificités locales ou bien à des évolutions relatives de l'environnement proche des stations Météo France (Richard *et al*., 2014).

Les hausses les plus fortes sont observées pendant les périodes les plus fortement ou fréquemment radiatives (Tmax plutôt que Tmin, printemps et été plutôt qu'hiver et automne). Cela renforce l'hypothèse d'une réduction régionale du forçage des aérosols conduisant à une plus grande transparence de l'atmosphère sur l'Europe (Booth *et al*., 2012). Cette transparence favorise le réchauffement de la surface par rayonnement solaire direct et a des implications potentielles pour la température (Wild, 2009).



a) La ligne en pointillé noir correspond à la moyenne *a posteriori* calculée à partir de la méthode bayésienne de détection des ruptures.



b) La ligne rouge indique la valeur de cumul moyen pour les périodes 1961-1987 et 1988-2011.

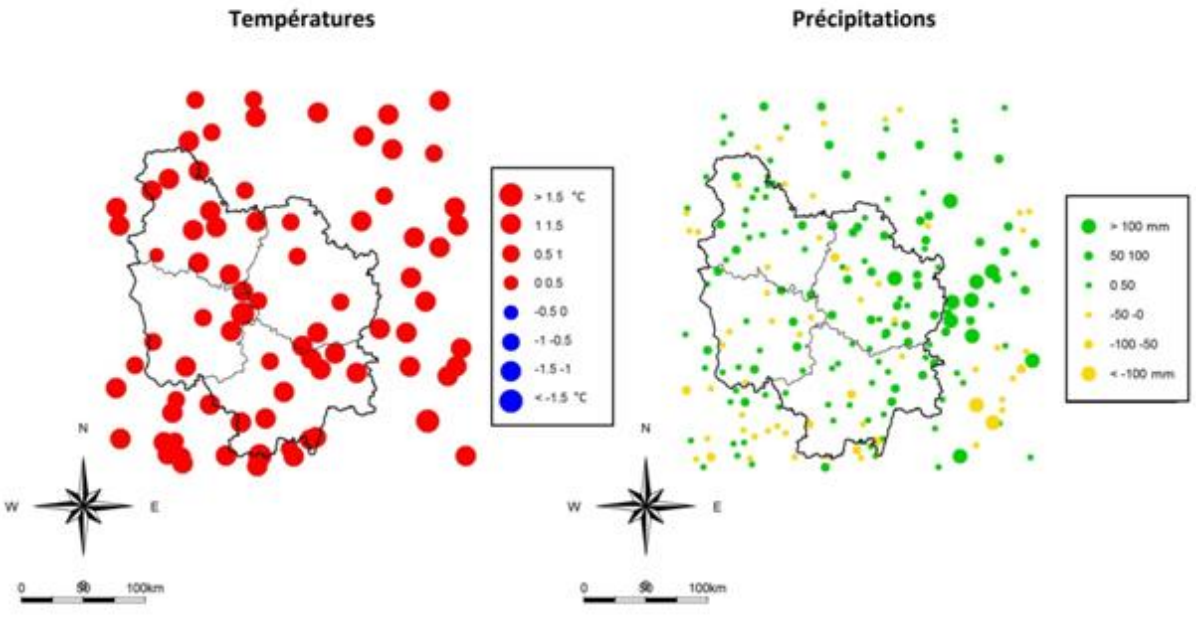
Figure 12 : Évolution des températures moyennes annuelles (a) et des cumuls annuels de précipitations (b) sur la Bourgogne pour la période 1961-2011

Tableau 15: Amplitude du réchauffement annuel et saisonnier pour les Tmin et les Tmax sur la Bourgogne (table de gauche) et évolution des précipitations avant et après rupture de 1987/88 (table de droite)

Période	ΔTmin	95% Interval de confiance	ΔTmax	95% Interval de confiance
Années	1.17*	0,84 – 1,49	1.12*	0,68 – 1,54
DJF	1,06*	0,32 – 1,79	0,97*	0,2 – 1,76
MAM	1,41*	0,97 – 1,83	1,5*	0,8 – 2,2
JJA	1,21*	0,84 – 1,59	1,22*	0,58 – 1,87
SON	0.89*	0,32 – 1,47	0,35	-0,3 – 1

Période	ΔP (mm)	95% Interval de confiance
Années	25,93	19,42 - 32,43
DJF	-5,99	- 8,00 - -3,19
MAM	-4,47	- 6,46 - -2,48
JJA	10,61	8,51 - 12,71
SON	22,32	19,94 - 24,70

* différences significatives



a) *b)*

Figure 13 : Cartes des différences (période 1988-2011 moins période 1961-1988) des températures moyennes annuelles (a) et des cumuls annuels moyens (b) pour les stations de la région Bourgogne élargie

Aucune rupture n'est détectée sur les cumuls annuels des précipitations. Tout juste observe-t-on (cf. ligne rouge de la Figure 12b) une légère augmentation (+25mm, cf. Tableau 15) des cumuls annuels moyens entre les deux périodes (avant et après 1987/1988). Cette augmentation globale masque de fortes disparités locales (cf. Figure 13b) et saisonnières (cf. Tableau 15). Les automnes et les étés auraient été en moyenne plus pluvieux depuis la rupture 1987/1988, alors que les hivers et les printemps auraient été en moyenne légèrement moins pluvieux. Mais, quelle que soit la saison, la très forte variabilité interannuelle est l'élément dominant et rend non significatives toutes ces petites évolutions. L'absence d'évolution significative des précipitations est attestée par l'ensemble des tests statistiques, les mêmes que ceux appliqués aux températures.

En accord avec de Laat and Crok (2013), nous suggérons (Richard *et al*., 2014 ; Brulebois *et al*., 2015) que la rupture 1987/88 observée sur les températures de surface ne coïncide pas entièrement avec la variabilité climatique décennale et multi-décennale, mais résulte d'une combinaison de facteurs d'échelles imbriquées :

- Augmentation de la concentration de gaz à effet de serre (GES) à l'origine d'une augmentation progressive du forçage radiatif (IPCC, 2013) ;
- Réduction des émissions d'aérosols européens au cours des années 1980, conduisant à une plus grande transparence atmosphérique, permettant ainsi à une fraction plus du rayonnement solaire direct d'atteindre la surface (de Laat and Crok, 2013) ;
- Changement de phase de la North Atlantic Oscillation (NAO), mode de variabilité fortement associé aux anomalies de températures hivernales en Europe (Cattiaux *et al*., 2010), à dominante négative au cours des années 1980, et surtout persistant en phase positive entre 1988 et 1994 ;
- Persistance de la phase positive de l'Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO), mode de variabilité faiblement anti-corrélé avec la NAO (Woollings *et al*., 2014) et prenant, en termes d'impact thermique positif sur l'Europe de l'ouest, le relais de la NAO à partir de 1995.

Ces deux derniers points correspondent à des changements discrets. La rupture 1987/88 marque deux climats distincts en termes de températures ce qui a permis de tester l'effet du réchauffement climatique sur la ressource en eau.

b. Des débits déjà en baisse

Sur le territoire bourguignon, l'évolution des débits observés en réponse à l'augmentation brutale de la température a été analysée. Les résultats portent sur 9 des 13 bassins versants sélectionnés pour la modélisation hydro-climatique (cf. page 15) : ceux pour lesquels des données de débit sont disponibles sur la période analysée. L'évolution entre deux périodes d'une vingtaine d'années (1969-1987 et 1988-2009) situées de part et d'autre de la rupture de température de 1987/88 est exprimée en pourcentage (cf. Figure 13).

La réponse hydrologique au forçage climatique décrit précédemment est sans appel : de part et d'autre de la rupture de température de 1987/88, les débits annuels ont tous diminué. Les baisses vont jusqu'à -15 à -20% pour les bassins les plus touchés : Arroux à Rigny-sur-Arroux, Bourbince à Vitry-en-Charollais, Nièvre d'Arzembouy à Poiseux (cf. Figure 13). En moyenne, sur les neuf bassins versants étudiés, le débit a diminué de 11%.

Le régime hydrologique est impacté dans son ensemble (cf. Figure 15) : des diminutions sont visibles sur une majeure partie de l'année. Les diminutions significatives observées en août et septembre (-28 et -13%), bien que moins importantes que celle observée en Juin (-40%), interviennent à une période critique de l'année où la ressource en eau est déjà peu disponible. En parallèle, les cumuls annuels de précipitations n'ont pas évolué. La diminution des débits est donc essentiellement imputable à l'augmentation de l'évapotranspiration sous l'influence de l'accroissement brutal des températures.

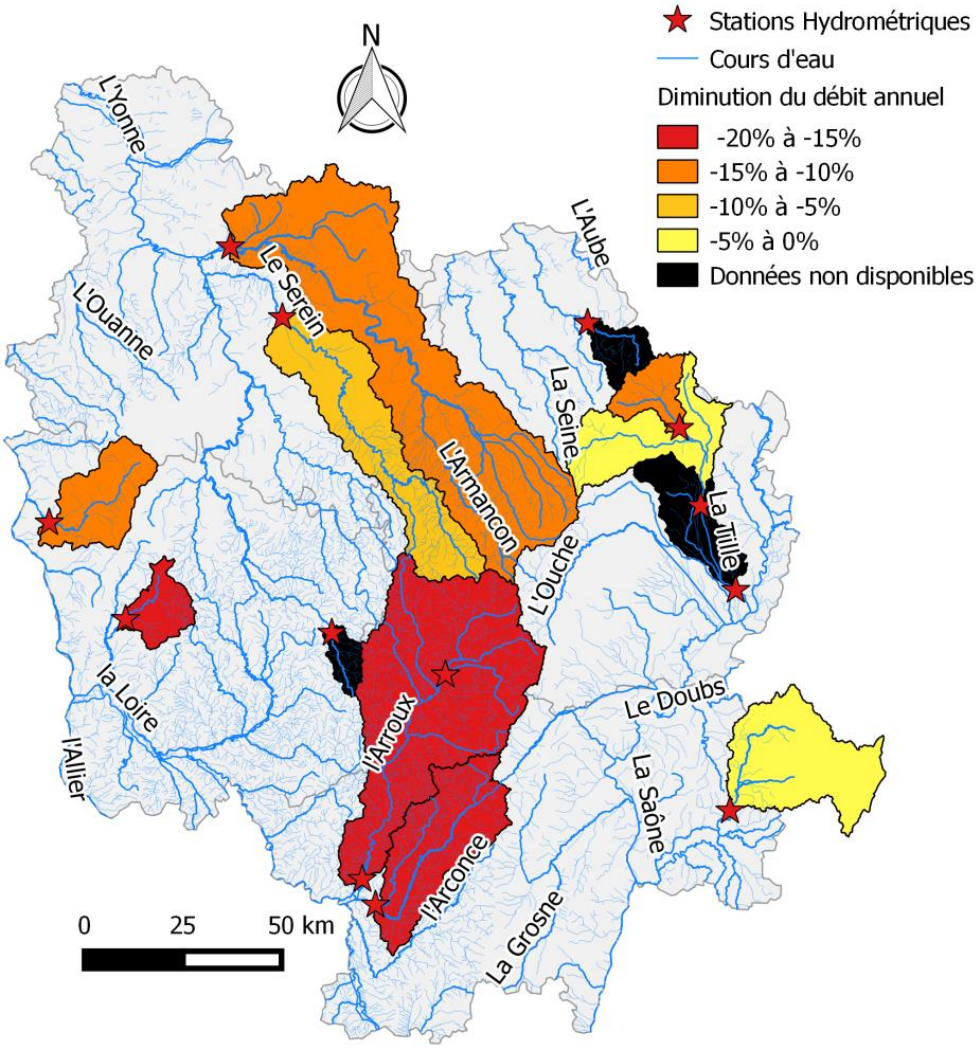


Figure 14 : Différence de débit annuel entre les périodes 1969-1987 et 1988-2009 sur les 9 bassins versants étudiés (différence en % [1988-2009] - [1969-1987])

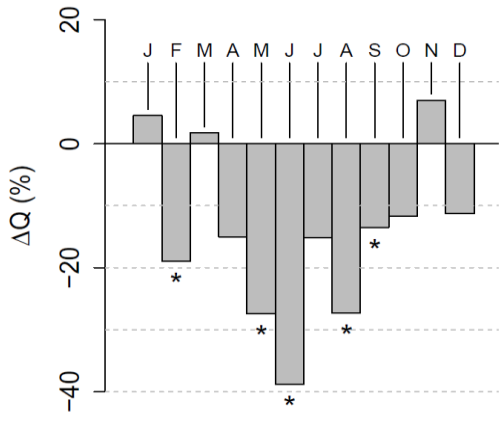


Figure 15 : Différences entre les moyennes mensuelles interannuelles de la période 1969-1987 et 1988-2009 sur vingt chroniques de débits en Bourgogne (différence en % [1988-2009] - [1969-1987])

2. Simulation du climat passé (1980-2011) et de ses impacts sur la ressource en eau

a. Des températures validées, des précipitations difficiles à simuler de manière robuste et nécessitant des post-corrections

La chaîne de modélisation hydro-climatique a été développée sur la période 1980-2011. Pour alimenter latéralement le MCR WRF, les données utilisées sont des réanalyses. Les réanalyses sont générées par des modèles météorologiques, versions les plus récentes, alimentés rétrospectivement par des observations (stations de mesures in situ, radio sondage, données satellitales etc.) selon une procédure dite d'assimilation (Dee et al., 2011). Le climat est ainsi rétrospectivement reconstitué au pas de temps de 6h pour l'ensemble du globe. Les réanalyses disponibles sont nombreuses (https://reanalyses.org/atmosphere/comparison-table). Certaines permettent de documenter l'ensemble du XXème siècle (Compo et al., 2011). Mais leur qualité a largement bénéficié de l'apport des produits satellites développés depuis les années 1970 (Poli et al., 2010). Ainsi, avons-nous opté pour les réanalyses ERA-Interim (Berrisford et al., 2011), optimales pour l'Europe sur les dernières décennies (Dee et al., 2011). Les réanalyses ERA-Interim sont disponibles à partir de 1979. Nous les avons utilisées dans le cadre du projet HYCCARE sur la période 1980-2011 (l'année 1979 servant de période d'équilibrage du modèle) pour évaluer la capacité du modèle WRF à régionaliser correctement les données d'entrée des modèles hydrologiques. Températures et précipitations annuelles observées et simulées par la chaîne ERA-WRF sont comparées sur la période 1980-2011 (cf. Figure 16).

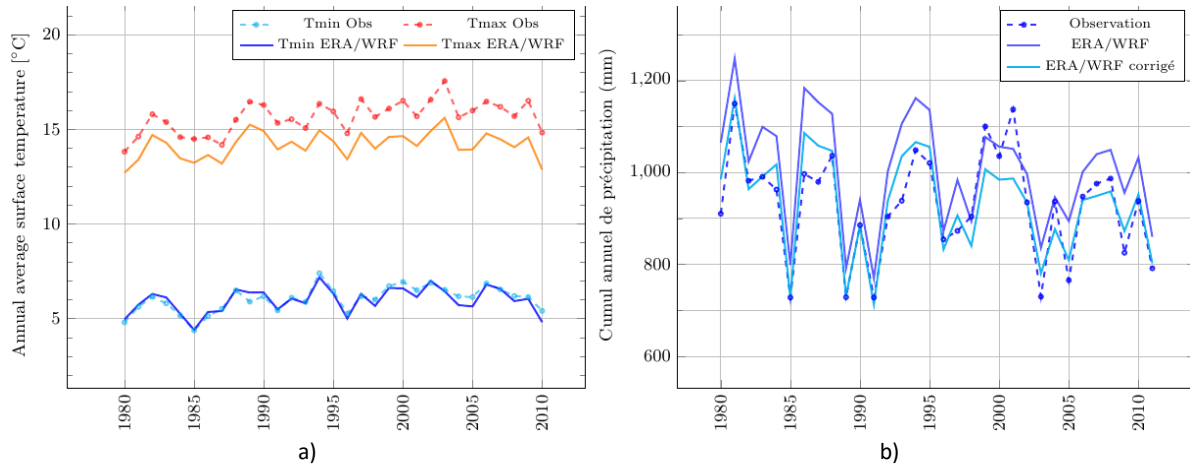


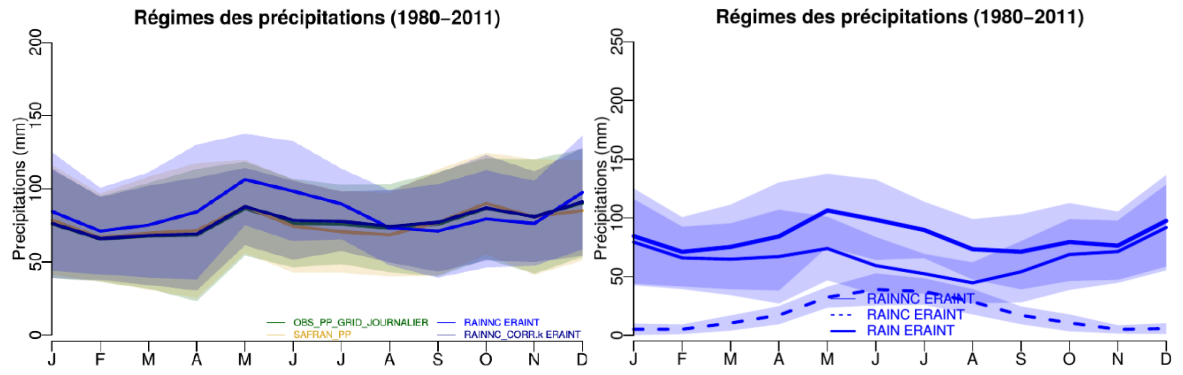
Figure 16 : Températures (Tmax et Tmin) (a) et précipitations (b) annuelles observées et simulées (ERA/WRF)

La variabilité inter-annuelle des températures moyennes annuelles est très bien reproduite par ERA-WRF (R^2 = 0.87). Aucun biais d'importance n'est observé sur les Tmin. Sur les Tmax, un biais froid systématique est noté (~ 1.4°C, cf. Figure 16a). Ces résultats recoupent partiellement ceux de Xu *et al.* (2012). Partiellement seulement, car les biais chauds auparavant observés sur les Tmin, et attribués à WRF (Zang *et al.*, 2009), ont quasi disparu. Signalons ainsi l'effet des améliorations effectuées entre les versions 3.1 et 3.3.1 de WRF. En revanche, sur les Tmax, les biais froids persistent. Ils sont maxima lors des saisons chaudes (printemps et été), atténués automne et hiver (cf. Annexe A). Nous suggérons qu'ils sont attribuables à ERA-Interim.

La variabilité interannuelle des cumuls annuels de précipitations (cf. Figure 16b) est également bien reproduite (R^2 = 0.86). Mais les précipitations sont systématiques surestimées (+ 86mm/an en moyenne). Ce biais pluvieux n'est pas constant sur l'année. Il est maximal en période convective, au printemps et en été (cf. Figure 17). ERA-WRF tend à surestimer les pluies convectives (issues des

orages). Cette surestimation trouve son origine dans 1) la paramétrisation du schéma de convection plus ou moins adapté à la zone géographique et 2) l'absence de rétro-action entre les schémas de convection et radiatif (Alapaty et al., 2012). Comme l'ont récemment observé Boulard et al. (2016), ce dernier point a été corrigé dans les dernières versions de WRF. Enfin, une part difficile à quantifier est attribuable au schéma de microphysique. Notons que les précipitations stratiformes (c'est-à-dire non convectives) sont assez bien reproduites. Ce type de précipitations domine lors des mois froids.

Ce biais pluviométrique, même s'il ne représente qu'environ 10% du cumul annuel total, est un obstacle pour la simulation des débits. Pour pallier cela, une méthode de post-correction statistique dite 'quantile mapping' (Boé *et al.*, 2007, Gudmundsson *et al.* 2012) a été appliquée. Elle a permis de réduire le biais moyen annuel à 39mm. Cet « assèchement » intervenant principalement sur la période convective, la correction a également permis de récupérer un signal de précipitations plus cohérent et performant. La correction appliquée de manière différenciée au pas de temps mensuel permet de produire un régime de précipitations conforme à ceux obtenus avec les observations interpolées ou par SAFRAN (cf. Figure 17a).



(a) Précipitations ERA-WRF simulées (bleu), ERA-WRF simulées post-corrigées par quantile mapping (violet), observées interpolées (vert) et SAFRAN (moutarde)

(b) Parts stratiformes (RAINNC) et convectives (RAINC) des précipitations simulées (ERA-WRF)

Figure 17 : Régime moyen de précipitations (1980-2011)

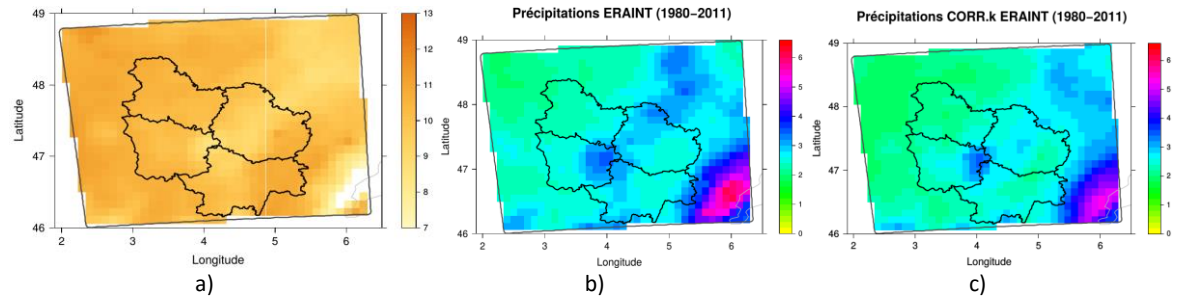


Figure 18 : Cartes des températures moyennes annuelles (a) et des précipitations moyennes journalières non-corrigées (b) et corrigées (c)

Les géographies des températures et des précipitations sont réalistes (cf. Figure 18). La conformité entre champs observés et simulés ($R^2 > 0.9$) est une valeur ajoutée importante de la méthode de désagrégation dynamique du climat et témoigne de l'apport de WRF, ce grâce à sa capacité à décrire finement la physiographie des territoires. La carte des températures (cf. Figure 18a) montre clairement l'impact du relief avec des températures annuelles moyennes plus faibles sur le Morvan et le Jura (partie sud-Est de la zone). Ces moyennes montagnes sont les plus arrosées (cf. Figure 18b). Mais la

comparaison entre la Figure 18b et la Figure 18c suggère qu'à la non-homogénéité des biais dans le temps se surajoute une hétérogénéité spatiale.

Les sur-cumuls de précipitation se concentrent principalement sur les versants exposés aux vents dominants, à savoir Ouest à Sud-Ouest (cf. Figure 18b). L'hypothèse est que, dans le modèle WRF et sa paramétrisation du schéma de convection, le forçage orographique en est à l'origine (Marteau et al., 2015). Après post-correction, la géographie des précipitations est significativement modifiée (cf. Figure 18c).

Malgré la fiabilité des données de forçage produites par les réanalyses ERA-Interim bénéficiant d'une assimilation optimale (qualité et densité du réseau d'observation in situ dur l'Europe, période couverte par les satellites, dernière génération du modèle météorologique), et malgré l'utilisation d'une version up-gradée de WRF (3.3.1), les biais identifiés sur les précipitations simulées nécessitent de développer une méthode statistique de post-correction. C'est indispensable pour alimenter de manière réaliste un modèle d'impact. Sans post-correction statistique des précipitations, les simulations des débits observés (1980-2005) des différents cours d'eau sélectionnés pour HYCCARE par les modèles hydrologiques ne sont pas robustes. Ces résultats rejoignent ceux présentés dans un récent travail (Boulard et al., 2015) de comparaison et validation détaillée des variables climatiques simulées par WRF (rayonnement, humidité relative, pression de surface, vitesse du vent – Allen et al. 1989) nécessaires au calcul de l'ETP Penman-Monteith. Dans HYCCARE, La simulation correcte des débits après post-correction des pluies confirme indirectement que l'ETP simulée est correcte.

b. Des simulations de l'évolution de la ressource en eau robustes

Afin de comparer la réponse des modèles hydrologiques à la rupture climatique observée, les simulations de débits sur la période 1980-1995 ont été comparées aux observations sur les bassins versants de l'étude. En raison de la disponibilité des données sur cette période, et pour ne considérer que des bassins versants indépendants, seuls 8 des 13 bassins ont été analysés : Arroux, Bourbince, Nièvre, Nohain, Armançon, Serein, Tille et Seille. Les différences de débits (en pourcentage) entre la période 1980-1987 et 1988-1995 sont représentées dans la Figure 19. Les débits simulés par les modèles SWAT, GR4J et GARDENIA montrent une tendance proche de celle observée, à savoir, une diminution répartie sur une majeure partie de l'année. Cependant, SWAT simule des diminutions du débit plus fortes que GR4J et GARDENIA.

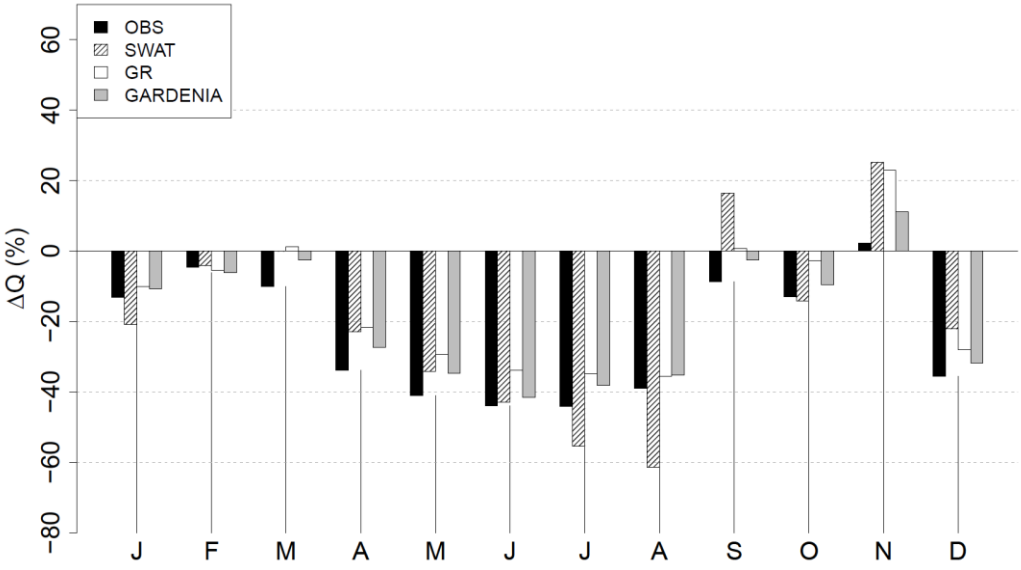


Figure 19 : Différences entre les moyennes mensuelles interannuelles de débits simulés et observés (en %) de la période 1980-1987 et 1988-1995 sur 8 bassins versants

Les modèles hydrologiques décrits précédemment ont été calibrés et validés de part et d'autre de la rupture climatique observée. La performance constante des modèles, qu'ils soient calibrés avant ou après la rupture climatique, témoigne de la robustesse de la méthode et des résultats et autorise à appliquer cette méthode de modèles d'impacts du changement climatique à l'horizon 2100.

Ces diminutions observées de débits peuvent être engendrées notamment par une diminution de la fraction des précipitations qui s'infiltre et recharge la nappe. Ces pluies efficaces peuvent être modifiées par de multiples facteurs, qu'ils soient climatiques (modification des précipitations et de l'évapotranspiration), pédologique (réserve utile du sol, capacité d'infiltration) ou paysager (occupation du sol). Ainsi, une modification du climat telle que celle observée après 1987/88 peut voir ses effets atténués ou aggravés par d'autres paramètres non climatiques. La modélisation permet d'appréhender ces différents paramètres afin de tester leur influence respective.

c. Bilan hydrique : évolutions et sensibilités

Le modèle SWAT permet de simuler les processus d'infiltration, de ruissellement, et de recharge de la nappe à l'échelle des sous-bassins sur 3 des 13 bassins versants retenus (cf. page 15): l'Armançon à Brienon-sur-Armançon, la Tille à Champdôtre et l'Arroux à Dracy-Saint-Loup. L'analyse des sorties du modèle SWAT permet de comprendre comment évoluent les principaux compartiments du cycle hydrologique (eau du sol, eau de percolation, jusqu'au débit des cours d'eau) en réponse à un forçage climatique. Deux indicateurs ont été choisis pour caractériser cette réponse. Leur évolution, au travers de la rupture climatique observée en 1987/88, informe sur l'expression différentielle des impacts du changement climatique dans les territoires.

La recharge des nappes souterraines s'effectue grâce au phénomène de percolation. Lors d'un épisode de pluie, dès lors que la teneur en eau du sol dépasse sa capacité de rétention maximale (appelée capacité au champ en agronomie), une lame d'eau gravitaire percole à travers le profil de sol et alimente les niveaux plus profonds. L'indicateur de recharge des nappes consiste en un nombre moyen de jours par an durant lesquels l'eau percole à la base du profil de sol.

La percolation informe de la recharge des nappes, mais pas de l'évolution de la teneur en eau du sol. Or, d'un point de vue agronomique, la sensibilité d'un territoire en période de sécheresse provient d'une diminution parfois importante du remplissage de la réserve utile. Afin de fournir un indicateur de cette sensibilité, nous nous intéressons également à l'évolution du nombre de jours (par an) durant lequel la réserve utile est remplie à moins de 50% (situation de stress hydrique pour les végétaux).

Les deux indicateurs ont été moyennés par bassin, et sur les deux sous-périodes de part et d'autres de la rupture (1980-87 et 1988-95). Leurs valeurs, ainsi que celles de paramètres climatiques (précipitations, ETP et température) sont présentées dans le Tableau 16.

Tableau 16 : Paramètres climatiques et indicateurs hydriques sur les deux périodes

Période	Paramètre	Arroux	Armançon	Tille
1980-1987	P (mm)	979	906	960
	ETP (mm)	661	675	644
	T(°C)	8.5	9.3	9.2
	Percolation (jours/an)	110	111	114
	Stress (jours/an)	45	34	80
1988-1995	P (mm)	928	861	916
	ETP (mm)	676	700	662
	T (°C)	9.5	10.2	10.0
	Percolation (jours/an)	105	105	104
	Stress (jours/an)	60	42	96

Le nombre de jours de percolation, et donc de recharge de la nappe, est en baisse sur les trois bassins tandis que le nombre de jours de stress hydrique (teneur en eau inférieure à 50%) est en augmentation. Sur cette courte période (deux fois huit ans), cette baisse globale de la disponibilité en eau (dans les nappes et dans le sol) s'explique par l'évolution conjointe des précipitations et de l'ETP. Portée par la hausse de la température, l'ETP augmente de +15 et +25mm selon les bassins entre les deux périodes (1980-87 et 1988-95). Sur les trois bassins versants, les précipitations diminuent d'environ 50 mm entre les deux sous-périodes de 8 ans, alors que les précipitations n'évoluent pas sur la période 1961-2011 (cette spécificité est due à la faible durée de la période considérée). Cette diminution des apports renforce la baisse globale de la disponibilité en eau et en rend l'attribution (hausse de la température et de l'ETP versus baisse des précipitations) plus délicate. L'évolution par sous-bassins des 2 indicateurs est présentée en Figure 20 et en Figure 21.

L'évolution des indicateurs présente des inégalités spatiales (cf. Figure 20 et Figure 21). Sur un certain nombre de sous-bassins, elle semble corrélée avec l'évolution des précipitations entre les deux périodes, tandis que l'évolution de l'ETP (calculée à 12 km) est par essence beaucoup plus homogène au sein des bassins.

Mais ce forçage climatique n'affecte pas la teneur en eau du sol et la recharge des nappes de la même façon. En effet, un calcul de corrélation entre les différences de précipitations et d'indicateurs donne des valeurs significatives et atteignant 0.67 à 0.76 selon le bassin, pour l'indicateur de percolation, et 0.28 à 0.42 pour le stress hydrique.

Bien que le premier des paramètres contrôlant la recharge des nappes ainsi que la teneur en eau du sol soit la quantité d'eau précipitée, d'autres facteurs interviennent également. En premier lieu, seule la fraction d'eau infiltrée alimente effectivement le sol. Cette fraction d'eau infiltrée est modifiée par le type d'occupation du sol, le relief, la texture du sol, ou encore l'antécédence d'humidité du sol. En réponse à l'infiltration de l'eau, la teneur en eau du sol varie d'autant plus que la réserve utile du sol est faible. Elle est également influencée par la demande évaporatoire des plantes et de l'atmosphère, qui varie selon le type de végétation et la période de l'année. La percolation, et donc la recharge des nappes, n'intervient finalement que lorsque la teneur en eau du sol dépasse la capacité de rétention du sol.

À l'égard de la multitude d'interactions entre ces facteurs, on comprend aisément que la recharge des nappes et la teneur en eau des sols montrent des évolutions distinctes en réponse au même forçage climatique. Cela amène à considérer une sensibilité différente pour chaque compartiment du cycle de l'eau. Il n'existe donc pas une seule carte de fragilité des territoires face au changement climatique. Les territoires connaissant des difficultés sur plusieurs plans (stress hydrique, déficit de recharge...) seront certainement ceux qui seront les plus impactés dans le futur.

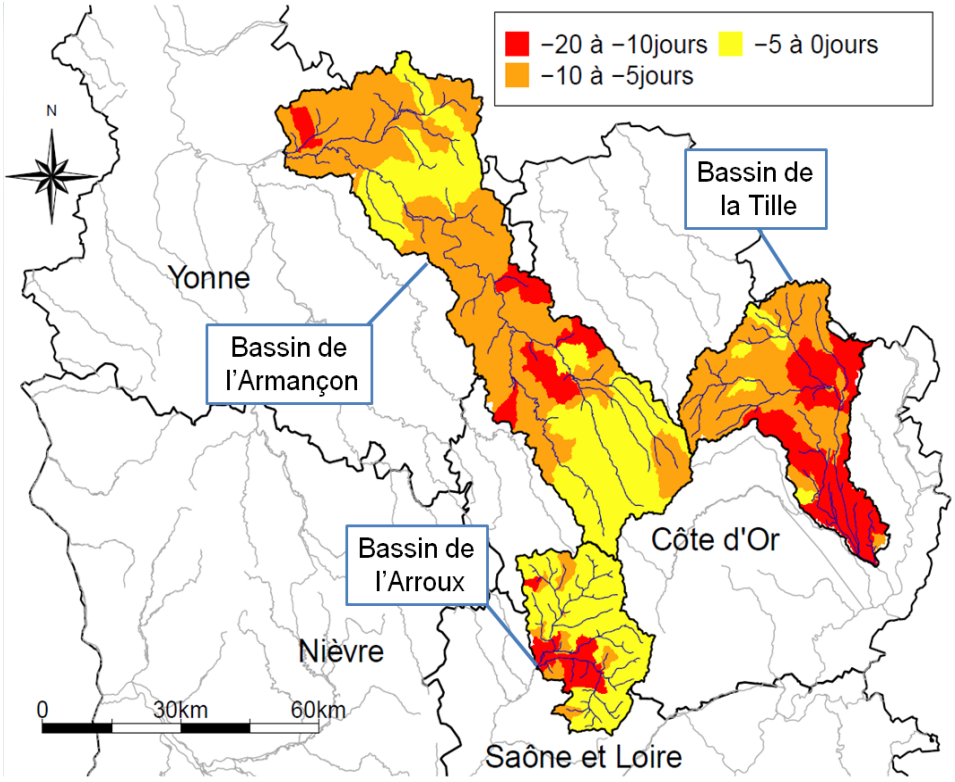


Figure 20 : Différence entre les deux sous-périodes du nombre de jours moyens par an où l'eau percole à la base du profil de sol sur les trois bassins versants étudiés

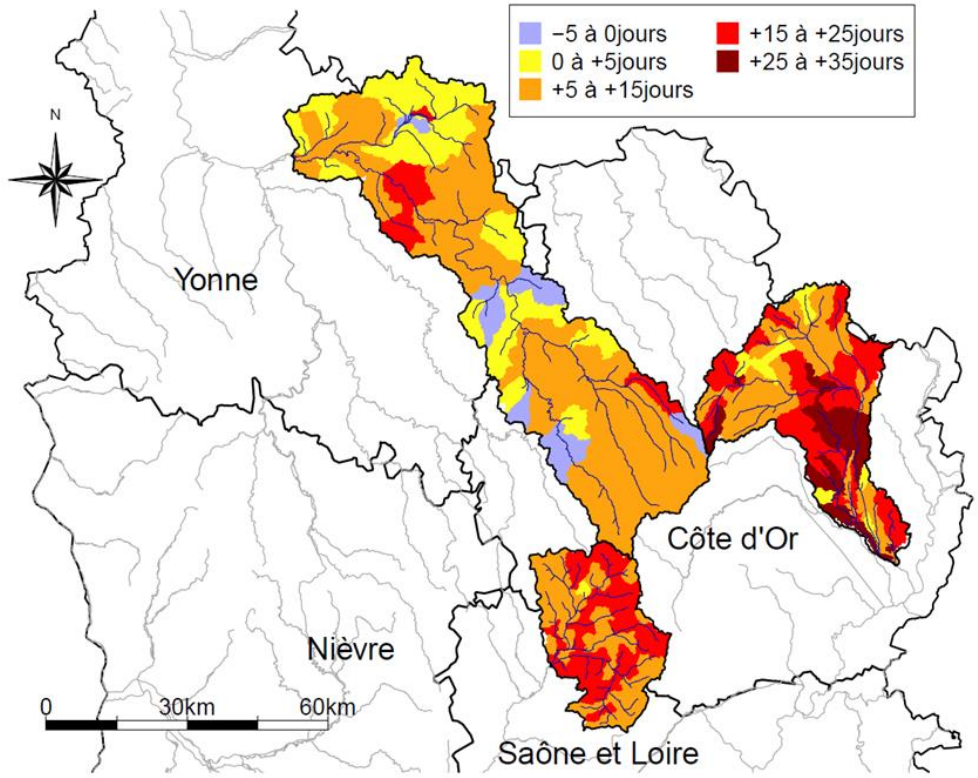


Figure 21 : Différence entre les deux sous-périodes du nombre de jours moyens par an où la réserve utile est remplie à moins de 50% (stress hydrique) sur les trois bassins versants étudiés

L'activité agricole, déjà dépendante du climat

Sur le Tableau 17, les Modèles 2 et 3 montrent que les coefficients estimés du Modèle 1 sont relativement stables lorsque les variables de climat ne sont pas les mêmes. Le Modèle 1 nous indique qu'une augmentation de 1°C des températures pendant la saison de croissance d'avril à septembre augmente de 0,19% le prix des terres. Des températures suffisamment élevées sont nécessaires durant la saison de croissance des plantes. Une augmentation de 1 jour du nombre de jours de pluie diminue quant à elle le prix de 3,22%. Nous captons ici le risque d'excès d'eau auquel sont fortement exposées les cultures de Côte-d'Or.

Parmi les résultats les plus intéressants, notons également que le prix des terres est 14.83% plus faible dans les communes dont le sol est à dominante argileuse par rapport aux communes à dominante limoneuse. Les sols limoneux auraient donc un potentiel agronomique plus fort en Côte-d'Or.

Enfin, le Modèle 1 nous apprend que la densité de population augmente le prix des terres, en raison des anticipations d'urbanisation. Le fait que l'acheteur soit le fermier sur place diminue le prix, en raison du statut du fermage qui protège les agriculteurs locataires de terres. Enfin, nous observons que seule la Petite Région Agricole de la Côte viticole induit un prix plus élevé que la PRA Plateau langrois. Plus précisément, une terre vendue dans une commune appartenant à la PRA Côte viticole sera 33.76% plus chère qu'une terre vendue dans une commune qui est dans la PRA Plateau langrois. Nous captons ici un effet d'anticipation de conversion vers de la vigne dans la mesure où la viticulture d'appellation est représentée par la PRA Côte viticole.

Tableau 17 : Résultats d'estimation de modèles économétriques du prix des terres agricoles en Côte-d'Or

	Modèle 1	**Modèle 2**	**Modèle 3**
Constante	6.58487***	2.38812**	13.36857***
Température saison de croissance Avril – Septembre	0.00194***	0.00217***	
Pluie en nombre de jours saison de croissance Avril – Septembre	-0.03226***		-0.04855***
Sable	0.05059	0.11571	-0.03032
Argile	-0.12988**	-0.11681*	-0.21729***
Texture mixte	-0.00121	-0.00653	-0.04531
Perméabilité	-0.14669**	-0.16677***	-0.21153***
Auxois	-0.36203***	-0.33543***	-0.37405***
Côte viticole	0.36359**	0.53330***	0.43073***
La plaine	-0.23461	-0.03589	0.00162
La vallée	0.16023	0.08293	0.39121***
Morvan	-0.34788**	-0.37137**	-0.43906***
Tonnerrois	0.10916	0.04068	0.30289
Val de Saône	-0.44210**	-0.28238	-0.13476
Vingeanne	-0.35148**	-0.18017*	-0.18500
Densité de la population dans la commune	0.17474***	0.18275***	0.21650***
Densité au carré	-0.00447***	-0.00459***	-0.00530***
Acheteur fermier sur place	-0.12032***	-0.11296**	-0.12861***
Année	0.07310	0.07321	0.05824
R^2	0.4159	0.4102	0.3920
R^2 ajusté	0.3986	0.3937	0.3749
N	625	625	625

*** significatif au seuil de 1%, ** significatif au seuil 5 %, * significatif au seuil 10%.

3. Quelles modalités du changement climatique à venir ?

Dans cette ultime étape de modélisation, le climat est intégralement simulé (pas de données observées ni de réanalyses). Deux simulations distinctes ont été réalisées :

- la première sur une période de contrôle (1980-2005) afin d'éprouver la capacité de la chaîne de modélisation climatique à reproduire un climat réaliste ;
- la seconde pour le siècle à venir (2006-2098) afin de tester la sensibilité du climat à l'augmentation des concentrations en GES.

a. Simulation de contrôle ARPEGE-WRF 1980-2005 : température et ETP réalistes, précipitations non validées

Le forçage de WRF par les données Arpege sur la période 1980-2005 ne permet pas l'intercomparaison directe année par année. En effet, le climat simulé est virtuel. C'est seulement la climatologie moyenne sur la période qui peut être confrontée entre les différents jeux de données. Ainsi les cycles moyens de ETP calculés par ERA-WRF versus Arpege-WRF sont proches l'un de l'autre sur la période 1980-2005 (cf. Figure 22a). Tout juste constate-t-on une légère surestimation générée par Arpege-WRF sur les mois de décembre et janvier. La proximité sur les régimes d'ETP atteste de la capacité d'Arpege-WRF à reproduire une climatologie cohérente des températures, du rayonnement et des vents. La distribution des températures montre (résultats non présentés) les mêmes biais froids que pour ERA-WRF sur les Tmax.

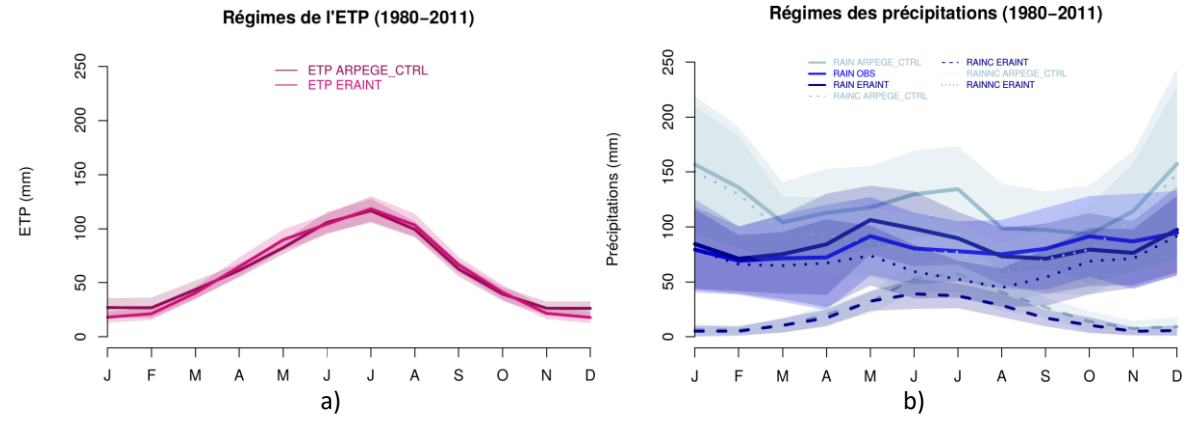


Figure 22: Régimes moyens d'évapotranspiration potentielle (a) et de précipitations (b) simulés par ERA-WRF (1980-2011) et Arpege-WRF (1980-2005)

Le régime pluviométrique Arpege-WRF présente une surestimation systématique des cumuls mensuels. Cela était déjà observé pour ERA-WRF, mais ces excès pluviométriques sont amplifiés (cf. Figure 22b). De surcroît, le régime pluviométrique est mal reproduit. Les trop forts cumuls de printemps et d'été sont toujours attribuables à la simulation excessive des précipitations convectives. Mais ils s'accompagnent de cumuls stratiformes également exagérés (novembre à février). A noter que les précipitations, comme pour ERA-WRF, présentent des biais amplifiés en zone de relief (Morvan, plateau du Châtillonnais, contreforts du Jura). L'excès de précipitations convectives est attribuable au schéma de paramétrisation de la convection sous-maille utilisé par WRF. Par contre, les excès de précipitations stratiformes en saison froide suggèrent un signal transmis au modèle WRF par le MCG Arpege. En d'autres termes, le MCG Arpège transmettrait trop d'humidité aux bornes latérales du MCR WRF.

En l'état, les simulations Arpege-WRF ne peuvent pas être utilisées directement pour alimenter des modèles hydrologiques simulant les débits des cours d'eau. Il est encore ici nécessaire de procéder à une post-correction des précipitations. L'idée est que l'application dédiée Arpege-WRF de la post-correction sur la période 1980-2005 pourrait permettre d'estimer les coefficients qui seront appliqués pour les simulations du climat projeté selon la trajectoire RCP8.5. Cette démarche s'appuie sur l'hypothèse contestable de stationnarité des biais pluvieux pour le climat projeté.

Nous verrons que la violation de cette hypothèse interdit d'appliquer l'ensemble de la chaîne de simulation hydro-climatique au climat projeté. Néanmoins, la capacité d'Arpege-WRF à simuler correctement température et ETP permettent de brosser les modalités de l'évolution probable de la ressource en eau. Pour cela, il est possible notamment de s'appuyer sur les résultats observés. Préalablement, il convient de vérifier que les modalités du réchauffement climatique projeté sont compatibles avec celles ayant été observées. En d'autres termes : retrouve-t-on un scénario de changement climatique projeté qui se rapprocherait des modalités du changement (réchauffement brutal et stabilité des précipitations) observé en Bourgogne (Richard *et al.*, 2014) et en France (Brulebois *et al.*, 2015) au cours des cinquante dernières années ?

b. Simulation ARPEGE-WRF 2006-2098 : poursuite du réchauffement par paliers

Nous avons appliqué les mêmes méthodes de détection de ruptures à la courbe d'évolution des températures projetées sur le 21ième siècle en Bourgogne selon la trajectoire de forçage radiatif RCP8.5. Le résultat montre (cf. Figure 23) des modalités de réchauffement similaires à celles observées sur le climat passé récent, à la différence près que pour le climat projeté l'amplitude des ruptures est moins importante et qu'entre ces ruptures sont observées des tendances haussières. 1987-1988 fut une première rupture. Elle en annonce d'autres. Mais elle présente des spécificités liées à l'un de ses facteurs (réduction des émissions d'aérosols en Europe) qui ne se reproduira pas (du moins dans ARPEGE) au cours du XXIème siècle. Les périodes entre deux ruptures permettent d'identifier une série de climats successifs. La durée de ces climats tend à se raccourcir au fur et à mesure que le réchauffement s'accélère et s'amplifie. Le saut d'un climat au climat suivant s'effectue selon des ruptures de plus en plus marquées. Ces deux derniers éléments sont portés par les concentrations en GES associées à la trajectoire 8.5. Les différents climats ainsi identifiés permettent d'effectuer une série de troncature au cours du XXIème siècle. Les dates de ces troncatures ne sont pas mentionnées. Elles sont en effet virtuelles et ne présentent aucun caractère prédictible. Seule l'existence de ruptures constitue une hypothèse crédible, celle retenue pour définir une succession de climats fondés sur des hausses soudaines de température.

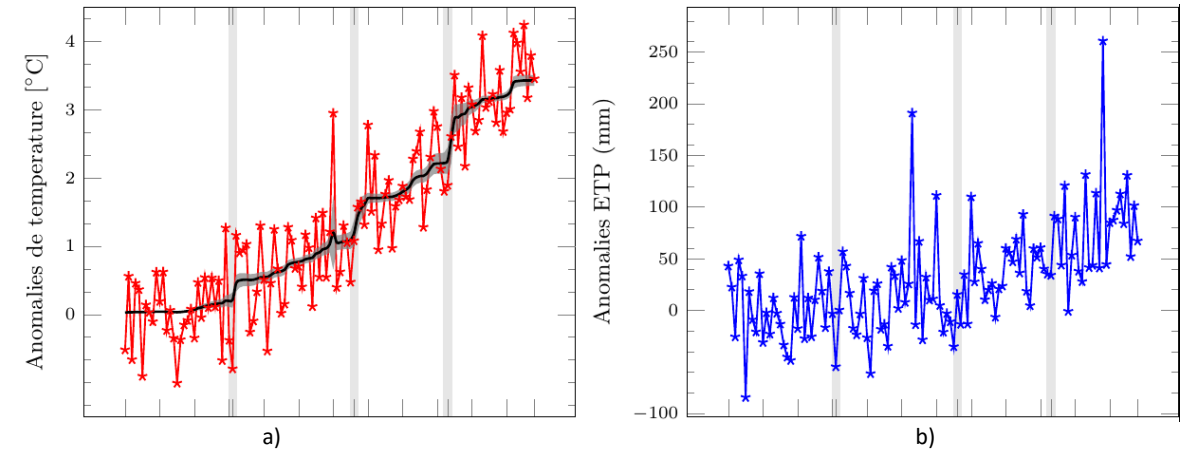


Figure 23 : a) trajectoire de la température moyenne annuelle simulé en continu par WRF forcé par Arpege-WRF sur la période 2006-2098; b) Évolution de l'ETP sur la même période

Conjointement au réchauffement nous observons une évolution haussière de l'ETP. En fin de siècle ces anomalies sont de l'ordre de +80mm. Deux éléments sont toutefois à noter dans cette évolution : i) une forte variabilité interannuelle avec des anomalies positives très fortes pour certaines années et ii) un retard dans l'augmentation de l'ETP qui est décalé avec le réchauffement des températures. Ce dernier point suggère soit une compensation par un comportement différencié du rayonnement, du vent ou de l'humidité relative ou une saisonnalité du réchauffement qui a retardé l'effet sur l'ETP. La Figure 24a supporte cette deuxième idée avec un premier réchauffement plutôt marqué sur les Tmin et Tmax hivernales limitant ainsi la hausse de l'ETP.

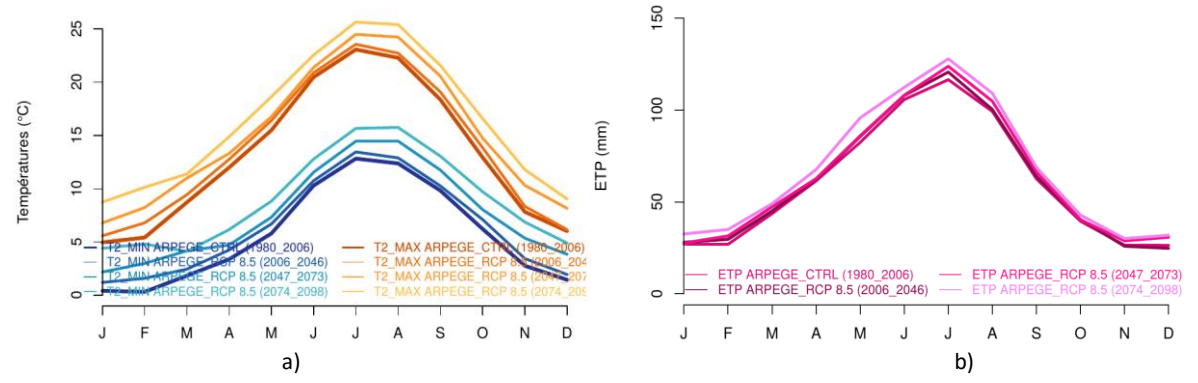


Figure 24 : a) Cycle annuel des Tmin et Tmax et b) de l'ETP pour chacun des climats inter-rupture projetées sur le 21ème siècle selon la trajectoire RCP8.5 régionalisée par WRF

Ce n'est que sur les périodes suivantes du réchauffement que les Tmin et Tmax augmentent de façon significative en période végétative entraînant mécaniquement une augmentation de l'ETP. Cette augmentation est finalement très nette d'avril à août sur la dernière phase du réchauffement. Ce scénario avec une effet complexe et ténu au cours des premières décennies ne peut se satisfaire pour avoir une image robuste de l'évolution de la ressource en eau que de simulation fiable des pluies. Or comme nous le suggérions plus haut ce point est critique dans nos simulations. Indépendamment de cela et en partant de l'hypothèse de cumul de pluie inchangé ou en légère augmentation comme suggéré par les résultats de la Figure 12 nous pouvons bâtir un scénario plausible d'évolution de la ressource.

c. Simulation ARPEGE-WRF 2006-2098 : sensibilité des précipitations au réchauffement

Les climats analysés sont déterminés à partir des ruptures identifiées sur la température moyenne en Bourgogne, température simulée par ARPEGE-WRF RCP 8.5 (cf. Figure 23a). Sur les précipitations ARPEGE-WRF, une post-correction Quantile Mapping a été appliquée. Les coefficients de cette post-correction ont été déterminés sur la base de l'écart local (12 km) et mensuel calculé entre la simulation de contrôle ARPEGE-WRF (1980-2005) et l'observation interpolée (1980-2011). Pour un mois donné (ex janvier) et une maille donnée, les corrections sont identiques tout au long du siècle. Elles sont stationnaires et ne modifient en rien le signe de l'évolution pluviométrique simulée par ARPEGE-WRF.

Les champs pluviométriques sont présentés pour les climats successifs de Bourgogne (cf. Figure 25). Globalement, les précipitations augmentent. Il ne s'agit pas d'une augmentation régulière : tous les climats sont plus pluvieux que l'actuel, mais le climat fin de siècle ne l'est pas plus que le climat mi-siècle. La géographie des évolutions montre que les reliefs (Morvan, Jura) enregistrent des augmentations pouvant être particulièrement fortes (1 mm/jour soit 365 mm/an). Une hausse des précipitations est possible sous nos latitudes. Au cours du XX^{e} siècle, elle a été observée en Bourgogne

(série homogénéisée Dijon Météo France). A l'échelle de la Bourgogne, l'année 2013 se dispute avec 1977 le titre d'année la plus arrosée jamais enregistrée. Pour autant une hausse des précipitations est-elle probable pour le siècle à venir ? Ce n'est pas ce qu'indiquent les simulations d'ensembles dont la moyenne tend plutôt vers une diminution, mais dont la diversité des membres signe surtout une forte incertitude (Terray and Boé, 2013). Pour la Bourgogne, si une augmentation des précipitations annuelles au cours du XXIe siècle ne peut être exclue, elle n'est pas le scénario le plus probable.

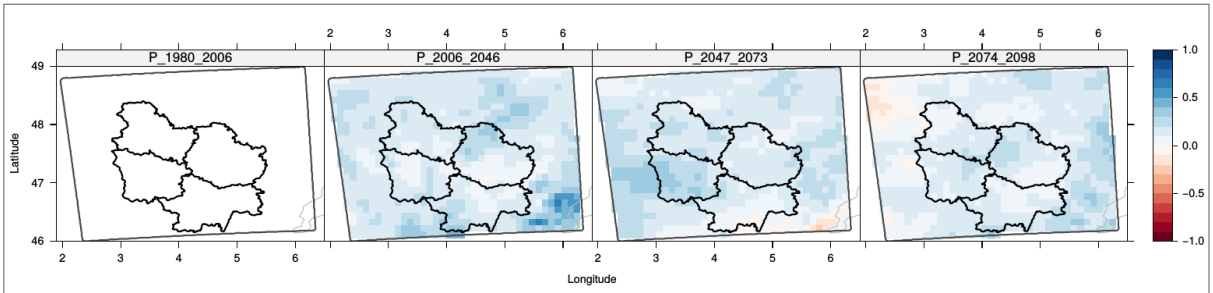


Figure 25 : Cartes des anomalies des cumuls journaliers des pluies corrigées à l'échelle de la Bourgogne et pour chacun des climats inter-rupture

Le second élément qui interroge est porté par l'évolution des régimes (cf. Figure 26). Les précipitations printanières et estivales sont celles qui augmenteraient le plus (cf. Figure 26a). Les évolutions observées, que ce soit au cours du XXème siècle sur la série homogénéisée Dijon ou sur la période 1961-2011 à l'échelle de la Bourgogne, ne donnent aucun signe avant-coureur de cette augmentation des précipitations de saison chaude. De surcroît, malgré la post-correction appliquée aux précipitations, les cumuls moyens augmentent plus rapidement que l'ETP (cf. Figure 23b et Figure 24b). Cette augmentation concerne les pluies stratiformes et convectives (cf. Figure 26b) et suggère à la fois une contamination du domaine régional par les biais humides issus du modèle forceur ARPEGE et des biais non-stationnaires, au regard de leurs structures spatiale (cf. Figure 25) et temporelle (cf. Figure 26b), engendrés par WRF. Les précipitations convectives sont renforcées par le MCR dans un contexte de réchauffement (Maraun et al., 2010). Ce renforcement est attribuable à une réponse non-linéaire du schéma de convection amplifié par l'absence de rétro-action négative du schéma radiatif (Alapaty et al., 2012) qui va faire pleuvoir plus souvent. L'exemple des mois de mai-juin-juillet 2003 (période de forte chaleur) en Bourgogne illustre ce problème avec cinq fois plus de cumuls de pluies convectives simulés par WRF par rapport à l'observé (Castel et al., 2010). Ce mécanisme est possiblement amplifié par les forçages orographiques. L'incapacité de la chaîne de modélisation ARPEGE-WRF à reproduire un cycle annuel correct, même sur la période historique, et la dépendance des biais humides au réchauffement ne permettent pas d'avoir confiance dans les précipitations simulées par ARPEGE-WRF.

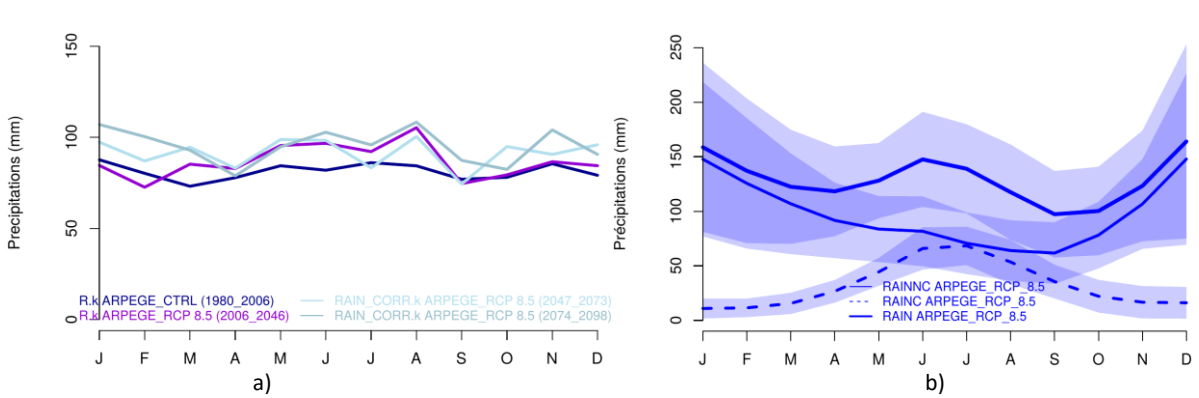


Figure 26 : a) Cycle annuel moyen corrigé pour chaque climat inter-rupture et b) cycles annuels moyens des pluies stratiformes et convectives calculés sur l'ensemble de la période 2006-2098

d. Simulation ARPEGE 2006-2098 : des précipitations également sensibles au réchauffement

Pour contourner ce problème, les précipitations simulées par ARPEGE ont été analysées. Ici il n'y a plus de désagrégation dynamique. La méthode est purement statistique. Les coefficients de l'ultime post-correction ont été déterminés sur la base de l'écart local et mensuel calculé entre la simulation de contrôle ARPEGE-WRF (1980-2005) et l'observation interpolée (1980-2011). La correction inclue une régionalisation statistique puisque la résolution spatiale d'ARPEGE est d'1.5° (environ 150 km) alors que celle des observations interpolées est de 12 km. En revanche, la correction reste stationnaire et ne modifie toujours pas le signe de l'évolution pluviométrique simulée par ARPEGE.

L'analyse des régimes pluviométriques ainsi obtenus (cf. Figure 27) montre des augmentations des volumes précipités et la difficulté d'ARPEGE à produire un cycle annuel réaliste. Ainsi, en amont des biais 'internes' générés par WRF, les biais humides du modèle forceur ARPEGE ont préalablement contaminé la simulation des précipitations. Déqué and Gibelin (2002) ont montré la propagation systématique des erreurs au sein du modèle ARPEGE entre les mailles de la basse résolution et celles plus fines du domaine d'intérêt. Cette contamination est un facteur qui complique la capacité des modèles climatiques à régionaliser correctement les pluies (Gensini et al., 2015).

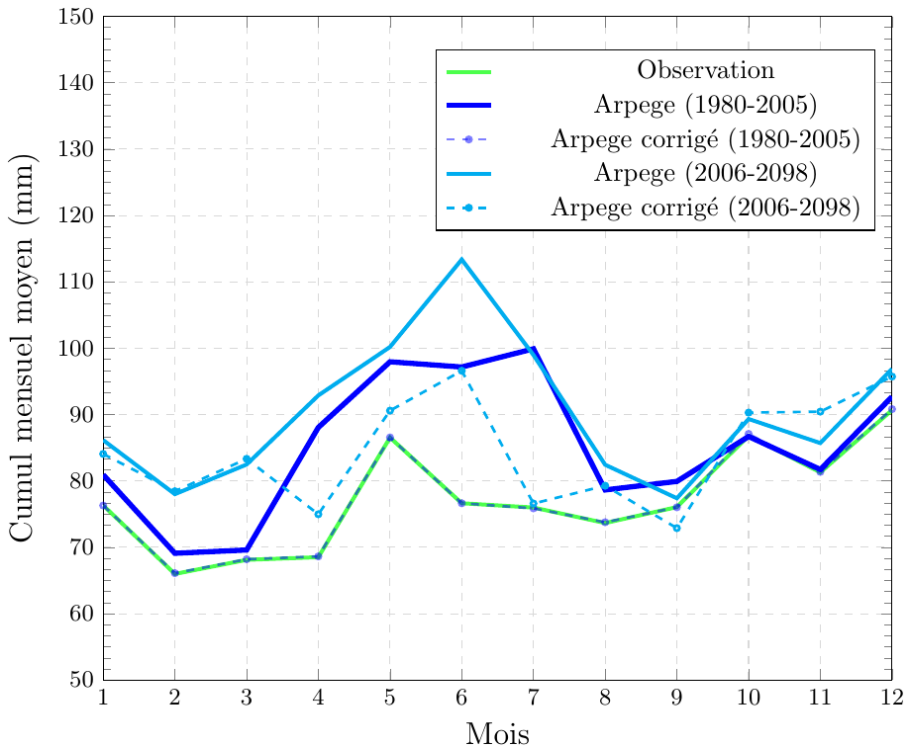


Figure 27 : a) Cycle annuel moyen des pluies non-corrigées et corrigées simulées par Arpege (CNRM-CM5.1) sur la Bourgogne pour la période historique (1980-2005) et projeté (2006-2098)

Le système climatique est fortement non-linéaire, les entrées et les sorties ne sont pas proportionnelles. Les changements peuvent être épisodiques et abrupts plutôt que lents et progressifs (Rial et al., 2004). Il est impératif que la communauté des chercheurs travaillant sur le système climatique de la Terre embrasse le paradigme de la non-linéarité et de la propagation des biais si nous voulons aller de l'avant dans l'évaluation de l'influence du changement climatique sur la ressource en eau.

Si l'incapacité actuelle des modèles de climat à régionaliser les pluies est un verrou majeur dans notre capacité à construire des connaissances solides et objectivées sur l'évolution de la ressource en eau, elle ne doit pas 'condamner' l'utilisation des MCR. Les progrès constants dans la compréhension et la modélisation des processus fins (Rummukainen 2016), ainsi que l'amélioration des méthodes de post-correction offrent des pistes (Chen et al. 2013, Teutchbein et al. 2013). Enfin, cette incapacité n'interdit pas de construire des scénarii qualitatifs robustes et efficaces en termes de conception puis de mise en place de politiques d'adaptation. Ainsi, en s'appuyant sur les trajectoires de réchauffement et d'ETP observées et projetées, ainsi que sur l'absence d'évolution des précipitations observées, nous avons pu bâtir une connaissance plausible sur l'évolution de la ressource en eau en Bourgogne. Cette connaissance s'appuie sur :

- la difficulté, pour ne pas dire l'incapacité des modèles de climat, à produire des évolutions pluviométriques de confiance ;
- les certitudes sur les modalités d'évolution des températures et de l'ETP (le rythme des évolutions restant une incertitude associée aux trajectoires radiatives et politiques d'atténuation) ;
- le fait qu'à volumes de précipitations inchangés, les débits des cours d'eau ont, forcés par des températures plus élevées, déjà diminué (Brulebois et al., 2015).

4. Conclusion : vers un scénario d'évolution du climat et de la ressource en eau

L'incertitude sur les précipitations projetées sur le XXI^{e} siècle, même relativement contenue en moyenne, rend délicate l'intégration des jeux de données de précipitation issus des modèles climatiques dans les modèles hydrologiques. L'une des raisons est que la transformation de la pluie en débit reste très dépendante non seulement des quantités d'eau précipitées, mais aussi de l'intensité et de la répartition temporelle de ces précipitations.

Pour autant, en se focalisant sur les observations des 30 dernières années, on peut considérer que le changement climatique est déjà là, comme en témoigne l'augmentation nette des températures. Celle-ci conduit, par l'intermédiaire très probable de l'accroissement de l'évapotranspiration, à la diminution des débits quelle que soit la saison, alors qu'en parallèle les précipitations ne diminuent pas.

C'est ce scénario, déjà amorcé au cours des dernières décennies, qui semble le plus probable pour celles à venir : un climat plus chaud, mais pas nécessairement plus sec en terme de précipitations, qui conduit à la diminution des débits moyens et à des étiages plus sévères. L'une des clefs pour anticiper l'avenir réside peut-être plus dans la compréhension fine des mécanismes de transformation des pluies en débits et de leur modification dans le cadre de l'évolution actuelle du climat, que dans notre capacité à simuler les débits futurs.

Les modèles hydrologiques conceptuels distribués ou semi-distribués (comme SWAT) peuvent aider à cette analyse des modifications actuelles de la transformation des pluies en débit, d'autant plus qu'ils simulent par exemple très correctement la diminution des débits observés après la brutale augmentation des températures de 1987-88. Au-delà, ils permettent de mettre en évidence des sensibilités différentes du territoire à ce changement climatique, sur la base de données climatiques observées et fiables.

V. Pénurie et gouvernance de l'eau, comment s'adapter ?

Les enquêtes auprès des huit territoires bourguignons choisis ont permis d'éclairer plusieurs questionnements relatifs à leurs capacités d'adaptation : Comment est actuellement gérée l'eau et avec quels outils ? La pénurie est-elle déjà présente et prise en compte localement ? Que peut-on dire de la gouvernance en place ? Comment l'adaptation au changement climatique est-elle appréhendée dans ces bassins versants ?

1. Dynamiques territoriales autour de la gestion de l'eau : huit situations

a. Les trois bassins versants en SAGE

Le bassin versant de la Tille

La Tille, affluent de la Saône, s'écoule en Côte-d'Or, en tête du bassin hydrographique Rhône Méditerranée. Son bassin versant est contrasté entre, au nord, un amont très rural dominé par la céréaliculture, avec une faible densité de population et une partie avale urbaine qui concentre près de 80 % de la population du bassin. On y retrouve tout ou partie du territoire de 9 des 24 communes du Grand Dijon et de 35 des 94 communes du SCoT de Dijon (cf. Figure 28). L'agriculture y est composée de cultures drainées (céréales) ou irriguées (maraîchage). En été la Tille connaît des assecs en amont sur les zones karstiques, et en aval des étiages sévères, résultant des pressions et aménagements urbains.

Le classement du bassin versant de la Tille en Zone de répartition des eaux (ZRE)[11] s'est traduit par l'initiation d'une étude « volumes prélevables » (VP) pour fonder la révision des autorisations de prélèvements. L'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse a identifié le bassin versant de la Tille comme nécessitant l'élaboration d'un SAGE intégrant un plan de gestion quantitative de la ressource en eau (PGRE). Ces démarches sont portées par l'EPTB Saône et Doubs. La CLE, installée en septembre 2012, est devenue l'interlocuteur de référence pour la gestion de la ressource en eau. Elle regroupe les représentants : des collectivités territoriales (région, département, communautés de communes dont le Grand Dijon, SCoT de Dijon), des structures portant les compétences sur l'eau et les milieux (2 syndicats de rivières, 2 syndicats d'eau et d'assainissement, l'EPTB), des pouvoirs publics (Préfet, Agence de l'eau, DDT, DREAL, ARS, ONF) et des usagers (chambre d'agriculture, syndicat des irrigants, chambre des métiers, de l'artisanat, représentants des industries des carrières, fédération de pêche, association environnementale et association de consommateurs). Le PGRE, adopté en décembre 2014 est un programme concerté, déterminant des actions sur 3 ans pour atteindre l'équilibre quantitatif. Fondé sur l'établissement de volumes prélevables adoptés par la CLE en décembre 2013, répartis entre usages et sur un cadre de suivi de l'état des cours d'eau, il énonce également des prescriptions et recommandations en termes d'économies d'eau, de ressources de substitution et d'hydromorphologie. Son élaboration a constitué un travail central de la CLE pendant la période d'étude.

Sur le bassin versant de la Tille, la situation de pénurie résulte de la disproportion entre les débits de la Tille et les besoins de l'agglomération de Dijon, au point que sur plus de 6 millions de m^3 consommés sur le bassin versant, principalement en aval, 73% sont destinés à l'eau potable et près de la moitié provient d'une ressource extérieure au bassin. En effet, l'agglomération dijonnaise compte environ

[11] Le classement, arrêté par le préfet reconnaît la récurrence des situations de déficit quantitatif et se traduit par des mesures visant à rétablir l'équilibre quantitatif.

253 0002 971 habitants, et concentre le développement économique et démographique de la Côte-d'Or (Boutelet et al., 2010 : 148). Son périmètre s'étale sur trois bassins versants contigus limitrophes, ceux de la Tille, de l'Ouche et de la Vouge. La nappe souterraine dite de Dijon Sud, au sud de l'agglomération, contribue également aux besoins de la communauté urbaine, ainsi qu'un 5e bassin versant (Renaud-Hellier, 2006) plus éloigné, celui de la Saône, palliant en été les déficits des précédents par un pompage dans la nappe alluviale à Poncey-lès-Athée (Boutelet et al., 2010 : 131).

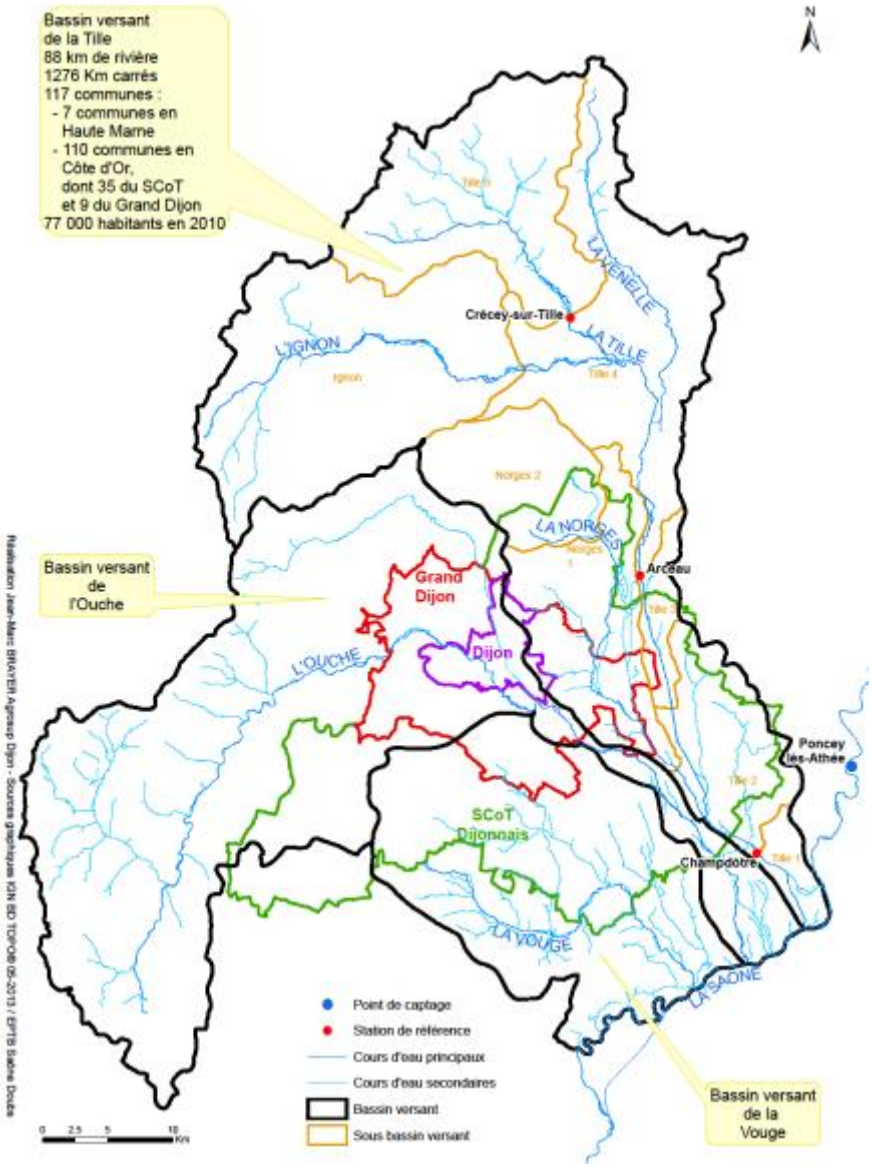


Figure 28 : Le bassin versant de la Tille dans l'environnement dijonnais

Le bassin versant de l'Arroux-Bourbince

L'Arroux prend sa source en Côte-d'Or ; il conflue avec la Loire à Digoin. Ses principaux affluents sont la Lacanche, la Drée, le Mesvrin, le Pontin, et la Bourbince ; le Ternin, la Selle, le Méchet et la Braconne (cf. Figure 29). Ces rivières coulent sur un socle granitique (partie Morvan), ce sol compact ne comporte que de petites réserves d'eau, des schistes aux couches de houille qui ont motivé l'exploitation pour le charbon (Blanzy-Montceau, Epinac) et des schistes bitumeux (Autun).

Le périmètre du SAGE Arroux-Bourbince réunit deux réalités contrastées. Le bassin versant de l'Arroux est un territoire rural dominé par l'élevage allaitant fondé sur le pâturage qui dessine un paysage

herbager maillé de haies. Le bassin versant de la Bourbince comprend la communauté urbaine du Creusot Montceau-Les-Mines. Les activités industrielles, aujourd'hui en déclin, ont particulièrement impacté la ressource en eau en termes de qualité et de quantité. Le fonctionnement de la Bourbince dépend de la gestion de l'eau du canal du centre par un système de retenues et de biefs.

Au début de notre étude, les deux syndicats SIBVB[12] et SINETA[13] se trouvent réunis dans la démarche SAGE de bassin versant, sachant toutefois que ces syndicats ne regroupent qu'une partie des communes de leur territoire, celles qui adhérent au syndicat. En décembre 2013, le document d'état initial paraît, presque cinq ans après le dépôt du dossier préliminaire. En mars 2014, les élections municipales perturbent le fonctionnement de la CLE dont le président est forcé de quitter ses fonctions. S'en suit une période d'incertitudes, inconfortable pour l'animateur du SAGE qui renonce à ses fonctions un an plus tard en décembre 2014. Une animatrice est recrutée pour prendre son relais et travailler sur la structuration de la gouvernance de l'eau. Il est alors question de remettre en place une nouvelle CLE ; une liste circule toutefois sans toutefois se traduire par un arrêté.

En juin 2015, le contrat de l'animatrice n'est pas renouvelé alors que le préfet communique sa décision de suspendre la démarche SAGE. Après sept années de cheminement, la démarche SAGE n'apparaît plus pertinente sur le territoire. L'argument rapporté par les interlocuteurs interrogés est celui qu'aurait donné le préfet : l'arrêt de la centrale thermique de Lucy consommatrice d'eau résout de fait un problème de gestion quantitative de la ressource sur le bassin versant. Nous pouvons remarquer que dans l'état initial l'usage de l'eau par la centrale n'apparaissait pas comme un enjeu saillant. Fin juin 2015, les deux syndicats des bassins versants signent avec l'Agence de l'eau Loire-Bretagne deux contrats territoriaux de gestion. Chacun renforce son équipe par le recrutement d'une personne. Sur le site web Gesteau, il n'est pas fait mention de cette décision d'arrêt, le SAGE est toujours présenté comme en cours d'élaboration. Dans leurs propos, les acteurs interrogés sur cette suspension semblent croire à la possibilité de relancer ultérieurement la démarche. La perspective de l'application de la nouvelle compétence loi GEMAPI (gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations) engagée, puis repoussée à janvier 2018 puis la mise en œuvre de la loi NOTRE sur l'organisation territoriale en incitant au regroupement des intercommunalités et en élargissant leurs compétences, ont contribué à rendre plus incertaine et mouvante la structuration territoriale locale.

[12] Syndicat intercommunal du bassin versant de la Bourbince
[13] Syndicat intercommunal d'étude et d'aménagement de l'Arroux

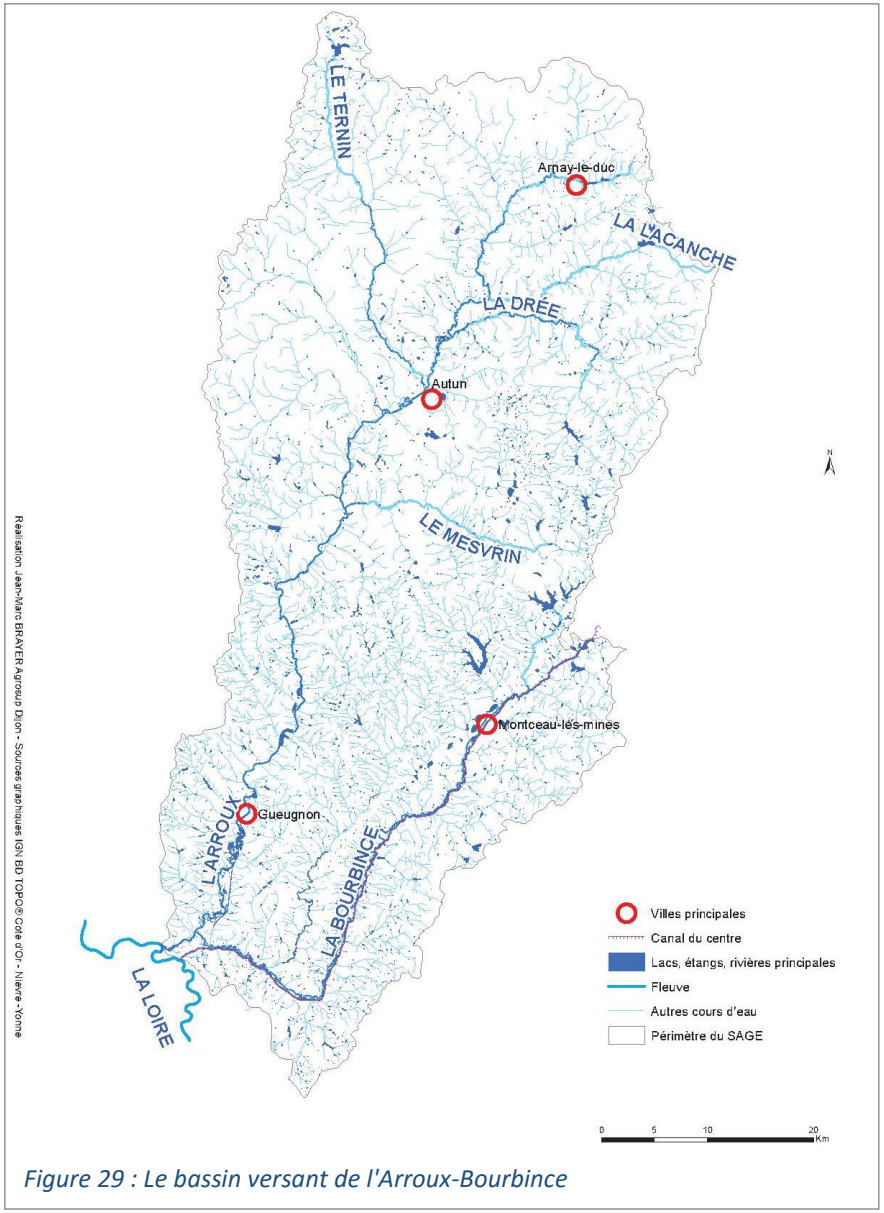


Figure 29 : Le bassin versant de l'Arroux-Bourbince

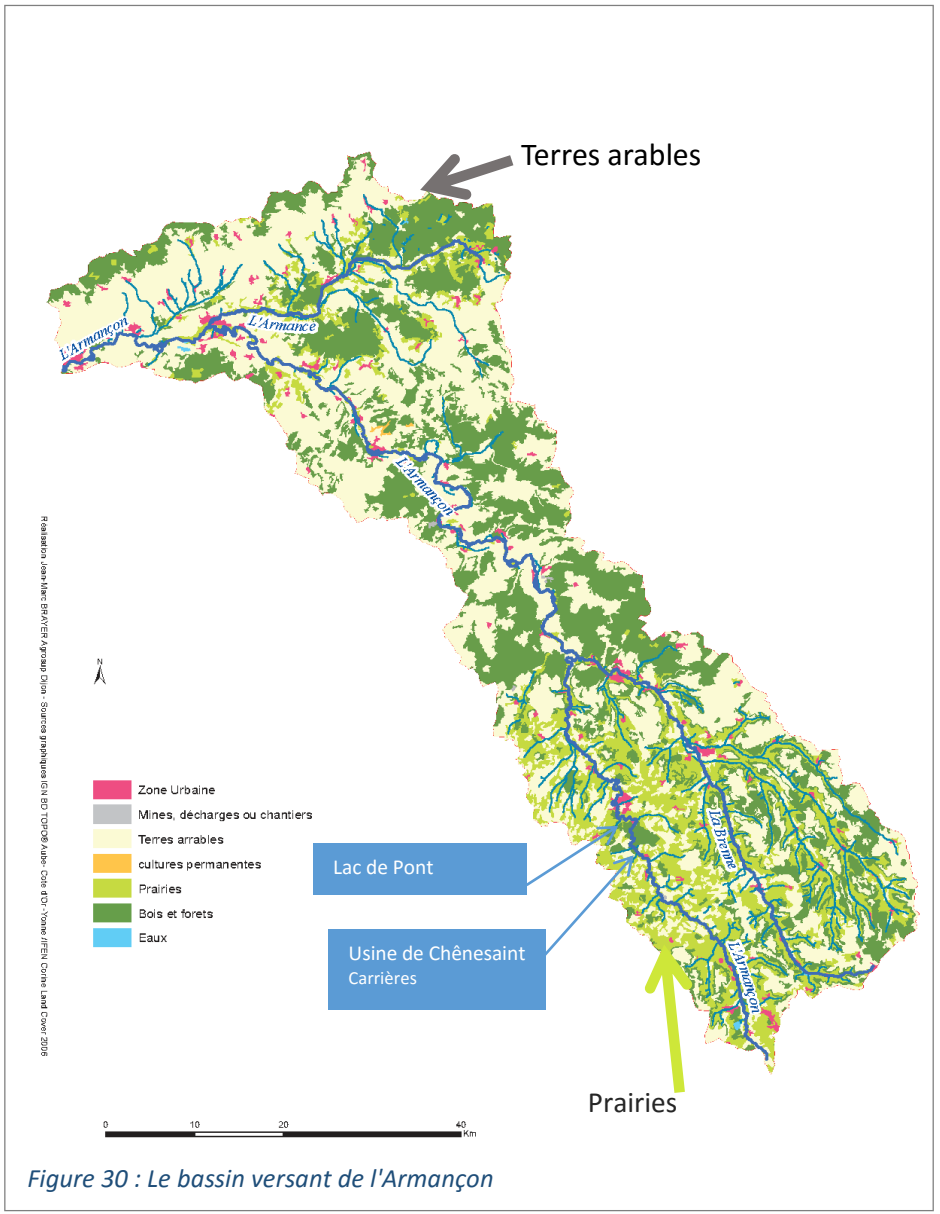


Figure 30 : Le bassin versant de l'Armançon

Le bassin versant de l'Armançon

Le bassin versant de l'Armançon se trouve au sein du bassin hydrographique Seine-Normandie, dans le secteur Seine-Amont (cf. Figure 30). D'une superficie de 3100 km², il se compose de 279 communes réparties sur trois départements et deux régions. A l'amont du bassin versant, le réseau hydrographique forme un chevelu, constitué principalement de l'Armançon, de la Brenne (affluent rive droite de l'Armançon), de l'Oze et l'Ozerain (affluents de la Brenne). A l'aval, il n'y a que l'Armançon, rejoint ensuite par ses derniers affluents rive droite : l'Armance qui vient de l'Aube, le Créanton et la Brumance, avant de se jeter dans l'Yonne à Migennes. Le bassin est également structuré par la présence du canal de Bourgogne qui longe l'Armançon. Le canal est en majeure partie alimenté par l'Armançon et la Brenne par le biais de prises d'eau en rivières et de trois barrages réservoirs : Pont-et-Massène, Grosbois et Cercey. Afin d'alimenter le canal à partir de la retenue de Pont, l'Armançon est alimenté artificiellement sur une trentaine de kilomètres.

L'amont et l'aval du bassin versant de l'Armançon sont différents quant à la nature du sol et aux enjeux de gestion. En tête de bassin, le sol est karstique, les cours d'eau sont nombreux mais de petite taille et soumis à des étiages sévères. L'agriculture est tournée vers l'élevage bovin allaitant, avec un nombre important de bêtes à abreuver. Sur les plateaux, on trouve des cultures. A l'aval, le paysage est caractérisé par une vallée alluviale et des plateaux occupés par des cultures, des prairies et de la forêt. L'agriculture est davantage tournée vers les grandes cultures, surtout dans la partie la plus à l'aval. L'enjeu principal de l'aval de l'Armançon est le risque d'inondations. De fait, une stratégie de prévention des inondations et une culture du risque se sont mis en place, via un Programme d'action de prévention des inondations, PAPI, établi en 2003. Puis ses actions ont été intégrées au plan Seine depuis 2008. Le comité de pilotage du PAPI travaille en partenariat avec la commission thématique inondations de la CLE.

La gestion des rivières du bassin est portée par trois syndicats : le SIRTAVA (Syndicat mixte pour la réalisation des travaux d'aménagement de la vallée de l'Armançon), le SIAVA (Syndicat intercommunal d'aménagement de la vallée de l'Armance et le SIVU (Syndicat intercommunal à vocation unique) du Créanton et de la Brumance. Le SIRTAVA est le plus gros des trois et regroupe plus d'une centaine de communes ; il était la structure porteuse du SAGE. Depuis décembre 2015, les trois syndicats ont fusionné en un seul syndicat mixte, dans la perspective de la mise en œuvre de la compétence loi GEMAPI, et pour compter face à l'EPTB Seine Grands Lacs.

Initié en 1995, le SAGE est approuvé en 2013 ; il est aujourd'hui dans une phase de mise en œuvre de son plan de gestion. La constitution d'une gestion intégrée à l'ensemble du bassin se traduit par la signature d'un contrat global unique avec l'Agence de l'eau, alors que par le passé, deux contrats étaient signés, un pour l'amont et un pour l'aval. Le contrat global amont était alors porté par le syndicat d'adduction d'eau potable et d'assainissement de Semur-en-Auxois, le SIAEPA, qui n'apparaît plus dans la nouvelle gouvernance.

b. Les cinq bassins versants complémentaires

Le bassin versant du Nohain

C'est un territoire rural. Les enjeux locaux sont essentiellement sur la qualité : ressource très dégradée liée aux activités agricoles importantes (maïsiculture) et aux STEP anciennes et/ou sous-dimensionnées Il y a également un enjeu de continuité avec un grand nombre d'ouvrages sur le Nohain. Il y a des risques d'inondation, mais sans enjeux importants, davantage une source de conflits de voisinage (pelles non levées) et des pertes économiques (champs inondés).

Un premier Contrat territorial Nohain Vrille Mazou était en cours d'élaboration au moment des entretiens. La démarche d'élaboration du contrat est jugée avancer correctement. La structure porteuse (association de Pays) n'a pas de compétence, savoir-faire et sensibilité particulière sur le sujet. L'animatrice a été recrutée en mai 2012, après une phase de diagnostic prise en charge par le

Conseil départemental de la Nièvre. Comme sur le reste du département de la Nièvre, il n'y avait pas auparavant de structuration institutionnelle autour de l'eau (absence de syndicats de rivière par exemple).

Le bassin versant de la Nièvre

Un premier Contrat territorial Nièvre était en cours d'élaboration au moment des entretiens. La démarche d'élaboration du contrat est jugée avancer correctement, mais la négociation des éléments financiers n'était pas encore achevée et pouvait potentiellement soulever plus de dissensions (solidarité avec une imposition égale de tous les habitants vs imposition plus importante des riverains ou des communes riveraines). Une des huit communautés de communes du territoire (« Nièvre et Forêt ») porte la démarche pour des raisons démographiques (elle représente 1/3 de la population) mais aussi car une des communes a connu un important problème de pollution industrielle. Comme sur le reste du département de la Nièvre, il n'y avait pas auparavant de structuration institutionnelle autour de l'eau et la dynamique de contrat a été initiée par le préfet. Il y a des enjeux en termes de continuité (avec la présence de nombreux ouvrages, dont des moulins) et de morphologie mais pas de problèmes majeurs sur le bassin, selon l'animatrice.

Le bassin versant de l'Yonne

Ce bassin est sur le territoire du Parc naturel régional (PNR) du Morvan. Celui a engagé de longue date des actions en faveur de la ressource en eau et des milieux aquatiques (depuis sa création en 1970). Depuis, toutes les générations de contrat de l'AESN ont été élaborées sur le territoire. A chaque nouveau contrat, le périmètre s'est élargi jusqu'à dépasser celui du Parc. Le PNR a pris en charge cette question car il n'y avait pas d'autres acteurs, pas de syndicat, et un chef de service hydrobiologiste attaché aux milieux aquatiques est resté 22 ans au PNR. Au PNR, il y a aujourd'hui deux personnes animatrices de contrat, dont une interrogée (en poste depuis 9 ans au PNR).

Une partie de territoire est vulnérable à la sécheresse par l'absence de nappes et dépend donc de la pluviométrie. Le maillage du territoire en captages comme en STEP représente également un enjeu important. Sur le Morvan, il y a un maillage très fin de nombreuses STEP de petites tailles, gérées en régie au niveau communal par le cantonnier, pas forcément bien formé, ou le maire directement. Ces infrastructures ne posent pas de problème en tant que telles mais elles sont très nombreuses et gérées à très petite échelle. Le problème est identique pour les captages et la distribution. Du fait des caractéristiques hydrogéologiques et du relief, il y a de nombreux captages de très petites tailles alimentant chacun un hameau. Ces captages isolés -très faible interconnexion entre eux- sont gérés par des associations syndicales libres (groupes d'habitants qui gèrent eux-mêmes leur captage). Ces captages privés ne peuvent pas bénéficier de déclaration d'utilité publique (donc pas de périmètre de protection) et ont des obligations de contrôle allégées par l'ARS. Il y a donc une grande hétérogénéité des échelles de gestion de l'eau potable sur le territoire du contrat : des syndicats d'eau à quelques endroits (en général en dehors du PNR), des régies communales et des associations syndicales libres. Le maillage des captages est donc un enjeu en soi : ils sont très nombreux (donc très nombreux à surveiller), de très petites tailles et sans nappe de réserve (donc possiblement taris en période de sécheresse), et en général non connectés (pour des raisons de coûts et d'accessibilité).

Le bassin versant du Serein

Auparavant, il y avait deux syndicats distincts sur le Serein, un sur l'amont et un sur l'aval (le syndicat du haut Serein et le syndicat intercommunal d'aménagement de la vallée du Serein). Il n'y avait auparavant aucune démarche sur la partie aval et la partie amont (Sud) bénéficiait d'un contrat global (Auxois Morvan, à cheval sur le Bassin de l'Armançon). Il a été décidé de ne pas reconduire ce contrat sur la partie Serein, qui ne nécessiterait pas une approche « contrat global ». Le choix a donc été fait d'organiser l'action autour d'un syndicat de rivière, avec un technicien de rivière. Un syndicat de rivière, le syndicat du bassin du Serein, s'est donc mis en place récemment (avril 2014) sur tout le bassin versant du Serein, en fusionnant deux syndicats hydrauliques (Haut Serein et Bas Serein, chacun

sur un département), fusion réalisée dans le cadre du Schéma Départemental de Coopération Intercommunal, prévu dans le cadre de la loi de Modernisation de l'Action Publique Territoriale et d'Affirmation des Métropoles de janvier 2014. Ce syndicat a inscrit des compétences proches de la GEMAPI : actions sur les milieux, les rivières, les zones Humides et pour la sensibilisation et l'information sur les inondations (le syndicat pourra intervenir seulement sur la prévention et pas sur la lutte contre les inondations, cela pouvant aller jusqu'à la préservation de champs d'expansion de crues ou des aménagements de ralentissement dynamique –plantations de haies). Un Plan territorial d'actions prioritaires[14] (PTAP) est en cours d'émergence.

Ce bassin versant a des caractéristiques amont / aval très distinctes : amont herbager, élevage, zone karstique avec des problèmes de disponibilité de la ressource pour l'abreuvement ; et à l'aval la zone de Chablis avec un foncier très cher (parcelles viticoles) et donc un certain immobilisme par rapport aux possibilités d'aménagements fonciers (notamment pour faire face aux phénomènes de ruissellement et aux crues) En termes de périmètre, la pertinence du découpage par bassin versant n'est pas évidente ; il y a une forte dichotomie entre l'amont et l'aval avec des enjeux différents, et au contraire, une relative unité entre l'amont du bassin versant du Serein et l'amont du bassin versant de l'Armançon (et c'est pourquoi il y a eu un contrat global couvrant les parties avales de ces deux bassins versants, le contrat global Auxois Morvan 2009-2013 porté par le SIAEPA). Mais il y a eu la volonté de ne pas trop agrandir le territoire concerné par un SAGE (bassin versant de l'Armançon) en lui ajoutant celui du Serein, dont la situation ne nécessitait pas de recourir au levier SAGE.

Le bassin versant de la Seille

Ce bassin versant représente un territoire vaste, à cheval sur trois régions et trois départements, et rassemblant 11 structures gestionnaires (syndicats de rivière et communautés de communes) ayant des visions et des cultures d'action très hétérogènes. La coopération intercommunale est extrêmement morcelée et variable d'un département à l'autre. « *Sur le territoire du bassin de la Seille, les volontés locales d'œuvrer pour la restauration des cours d'eau et l'amélioration de la qualité de la ressource sont fortes mais dispersées entre de nombreuses structures à compétences uniques.* »[15]

C'est le second Contrat de rivière de la Seille (en cours d'exécution, approuvé et signé en 2011), dans la continuité du 1er contrat de rivière (2002–2008). « *Dès 2002, le bassin versant de la Seille a bénéficié d'un premier contrat de rivière. A l'issue de ce contrat, en 2009, l'EPTB Saône et Doubs a continué à assurer l'animation de la démarche, permettant le lancement, depuis février 2012, d'un second contrat sur le bassin versant de la Seille.* »[16]

Les enjeux de gouvernance sont donc importants sur ce territoire et le contexte actuel est jugé « très tendu » par l'animatrice, récemment recrutée, suite aux départs des deux anciens agents dédiés à ce contrat au sein de l'EPTB Saône et Doubs et à l'absence d'animateur pendant 6 mois. « *Il y a eu un clash au niveau de la gouvernance* ». Le désaccord a porté entre l'Agence de l'eau et certaines structures gestionnaires, notamment des syndicats de rivière, essentiellement sur la mise en œuvre des objectifs de restauration morphologique et de libre circulation piscicole et sédimentaire « *Aujourd'hui, on est un petit peu en combat permanent pour essayer de mener à bien le contrat de rivière tel qu'il a été défini à l'origine.* »

[14] Le Plan Territorial d'Action Prioritaires est un dispositif proposé par l'AESN lorsqu'une démarche transversale de type contrat global n'apparaît pas nécessaire. Le Plan Territorial d'Action Prioritaires est commun à l'ensemble du sous-bassin Seine Amont (organisés selon les défis et leviers du SDAGE) et est décliné par unité hydrographique en identifiant les actions à engager.

[15] extrait de l'état de lieux du second contrat de rivière, p.18

[16] extrait de la page : http://www.eptb-saone-doubs.fr/Seille-Contrat-de-riviere

2. L'adaptation à la pénurie d'eau, un chemin inversé du futur à aujourd'hui

Notre hypothèse est que le changement climatique est déjà là et que la pénurie d'eau dans un futur modelé par le changement climatique est une question d'aujourd'hui. Plutôt qu'une projection, nous proposons un chemin inversé, du futur à aujourd'hui, pour traiter de la question de l'adaptation au changement climatique. Pourquoi ? Tout d'abord, les notions d'adaptation, de vulnérabilité et de résilience continuent d'évoluer dans leurs acceptions théoriques ; l'ambivalence dans les interprétations en fait des concepts « fuyants » qui constitueraient une « barrière cognitive à l'action" (Simonet, 2015). Or si l'avenir véhicule des incertitudes, tout ne sera pas fatalement nouveau ; ce sera plutôt une exacerbation de problèmes qui existent déjà (Magnan, 2012, 58). La capacité d'adaptation peut donc être examinée à l'aune des pratiques d'aujourd'hui. Selon Chateauraynaud (2007 ; 2012), la capacité des acteurs, « visionnaires à rebours », à faire face aux problèmes de demain dépend des expériences passées et des mécanismes de gestion d'aujourd'hui, comme autant de « prises sur le futur ». Dow et al. (2007) ont vérifié que les gestionnaires ayant vécu des sécheresses sont davantage susceptibles de faire face aux événements climatiques. S'adapter, c'est donc s'appuyer sur une capacité d'action issue d'expériences antérieures.

Les entretiens et les ateliers de design territorial ont montré la richesse des observations que les gens font du changement climatique en l'associant à une multitude de signes. Pour eux, le changement climatique est une réalité observée. Quant à la pénurie d'eau, elle est une situation avérée dans le cas du bassin versant de la Tille régulièrement soumis à des arrêtés sécheresse. Elle existe aussi sur les autres territoires même si elle n'est pas formulée comme problème à part entière.

En 2006, *Science* dans le volume 313 consacre un dossier spécial à l'eau. La recherche d'eau douce est un problème aussi vieux que la civilisation elle-même faisant du monde « *A thirsty world* » (Yeston *et al*., 2006). Le changement climatique, la pollution des eaux, contribuent à rendre plus rare la ressource en eau. Oki et Kanae (2006) s'interrogent sur cette rareté de l'eau. Ils rappellent que seulement 2,5% de l'eau de la planète est de l'eau douce et qu'il y a une grande variabilité dans le temps et dans l'espace de la disponibilité de cette ressource. Selon eux, le nœud du problème tient aux variations de la ressource. Le changement climatique accélérera les cycles hydrologiques. Des cycles hydrologiques différents devraient conduire à des changements dans le mode de gestion des ressources sans quoi les populations auront du mal à faire face à la variabilité (*op.cit*). Des travaux plus récents, comme ceux du World Resources Institute[17] parus en 2015, s'avèrent beaucoup plus alarmistes dans leurs projections à l'horizon 2040, avec un effet de stress accru en même temps que la demande d'eau croît sur la plupart des territoires.

Trois mois après la parution de « *A Thirsty World* », Kallis *et al*. (2006) dénoncent la simplification de la complexité de l'eau qui émane de ce dossier spécial ; ils avancent que la rareté de l'eau tient avant tout à des processus socio-économiques : l'urbanisation, les transitions économiques, des facteurs géopolitiques et à la pauvreté. Au cœur du débat par volume interposé, se trouve la question « la pénurie d'eau, donnée naturelle ou question sociale ? » dont se saisissent également Honnegger et Bravard (2005) dans deux numéros spéciaux de la revue Géocarrefour. La pénurie d'eau est bien un construit social, technique (Rivière-Honegger et Bravard, 2005), et politique (Fernandez, 2009). Elle met en regard l'état d'une ressource et des besoins. Garcier (2010) montre comment en Lorraine, dès les années 1950, la crainte d'une pénurie surgit de deux constats : la pollution des eaux et des prévisions optimistes de développement industriel avec une augmentation de la population, engendrant le doublement des besoins. D'après la directive européenne cadre sur l'eau, la pénurie d'eau correspond à la situation où les prélèvements affectent les débits des cours d'eau, au point de nuire à la vie aquatique. La notion de pénurie est donc relative.

[17] World Resources Institue – Water risk atlas 2015 – wri.org

Les trois territoires de l'eau étudiés illustrent chacun des formes de pénurie d'eau différentes. Le bassin versant de la Tille est classé Zone de Répartition des Eau, ZRE, car sujet à des arrêtés sécheresse chaque année depuis 2000. Ce classement, réversible, pose la reconnaissance d'un état de déficit quantitatif et indique que le territoire doit "reconquérir l'équilibre quantitatif" notamment en déterminant des volumes maximum prélevables à répartir entre usagers. Les deux bassins versants de l'Armançon et de l'Arroux n'affichent pas dans leurs documents de gestion un état de déséquilibre quantitatif et ne prennent pas en charge cette question. Pourtant l'analyse des entretiens fait surgir des situations de pénurie passées ou futures. Dans le cas du bassin versant de l'Arroux, la pénurie pourrait s'avérer un problème de gestion dans une perspective de réchauffement climatique. Enfin, dans le cas du bassin versant de l'Armançon, une situation de pénurie a touché l'amont du bassin versant en 2003. Nous avançons que cette situation peine à faire référence car le bassin versant doit faire face à des situations plus fréquentes d'inondations, c'est-à-dire d'abondance d'eau.

A travers ces trois cas d'étude, nous demandons comment définir et comment appréhender la pénurie d'eau ?

a. Le bassin versant de la Tille : la pénurie objet de politique publique, gérée par indicateurs

En 2010, la reconnaissance du déficit quantitatif s'est traduite par l'initiation d'une étude « volumes prélevables » pour fonder la révision des autorisations de prélèvements. Cette étude est intégrée dans le plan de gestion quantitative de la ressource (PGRE), lui-même composante du schéma d'aménagement (SAGE). Le volet quantitatif du schéma d'aménagement, adopté en décembre 2014 détermine des actions sur 3 ans pour atteindre l'équilibre quantitatif. Il est fondé sur les volumes prélevables et leur répartition entre usages, adoptés par la CLE[18] en décembre 2013, et sur un cadre de suivi de l'état des cours d'eau ; il énonce également des prescriptions et recommandations en termes d'économies d'eau, de ressources de substitution et d'hydromorphologie, à l'échelle du bassin.

Pierre angulaire de la gestion quantitative et au cœur du sujet des réunions observées, l'adoption des volumes prélevables est apparue comme le point de départ d'une démarche d'adaptation, reposant sur une « mise en nombres » de la ressource (Marquet, 2014). Associés aux critères de quantification de la ressource (stations de références et débits seuils), qui déterminent les situations de crise, les volumes prélevables constituent un élément clé de l'infrastructure de résorption du déficit.

L'étude volumes prélevables a fourni une meilleure connaissance de la ressource en eau, des besoins du milieu, et mis en visibilité les situations de déficit, mais l'objectif de fixer les volumes prélevables en vue de la révision des autorisations a focalisé les échanges sur les valeurs chiffrées, les objectifs partagés passant au second plan. Le travail sur les chiffres ancre la réflexion sur des valeurs passées, prises en référence : les chiffres « stabilisent » la ressource occultant l'idée que les débits et volumes prélevables pourraient évoluer à la baisse. Il se fabrique la croyance collective (Vaughan, 1999) que la ressource devient une quantité prélevable avec certitude de 2015 à 2020. Chaque usager ayant participé à la concertation repart avec cette garantie, qui pourrait vaciller sous l'effet d'une météorologie peu favorable. La quantification n'a pas ouvert l'exploration de différents scénarios. La mise en calcul du futur en donnant l'illusion d'une maîtrise, ne nous paraît pas préparer aux incertitudes radicales (Chateauraynaud, 2012). Par sa nature, le volume prélevable, comme le débit d'objectif d'étiage qu'étudie Fernandez (2009 : 29), institutionnalise la pénurie d'eau et procède d'une « commensuration », c'est-à-dire de « mécanismes de quantification qui circonscrivent les termes avec lesquels les acteurs caractérisent le système géré ». La commensuration suppose la substituabilité entre les choses. En créant des équivalences, le débit d'objectif d'étiage permet de négocier entre parties-prenantes. Ici le volume prévelable, indicateur « hégémonique » ou « boîte noire » (op.cit.

[18] La CLE valide, par le vote, matérialisant un consensus entre les parties prenantes, les étapes de construction du schéma d'aménagement.

:311-5), a surtout fait écran à l'explicitation des enjeux de réflexion sur les besoins au sein de la commission.

De plus, la subtilité des arbitrages chiffrés nous semble perçue seulement par un petit nombre d'acteurs : l'animateur du SAGE, pour qui l'étude volumes prélevables n'a pas de secret et qui a contribué aux propositions de volumes prélevables, le représentant de la DREAL qui connaît les séries statistiques des stations hydrométriques. Mais tous les participants aux réunions ne peuvent pas avoir une connaissance totale de tous les documents, presque 600 pages pour la seule étude volumes prélevables (plus quelques 970 pages de diagnostic au total). Cela crée une asymétrie dans les débats entre ceux qui maîtrisent la technicité des calculs et ceux qui ne la maîtrisent pas. Pour Marquet (2014), la mise en nombre et en modèle hausse l'expertise scientifique au-dessus des savoirs profanes exprimés dans la mise en mots (cf. Vergote et Petit, article à paraître).

b. Le bassin versant de l'Arroux-Bourbince : la pénurie derrière l'abondance

Sur le bassin versant de l'Arroux, l'arrêt de la centrale thermique de Lucy a été l'argument avancé pour justifier l'arrêt de la procédure SAGE engagée 6 ans plus tôt. Cette centrale prélevait de l'eau dans le canal de Bourgogne, puis la restituait au canal qui la restituait à La Bourbince. La notion de pénurie n'est plus mise à l'agenda de l'action collective de gestion de l'eau.

Sur le bassin versant de l'Arroux, les étangs ou lac réservoirs sont nombreux pour alimenter le canal et pour constituer des réserves d'eau potable là où les nappes souterraines sont rares ou de faible taille :

> « *La ressource en eau c'est surtout des eaux de surface* ».

La présence de l'eau est manifeste :

> « On *est dans une région où c'est le bocage, c'est aussi beaucoup de petits ruisseaux, beaucoup de sources, beaucoup de fontaines, de creux d'eau, qui font qu'il y a une ressource en eau quand même abondante* », un élu du territoire.

La situation de l'Arroux nous fait penser à la situation des étangs de la Brenne décrite par Geneviève Bédoucha (2011), où l'eau est rare pour les propriétaires d'étangs, pisciculteurs et pour les éleveurs pour qui, l'eau des étangs, sert à l'abreuvement du bétail l'été. Le territoire de l'Arroux-Bourbince, comme la Brenne reflète ce paradoxe de l'abondance de l'eau dans le paysage et d'une rareté qui, en Brenne, amène à faire fonctionner un système subtil d'écoulement d'eau entre les étangs pour "perdre le moins d'eau possible, parvenir à ne jamais en gaspiller : la notion d'économie de l'eau est dans cette société une préoccupation constante, elle est essentielle à l'intelligence du système" (Bédoucha, 2011 : 336).

Sur le bassin versant de l'Arroux-Bourbince, les conditions climatiques (faibles précipitations et hausse des températures) accélèrent l'évaporation et l'eutrophisation des retenues, entraînant un phénomène d' « eau chaude » déjà repéré :

> « *Donc on a de l'eau chaude dès le début parce qu'il n'y a pas d'arbres, parce qu'on dit qu'il fait de plus en plus chaud, parce qu'il n'y a pas de couvert arboré et puis parce que il y a beaucoup d'étangs et que ces étangs-là contribuent au réchauffement* », un représentant de la fédération de pêche.

Selon cet interlocuteur, la température de la Bourbince aurait atteint 28°C au cœur de la canicule de 2003. Des situations qui pourraient se répéter dans une perspective de changement climatique et montrer que la pénurie est possible dans un territoire qui semble bien pourvu en eau.

Cette situation de pénurie est perçue par certains acteurs : *« le Creusot n'a pas d'eau »*, s'exclame un élu. D'ailleurs, le manque d'eau est ancien ; frein au développement de l'industrie des hauts fourneaux aux besoins croissants à la fin du XIX^{e} siècle, il a été levé par le financement de la dérivation de cours d'eau, la création d'étangs (par ex. de la Noue, 1915) et la construction de barrages (barrage du Martinet en 1904, de Saint-Sernin-du-Bois en 1921) par la société Schneider (Dessolin, 1989). Le

dernier barrage créé est celui de la Sorme en 1971 pour l'alimentation en eau industrielle de l'usine Michelin de Blanzy, pour l'eau potable de la communauté urbaine du Creusot-Montceau-Les Mines, et l'écrêtement des crues de la Bourbince (Petit, 2015).

Pour VNF, le manque d'eau est une réalité :

> *« Aujourd'hui, les besoins sont supérieurs aux capacités de stockage » « la plaisance on a tout le trafic en été quand on n'a pas d'eau* ».

Le maintien d'un niveau d'eau dans le canal pour éviter les « chômages » suppose de stocker l'eau il faut « *qu'on puisse tenir avec nos réserves* » et d'économiser les stocks :

> « *Sur la Dheune, on a eu un barrage défectueux, on s'est aperçu qu'on avait gaspillé un peu d'eau, l'année dernière* ».

VNF et les autres acteurs qui régulent les retenues d'eau (communes, communauté urbaine du Creusot-Montceau-les-Mines) dont l'origine est artificielle risquent d'être confrontés avec le changement climatique à des modes de remplissage des réservoirs perturbés et dépendant du régime des pluies d'hiver.

Le bassin versant de l'Arroux-Bourbince est caractérisé par des « systèmes techniques » de gestion de l'eau (Bédoucha, 2003) et cette maîtrise de l'eau relève de différents acteurs aux objectifs de gestion séparés.

c. Le bassin versant de l'Armançon : la pénurie et l'excès

Sur le bassin versant de l'Armançon, la situation de pénurie, vécue en 2003, concerne l'amont du bassin versant, la partie Auxois-Morvan. Quand les petits ruisseaux se tarissent, un besoin en eau conséquent s'exprime pour les hommes et les bêtes du territoire. Cette situation spécifique de l'amont du bassin versant contraste avec l'aval sujet aux inondations, et fait de la pénurie une problématique tronquée par les différences amont-aval du bassin versant :

> « *Ben c'est sûr que les inondations, on les a vécues, donc on sait très bien que…Après pour qu'il y ait vraiment un problème d'eau, il faudrait peut-être qu'il soit six mois sans tomber une goutte d'eau, et puis que ce soit en plein été. Après… Mais bon ça ne s'est jamais vu… Autant les inondations, ça revient régulièrement, autant les périodes de sécheresse, c'est quoi ? C'est trois, quatre mois, et puis après il repleut, on a un orage et c'est reparti, quoi* » ; « *Nous quand on parle de rivière, évidemment la situation de crise c'est l'excès d'eau, donc les inondations* ».

Dans une note, Yonne Nature Environnement prend position sur la gestion quantitative de l'eau ; pour l'association,

> « *Le SDAGE (2016-2021) ne prend pas suffisamment en compte l'enjeu des étiages sur les têtes de bassin et le petit chevelu. Ces derniers constituent les 'poumons' et les réservoirs de biodiversité des plus grands cours d'eau. Ce petit chevelu sera la première victime des incidences du changement climatique qui impliqueront des étiages sévères, une moindre dilution des rejets, et a contrario des risques de sur-débit et d'inondations en période pluvieuse.* »

L'année 2003 pour les personnes interviewées de l'amont du bassin versant fait référence pour la pénurie. « Alors ça s'est passé en 2003 » ainsi débute le récit du manque d'eau. Selon Chateauraynaud (2012), on pourrait considérer la gestion de la pénurie de 2003 comme donnant prise sur le futur. En 2003, l'eau a manqué pour les bêtes, comme on nous l'a rapporté « *en gros, il y a 2 bêtes pour 1 homme* ».

> *« Nous, alors sur notre station de pompage qui est en bordure de rivière, donc nous avons deux puits, c'est descendu, c'est descendu, on n'a pas manqué d'eau, mais combien de temps on aurait pu tenir ? Ça on ne le sait pas.* » « *La sécheresse de 2003. Il y a beaucoup de sources qui étaient taries alors, bah en tant qu'agriculteur, on était bien embêté. (…) La rivière était à sec et elle était tellement à sec qu'en amont du barrage, là - même le barrage il avait baissé de plus de 50 cm, pas loin d'un mètre je crois* ».

Des décisions inédites sont alors prises :

> « *Comme on voyait ce barrage baisser, baisser, baisser, on a pu obtenir du préfet – et ça a été pour nous un élément essentiel mais c'est cette crise qui a permis de le faire – c'est de mettre qu'à partir d'un certain niveau, il a choisi 13 mètres, ce n'est plus le CANAL qui était prioritaire, ça devenait l'eau potable. Et on est arrivé à 13 mètres, et on est devenu prioritaire et le canal s'est arrêté, complètement, c'est-à-dire qu'ils ont arrêté la circulation sur le canal. Donc on a quand même obtenu ce jour-là, cet arrêté, il date de juillet 2003* ».

Le président d'un syndicat décide d'utiliser les réserves d'eau de carrières pour abreuver le bétail. Une forme de transhumance du bétail s'organise alors pour accéder à l'eau des principaux cours d'eau, l'Armançon et le Serein :

> « *Mais ce qui était très intéressant dans cette histoire-là c'est que vous avez une énorme transhumance qui s'est passé sur les bêtes des autres années, du Serein et l'Armançon qui sont tous allés dans les prés le long de… ça a duré un mois, un mois et demi* ».

Pour le syndicat d'adduction d'eau potable et d'assainissement d'eau potable, l'année 2003 déclenchera des actions de sécurisation avec la mise en place d'autres réserves et d'autres pompages.

d. La pénurie : passé, présent, futur

La pénurie, comme construit social et économique, découlant du rapport entre une ressource et des besoins, n'est pas une situation nouvelle. Différents travaux montrent que des territoires ont fait face à des situations pénurie alors que des besoins liés au développement industriel au Creusot (Dessolin 1989), en Lorraine (Garcier 2010), ou au développement industriel et agricole dans le bassin de l'Ardèche (Jacob-Rousseau, 2005) augmentaient, concomitamment à une démographie croissante. Dans les premiers cas, des programmes d'aménagements hydrauliques ont été conçus pour disposer de davantage de ressources en eau. Dans le cas de l'Ardèche, la pénurie conjoncturelle en 1820 est devenue structurelle à partir des années 1900, générant des tensions entre les agriculteurs et les industriels mouliniers de la soie, ces derniers organisant l'appropriation des ressources par l'acquisition foncière et le stockage en amont de la ressource.

Les situations de rareté engendrent des tensions entre usagers de l'eau, des négociations et des règles de partage. Ces situations interrogent les capacités de gestion collective à résorber la rareté. « Les situations de pénurie ne s'expliquent pas nécessairement par une rareté réelle de la ressource, mais bien souvent par la faiblesse des ressources sociales et organisationnelles consacrées à leur gestion, sous la forme de changement de valeurs, de définition de normes, de procédures ou de planification à long terme » (Lassere 2005 : 563, cité par François 2006).

Le changement climatique pourrait créer des situations inédites, non résolues par une gestion de crise « à froid » (Vergote, Petit, à paraître) comme elle est aujourd'hui pratiquée. Quelles réponses apporter ? Les mêmes que par le passé ? Ou est-ce que c'est la posture qui devrait changer ?

Selon les trois cas d'étude, la pénurie est perçue comme transitoire dans le temps, levée par le retour des pluies, ou transitoire dans l'espace, les ressources étant abondantes plus loin ou l'eau étant stockée :

- Dans le cas de la Tille, la complexité de la gestion par indicateurs, seuils et stations de mesure masque la pénurie ; le recours à une ressource extérieure (la nappe de la Saône) permet de continuer comme avant sans remettre fondamentalement en cause les besoins (Vergote, Petit, à paraître);
- Dans le cas de l'Arroux, la maîtrise de l'hydraulique éloigne d'une perspective de situations non contrôlées ;
- Dans le cas de l'Armançon, l'abondance en aval atténue l'idée de crise, la pénurie étant transitoire dans l'espace.

Le dispositif de SAGE associant la CLE est-il un lieu de gestion permettant la résorption des déficits ?

Dans nos observations, les CLE ont peu traité de l'évolution des besoins. Dans le cas de la Tille, la posture était celle du statu quo sur les prélèvements actuels. La CLE ne nous a pas paru un lieu de résolution de problème abouti. Les conditions d'une réelle participation selon les critères que Borzeix *et al*. (2015) appliquent aux situations de travail, ne semblent pas toutes réunies. Manque un lien « au faire » (op.cit.) qui, dans le cas de la CLE et du SAGE, paraît éloigné dans le temps au vu de la longueur des procédures et reporté sur les contrats territoriaux ou globaux.

Les actions de restauration de la morphologie des cours d'eau, inscrites dans les contrats territoriaux et financées par les Agences de l'eau, visent à recréer des capacités de résilience des ruisseaux pour générer de nouvelles ressources. Ce meilleur état écologique du milieu s'inscrit pleinement dans les objectifs de la DCE. Dans la DCE, les mesures de restauration viennent compenser « les pressions jugées 'inévitables' parce qu'elles sont bénéfiques pour la société et rentables » exercées sur un état naturel défini comme sans perturbations anthropiques (Bouleau, Pont, 2014). Les trois cas étudiés, similaires à bien d'autres, « rendent illusoire la définition d'un état non impacté » et les dynamiques observées mêlent des processus bio-physico-chimiques et des aménagements multiples, anciens et récents (op.cit.). Le changement climatique rendra plus caduque la distinction entre variabilité naturelle et impacts anthropiques (op.cit.). Il va changer les milieux eux-mêmes et les impacts produisant de nouvelles trajectoires d'évolution des milieux. Les procédures de SAGE vont devoir se saisir de ces nouvelles variabilités, pour que les outils de planification restent légitimes et efficaces.

Le changement climatique interroge sans précédent la question de la pénurie dans ces trois territoires où celle-ci n'est pas formulée comme problème durable, car aujourd'hui réglé par un commerce de l'eau, car la ressource est disponible sur le territoire voisin, et par le caractère transitoire du déficit. Ce sujet semble manquer d'arènes pour être traité. Le projet HYCCARE en a créé plusieurs pour renouveler les perspectives : les ateliers de design territorial, la réunion d'élaboration de nouveaux indicateurs de gestion de l'eau et un atelier créatif avec les irrigants de Côte-d'Or.

3. Gouvernance de l'eau et adaptation

La juxtaposition dans l'analyse de ces huit territoires de gestion de l'eau met en évidence des invariants en termes de modes de gestion.

a. L'eau, un secteur très réglementé et une fragmentation des compétences

Le contexte législatif et institutionnel est en profonde mutation et plusieurs acteurs ont mentionné les évolutions institutionnelles à venir dans le domaine de l'eau, comme autant de facteurs ne permettant pas une grande visibilité quant aux reconfigurations à venir et à leurs effets. Il y a la nouvelle compétence obligatoire relative à la gestion des milieux aquatiques et de prévention des inondations (GEMAPI) attribuée aux communes et à leurs groupements, qui devraient être exercée via des établissements publics d'aménagement et de gestion de l'eau (EPAGE). Il y a également la réforme territoriale et la loi NOTRE (Nouvelle Organisation Territoriale de la République) qui vient modifier la répartition des compétences et l'exercice de compétences optionnelles, ce qui peut avoir des répercussions importantes, par exemple pour les interventions des Régions. Ces différents éléments font que le paysage institutionnel de la gestion locale de l'eau n'apparaît guère stabilisé pour les acteurs locaux.

Malgré un schéma unitaire idéal, il n'y a pas un territoire de gestion de l'eau, mais bien des territoires de gestion qui se superposent, avec des systèmes de gouvernance complexes, car éparpillés, difficilement lisibles et très variables selon les différentes configurations historiques et institutionnelles. Il y a une certaine tendance à l'atomisation, à la fragmentation des compétences des services concernés par la gestion de l'eau (services de l'Etat -DREAL, DDT, ARS…- et autres instances : ONEMA, Agences de l'eau…) avec une spécialisation (milieux aquatiques, continuités écologiques,

pollution diffuses, risque inondation, disponibilité…), qui se fait au détriment d'acteurs assurant des compétences plus généralistes, avec une vision globale des enjeux.

Et dans un environnement très réglementé, une forme d'arrangement institutionnel, pratiqué par différents acteurs et à différents niveaux, consiste à éviter des dispositifs réglementaires lourds, jugés peu efficients, au profit de fonctionnements plus légers, privilégiant la confiance et le volontarisme.

b. Le SAGE, une procédure lourde

La chronologie des étapes des procédures de gestion montre l'inertie partagée des démarches SAGE qui engagent des diagnostics successifs lourds sur des espaces vastes :

> « *Non la CLE moi je trouve que c'est bien fait. Au départ, j'avais l'impression encore, un petit peu de haut, en disant : qu'est-ce que c'est encore (…). Mais c'est vrai qu'elle est porteur du SAGE et du contrat global et qu'il faut bien qu'il y ait une structure qui porte, et à partir de là il y a pas de problème. Moi je trouve que c'est pas mal fait, et ça amène une réflexion sur l'eau en général, et le SAGE - même si je trouve que c'est un peu lourd, quand on voit ce document là, épais comme ça quand même. Que pour le mettre en page, il a fallu quand même au SIRTAVA 8 ans ? 9 ans ?* »

> « *Moi j'en suis à mon troisième SDAGE donc vous savez, bon... on commence à en avoir ras-le-bol, parce que finalement c'est des parlotes qui durent 5 ans, hein, pour atteindre un, ce fameux programme de mesures, en fin de programme, comme il n'y a pas assez de porteurs de projets, il y a peu de projets qui sont faits* ».

Le temps long consacré à l'élaboration du SAGE peut servir à l'appropriation des enjeux autour de la ressource en eau et être jalonné de débats intéressants. Mais il a aussi épuisé les participants, voire a participé à l'achoppement de la procédure dans le cas de l'Arroux-Bourbince. En l'occurrence, les cinq ans de diagnostic pris pour le réaliser en interne n'ont pas facilité l'enrôlement des membres de la CLE dans une dynamique commune, selon un représentant de l'Agence de l'eau, qui aurait préféré voir confier ce travail à un cabinet d'expertise.

Ce mode de gestion par planification à l'échelle de vastes territoires contraste avec une gestion de l'eau par la proximité par le biais d'associations syndicales libres, présentes sur les bassins versants de l'Arroux et de l'Armançon (zone du Morvan). Dans ce cas, les sources sont sous la responsabilité d'une commune ou d'un hameau, l'ARS (agence régionale de santé) en assure un suivi sanitaire.

c. Les contrats, des systèmes de gouvernance hétérogènes, complexes et fragiles

Un des critères de choix des terrains était l'absence de SAGE, il n'est donc pas surprenant de retrouver des dispositifs d'actions locaux relativement « simples ». Pour autant, au-delà de la diversité des situations et des enjeux concernés, un aspect frappant de l'analyse des différents systèmes locaux de gestion de l'eau est la grande variabilité des formes de gestion et de gouvernance locale, reposant parfois largement sur le bricolage. Cette grande diversité est liée à des enjeux et intérêts différents associés localement à la gestion de l'eau, eux-mêmes dépendants en partie des processus historiques d'organisation des acteurs et de structurations des systèmes de gestion de la ressource, variables selon les contextes. En ce sens, ces dispositifs sont réellement ascendants, puisqu'ils ne peuvent exister sans reposer sur un dynamique et un rassemblement d'acteurs et d'intérêts locaux. Et ce sont bien souvent des dynamiques relativement précaires (notamment en termes de personnel, de financements, de structures porteuses…) que l'on retrouve localement.

A titre d'exemple, dans le département de la Nièvre, on voit une grande diversité d'arrangements institutionnels pour accueillir les animateurs chargés d'élaborer les premières politiques de gestion concertée de l'eau (au sein d'une association de Pays, d'une communauté de communes, d'une association naturaliste, d'un PNR…). Ces postes, parfois contractuels, sont souvent financés par des

fonds non pérennes et certains organismes d'accueil sont inexpérimentés dans le domaine (absence de culture, de données, de savoir-faire en matière de gestion locale de l'eau). Certaines structures d'accueil elles-mêmes n'ont parfois guère de visibilité quant à leur avenir proche (cas d'une association de Pays accueillant l'animatrice d'un contrat en cours d'élaboration) d'où certaines situations de bricolages et d'instabilité institutionnelle. Certains animateurs apparaissent alors relativement isolés, avec des postes non-pérennes et une visibilité très limitée à moyen terme.

La relative fragilité de ces dynamiques locales, reposant sur le rassemblement et la volonté des acteurs locaux, oblige à travailler sur un nombre resserrés d'enjeux, reconnus et compris de tous. Pour les animateurs rencontrés, faire accepter certains enjeux en termes de morphologie ou de continuité apparaît déjà comme un défi majeur, loin d'être encore entièrement relevé dans plusieurs situations. Dans ce contexte et à ces échelles, le problème des changements climatiques et de ses effets peut apparaître comme une question « en trop », qu'il n'est guère possible d'aborder en tant que telle (dynamique trop fragile, équilibres précaires, questions trop complexes).

Au niveau des animateurs de démarches locales, la gestion de l'eau n'apparaît guère conflictuelle dans la majorité des contextes étudiés. Pour les animateurs initiant une première génération de contrats, la première étape est bien de stabiliser un système de gouvernance. Ce qui constitue donc les premiers *outputs* de cette politique, c'est bien de réussir à « mettre tout le monde autour de la table » et à créer la confiance. Il s'agit donc bien de constituer, rassembler et animer une communauté locale d'acteurs concernés par la gestion de l'eau et des milieux aquatiques.

d. Trouver la bonne échelle territoriale

L'unité hydrologique de bassin versant posée comme pertinente par les politiques de l'eau ne va pas de soi. L'entité hydrologique au fonctionnement naturel est en fait modifiée par les ouvrages comme le canal du centre pour le bassin versant de l'Arroux-Bourbince et le canal de Bourgogne pour le bassin versant de l'Armançon :

> *« Le canal fait que la rivière ne coule pas naturellement ».*

Et ces territoires de l'eau ne correspondent pas à des bassins de vie et d'emplois, où les besoins en eau se condensent, structurés par des agglomérations et des infrastructures.

Les bassins versants étudiés représentent trois cas contrastés où il est difficile de trouver les « bonnes limites » de la gestion (Ghiotti, 2006). « Jusqu'à quelle surface un bassin versant reste-t-il facilement gérable ? », se demande S. Vieillard-Coffre (2001). Les bassins versants de l'Arroux-Bourbince et de l'Armançon relient des territoires hétérogènes et des communes qui font partie du bassin versant tout en dépendant des ressources en eau potable d'un autre bassin versant.

En 2015, l'Armançon aboutit à une congruence entre syndicats gestionnaires et territoire hydrologique, quand le SAGE du bassin versant de l'Arroux achoppe dans une disparité en termes de poids démographique et politique entre l'Arroux rural et la Bourbince associée à l'agglomération du Creusot-Montceau-les-Mines. De plus, cinq communes de la Nièvre sont intégrées dans le périmètre de l'Arroux, ce qui, pour des élus, constitue un manque d'efficience de déplacer des services pour une portion de territoire aussi petite. Enfin, le découpage géographique qui dessine un bassin de la Tille en déficit quantitatif apparaît limitant pour penser des solutions. Dans le cas étudié, les logiques d'approvisionnement en eau potable couvrent plusieurs bassins. L'articulation entre les territoires de gestion du développement urbain et ceux de la politique de gestion de l'eau reste une question ouverte (Renaud-Hellier, 2006). Comme le suggèrent Mermet et Treyer (2001), dans une perspective d'adaptation, les besoins gagneraient à être raisonnés à l'échelle des périmètres conjoints des cinq bassins sollicités pour Dijon (Tille, Ouche, Vouge, nappe Dijon Sud, Saône). En effet, la substitution d'une ressource par une autre, grâce aux interconnexions et aux achats d'eau, trouverait ses limites face au changement climatique accentuant les difficultés estivales, affectant les territoires voisins et modifiant le rapport à autrui (Petit, 2011). Les solutions aujourd'hui mobilisées face au déficit en eau

pourraient être inopérantes dans un futur où les territoires seraient interdépendants et en même temps concurrents pour accéder aux ressources.

Toutefois, le périmètre des bassins versants compte pour les agences de l'eau, et pour des élus et d'autres acteurs, cette échelle fait sens :

> « *Très vite je suis rentré dans le SAGE et j'ai compris qu'il y avait une dimension bassin versant stratégique à avoir, et qu'il fallait amener les riverains à être des habitants d'un bassin versant* », un président de syndicat ;
>
> « *Le SAGE est l'endroit où tous les acteurs qui sont autour de l'eau peuvent se rencontrer et émettre leurs avis ou leurs idées* », une élue membre de CLE ; « *d'une manière citoyenne, c'est intéressant [la CLE] ce qu'il y a autour m'a permis d'être conscient de toutes les étapes, entre l'eau qui est dans la rivière et l'eau qui arrive au robinet* », représentant d'une association de tourisme.

e. Le recours au contrat, comme fenêtre de discussion et de négociation

La variété des structures gestionnaires est fréquemment évoquée pour expliquer les différences d'adhésion aux grands impératifs d'action promus par les SDAGE, et plus largement par la DCE. Les enjeux liés à la morphologie des cours d'eaux (restauration des cours d'eau, reméandrages) et à la continuité écologique (suppressions d'ouvrages) sont ainsi ceux les plus fréquemment cités comme étant source d'incompréhension, voire d'opposition de la part des acteurs locaux :

- au nom de la préservation du patrimoine (par exemple, association de propriétaires de moulins),
- au nom du « retour en arrière » que signifierait le retour à des régimes hydrologiques plus conformes au fonctionnement écologique des cours d'eau.

Les difficultés à faire passer certains enjeux en termes de morphologie et de continuité conduisent, sur certains territoires, à recourir à la forme contractuelle et à conditionner certains financements pour lesquels les acteurs locaux sont demandeurs (en matière d'assainissement et de réseaux par exemple), à l'engagement simultané d'autres opérations, dont l'acceptabilité est moindre. Par exemple, sur un bassin versant, une agence de l'eau finance encore de la « ripisylve » mais avec en contrepartie, l'engagement également d'actions morphologiques : « *C'est la carotte* », pour reprendre l'expression de l'animatrice.

La forme contractuelle apparaît bien comme un espace de négociation à disposition des Agences de l'eau, l'élaboration du contrat fournissant une « fenêtre de discussion » avec les acteurs locaux. Ainsi, historiquement, les contrats de rivière de l'AESN portaient sur l'AEP. Mais dorénavant, si les acteurs locaux ont des besoins en AEP et passent par un contrat de rivière, il y a une phase de négociation où les financeurs demandent en contrepartie à inscrire dans les contrats et à programmer une partie sur les milieux aquatiques, axée sur les objectifs de la DCE. Ces mêmes logiques sont également décrites sur le bassin versant étudié sur le territoire de l'AERMC.

f. Que veut dire participer ?

En environnement, la coordination de toutes les parties prenantes est vue comme la clé d'une gestion efficace et partagée. Billé (2006) critique l'emboîtement logique couramment admis : la gestion de la ressource passe par une meilleure coordination entre les acteurs et les usages, que la concertation doit permettre en visant le consensus. Que permet une CLE ? la participation d'une pluralité d'acteurs ? La concertation entre eux ?

La CLE est la scène reconnue de la participation croisée des services de l'Etat, d'usagers et des collectivités territoriales :

> « *On est beaucoup à la réunion, on est une vingtaine, donc entre les gens de la DDE, la DDA, enfin ça s'appelle plus comme ça, entre les assoc' écolos, entre les pêcheurs, les agri, on voit bien que*

les centres d'intérêts, enfin les préoccupations, sont pas tout à fait au même endroit, mais ça se passe relativement bien ».

Souvent aussi qualifiée de parlement de l'eau, la CLE, selon les propos des personnes interviewées, ne tient pas toutes ses promesses :

« *La CLE, je vais vous expliquer…ceux qui sont nommés par les départements et les régions. Ils ne viennent jamais, ça ne les intéresse pas …ça fait 3 élus sur un collège qui doit faire au moins une quinzaine, vingtaine, 22, je crois…vous avez les administratifs qui nous noient dans des problèmes qu'on ne comprend pas...* » ; « *A la CLE elle-même les échanges sont quand même assez formels. (…) ceci étant, il y a des réunions thématiques, « milieu humide » sur lesquelles on peut quand même discuter un peu plus raisonnablement avec les gens de l'ONEMA, de la DDT, ceci étant, ces réunions-là ne sont que consultatives…* ».

Plutôt qu'un lieu de négociation, la CLE est plutôt qualifiée de lieu d'information et de validation :

« J'ai jamais vu de débats. Il y a des échéances, c'est vachement... le fonctionnement de ces institutions est assez normé, assez cadré. Il y a des dates, il y a des protocoles à respecter, donc ça doit être fait avant telle date. Il y a des directives européennes - enfin, je n'emploie pas forcément les bons termes - il faut rentrer dans un calendrier et puis bon, bah voilà, on est là, on vote, il y a des collèges » ; « je n'ai pas vraiment eu le sentiment qu'on négociait des choses ».

La CLE réunie sous l'autorité du préfet est perçue comme un lieu très formel où la prise de parole est difficile et où l'avis de l'Etat prime. Dans le cas de l'Arroux-Bourbince, la CLE a fonctionné comme un lieu de partage de connaissances. Les personnes interviewées se réfèrent alors au travail d'une des commissions portant sur l'inventaire des zones humides. Le collectif semble peu constitué au moment des enquêtes, les membres peinent à citer les autres participants à ces réunions ; toutefois ils déplorent une faible implication des élus. Dans le cas de l'Armançon ou de la Tille, les avis divergent entre ceux qui considèrent les bureaux de CLE et les commissions thématiques comme des lieux de débats alors que pour d'autres les décisions se prennent ailleurs :

« *Alors donc, la CLE., pour revenir à ça, elle s'occupe aussi de donner des avis, avis qui ne sont pas forcément suivis d'ailleurs (…) la consultation c'est bien beau, il y a un avis qui va être donné : est-ce que cet avis sera suivi, je n'en sais rien* ».

« *Moi, je… quand j'y vais, je viens avec un mandat, c'est-à-dire que… c'est ce que je disais, il y a une négociation interne, une discussion interne, une analyse technique, financière, etc. et ensuite chacun d'entre nous vient avec… défendre les intérêts de sa collectivité, de son mandat.* »

Dans le cas du bassin versant de la Tille, les réunions de la commission ressource en eau ont paru techniques sans débat politique autour des enjeux. Le calendrier très serré a paru contraindre le temps des débats : « La gestion de l'eau est pilotée par le temps administratif » (Hagel, 2011).

Dans les trois cas, la technicité de l'expertise crée une asymétrie dans les débats. Les termes « *un fonctionnement d'initiés* », « *c'est extrêmement compliqué* », « *une usine à gaz* », reviennent chez les personnes interviewées. Trouver sa place dans le débat n'est pas évident :

« *J'ai eu l'impression d'apporter rien et ça me dépassait en fait* », « *on nous abreuve de rapports supplémentaires, ça fait des couches supplémentaires et on apprend juste un truc qu'on savait finalement, (…) si c'est pour faire la moitié en synthèse biblio, moi je ne m'y retrouve pas* ».

La technicité tient à la documentation abondante produite, des diagnostics font généralement de 400 à 500 pages ; les documents tels que les SDAGE sur lesquels les membres de la CLE doivent se prononcer sont tout aussi touffus. Il faut la traduction en tableau par l'animateur du SAGE pour rendre le document accessible en réunion. Un foisonnement documentaire qui peut être assimilé à une logique d'inaction :

« *Enfin ce que j'attends, depuis bien longtemps, c'est qu'on passe dans les choses concrètes. Parce que c'est bien d'avoir des données, c'est bien d'avoir… mais une fois qu'on a tout ça, qu'est-ce qu'on fait ? Là effectivement on a un point noir, comment on le traite ?* ».

La complexité tient au recours à des calculs qui portent sur les débits biologiques et les débits hydrologiques et qui ne sont pas toujours explicites pour le profane. Il y a ceux qui maîtrisent la subtilité des calculs et ceux qui ne la maîtrisent pas. On pourrait parler de « secret structurel » (Vaughan, 1999) car la complexité de l'approche scientifique et technique exclut de la connaissance bon nombre de personnes, aux disponibilités et compétences différentes pour appréhender les documents d'expertise mis à disposition.

« *Je ne suis pas rentré dans ce détail-là, parce qu'il y a assez de… je dirais de techniciens pour juger du… Moi… Nous, notre action, elle est plus liée au bon usage qu'on peut faire de l'eau, »*

La CLE rassemble une pluralité d'acteurs, gestionnaires et usagers. Toutefois, dans plusieurs entretiens, les interlocuteurs déplorent un engagement a minima des élus et leur absence aux réunions. D'autres travaux ont également pointé la faiblesse de la participation citoyenne et d'habitants et interrogé la manière de les faire entrer dans le débat (Seguin, 2013). D'autres analyses comme celles menées par Granjou et Garin (2006 : 11) dans le bassin de la Charente, montrent également qu'un mode participatif ne suffit pas à « remettre spontanément en cause les logiques et rapports de force antérieurs ».

La CLE et le SAGE créent un espace et un collectif d'acteurs inédits autour de la gestion de l'eau à l'échelle d'un bassin versant. Toutefois, la « conception gestionnaire de l'élaboration d'un SAGE », aussi observée dans le SAGE Est Lyonnais par exemple (Allain, 2012), doublée d'une forme de planification par le haut, éloigne de la gestion d'un patrimoine commun. Allain (2012 : 64) constate « s'il y a bien construction de règles collectives de gestion, les fondements politiques d'une gestion en bien commun ne sont pas réellement établis, risquant ainsi de ne pas garantir dans la durée l'engagement collectif ».

Nous constatons une grande asymétrie entre les acteurs participants à la CLE. Certains participent dans le cadre de leur activité professionnelle, d'autres sont des bénévoles associatifs. La complexité de la gestion de l'eau, liée aux procédures et aux mécanismes écologiques mobilisés pour l'action, module fortement la capacité à faire débat. De plus, les conditions d'une réelle participation selon les critères que Borzeix et al. (2015) appliquent aux situations de travail, ne semblent pas toutes réunies dans les CLE. Borzeix et al. (2015) identifient quatre ingrédients à la participation : une démarche d'enquête, un dispositif adapté, un ensemble de valeurs partagées, une conscience morale d'œuvrer pour ou au nom d'une communauté plus large. Au cours des entretiens individuels comme dans les réunions observées, les participants ont exprimé un souci de contribuer à la gestion du bassin versant et fait valoir une démarche constructive, même s'ils défendent des intérêts sectoriels.

Par contre, la CLE et le SAGE ne nous ont pas semblé engager les membres dans une réelle démarche d'enquête : les diagnostics externalisés à des bureaux d'étude ou réalisés par les animateurs, n'ont pas directement mobilisé les membres de la CLE qui sont informés des résultats. En ce sens, le dispositif ne paraît pas le plus adapté à la participation. Mais plus encore, Borzeix et al (2015), voient dans la participation un mode d'activité qui implique l'action, plutôt qu'un régime d'activité prescrit. L'orientation de la participation vers l'action « fait la différence » et fait de la participation une ressource. « Cette orientation pragmatique tranche avec les formules participatives essentiellement discursives et indirectes, beaucoup plus répandues et mieux connues, aussi démocratiques soient-elles dans leurs énoncés » (op.cit.). Dans les réunions de CLE, la participation est dissociée du faire. Ce « faire » est souvent différé dans le temps car le programme de gestion advient quelques 10 années après les premiers rassemblements. Le « faire » est délégué aux contrats territoriaux et globaux, outils opérationnels des agences de l'eau. Cette déconnexion relative de la participation au faire nous paraît une difficulté majeure pour la participation des acteurs.

Les résultats de nos recherches amènent à revisiter les modalités de la participation dans le cadre contraint de la procédure du SAGE. Deux propositions se dégagent. La première est de relier davantage les démarches CLE et SAGE à un « faire » des participants, dans la construction des connaissances sur leur territoire et dans les actions à mettre en œuvre. La seconde proposition est de passer d'un débat délibératif à un débat interprétatif comme le propose Citton (2013). Le débat interprétatif, introduit dans les programmes scolaires en 2002, permet aux élèves d'exprimer une pluralité de significations du texte. En sortant du modèle de rationalité argumentative, il permet « l'émergence de nouvelles pertinences » (*op.cit.*). Cette exploration que permet le débat interprétatif nous paraît une ressource pour l'adaptation au changement climatique (Vergote, Petit, à paraître). Elle permet de se préparer à un futur instable. Pour la gestion tant actuelle que future, la recherche de voies autres que celles de la planification renouvèle les modalités de gestion de la ressource en eau. Berdoulay et Soubeyran (2014) proposent de penser l'adaptation au changement climatique sans les ornières de la planification, dans un espace participatif qui accorde une place à l'incertitude.

4. Quelles acceptions de l'adaptation aux changements climatiques?

a. Une adaptation à des risques tendanciels, sur le moyen et long terme

Il est fréquent pour qualifier l'adaptation, de distinguer l'adaptation aux évolutions tendancielles (changements graduels liés au climat) de l'adaptation aux événements extrêmes, entre « risques tendanciels » et « risques occurentiels » (Debizet & Dubois, 2011). Cette distinction conduit parfois, afin de clarifier les termes, à associer le terme de « résilience » à une meilleure capacité de réaction aux événements extrêmes et « anticipation » à la capacité à se préparer aux risques induits par les changements graduels.

En suivant cette distinction, et contrairement à certains recueils de « bonnes pratiques », où les acceptions de l'adaptation pour le secteur de l'eau sont quasi-unanimement orientées autour de la gestion des catastrophes naturelles (inondations, ruissellement, glissement…) et autour de la connaissance et de la prospective (par exemple, « Garonne 2050 » etc.), les réponses recueillies lors des enquêtes autour des cinq bassins versants complémentaires s'organisent autour des idées de gestion intégrée, d'anticipation, d'efficience et de prévention des épisodes de pénurie.

Les entretiens réalisés renseignent les conceptions et représentations de l'adaptation des gestionnaires locaux de l'eau (adaptation technique, adaptation intégrée, adaptation en continu), qui s'appuient bien moins sur l'idée d'évitement de crises et de préparation à des événements extrêmes que sur l'idée que les effets des changements climatiques seraient bien davantage des « crises au ralenti », déjà en cours, à intégrer au reste de l'action publique. Ces évolutions ne sont alors pas perçues comme brutales mais bien à moyen et long terme. Aucun des acteurs ne mentionne d'urgence à s'adapter, et le traitement de nombreux autres problèmes actuels leur apparaît bien plus urgent. Cette représentation de l'adaptation à des évolutions de long terme était également dominante lors des ateliers du climat organisés sur le bassin versant de l'Armançon.

Ces représentations sont largement déterminées par la nature des dispositifs d'action étudiés. Les acteurs rencontrés n'étaient pas en charge de la gestion des « risques occurentiels » (extreme climate-related hazards). La gestion et la prévention des risques naturels apparaissent être traitées dans des instances et par des procédures différentes (comme la procédure d'arrêté sécheresse par exemple).

b. Arrêter le « non durable », l'adaptation sans regret

Pour les gestionnaires locaux, les évolutions climatiques viendront accentuer des dynamiques non-durables, sur lesquelles ils sont déjà aux prises dans leur action au quotidien (traitement de la ripisylve,

conversion des prairies humides, pénurie ponctuelle en eau potable, accentuation des étiages et effets sur la biodiversité, etc.).

Dans cette perspective, s'adapter aux effets des changements climatiques est interprété par les acteurs rencontrés au regard des enjeux qui se posent à eux au quotidien en matière de gestion de l'eau et des milieux. Une interprétation de l'adaptation fréquemment rencontrée correspond à une interprétation immédiate et pragmatique. Il s'agit déjà d'arrêter le « non durable » : les dynamiques actuellement insoutenables, par exemple en termes de mise en culture de prairies humides, doivent être maîtrisées, voire inversées pour pouvoir garantir des capacités d'adaptation pour demain. Ces dynamiques sont non-durables car elles ont toutes une série d'effets négatifs directs sur la ressource en eau et les milieux aquatiques (augmentation de la consommation d'eau et d'intrants liée aux cultures, dégradation de la qualité de l'eau, réduction de la biodiversité, etc.). Mais elles ont également des effets à venir dans une perspective de changements climatiques :

- en entraînant une plus grosse consommation d'eau, elles renforcent le risque de pénurie d'eau. Elles aggravent donc une vulnérabilité dont il est prévu qu'elle soit également accentuée par les changements climatiques.
- en diminuant les capacités de rétention temporaires d'eau de ces milieux, elles minorent les fonctions naturelles de stockage que peuvent remplir ces zones. Elles diminuent donc les capacités d'adaptation de ces milieux, utiles autant lors des épisodes de fortes précipitations que lors des épisodes d'étiages.

L'impact négatif de ces dynamiques est donc double en termes d'aggravation : aggravation de la vulnérabilité et diminution des capacités d'adaptation pour y faire face. Et les gains à maîtriser et agir sur ces dynamiques sont donc avant tout directs et immédiats, sans bien même se projeter dans une perspective de changement climatique. Mais il y a bien des gains supplémentaires à moyen terme, dans une perspective de changement climatiques, pour faire face à des épisodes d'à-secs plus prononcés et à de possibles risques de pénurie d'eau. Cette interprétation, qui apparaît accessible et opérante immédiatement pour les acteurs, rejoint d'autres observations de chercheurs travaillant sur ces questions d'adaptation des territoires, notamment Rochette et al. qui soulignent à propos du recours à la gestion intégrée des zones côtières pour la mise en œuvre de l'adaptation au changement climatique qu'« une partie des problèmes liés au changement climatique peut déjà être résolue "en faisant bien aujourd'hui ce que l'on faisait mal hier". » (Rochette, Magnan et Billé, 2010 : 117).

On retrouve ainsi dans le discours des différents acteurs une position pragmatique qui consiste à dire : « occupons-nous d'abord des problèmes actuels, connus et reconnus et qui ne pourront qu'être aggravés par les changements climatiques ». Il n'y a guère, dans cette position, de dimension prospective mais une volonté de faire converger le traitement des problèmes actuels auxquels sont confrontés au quotidien les gestionnaires avec ceux, annoncés, liés aux effets des changements climatiques. Cette perspective affirmant que certains dysfonctionnements actuels, comme gaspillage de l'eau potable, ne passeront plus avec le changement climatique.

On est bien là dans des mesures d'adaptation « sans regret », qui constituent dans le domaine de l'eau comme dans les autres secteurs, les mesures les plus accessibles et faciles à mettre en œuvre, car elles répondent à la résolution de problème existants « ici et maintenant » (et non pas seulement « ailleurs et/ou plus tard »). Les gains attendus en matière d'adaptation ne sont que secondaires, ils ne sont que des co-bénéfices de mesures visant le traitement de problèmes actuels et avérés. L'adaptation aux effets des changements climatiques vient ici comme un supplément de légitimité, en renforçant la nécessité et l'acceptabilité des mesures à mettre en œuvre (et qui devront être mises en œuvre, avec ou sans évolutions climatiques).

c. Des imaginaires de solutions contrastés

Il est intéressant de noter que la malléabilité des registres de l'adaptation permet que le concept soit mobilisé pour soutenir des voies d'adaptation très différentes, voire opposées. Ainsi, la figure du

barrage apparaît comme un exemple controversé d'adaptation ou au contraire de maladaptation. Plusieurs animateurs expliquent que, contrairement à une idée intuitive, les barrages et les étangs n'apparaissent pas comme des réservoirs en mesure de compenser l'eau absente aux périodes critiques (à cause de la température élevée et de la moindre qualité de ces eaux de réservoirs). Pour les acteurs « de terrain », au contraire, les ouvrages qui font barrage au cours d'eau seraient donc à préserver car ils constituent des réservoirs « naturels » d'eau (en plus de faire partie du patrimoine, etc.). Les animateurs et techniciens de rivière ont un discours inverse : il y a une confusion entre débit et quantité et ces ouvrages n'ont pas de réelles fonctions de soutien à l'étiage (seul de gros barrages peuvent en avoir réellement) et accentuent au contraire les pertes en eau (par une accentuation de la surface exposée au rayonnement et une augmentation de la température de l'eau, une étude de l'AELB estimant la perte à 1 cm/jour par ces barrages), en plus d'être contraire à l'objectif de continuité.

Face à ce registre de l'adaptation défensive, par des ouvrages « en dur », un discours très présent chez les acteurs interrogés consiste à l'inverse à préserver et renforcer les capacités de fonctionnement des milieux, pour pouvoir s'adapter eux-mêmes aux évolutions climatiques. « L'adaptation, c'est pouvoir redonner des capacités de résilience aux milieux pour pouvoir encaisser des à-coups climatiques » déclare ainsi l'une des personnes interrogées. L'important serait de maintenir ou redonner des capacités aux milieux pour pouvoir s'adapter, en favorisant la transparence des ouvrages, en travaillant sur les aspects de morphologie et les capacités de rétention des sols, en améliorant les connectivités entre les milieux… Cette vision de l'adaptation s'appuie sur la préservation et l'amélioration de la résilience des écosystèmes et inclue les actions de préservation et de restauration des zones humides et des cours d'eau, d'amélioration de la biodiversité, de préservation ou de recréation de continuité écologique, etc. Elle s'articule particulièrement autour de la préservation et la restauration des zones humides, qui constituent des réservoirs naturels d'eau. Et ces discours insistent largement sur les autres gains associés à de telles mesures (en termes de soutien aux étiages, de lutte contre les inondations, de biodiversité et de connectivité des milieux…), assurés quelles que soient les évolutions climatiques.

A un niveau plus stratégique, le discours sur l'adaptation ainsi peut faciliter et accélérer des évolutions conceptuelles plus profondes. Le « problème climat » peut être mobilisé pour accompagner et renforcer le discours sur un changement de référentiel urbanistique, prônant le passage d'une ville minérale, et par là imperméable (artificialisation des sols) et inconfortable (îlot de chaleur urbain), à une ville plus végétale, perméable et confortable (la végétalisation et l'eau permettant un rafraîchissement facilité des espaces urbains). Ce discours repose là encore sur une perspective « gagnant-gagnant » : se préparer pour demain et faire des économies aujourd'hui.

« Plus révolutionnaire, nous allons maintenant devoir retenir l'eau dans nos territoires. Nous avons passé des décennies à drainer nos sols, bétonner nos villes, raccourcir les cours d'eau et bloquer l'eau entre des digues bien étroites. Nous pouvons recreuser nos fossés en ville et les verdir, prévoir des mares temporaires, nous mettre aux « jardins de pluie » comme les Australiens, ou encore ouvrir des brèches dans des digues pour réalimenter des zones humides d'infiltration des eaux. Nos nappes seront notre meilleur frigo d'eau fraîche pour les futures canicules. Le plus intéressant c'est que ces solutions simples d'infiltration de l'eau vers les nappes peuvent aussi nous faire gagner de l'argent : à Montpellier la gestion des eaux de pluie sur une zone de 3 ha de l'opération campus a été mise en « 0-rejet » vers les égouts et elle s'est révélée 7 fois moins chère que le tout à l'égout traditionnel ! »[19]

En accentuant ces différentes figures d'adaptation évoquées afin de les mettre en tension, ces orientations d'adaptation différentes (restaurer les milieux et laisser les prairies humides non cultivées vs soutenir les étiages par des barrages ou des retenues) peuvent illustrer des imaginaires de solutions divergents, entre des cultures mécanistes, du contrôle, de la maîtrise (qui passent par des équipements « en dur »), et des cultures écologistes, naturalistes, davantage orientées vers le maintien, voire le

[19] Martin Guespereau, ancien directeur général de l'AERMC. Tribune Libre « Changement climatique et eau : assez parlé d'incertitudes, parlons concret ! », p.6 In : Revue L'eau, l'industrie, les nuisances n°382, mai 2015

renforcement des capacités de fonctionnement des milieux, entre un paradigme techniciste et un paradigme éco-systémique. La mise en tension de ces différents univers de solution est en partie schématique mais elle donne à lire les différents imaginaires mobilisés. On peut rapprocher ces différents imaginaires de gestion des différents rapports vis-à-vis de la nature, comme le proposait Jean-Baptiste Narcy (2004), en s'appuyant sur les travaux de Boltanski et Thévenot et de Raphaël et Catherine Larrère, entre une nature passive et maîtrisée (natura naturata) et une nature vivante mais coupée de l'homme (natura naturans). On peut alors voir différentes postures par rapport à l'adaptation, entre un paradigme techniciste, où l'adaptation pour les systèmes humains consiste à « lutter contre » les changements climatiques par des ouvrages de protection ou de régulation et un paradigme éco-systémique, où il s'agit plutôt « de faire avec » ces changements, en s'appuyant sur les capacités d'adaptation des écosystèmes. L'idée de résilience pourrait constituer un marqueur entre ces différentes postures, bien que sa polysémie lui confère une grande malléabilité. On retrouvait bien ces différentes figures de l'adaptation et les imaginaires associés lors des ateliers du climat réunissant élus, acteurs locaux, gestionnaires, organisés sur le bassin versant de l'Armançon. Une issue à ces oppositions serait de sortir la gestion de l'eau d'une sphère purement technique pour penser la protection et la gestion des milieux aquatiques comme partie prenante à niveau égal des logiques d'aménagement du territoire.

VI. Les vertus de l'incertitude et de la co-construction dans la recherche-action

L'implication des acteurs locaux était prévue dès le départ du projet, afin de prendre en compte leur expertise locale et de leur transmettre les résultats efficacement. Mais le projet a finalement été plus loin : à plusieurs reprises les acteurs ont été co-décideurs, en particulier lors des ateliers de design territorial et lors de réflexion sur les indicateurs hydrologiques. Les travaux de recherche en ont été enrichis mais aussi infléchis. Ils montrent que, si l'on conditionne souvent l'action à la connaissance, l'incertitude ne justifie pas l'inaction : elle est en fait un guide pour orienter les décisions.

1. Ateliers de design territorial et indicateurs hydrologiques : deux exemples de co-construction réussie

a. Les ateliers de design territorial

Deux territoires, une approche : la co-construction d'ateliers prospectifs et créatifs

Dès le départ du projet, était prévue une phase de "travail de groupe avec l'appui d'un cabinet apportant son savoir-faire de médiation territoriale et capable d'engager le collectif dans une démarche d'action et de changement". L'objectif était de nourrir les réflexions de l'axe 2 sur les ressorts de l'action collective (place des savoirs, relations entre les personnes, dispositifs de gestion des ressources, évènements de contexte déclencheurs...) en complément des enquêtes et des réunions observées sur les trois bassins versants étudiés (cf. page 26).

Des ateliers ont ainsi été organisés dans deux territoires différents, représentant des enjeux locaux de gestion de l'eau et un état d'avancement des SAGE différents. En effet, la dynamique du SAGE de l'Arroux-Bourbince ayant été mise en suspens au cours du projet, les ateliers n'ont pu être organisés que sur les bassins versants de l'Armançon (début 2015) et de la Tille (fin 2015). Dans le deuxième cas, ils ont été menés en partenariat avec l'EPTB Saône et Doubs et étendus aux bassins versants de l'Ouche et de la Vouge afin de permettre une réflexion élargie et cohérente. En effet, ces trois bassins versants contigus sont interconnectés et présentent des enjeux similaires en termes de ressource en eau (ils sont en "Zone de Répartition des Eaux", c'est-à-dire en déficit quantitatif chronique). Autre point commun, leur fonctionnement est largement impacté par la présence de l'aire urbaine de Dijon. Cette dernière est en partie alimentée en eau potable par la "Nappe de Dijon Sud", à cheval entre les bassins de la Vouge et de l'Ouche et faisant l'objet d'un contrat de nappe. Cette approche plus englobante a été également voulue par les parties prenantes (animateurs et agence de l'eau).

Le collectif de chercheurs s'est rapidement tourné vers la méthode du "design territorial" pour organiser ces temps de travail en groupe. Il s'agit de proposer des ateliers prospectifs et créatifs autour du changement climatique et de la modification de la disponibilité des ressources en eau. La méthode envisagée consiste à faire un pas de côté pour déconstruire la réalité telle qu'elle est connue et pratiquée. Il s'agit en effet d'imaginer un territoire bourguignon sous l'influence d'un changement climatique modifiant la disponibilité des ressources en eau. Les projections du territoire à moyen et long terme devaient permettre d'imaginer la façon dont les hommes et les sociétés s'organiseront pour faire face aux changements induits. L'objectif n'est pas de dégager un plan d'action précis mais de favoriser l'appropriation des effets du changement climatique en rendant les participants pro-actifs et d'observer leurs réactions quant aux choix et possibilités qui s'offrent à eux (les acteurs pouvant avoir des intérêts divergents concernant l'usage de l'eau).

Ces "ateliers du climat" ont été co-construits (cf. Figure 31) entre le collectif de chercheurs d'HYCCARE, les animateurs des bassins versants concernés et les intervenants extérieurs, spécialistes du design

territorial (Design Territoire Alternatives, pour l'Armançon) ou de l'animation (Kipp, pour Tille-Ouche-Vouge), le tout coordonné par Alterre.

Dans le cas des bassins versants de la Tille, de l'Ouche et de la Vouge, l'existence du retour d'expérience sur les ateliers de l'Armançon et les travaux HYCCARE plus avancés ont permis de mieux cadrer les ateliers et d'aller plus loin dans la co-construction de leur déroulé. Cette dernière était toutefois plus complexe car réunissant plus d'acteurs, avec quatre animateurs (3 SAGE et un contrat de nappe) au lieu d'un et un co-portage par Alterre et l'EPTB Saône et Doubs.

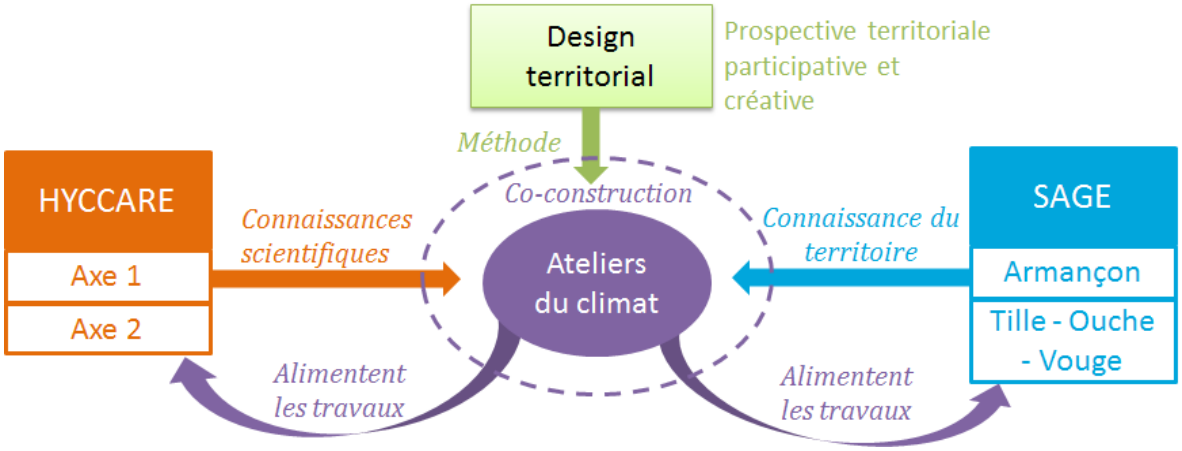


Figure 31 : La co-construction des ateliers du climat

Des objectifs et un fil rouge similaires : de l'appropriation des connaissances à la création collective

Pour les deux sessions d'ateliers, les objectifs définis collectivement étaient similaires :

- pour HYCCARE : restituer les premiers résultats afin qu'ils soient appropriés localement et nourrir les réflexions de l'axe 2 ;
- pour les territoires : faire travailler ensemble les acteurs locaux hors cadre formel et engager une première réflexion prospective sur le changement climatique pouvant alimenter les outils de planification et de gestion de l'eau (SAGE, PGRE...).

Les acteurs locaux invités à ces ateliers ont été choisis par les animateurs des bassins versants, en concertation avec le collectif HYCCARE : il s'agit essentiellement de membres des Commissions locales de l'eau.

Les ateliers ont été organisés à chaque fois en deux temps[20] espacés de quelques semaines. Cela avait pour but de laisser du temps, d'une part aux acteurs locaux pour s'approprier le sujet, et d'autre part aux organisateurs pour ajuster si besoin le déroulé des ateliers entre deux sessions. Bien que programme détaillé des ateliers soit différent entre les deux territoires, le même fil rouge a été gardé avec (cf. Figure 32) :

- Une introduction courte pour présenter le projet HYCCARE et rappeler les objectifs des ateliers.
- Un premier temps d'échanges en petits groupes (2-3 personnes) sur la perception du changement climatique ("le changement climatique et moi") puis un échange en plénière avec les chercheurs. Les objectifs étaient de faire ressortir les perceptions individuelles et

[20]Pour l'Armançon en deux journées et pour la Tille en deux demi-journées (ainsi qu'une soirée de restitution).

subjectives du changement climatique, de les confronter aux connaissances scientifiques et de commencer à créer une dynamique de groupe.

Pour vous, c'est quoi le changement climatique ?

Racontez un moment de votre vie où vous avez l'impression de l'avoir ressenti.

Est-ce que le changement climatique a changé des choses dans votre quotidien ?

- Une présentation dynamique des premiers résultats d'HYCCARE entrecoupée de questions des participants afin de favoriser l'appropriation des connaissances et de créer une relation de proximité entre chercheurs et participants pour faciliter les échanges ;
- Des travaux en groupes de 5-6 personnes sur les conséquences du changement climatique et de ses impacts sur la ressource en eau à partir de photographies d'activités (agriculture, industrie, etc.), de bâtiments, de personnes... L'idée était que les participants commencent à se projeter dans des situations concrètes et locales en mobilisant les connaissances qui venaient d'être présentées. Les réflexions menées dans chaque groupe ont ensuite été partagées entre les groupes.
- Des réflexions prospectives en groupes de 5-6 personnes pour imaginer et territorialiser des pistes d'adaptation à un scénario d'évolution de la ressource en eau. Cela a aussi été l'occasion de faire réfléchir sur un objectif commun des acteurs qui n'ont pas forcément l'habitude de co-construire, et a permis que chacun comprenne mieux les contraintes et leviers des autres. Là aussi les échanges en groupe ont été restitués à tous.

Scénarii des ateliers de l'Armançon *pour 2043 : pénurie d'eau progressive ; pénuries d'eau brutales ; excès d'eau brutaux ; alternance d'excès et de pénuries d'eau.*

Scénario des ateliers Tille-Ouche-Vouge *: +1° par rapport à 2015, des précipitations très variables d'une année sur l'autre, des cours d'eau avec 30% de débit en moins en moyenne et une grande instabilité générale, des étiages plus sévères et plus longs.*

- La conception collective, dans un cas d'un projet, dans l'autre de supports de communication, venant concrétiser les stratégies et pistes d'adaptation discutées dans les travaux précédents. Ce temps de création visait à renforcer la dynamique de groupe en faisant travailler les participants sur des projets concrets ainsi qu'à synthétiser et clore les ateliers.
- Un bilan pour recueillir le ressenti et l'avis des participants, complété par une synthèse des chercheurs en sciences sociales sur la manière dont ce sont déroulés les ateliers.

Des comptes-rendus des ateliers ont été élaborés afin de synthétiser les échanges et de promouvoir la démarche (cf. Annexes C et D).

De plus, dans le cas des ateliers sur les bassins versants de la Tille, de l'Ouche et de la Vouge, une soirée de restitution (18h-20h) a été organisée deux mois après les ateliers. Il s'agissait de rendre compte des échanges qui ont eu lieu, -de montrer la cohésion de groupe crée, d'intégrer de nouvelles personnes à la dynamique et à la réflexion, en particulier les élus du Grand Dijon et des trois bassins versants.



Figure 32 : Principales étapes suivies lors des ateliers de design territorial

Bilan : des dynamiques locales stimulées, HYCCARE enrichi

Les deux sessions d'ateliers ont mobilisé une quarantaine de participants d'horizons divers (chercheurs, élus locaux, associatifs, techniciens, professionnels, agents de l'Etat…). Si lors des ateliers de l'Armançon le manque de représentation de la profession agricole a été souligné, cette dernière a été très présente à ceux des bassins versants de la Tille, de l'Ouche et de la Vouge.

Les participants se sont pliés volontiers aux différents exercices, bien que ceux-ci soient relativement inhabituels. La méthode a permis des échanges riches et constructifs, sans tension entre usagers, et le développement d'une culture commune autour du changement climatique et de ses impacts sur l'eau. Si quelques-uns ont regretté que peu de résultats tangibles découlent de ces ateliers (ce qui n'était pas leur objet), il semble qu'une dynamique ait véritablement été lancée sur les deux territoires. Les participants ont émis le souhait, d'une part de continuer et d'aller plus loin dans les échanges, et d'autre part de diffuser les réflexions dans les territoires, de rallier d'autres acteurs. Ainsi, une conférence est prévue en 2016 sur le territoire de l'Armançon pour inviter plus largement les élus locaux à s'approprier les connaissances sur le changement climatique et ses impacts sur la ressource en eau. Pour les bassins versants de la Tille, de l'Ouche et de la Vouge, les réflexions sont encore en cours sur les suites à donner.

Vis-à-vis du projet HYCCARE, les ateliers ont également atteint leurs objectifs, puisqu'ils ont effectivement servi de "matière" pour l'analyse sociologique et ont permis de restituer les connaissances acquises. Ces temps de rencontre entre chercheurs et acteurs locaux ont aussi contribué à infléchir les travaux de l'axe 1. En effet, lors des ateliers de l'Armançon, peu de simulations étaient prêtes pour être présentées (seules celles sur les températures jusqu'en 2043), ce qui a incité les chercheurs à travailler davantage sur les observations et à mettre en avant celles-ci lors des ateliers. Cela a très bien fonctionné, l'analyse du passé étant pour les participants un exemple tangible de ce qui pourrait se passer à l'avenir. Cette expérience a ainsi alimenté l'idée d'approfondir le travail sur les observations davantage que prévu. Enfin, lors des ateliers des bassins versants de la Tille de l'Ouche et de la Vouge, les simulations étaient plus avancées mais les chercheurs avaient peu confiance en

celles des pluies (cf. page 51). Cette incertitude sur l'évolution des pluies a été expliquée et n'a pas été un frein à la conduite des ateliers : les participants ont pu se projeter et réfléchir collectivement à l'adaptation. C'est aussi un résultat d'HYCCARE.

b. Les indicateurs hydrologiques

Un autre objet de co-construction entre chercheurs et acteurs a été la définition d'indicateurs hydrologiques. L'objectif était d'aboutir à un jeu d'indicateurs (à calculer à partir des données simulées) pour caractériser l'évolution des étiages, qui soit opérationnel pour les gestionnaires de la ressource en eau.

Pour cela une demi-journée de travail a été proposée aux acteurs concernés par ces indicateurs (animateurs, techniciens, agents de l'administration…) en mars 2015. Réunissant une vingtaine de participants, elle a été l'occasion de :

- Présenter des premiers résultats produits par HYCCARE ;
- Proposer une pré-sélection d'indicateurs hydrologiques (de sévérité et de saisonnalité de l'étiage) choisis à partir de la littérature ;
- Confier des jeux de données aux participants pour tester l'utilisation des indicateurs proposés ;
- Echanger sur ces indicateurs afin de recueillir les avis et attentes des acteurs et d'aboutir à une proposition adaptée à leurs besoins pour les éclairer sur l'impact du changement climatique sur la ressource en eau.

Indicateurs présélectionnés *:*

Sévérité de l'étiage : débit journalier minimum de l'année, durée de l'étiage (nombre de jours situés sous le seuil déterminé), volume d'étiage (déficit de volume entre le seuil et le débit observé)

Saisonnalité de l'étiage : dates de début, de centre et de fin d'étiage (10%, 50% et 90% du volume d'étiage), date du débit journalier minimum

A l'issue de la session, les participants :

- Ont fait ressortir deux indicateurs particulièrement utiles et pertinents pour la gestion de l'eau : la durée de l'étiage et la date de début de l'étiage. Ces indicateurs seraient également intéressants pour sensibiliser aux impacts du changement climatique sur la ressource en eau dans les territoires.
- Ont discuté du seuil d'étiage choisi (privilégier le VCN10 ou le VCN3, plus opérationnels que le quantile Q15 proposé) et l'intérêt d'identifier les différentes périodes (s'il y en a) où l'on passe sous le seuil dans l'année.
- Ont souligné l'intérêt des autres indicateurs, complémentaires aux deux premiers mais moins utilisés dans la pratique.

Au-delà de la co-construction des indicateurs, cette demi-journée d'échanges a également pu permettre de faire remonter des difficultés de perception du changement climatique au niveau des territoires : « on en parle mais on ne le touche pas du doigt ». La rupture de température est un résultat très fort, mais personne ne l'a ressenti : il faut avoir un recul suffisant pour s'en rendre compte, c'est une approche statisticienne et non intuitive.

Aussi, c'est à cette occasion qu'a émergé l'idée de rédiger une synthèse des premiers résultats de l'axe 1 (mentionnée page 11) : les participants ont émis le souhait qu'un résumé soit mis à disposition des territoires pour sensibiliser au changement climatique et diffuser les messages clés auprès des acteurs locaux. Pour y répondre, le collectif a co-rédigé un document synthétisant les résultats d'HYCCARE sur le changement climatique passé et à venir intitulé "Le changement climatique en Bourgogne et ses effets sur la ressource en eau" (cf. Annexe B). Avant sa diffusion, ce résumé été soumis aux personnes ayant participé à la réunion sur les indicateurs hydrologiques afin de s'assurer qu'il corresponde bien à leur demande et leur soit utile. Ce document est ainsi une autre illustration de comment les échanges avec les territoires ont influé sur les travaux d'HYCCARE au fil du projet.

Enfin, l'observation de cette réunion a également contribué aux réflexions menées dans l'axe 2 (cf. page 72).

2. Évolution du rapport aux acteurs et ses conséquences sur le projet

a. Du transfert de connaissance à la co-construction avec les acteurs

La relation entre chercheurs et acteurs du territoire a été différente selon les types d'acteurs et a évolué au fur et à mesure du projet :

- Au départ, l'objectif prépondérant aux rencontres et échanges avec les acteurs était de s'assurer que le projet réponde bien à leurs attentes et à leurs besoins, qu'il soit adapté aux réalités des territoires.
- Au fil du projet, il s'est aussi de plus en plus agi de leur restituer les premières conclusions afin de favoriser leur appropriation, les décideurs locaux étant une des cibles prioritaires d'HYCCARE (cf. page 6). Ces temps de transfert des connaissances ont été multiformes : des conférences aux réunions presque informelles, en passant par les ateliers du climat (cf. page 79). Ils ont ciblé des groupes d'acteurs relativement homogènes (ex : irrigants de Côte-d'Or) ou des publics mixtes (ex : ateliers du climat), parfois à l'initiative du collectif HYCCARE (ex : réunion sur les indicateurs hydrologiques), parfois à la demande d'acteurs (ex : conférence de l'Agence de l'eau Seine-Normandie). Lorsque certains acteurs ont été rencontrés à plusieurs reprises, une relation de confiance s'est installée, permettant de vrais échanges et des réflexions approfondies sur les pistes d'adaptation. Le cas des irrigants de Côte-d'Or en est un exemple : suite à une première rencontre où les agriculteurs semblaient sur la défensive, ils sont venus aux ateliers du climat des bassins versants Tille-Ouche-Vouge où ils ont beaucoup contribué et l'un d'entre eux est venu témoigner de manière très positive au séminaire final de restitution du projet.
- Enfin, de réelles expériences de co-construction ont pu voir le jour avec les gestionnaires de l'eau. C'est notamment le cas :
    - des ateliers de design territorial (cf. page 79), dont les objectifs et le contenu ont été discutés et co-décidés entre chercheurs, animateurs et prestataires, avec parfois des compromis à réaliser;
    - des indicateurs hydrologiques (cf. page 83), dont le choix a été débattu et testé avec les acteurs de l'eau.

La liste des principaux temps de rencontre entre chercheurs et acteurs est disponible en page 7.

Ainsi, les relations entre chercheurs et acteurs ont changé de forme et d'ampleur au cours du projet : la consultation "unilatérale" a fait place à des échanges plus approfondis, à des interactions plus complexes permettant de co-construire plusieurs éléments du projet.

b. Impacts sur les travaux de recherche

Les temps d'échanges avec les acteurs ont eu des impacts sur le projet deux ordres :

- sur le contenu du projet, que ce soit au niveau des choix méthodologiques ou des résultats ;
- sur la manière de transmettre les résultats du projet (productions, formats, éléments à mettre en avant...).

Au-delà des apports directs sur le "contenu" du projet (choix des indicateurs hydrologiques, connaissances locales, observation des jeux d'acteurs...), les relations avec les acteurs du territoire ont induit plusieurs inflexions d'HYCCARE. Les plus marquantes sont :

- des analyses des observations du changement climatique passé et de ses impacts sur la ressource en eau plus poussées qu'initialement prévu, en lien avec les difficultés rencontrées sur les simulations, la nécessité d'avoir des résultats concrets à présenter aux acteurs et le bon

retour de ces derniers sur cette approche, l'analyse du passé étant robuste et presque suffisante pour se projeter dans l'avenir.

- un glissement des questionnements sur le rôle du collectif dans l'adaptation future, au rôle de l'individu (et du collectif) sur l'adaptation du futur à aujourd'hui et sur les outils actuels de gestion de l'eau.

Par ailleurs, les divers exercices de transfert des connaissances ont permis au collectif d'HYCCARE de réfléchir à la manière de présenter les résultats. Peuvent notamment être mis en avant l'importance de :

- La rencontre directe entre acteurs et chercheurs accompagnée par un « facilitateur »;
  Les chercheurs du projet ayant eu à cœur de travailler en relation étroite avec les acteurs de terrain et de leur restituer leurs résultats, ils ont dialogué directement avec eux à travers les différentes réunions. Le rôle d'Alterre ou des animateurs des ateliers du climat a été de les mettre en relation et de faciliter les échanges via des choix d'animation, de format de réunion etc. Cette rencontre directe a été très appréciée par les participants qui ont confiance en l'objectivité des chercheurs : les voir présenter leurs résultats et pouvoir leur poser directement des questions leur a permis de mieux s'approprier le sujet.

- Confronter perceptions des acteurs et connaissances produites ;
  Cela permet aux acteurs de s'interroger eux-mêmes sur leur ressenti et leurs connaissances sur le changement climatique et de mettre en regard ces éléments subjectifs avec les connaissances produites par le projet, facilitant aussi leur appropriation.

- Bien clarifier ce que l'on sait et ce que l'on ne sait pas ;
  Les acteurs rencontrés n'ont pas montré de difficultés pour se projeter dans le futur malgré les incertitudes lorsqu'ont été clairement énoncés ce qui est robuste et ce sur quoi on a peu confiance, en d'autres termes ce sur quoi il est possible de se baser pour guider l'action et ce sur quoi il faudra avancer sans espérer davantage de connaissances à court terme.

- Bien adapter le format de présentation des résultats.
  C'est par exemple le choix d'indicateurs qui "parlent" aux acteurs (ex: indicateurs hydrologiques utilisés pour les arrêtés sécheresse) ou encore la rédaction d'une synthèse des éléments clés à diffuser auprès des acteurs locaux (ex : recto-verso pour les gestionnaires de l'eau pour leurs territoires).

3. Incertitude dans la recherche, incertitude dans l'action ?

a. Quels besoins de connaissances ?

Les entretiens menés sur les cinq bassins versants en contrat de milieu et en région ont permis de faire ressortir quelques éléments concernant les besoins de connaissances des acteurs locaux.

Tout d'abord, plusieurs acteurs ont des requêtes précises sur les impacts à venir du changement climatique sur la ressource en eau, à des horizons temporels réduits (au maximum, deux décennies), dans l'optique d'ajuster le dimensionnement ou le fonctionnement de certains équipements (captages d'eau potable, STEP…). Or le projet a montré qu'il est difficile de répondre précisément à ces demandes du fait des incertitudes existantes, seule des tendances peuvent être dégagées pour le moment. Inversement, un acteur régional relève qu'il y a finalement beaucoup d'informations disponibles dans le secteur de l'eau : la question serait davantage au niveau du traitement et de l'usage qui peut en être faite aux niveaux locaux.

Concernant la forme de restitution des connaissances plus générales, les acteurs insistent sur la nécessité d'adopter des formats très synthétiques, pédagogiques et un vocabulaire simple et

accessible. Il faut s'attacher à faire passer les éléments fondamentaux à des acteurs qui n'ont pour la plupart pas de connaissances préalables sur ces sujets. Plusieurs animateurs insistent sur la nécessité de présenter des éléments très concrets et territorialisés, directement exploitables et non-culpabilisants. Au-delà de la forme écrite, les réunions d'information, les séminaires et les visites thématiques réunissant des élus motivés par les mêmes questions sont mentionnés comme étant efficaces et motivantes. Enfin, d'autres formats de restitution sont cités, comme les clips vidéos ou l'idée d'un Massive Open Online Course (MOOC).

b. Communiquer sur l'incertitude des résultats de recherche

Les choix méthodologiques relatifs à la modélisation du climat (modèle de climat régional et simulations en continu) n'ont pas permis de travailler sur les incertitudes selon l'acception habituelle. Les résultats obtenus ont des incertitudes liées au choix du modèle, au choix de la trajectoire de forçage radiatif et à la variabilité interne du climat. Mais les temps de calcul sont tels qu'il n'est pas possible de travailler en multi-modèle ou de réaliser plusieurs simulations pour documenter ces incertitudes. C'est la contrepartie du choix de la précision spatiale et temporelle. Si cela peut limiter l'interprétation des résultats, il ne semble pas que cela ait gêné les acteurs à qui ils ont été restitués. Aucune question sur ce sujet n'a d'ailleurs été formulée.

C'est sur un autre type d'"incertitude" qu'il a fallu réussir à bien communiquer auprès des acteurs des territoires comme des partenaires institutionnels : celle sur l'évolution à venir des précipitations et des débits du fait de l'absence de simulations robustes. En effet, bien que les simulations aient été réalisées, les chercheurs ont choisis d'être très prudents sur leur restitution du fait de la mauvaise reproduction du cycle annuel des pluies. Aussi, deux « stratégies » ont été mise en œuvre :

- Pour les pluies, les résultats ont été présentés tout en indiquant la faible confiance qui leur est accordée et les raisons de ce positionnement. Celui-ci s'appuie sur deux principaux éléments de comparaison : les observations du passé et les résultats obtenus dans d'autres projets de recherche. Concernant l'augmentation des quantités précipitées, ce n'est pas ce qui a été observé par le passé de façon significative ni le résultat dominant des résultats publiés par ailleurs. Toutefois, cette hypothèse n'est pas invraisemblable, c'est une possibilité que certains modèles statistiques prédisent également. Par contre, il a bien été expliqué que le cycle annuel des pluies semble lui totalement improbable. Pour des raisons de clarté, le message finalement favorisé sur l'évolution à venir des pluies a été de se baser sur l'observation du passé et donc de considérer que les précipitations n'évolueraient quasiment pas en quantité.
- Pour les débits, les simulations n'ont peu ou pas été présentées du fait de la mauvaise reproduction du cycle annuel des précipitations. Là encore, ce sont les évolutions passées qui font références : avec une faible évolution des pluies et une forte évolution des températures, les débits devraient être amenés à baisser comme cela a déjà été observé.

Enfin, la communication sur ces "incertitudes" a été accompagnée par une mise en exergue des résultats robustes, en particulier sur les températures.

c. Agir en tenant compte de l'incertain

Lors d'un entretien mené dans le cadre d'HYCCARE, un acteur régional relève que dans le cas du changement climatique, il faut adopter une approche systémique et « faire de l'incertitude une donnée de départ ». La question de la connaissance peut être dans certains cas un argument à l'inaction et constituer des points de blocages. De façon plus générale, il ressort que l'attente de nouvelles avancées scientifiques en matière d'hydrologie et de climatologie à des échelles régionales, voire plus fine est fréquemment invoquée pour justifier qu'il est « urgent d'attendre » de nouveaux résultats avant de pouvoir réellement statuer sur les adaptations à mettre en place pour améliorer la gestion de l'eau. Cette posture doit être bien comprise pour être correctement désamorcée, notamment

lorsqu'il s'agit de restituer des résultats scientifiques en matière de prévision des impacts, en communiquant correctement sur l'incertitude.

Comme cela a été précisé auparavant, les acteurs rencontrés au cours du projet n'ont finalement pas montré de difficultés pour se projeter dans le futur malgré les incertitudes, car celles-ci ont justement été explicitées. Il a pu y avoir des frustrations mais la communication faite par les chercheurs sur ce sujet a permis de mettre en avant les connaissances sur lesquelles il est possible de se reposer pour orienter les décisions. Par exemple, lors des ateliers, l'absence de simulations sur les pluies et les débits n'a pas gêné les participants pour imaginer leur territoire de demain et se mettre en action.

Le rapport entre connaissance et action communément admis n'est finalement pas si évident : il est possible d'agir malgré de fortes incertitudes si celles-ci sont explicitées et éclairées par des certitudes. Il y a certes besoin de données locales mais leur absence n'est pas la raison de l'inaction, la connaissance seule n'est pas suffisante pour motiver l'action.

Conclusion et perspectives

Le projet HYCCARE a apporté de nouvelles connaissances sur l'évolution passée et future du climat et de la ressource en eau en Bourgogne, à une échelle fine du territoire. Il a également permis de constater que le changement climatique est déjà perçu par les acteurs locaux mais qu'il est encore peu intégré dans la gestion collective de l'eau car la pénurie d'eau est encore peu lisible. Pourtant, la disponibilité en eau dans les territoires devrait continuer à diminuer sous l'effet de l'augmentation des températures. Ces dernières évoluant par ruptures, il faudra s'adapter en continu car il n'y aura pas de stabilisation du climat.

L'objectif d'HYCCARE de fournir des outils aux décideurs locaux afin de favoriser la prise en compte du changement climatique et de ses impacts sur la ressource en eau a ainsi été atteint, bien que toutes les connaissances initialement prévues n'ont pas pu être produites. Le manque d'informations sur l'évolution future des précipitations et des débits n'a pas été un frein à la mise en action des acteurs, grâce à une communication assumée sur les certitudes et les incertitudes.

Le projet a également eu des résultats méthodologiques importants, en particulier grâce aux choix initiaux relativement originaux (modèle de climat régional, simulations en continu, chaîne hydro-climatique, travaux exploratoires sur le foncier agricole...) et a ainsi ouvert plusieurs pistes à explorer. La vraie pluridisciplinarité et la co-construction au sein des axes, entre les axes et avec les acteurs du territoire a été la marque de fabrique et d'évolution du projet, rendant le tout cohérent et multiforme.

Les résultats ont été valorisés sous de multiples formes scientifiques (articles, communications,...) et non scientifiques (synthèses, comptes-rendus, articles de presse…). Ils ont été partiellement restitués auprès des acteurs à de nombreuses reprises via des réunions, conférences, ateliers. Enfin, un séminaire final de restitution a été organisé à la fin du projet afin de transmettre les conclusions du projet et de les confronter au point de vue des acteurs. Rassemblant 130 personnes, il a permis un débat ouvert avec gestionnaires de l'eau, élus locaux, institutionnels, associations, agriculteurs...

Les acteurs de la gestion de l'eau rencontrés au fil du projet ont ainsi acquis des connaissances sur le changement climatique en Bourgogne. Des passerelles ont été établies entre les mondes souvent trop cloisonnés de la recherche, des institutionnels, des gestionnaires de l'eau et des usagers.

Les perspectives qui s'ouvrent au sortir de ce projet sont de deux ordres. Elles concernent d'une part, la valorisation des résultats et leur traduction concrète dans les territoires. Au-delà de la nécessaire diffusion des données produites et des productions réalisées (cartes, rapports, synthèses...), une valorisation des travaux est également à planifier. Alterre prévoit par exemple de rappeler les principaux résultats dans sa publication « Repères » en 2017 et de travailler sur les suites à donner aux ateliers du climat. Une boîte à outils ou un kit de sensibilisation au changement climatique pourrait voir le jour pour permettre aux animateurs des bassins versants de travailler sur ces questions avec les acteurs locaux. D'autre part, des perspectives en termes de travaux de recherche sont multiples : amélioration des simulations des précipitations, analyse de l'évolution du stress hydrique et de la percolation sur les dix autres bassins versants, travail sur les impacts du changement climatique sur la qualité de l'eau, simulation de l'évolution du prix du foncier agricole sous l'effet du changement climatique à venir, travaux sociologiques sur l'irrigation de demain...

LISTE DES VALORISATIONS

Articles

Brulebois E., Castel T., Richard Y., Chateau C., Amiotte-Suchet P., 2015. Hydrological response to an observed shift in air surface temperature over France in 1987/88. Journal of Hydrology, Volume 531, p. 892-901.

Vergote M.-H., Petit S. (accepté, à paraître 2016). Du futur à aujourd'hui, mettre la gestion de l'eau sous tension. *Développement durable et territoires*, numéro spécial « L'adaptation en tension » (2/2).

Vergote M.-H., Petit S. (résumé accepté, article en cours d'écriture). Compter l'eau, compter sur l'eau. Des indicateurs de durabilité à renouveler. *Participations*.

Colloques- Séminaires

Brulebois E., Rossi A., Le Moine N., Philippe M., Castel T., Richard Y., Amiotte-Suchet P. : Potentialités d'une chaîne hydroclimatique à l'échelle des bassins versants bourguignons, XXVIIe colloque de l'Association Internationale de Climatologie, juillet 2014, Dijon, France.

Brulebois E., Ubertosi M., Bachmann J., Rossi A., Castel T., Richard Y., Sauvage S., Sanchez-Perez J.-M., Amiotte-Suchet P., Sensitivity of water quality of three contrasted north-eastern French watersheds to climate change (2006-2100) using SWAT model, International SWAT Conference, June 2015, Pula, Italie.

Castel T., Larmure A., Richard Y., 2014 « L'évolution des incertitudes dans un contexte de changement climatique - Approche agroclimatique » Tutoriel proposé dans le cadre du congrès « Décider dans un monde incertain un enjeu de la maîtrise des risques » Congrès Lambda-Mu 19 Dijon, octobre 2014. Tutoriel initié par M-H. VERGOTE membre du comité de programme du congrès.

Larmure A., Petit S., Toussaint H., 2014, « Le changement climatique fait-il évoluer les pratiques agricoles ? », organisation et animation d'une table ronde, Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Dijon, le 4/07/2014.

Legras O., Ubertosi M., Brulebois E., Amiotte-Suchet P., Rossi A., Castel T., Richard Y., Brayer J.-M., Doney C., Pinson S., Sollsteiner P., Toussaint H., Evolution du bilan hydrique à l'échelle de bassins versants en contexte de changement climatique - Mise en place d'une méthodologie, XXVIIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie, juillet 2014, Dijon, France.

Petit S., Vergote M.-H., Poncet M., 2015, « Changer avec le climat », Communication au Colloque ARPENV Transition écologique, de la perception à l'action, Nanterre, 11-12 juin 2015, diaporama, 22 p.

Petit S., Vergote M.-H., 2016, Comment appréhender la pénurie d'eau ?, Communication au séminaire de restitution HYCCARE, Dijon, 25/03/2016.

Rossi A., Castel T., Richard Y., Amiotte-Suchet P., Brulebois E., Ubertosi M., Brayer J.-M., Doney C., Toussaint H., Analyse des paramètres hydroclimatiques simulés à haute résolution par un modèle climatique régional (WRF), XXVIIe colloque de l'Association Internationale de Climatologie, juillet 2014, Dijon, France.

Vergote M.-H., 2016 Présentation de l'étude des volumes prélevables sur le BV de la Tille. Séminaire de recherche au Centre de Recherche en Gestion de l'Ecole Polytechnique (Institut Interdisciplinaire de l'Innovation) Palaiseau, 8 février 2016.

Valorisation à destination des professionnels :

Bertrand F., 2015. « L'adaptation aux changements climatiques pour les collectivités locales : du concept aux pratiques », journées de dialogue Recherche-Gestion, Etablissement Public Loire, Orléans, 24 septembre 2015, http://www.eptb-loire.fr/recherche-gestion-2015

Brulebois E., Tissot A.-C., 2015. *HYCCARE Bourgogne - De la connaissance du climat aux leviers d'adaptation*. Intervention à la Commission territoriale Seine-amont du bassin Seine-Normandie, Sens, le 21/10/2015, diaporama, 46 p.

EPTB Saône et Doubs, HYCCARE Bourgogne, 2016. *Les ateliers du climat des bassins versants de la Tille, de l'Ouche et de la Vouge.* Synthèse d'échanges, 6 p.
www.alterre-bourgogne.org/arkotheque/client/alterre_bourgogne/_depot_arko/articles/1469/hyccare-ateliers-du-climat-tov_doc.pdf

HYCCARE Bourgogne, 2015. *Le changement climatique en Bourgogne et ses impacts sur la ressource en eau.* Synthèse, 2 p.
www.alterre-bourgogne.org/c/ressources/detail/2768/le-changement-climatique-en-bourgogne-et-ses-effets-sur-la-ressource-en-eau

HYCCARE Bourgogne, 2015. *Les ateliers du climat du bassin versant de l'Armançon.* Synthèse d'échanges, 32 p.
www.alterre-bourgogne.org/c/ressources/detail/2770/les-ateliers-du-climat-du-bassin-versant-de-l-armancon

Petit S., 2015. *Changer avec le climat*. Intervention à l'Assemblée générale du syndicat des irrigants de Côte d'Or, Bretenières, le 15/12/2015, diaporama, 14 p.

Petit S., Vergote M.-H., 2015. *Pratiquer l'irrigation demain. Réflexion collective à partir d'une méthode de créativité.* Rapport, 10 p. + annexes 14 p.

Petit S., Vergote M.-H., 2016. *Faire de l'eau et du climat nos proches, pour s'adapter ensemble ici et maintenant.* Restitution des ateliers du climat des bassins versants de la Tille, de l'Ouche et de la Vouge, 2 p.
www.alterre-bourgogne.org/arkotheque/client/alterre_bourgogne/_depot_arko/articles/1485/recit-atelier-climat_doc.pdf

Tissot A.-C., 2015. *L'adaptation au changement climatique : De la compréhension du climat à l'action.* Intervention à la réunion annuelle des climatologues des centres MétéoFrance d'Auvergne, de Bourgogne et de Rhône-Alpes, Bron, le 20/05/2015, diaporama, 14 p.

Tissot A.-C., 2015. *HYCCARE Bourgogne - De la connaissance du climat aux leviers d'adaptation*. Intervention devant la délégation Allier Loire amont de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne, Lempdes, le 27/05/2015, diaporama, 21 p.

Tissot A.-C., 2015. *Le projet de recherche-action HYCCARE : de la connaissance du changement climatique à l'adaptation à ses impacts sur la ressource en eau en Bourgogne.* Intervention à l'Assemblée générale d'Alterre Bourgogne, Saint-Brisson, le 04/06/2015, diaporama, 9 p.
www.alterre-bourgogne.org/c/ressources/detail/2748/climat-les-acteurs-du-climat-en-bourgogne-franche-comte-mosa-ue-de-dynamiques-et-projets-en-cours?

Tissot A.-C., 2015. *L'adaptation au changement climatique : De la compréhension du climat à l'action.* Intervention au séminaire "Changement climatique et impacts sur l'eau et les milieux aquatiques" organisé par FNE Bourgogne, Dijon, le 10/10/2015, diaporama, 17 p.

Tissot A.-C., 2016. *HYCCARE Bourgogne - De la connaissance du climat aux leviers d'adaptation*. Intervention au Comité de bassin Loire-Bretagne, Orléans, le 20/03/2016, diaporama (15 p.), vidéo (24:53 -> 45:04) et interview (3min15).

www.eau-loire-bretagne.fr/changement_climatique/retour_dexperiences

Tissot A.-C., 2016. *HYCCARE Bourgogne : Quésaco ?* Intervention au séminaire de restitution d'HYCCARE "Le changement climatique et la ressource en eau : s'adapter ensemble, ici et maintenant", Dijon, 25/03/2016, diaporama, 12 p.

Tissot A.-C., 2016. *Les ateliers du climat : pour quoi ? comment ?* Intervention au séminaire de restitution d'HYCCARE "Le changement climatique et la ressource en eau : s'adapter ensemble, ici et maintenant", Dijon, 25/03/2016, diaporama, 8 p.

Valorisation dans l'enseignement :

Vergote M.-H., 2015, Module formation initiale Ingénieur, "Gestion de crise"

Mémoires de stage :

Analyse de la sensibilité du modèle SWAT à la précision des données pédologiques sur deux bassins de Bourgogne (France) : modélisation à partir de la base Donesol.
Jérémy Bachmann. Agronomie et Environnement. AgroSup Dijon. Année 2014-2015

Méthodologie pour la cartographie et le paramétrage du modèle hydrologique GR4J sur 28 bassins versants en France pour la période 1961-2014
Vincent Bonnard. Master 1 Transport, Mobilité, Environnement, Climat. Université de Bourgogne. Année 2014-2015

France : impact d'une rupture observée dans les températures de surface sur les débits de 28 cours d'eau
Lucile Hammou. Master 1 Sciences de l'Environnement. Université de Bourgogne. Année 2014-2015

Implémentation du modèle de qualité des eaux QUAL2K sur le bassin versant de l'Arroux.
Yoann Rainat. Master 1 Sciences de l'environnement. Université de Bourgogne. Année 2014-2015

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.
Damien Abadie. Master Sciences de l'environnement. Université de Bourgogne. Année 2013-2014

Evolution du bilan hydrique à l'échelle de bassins-versants en contexte de changement climatique. Mise en place d'une méthodologie.
Olivier Legras. Spécialisation « Agronomie et Environnement ». AgroSup Dijon. Année 2013-2014

Agriculture et changement climatique : Analyse économique des stratégies possibles face aux tensions à venir sur les ressources en eau
Coulibaly Seydou. Master Analyse économique et développement international option Finances publiques dans les pays en développement et en transition. Université d'Auvergne. Année 2013-2014

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
Etienne Brulebois. Master Espace rural et environnement. AgroSup Dijon. Année 2012-2013

Les enjeux de la ressource en eau face au changement climatique en Bourgogne. Représentativité des bassins versants choisis pour les simulations
Séverine Fock. Master 1 Transport, Mobilité, Environnement, Climat. Université de Bourgogne. Année 2012-2013

Impact du changement climatique sur le bilan hydrique, comparaison des modèles STICS et SWAT
Sophie Vallon. Master 1 Sciences de l'environnement. Université de Bourgogne. Année 2012-2013

LISTE DES RÉFÉRENCES CITÉES

Abbaspour, K.C., Vejdani, M., Haghighat, S., 2007. SWAT-CUP calibration and uncertainty programs for SWAT. Presented at the Intl. Congress on Modelling and Simulation (MODSIM'07), L. Oxley and D. Kulasiri, eds. Melbourne, Australia: Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, pp. 1603-1609.

Alapaty K., Herwehe JA, Otte TL, Nolte CG, Bullock OR, Mallard MS, Kain JS, Dudhia J., 2012, Introducing subgrid-scale cloud feedbacks to radiation for regional meteorological and climate modeling. Geophys Res Lett 39: L24809. Doi:10.1029/2012GL054031

Allen RG, Jensen ME, Wright JL, Burman RD (1989) Operational estimates of reference evaporation. Agron J 81:650–662.

Arnold J.G., Srinivasan, R., Muttiah R.S. and Williams, J.R. (1998). Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development1. JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc. *34*, 73–89.

Bai, J., Perron, P., 2003. Computation and analysis of multiple structural change models. J. Appl. Econom. 18, 1–22. doi:10.1002/jae.659.

Bédoucha G., 2003, Discordances momentanées. Analyse comparative, *Techniques & Culture*, 40, URL : http://tc.revues.org/1428, consulté le 07/03/2016.

Bédoucha G., 2011, *Les liens de l'eau. En Brenne, une société autour de ses étangs*. Paris, Versailles, Editions de la Maison des sciences de l'homme, Editions Quae, 688 p.

Berdoulay V., Soubeyran O., 2014, Adaptation, science de la durabilité et pensée planificatrice, *Natures Sciences Sociétés*, vol.22, 2 : 114-123.

Berrisford, P., Dee D., Poli P., Brugge R., Fielding K., Fuentes M., Kallberg P., Kobayashi S., Uppala S. and Simmons A., (2011) The ERA-Interim archive, version 2.0. ERA report series. 1. Technical Report. ECMWF pp.23.

Billé R., 2006, Gestion intégrée des zones côtières: quatre illusions bien ancrées, *Vertigo*, vol.7, n°3, déc. 2006.

Boé J., Terray L., Habets F., Martin E. (2007) Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. Int J Climatol 27:1643–1655.

Booth B., Dunstone, N. J., Halloran, P. R., Andrews, T. & Bellouin, N. 2012, Aerosols implicated as a prime driver of twentieth-century North Atlantic climate variability Nature 484, 228–232.

Boulard D., Castel T, Camberlin P., Sergent A.-S., Bréda N., Badeau V., Rossi A., Pohl B., 2015, Capability of a regional climate model to simulate climate variables requested for water balance computation : a case study over northeastern France. Climate Dynamics, 1-28.

Boulard D., Castel T., Camberlin P., Sergent A.-S., Asse D., Bréda N., Badeau V., Rossi A., Pohl B., 2016, Bias correction of dynamically downscaled precipitation and simulation of soil water deficit constraints on tree growth over northeastern France, submitted to Agricultural & Forest Meteorology.

Boulard D., 2016, Capacité d'une chaine de modélisation hydroclimatique haute résolution à simuler des indices de déficit hydrique : application aux Douglasaies et Hêtraies de Bourgogne, Thèse de doctorat, Université de Bourgogne.

Bouleau G., Pont D., 2014, Les conditions de référence de la directive cadre européenne sur l'eau face à la dynamique des hydrosystèmes et des usages, *Natures Sciences Sociétés*, vol.22, 1 : 3-14.

Borzeix A., Charlesb J., Zimmermann B., 2015, Réinventer le travail par la participation. Actualiténouvelle d'un vieux débat, *Sociologie du travail*, 57 : 1-19.

Boutelet M.,Larceneux A., Barczak A. (Ed), 2010, *Gouvernance de l'eau, Intercommunalités et recomposition des territoires* Editions Universitaires de Dijon.

Boy D., 2015, Les représentations sociales de l'effet de serre et du réchauffement climatique, Rapport ADEME, oct.2015, 39 p.

Brulebois E., Castel T., Richard Y., Chateau-Smith C. and Amiotte-Suchet P., 2015, Hydrological response to an abrupt shift in surface air temperature over France in 1987/88, Journal of Hydrology, 531 (3), pp.892-901.

Brulebois E., Rossi A., Le Moine N., Philippe M., Castel T., Richard Y., Amiotte-Suchet P., 2014, Potentialités d'une chaîne hydroclimatique à l'échelle des bassins versants bourguignons. *XXVIIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, 3-5 juillet 2014, Dijon, France.

Castel T., Lecomte C., Richard Y., Lejeune-Hénaut I., Larmure A., 2014, Le réchauffement climatique diminue-t-il le risque de dégâts par le gel pour les cultures de climat tempéré ? AIC, 271-277.

Castel T., Xu Y., Richard Y., Cuccia C., Bois B., Thévenin D., Crétat J., Pohl B., Roucou P., 2010, Assessment of Dynamic Downscaling of the Continental East French Regional Climate at high-resolution using the ARW/WRF model, AIC, 107-112.

Cattiaux J., Vautard R., Cassou C., Yiou P., Masson-Delmotte V., et al.. 2010. Winter 2010 in Europe: A cold extreme in a warming climate. Geophysical Research Letters, American Geophysical Union, 2010, 37 (20), pp.L20704.

Chateauraynaud F., 2007, « Visionnaires à rebours. Des signaux faibles à la convergence de séries invisibles », [En ligne] http://www.gspr-ehess.com/documents/FC_Visionnaires-a-rebours-dec-2007.pdf, consulté le 28/04/2015.

Chateauraynaud F., 2012, « Des prises sur le futur Regard analytique sur l'activité visionnaire », http://www.gspr-ehess.com/documents/.../FC-Prises-sur-le-Futur-janv2012.pdf, consulté le 28/04/2015.

Chan SC, Kendon EJ, Fowler HJ, Blenkinsop S, Ferro CAT, Stephenson DB., 2013, Does increasing the spatial resolution of a regional climate model improve the simulated daily precipitation? Clim Dyn, 41:1475–1495. doi:10.1007/s00382-012-1568-9.

Chen F., Dudhia J. (2001) Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling- system. Part I: model description and implementation. Mon Weather Rev 129:569–585.

Chen J., Brissette F.-P., Chaumont D., Braun M., Finding appropriate bias correction methods in downscaling precipitation for hydrologic impact studies over North America. Water Resour Res 2013, 49:4187–4205. doi:10.1002/wcrc.20331.

Citton Y., 2013, *Pour une interprétation littéraire des controverses scientifiques*, Versailles, Editions QUAE, Collection sciences en questions.

Debizet G. & Dubois P. (2011), « S'adapter à l'adaptation ? Mobilisation des acteurs et recours à l'expertise dans l'élaboration des PCET », Actes du colloque scientifique international "Renforcer la résilience au changement climatique des villes : du diagnostic spatialisé aux mesures d'adaptation" - Metz : France (2011)
[http://www1.univ-metz.fr/recherche/labos/cegum/2R2CV/Actes/DEBIZET_DUBOIS_1.PDF]

Dee DP, Uppala SM, Simmons AJ, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, Andrae U, Balmaseda MA, Balsamo G, Bauer P, Bechtold P, Beljaars ACM, van de Berg L, Bidlot J, Bormann N, Delsol C, Dragani R, Fuentes M, Geer AJ, Haimberger L, Healy SB, Hersbach H, Holm EV, Isaksen L, Kallberg P, Kohler M, Matricardi M, McNally AP, Monge-Sanz BM, Morcrette J-J, Park B-K, Peubey C, de Rosnay P, Tavolato C, Thepaut

J-N, Vitart F (2011) The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Q J R Meteorol Soc 137:553–597. doi:10.1002/qj.828

de Laat, A.T.J., Crok, M., 2013. A Late 20th century european climate shift: fingerprint of regional brightening? Atmos. Clim. Sci. 03, 291–300. http://dx.doi.org/10.4236/acs.2013.33031.

Déqué M. and Gibelin A.L., 2002: High versus variable resolution in climate modelling. In: Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling [Ritchie, H. (ed.)]. WMO/TD No. 1105, Report No. 32, World Meteorological Organization, Geneva, pp. 74–75.

Dessolin R., 1989, *L'eau et l'industrie au Creusot*, Académie de François Bourdon, 24 p.

Dow K., O'Connor R.-E., Yarnal B., Carbone G. J., Jocoy C.L., 2007, « Why worry ? Community water system managers' perception of climate vulnerability », *Global environmental Change*, n°17, p.228-237.

Explore 2070 : Les Impacts du changement climatique sur les milieux aquatiques et la ressource en eau à l'échéance de 2070, http://www.developpement-durable.gouv.fr/Evaluation-des-strategies-d.html.

Fernandez S., 2009, Si la Garonne avait voulu... Etude de l'étiologie déployée dans la gestion de l'eau de la Garonne, en explorant l'herméneutique sociale qui a déterminé sa construction. Thèse AgroParisTech, 653 p.

François M., 2006, La pénurie d'eau en Espagne : un déficit physique ou socio-économique ?, *Géocarrefour*, vol. 81/1. [En ligne] URL : http://geocarrefour.revues.org/1730 consulté le 21 mars 2015.

Garcier R., 2010, Du bon usage de la pénurie en eau. Pollution, pénurie et réponses institutionnelles en Lorraine 1949-1971, *Geocarrefour*, vol.85, n°2, p.169-180.

Gensini V. A. and Mote T. L., 2015, Downscaled estimates of late 21st century severe weather from CCSM3. Clim Change, 129:307-321. doi:10.1007/s10584-014-1320-z.

Ghiotti S., 2006 « Les territoires de l'eau et la décentralisation. La gouvernance de bassin versant ou les limites d'une évidence. *Développement durable et territoires*, Dossier 6 : Les territoires de l'eau, [En ligne] URL :http://developpement durable.revue.org/1742. Consulté le 17/07/2015

Granjou C., Garin P., 2006, Organiser la proximité entre usagers de l'eau : le cas de la Gestion Volumétrique dans le Bassin de la Charente, *Développement Durable et Territoires*, dossier 7, [En ligne] URL : http://developpemntdurable.revues.org/2694, consulté le 7/03/2016.

Gudmundsson L, Bremnes JB, Haugen JE, Engen Skaugen T. 2012, Technical note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using quantile mapping – a comparison of methods. Hydrol Earth Syst Discuss; 9:6185–201. doi: 10.5194/hessd-9-6185-2012. doi:10.1175/JCLI-D-12-00821.1

Hagel Z., 2011, La gestion quantitative de l'eau : une question implicite entre ville, espaces agricoles et milieux aquatiques, *Géocarrefour*, [En ligne], Vol. 86/3-4 |, consulté le 04 janvier 2015. URL : http://geocarrefour.revues.org/8487

Harper, K. C., 2008. *Weather by the Numbers*. Cambridge, Massachusetts, Massachusetts Institute of Technology: 328 p.

Hawkins E, Sutton R, 2009, The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions. Bull. Amer. Meteor. Soc., 90, 1095-1107. http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2009BAMS2607.1

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.-K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. and Midgley P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.

Jacob-Rousseau N., 2005, Aspects de la pénurie hydrique et de sa gestion dans la Cévenne vivaraise au XIX^{e} siècle, *Geocarrefour*, vol.80, 4 : 297-308.

Jonsdottir A., 2013. Scaling Climate. The politics of anticipation. In Hastrup K. et Skrydstrup M. (eds), *The social life of climate change models: anticipating nature*: 128-143.

Kallis G., Kiparsky M., Milman A., Ray I., Glossing Over the Complexity of Water, *Science*, vol.314, 01/12/2006: 1387.

Kendon EJ, Roberts NM, Senior CA, Roberts MJ., 2012, Realism of rainfall in a very high-resolution regional climate model. J Climate, 25:5791–5806. doi:10.1175/JCLI-D-11-00562.1.

Klemeš, V. (1986). Dilettantism in hydrology: Transition or destiny? Water Resour. Res. *22*, 177S – 188S.

Lasserre F., 2005, *Transferts massifs d'eau, Outils de développement ou instruments de pouvoir ?*, Presses Universitaires du Québec, 576 p.

Ley 10/2001, de 5 de Julio, del Plan Hidrológico Nacional, BOE n°161, viernes

Latour B. 1999, Politiques de la nature. Comment faire entrer les sciences en démocratie. Paris : La Découverte.

Latour B., 2015. Face à Gaïa. Huit conférences sur le Nouveau Régime climatique. Paris, Les empêcheurs de penser en rond, La découverte, 398 p.

Luke T. W., 2015, The climate Change imaginary, *Current Sociology Monograph,* Vol. 63(2): 280-296.

Magnan A., 2012, *Changement climatique : tous vulnérables ?* Paris, Editions Rue d'Ulm, coll. Sciences durables.

Maraun D., Wetterhall F, Ireson AM, Chandler RE, Kendon EJ, Widmann M, Brienen S, Rust HW, Sauter T, Themeßl M, Venema VKC, Chun KP, Goodess CM, Jones RG, Onof C, Vrac M, Thiele-Eich I., 2010, Precipitation downscaling under climate change: recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. Rev Geophys 48:RG3003. doi:10.1029/2009RG000314

Marquet V., 2014, *Les voies émergentes de l'adaptation au changement climatique dans la gestion de l'eau en France et au Québec*, Thèse de doctorat, Sociologie, Université de Bordeaux Segalen, 474 p.

Marteau R., Richard Y., Pohl B., Chateau Smith C., Castel T., 2014, High-resolution rainfall variability simulated by the WRF RCM: application to eastern France. Clim Dyn 44:1093-1107

Mermet L., Treyer S., Quelle unité territoriale pour la gestion durable de la ressource en eau ? Annales des Mines, avril 2001, p.67-79.

Miller D. A., R. A White. 1998: A Conterminous United States multi-layer soil characteristics data set for regional climate and hydrology modeling. Earth Interactions, 2.[Available on-line at http://EarthInteractions.org].

Milly P. C. D., J. Betancourt, M. Falkenmark, R. M. Hirsch, Z. W. Kundzewicz, D. P. Lettenmaer and R. J. Stouffer, 2008, Stationarity is dead : Whither water management ?, Science, 319(5863), 573-574, doi :10.1126/science.1151915.

Moss R. H., J.A. Edmonds, K. A. Hibbard, M. R. Manning, S.K. Rose, D.P. van Vuuren, T. R. Carter, S. Emori, M. Kainuma, T. Kram, G. A. Meehl, J.F.B. Mitchell, N. Nakicenovic, K. Riahi, S.J. Smith, R.J. Stouffer, A.M. Thomson, J.P. Weyant, T.J. Wilbanks (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature, 463, pp.747-756.

Nash, S. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I ? A discussion of principles. J Hydrol *10*, 282–290.

Niu, G.-Y., Yang Z.-L., Mitchell K. E., Chen F., Ek M. B., Barlage M., Kumar A., Manning K., Niyogi D., Rosero E., Tewari M., and Y. Xia, 2011, The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. J. Geophys. Res., 116, D12109, doi: 10.1029/2010JD015139.

Oki T., Kanaue S., 2006, Global Hydrological Cycles and World Water Resources, *Science,* vol.313, 25/08/2006: 1068-1072.

Oleson, K.W., Niu, G.-Y., Yang, Z.-L., Lawrence, D.M., Thornton, P.E., Lawrence, P.J., Stöckli, R., Dickinson, R.E., Bonan, G.B., Levis, S., Dai, A., and Qian, T., 2008, Improvements to the Community Land Model and their impact on the hydrological cycle. J. Geophys. Res. 113:G01021. DOI:10.1029/2007JG000563.

Perrin, C. (2007). Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR).

Petit S., 2011, « Le temps de demain. Un collectif engagé autour du changement climatique et de ses impacts », *Terrains et Travaux*, n°18, p.103-120.

Petit S. 2015. Au fond de l'eau : histoires sociales et représentations environnementales d'un bassin versant agricole. *Territoire en mouvement, revue de géographie et aménagement*, 25-26, [En ligne] URL: http://tem.revues.org/2757.

Pielke, Jr., R.A., 2009. Collateral Damage from the Death of Stationarity, GEWEX Newsletter, May, pp. 5-7.

Pinton S., 2009, Les humeurs du temps. Journal d'un paysan de la Creuse, Ethnologie française, XXXIX, 4 : 587-596.

Poli P, Healy SB, Dee DP. 2010. Assimilation of Glob al Positioning System radio occultation data in the ECMWF ERA–Interim reanalysis. Q. J. R. Meteorol. Soc. 136: 1972–1990. DOI:10.1002/qj.722

Quintana-Seguí P, Le Moigne P, Durand Y, Martin E, Habets F, Baillon M, Canellas C, Franchistéguy L, Morel S (2008) Analysis of near surface atmospheric variables: validation of the SAFRAN analyses over France. Journal of Applied Meteorology and Climatology 47:92–107. doi:10.1175/2007JAMC1636.1

Quintana-Seguí P., A Ribes, E Martin, F Habets, J Boé., 2010, Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins, Journal of Hydrology 383 (1), 111-124.

Renaud-Hellier E., 2006, Gestion de l'eau et du développement urbain dans l'espace dijonnais : quels modes d'intégration territoriale ?, *Revue Géographique de l'Est*, vol.46, p.1-2, [En ligne] http://rge.revues.org/1274, consulté le 5/08/2015.

Reyes-Garcia V., Fernandez-Llamazares A., Guèze M., Garcés A., Mallo M., Vila-Gomez M., Vilaseca M., 2016, Local indicators of climate change : the potential contribution of local knowledge to climate research, *WIREs Climate Change*, 7: 109-124.

Rial J., R.A. Pielke Sr., M. Beniston, M. Claussen, J. Canadell, P. Cox, H. Held, N. de Noblet-Ducoudre, R. Prinn, J. Reynolds, and J.D. Salas, 2004, Nonlinearities, feedbacks and critical thresholds within the Earth's climate system. Climatic Change, 65, 11-38.

Richard Y., Castel T., Bois B., Cuccia C., Marteau R., Rossi A., Thévenin D., Toussaint H., 2014 : l'évolution des températures observées en Bourgogne (1961-2011), Bourgogne Nature, 19, 110-117.

Rivière-Honegger A., Bravard J-P, 2005, « La pénurie d'eau, donnée naturelle ou question sociale ? », *Géocarrefour,* vol.80, n°4, p.257-260.

Rochette J., Magnan A. & Billé R., (2010), « Gestion intégrée des zones côtières et adaptation au changement climatique en Méditerranée », pp. 99-120 *in :* Paris, L'harmattan, p. 117 in LAZZERI Y.,

MOUSTIER E., (*Dir.*), Le développement durable dans l'espace méditerranéen : enjeux et propositions, L'Harmattan, Paris.

Rossi A., Castel T., Richard Y., Amiotte-Suchet P., Brulebois E., Ubertosi M., Brayer J.-M., Doney C., Toussaint H., 2014, Impact du changement climatique sur l'évolution de la ressource en eau en Bourgogne, France (1980-2100). Analyse des paramètres hydroclimatiques simulé à haute résolution par un modèle climatique régional (WRF), AIC, 170-176.

Rudiak-Gould P., 2013, Promiscuous corroboration and climate change translation: A case study from the Marshall Islands, *Global Environmental Change*, 22: 46–54.

Rudiak-Gould P., 2013, We have seen it with our own eyes : why we disagree about climate change visibility, *Weather, climate and Society*, 5: 120-132.

Ruggieri, E., 2013. A Bayesian approach to detecting change points in climatic records. Int. J. Climatol. 33, 520–528. doi:10.1002/joc.3447

Rummukainen M., 2016, Added value in regional climate modeling, WIREs Clim Change, 7:145-159. doi:10.1002/wcc.378.

Seguin L, 2013, Faire entendre la parole des citoyens par le recours au film. Analyse d'un panel de citoyens dans la gestion de l'eau, *Participations*, vol.3, 7 : 127-149.

Simonet G., 2015, Une brève histoire de l'adaptation : l'évolution conceptuelle au fil des rapports du GIEC (1990-2014), *Natures Sciences Sociétés*, vol.23, Supp., p.52-64.

Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, Gill DO, Barker DM, Duda M, Huang XY, Wang W, Powers JG (2008) A description of the advanced research WRF version 3. NCAR technical note, NCAR/TN\u2013475?STR, 123pp.

Swim, J., Clayton S., Doherty T., Gifford R., Howard G., Reser J., Stern P., Weber E. U., 2009, Psychology and Global Climate Change: Addressing a Multifaceted Phenomenon and Set of Challenges. Report of APA Task Force on the Interface between Psychology and Global Climate Change, 108 pp., www.apa.org/science/about/publications/climate-change-booklet.pdf, consulté le 8/03/2016.

Taylor K. E., Ronald J. Stouffer, and Gerald A. Meehl, 2012: An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. Bull. Amer. Meteor. Soc., 93, 485–498.doi: http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.135:3902–3920. doi:10.1002/joc.4254.

Terray, L., Boé, J., 2013. Quantifying 21st-century France climate change and related uncertainties. Comptes Rendus Geoscience, Vol. 345, 136–149.

Teutschbein C, Seibert J. Is bias correction of regional climate model (RCM) simulations possible for non-stationary conditions? Hydrol Earth Syst Sci 2013, 17:5061–5077. doi:10.5194/hess-17-5061-2013.

Thiéry, D. (2003). Logiciel GARDENIA, version 6, Guide d'utilisation.

Tselioudis G, Douvis C, Zerefos C. Does dynamical downscaling introduce novel information in climate model simulations of precipitation change over a complex topography region? Int J Climatol 2012, 2:1572–1578. doi:10.1002/joc.2360.

Vaughan D., 1999, « Technologies à haut risques, organisations et culture : le cas Challenger », *Actes du 9e séminaire du programme Risques Collectifs et Situations de Crise,* 11 oct. 1999, Editions CNRS, MSH-Alpes.

Vergote M.-H., Petit S. (accepté, à paraître 2016). Du futur à aujourd'hui, mettre la gestion de l'eau sous tension. *Développement durable et territoires*, numéro spécial « L'adaptation en tension » (2/2).

Vieillard-Coffre, S., 2001, Gestion de l'eau et bassin versant. De l'évidente simplicité d'un découpage naturel à sa complexe mise en pratique, *Hérodote*, vol.3, 102 : 139-156.

Voldoire, A., E. Sanchez-Gomez, D. Salas y Mélia, B. Decharme, C. Cassou, S.Sénési, S. Valcke, I. Beau, A. Alias, M. Chevallier, M. Déqué, J. Deshayes, H. Douville, E. Fernandez, G. Madec, E. Maisonnave, M.-P. Moine, S. Planton, D.Saint-Martin, S. Szopa, S. Tyteca, R. Alkama, S. Belamari, A. Braun, L. Coquart, F. Chauvin, 2012, The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation, Climate Dynamics, vol. 40(9): 2091-2121, DOI:10.1007/s00382-011-1259-y.

Weber E. U., 2016, What shapes perceptions of climate change? New research since 2010 *WIREs Climate Change*, 7:125–134.

Wilby R. L. and Dessai S., 2010, Robust adaptation to climate change, Weather, vol. 65, no. 7, 180-185.

Wild, M., 2009. Global dimming and brightening: a review. J. Geophys. Res.-Atmos. 114, D00D16.

Woollings T. , Franzke C., Hodson D.L.R., Dong B., Barnes E.A., Raible C.C., Pinto J.G., 2014. Contrasting interannual and multidecadal NAO variability. Clim Dyn. DOI 10.1007/s00382-014-2237-y.

Xu Y, Castel T, Richard Y, Cuccia C, Bois B., 2012, Burgundy regional climate change and its potential impact on grapevines. Clim Dyn 39:1613–1626.

Yeston J., Coontz R., Smith J., Ash C., 2006, A Thristy World, *Science*, vol.313: 1067.

Zhang Y, Duliere V, Philip WM, Salathé EP Jr, 2009, Evaluation of WRF and HadRM mesoscale climate simulations over the U.S. Pacific Northwest. Journal of Climate. Vol. 22, 5511-5526. DOI: 10.1175/2009JCLI2875.11

LISTE DES ACRONYMES

ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AELB	Agence de l'eau Loire-Bretagne
AERMC	Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse
AESN	Agence de l'eau Seine-Normandie
AMO	Atlantic multidecadal oscillation
ARS	Agence régionale de santé
BD	Base de données
BV	Bassin versant
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières
CESAER	Centre d'économie et de sociologie appliquées à l'agriculture et aux espaces ruraux
CITERES	Cités, territoires, environnement et sociétés
CLE	Commission locale de l'eau
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
CNRM	Centre national de recherches météorologiques
COPIL	Comité de pilotage
COS	Comité d'orientation scientifique
CRC	Centre de recherches de climatologie
DCE	Directive cadre sur l'eau
DDT	Direction départemental des territoires
DREAL	Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement
EPTB	Etablissement public territorial de bassin
ETP	Evapotranspiration potentielle
FO	Fonction objectif
GEMAPI	Gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations
GES	Gaz à effet de serre
GICC	Gestion et impacts du changement climatique
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GIP	Groupement d'intérêt public
HYCCARE	Hydrologie, changement climatique, adaptation, ressource en eau
IDPR	Indice de persistance et de développement des réseaux
IGCS	Inventaire, gestion et conservation des sols
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière
INRA	Institut national de recherche agronomique
IPCC	Intergovernmental panel on climate change
MCG	Modèles de circulation générale
MCO	Moindres carrés ordinaires
MNT	Modèle numérique de terrain
MOOC	Massive open online course
NAO	North Atlantic oscillation
NOTRe	Nouvelle organisation territoriale de la République
NS	Nash et Sutcliff
ONEMA	Office national de l'eau et des milieux aquatiques
ONF	Office national des forêts
PAPI	Programme d'action de prévention des inondations
PGRE	Plan de gestion de la ressource en eau
PNR	Parc naturel régional
PTAP	Plan territorial d'actions prioritaires
QMNA5	Débit mensuel quinquennal sec
RCP	Representative concentration pathway
SAGE	Schéma d'aménagement et de gestion des eaux
SCOT	Schéma de cohérence territoriale
SDAGE	Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux
SEDS	Systèmes, environnement et dynamiques sédimentaires
SIAEPA	Syndicat d'adduction d'eau potable et d'assainissement de Semur-en-Auxois
SIAVA	Syndicat intercommunal d'aménagement de la vallée de l'Armance

SIBVB	Syndicat intercommunal du bassin versant de la Bourbince
SINETA	Syndicat intercommunal d'étude et d'aménagement de l'Arroux
SIRTAVA	Syndicat mixte pour la réalisation des travaux d'aménagement de la vallée de l'Armançon
SIVU	Syndicat intercommunal à vocation unique
SST	Split sampling test
STEP	Station d'épuration des eaux usées
SWAT	Soil and water assessment tool
TAMU	Texas agricultural and mechanical University
Tmax	Température maximale
Tmin	Température minimale
UMR	Unité mixte de recherche
UPMC	Université Pierre et Marie Curie
VNF	Voies navigables de France
WRF	Weather research & forecasting
ZRE	Zone de répartition des eaux

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma des échanges au sein des axes, entre les axes et avec les acteurs du territoire dans le cadre du projet HYCCARE 6
Figure 2 : Répartition des financements d'HYCCARE 9
Figure 3 : Évolution du calendrier des travaux d'HYCCARE 11
Figure 4 : Diagramme simplifié de la démarche de production des connaissances hydro-climatiques pour le climat du passé récent et pour 2 trajectoires de climat projetées par le modèle Arpege-Climat (CNRM-CM5.1 expérience r1i1p1 – http://www.cnrm-game-meteo.fr/cm) 14
Figure 5 : Carte des 13 stations hydrométriques retenues dans le cadre d'HYCCARE et des bassins versants associés 16
Figure 6 : Carte présentant les bassins versants selon la typologie du BRGM (5 grands types de fonctionnement hydrologique identifiés) 20
Figure 7 : Performance de GR4J (critère NS) en fonction de la valeurs du paramètre X3 de GR4J, calibrée lors des multi-calibrations 23
Figure 8 : Débits journaliers (à gauche) et mensuels (à droite) de l'Armançon à Brienon-sur-Armançon, observés (noir) et simulé (bleu). a) par GARDENIA, b) par GR4J, c) par SWAT. 24
Figure 9 : Carte des trois bassins versants en SAGE étudiés dans le cadre d'HYCCARE 26
Figure 10 : Carte des cinq bassins versants complémentaires étudiés dans le cadre d'HYCCARE 28
Figure 11 : Carte des territoires étudiés dans le cadre du projet HYCCARE 34
Figure 12 : Évolution des températures moyennes annuelles (a) et des cumuls annuels de précipitations (b) sur la Bourgogne pour la période 1961-2011 41
Figure 13 : Cartes des différences (période 1988-2011 moins période 1961-1988) des températures moyennes annuelles (a) et des cumuls annuels moyens (b) pour les stations de la région Bourgogne élargie 41
Figure 14 : Différence de débit annuel entre les périodes 1969-1987 et 1988-2009 sur les 9 bassins versants étudiés (différence en % [1988-2009] - [1969-1987]) 43
Figure 15 : Différences entre les moyennes mensuelles interannuelles de la période 1969-1987 et 1988-2009 sur vingt chroniques de débits en Bourgogne (différence en % [1988-2009] - [1969-1987]) 43
Figure 16 : Températures (Tmax et Tmin) (a) et précipitations (b) annuelles observées et simulées (ERA/WRF) 44
Figure 17 : Régime moyen de précipitations (1980-2011) 45
Figure 18 : Cartes des températures moyennes annuelles (a) et des précipitations moyennes journalières non-corrigées (b) et corrigées (c) 45
Figure 19 : Différences entre les moyennes mensuelles interannuelles de débits simulés et observés (en %) de la période 1980-1987 et 1988-1995 sur 8 bassins versants 46
Figure 20 : Différence entre les deux sous-périodes du nombre de jours moyens par an où l'eau percole à la base du profil de sol sur les trois bassins versants étudiés 49
Figure 21 : Différence entre les deux sous-périodes du nombre de jours moyens par an où la réserve utile est remplie à moins de 50% (stress hydrique) sur les trois bassins versants étudiés 49
Figure 22: Régimes moyens d'évapotranspiration potentielle (a) et de précipitations (b) simulés par ERA-WRF (1980-2011) et Arpege-WRF (1980-2005) 51
Figure 23 : a) trajectoire de la température moyenne annuelle simulé en continu par WRF forcé par Arpege-WRF sur la période 2006-2098; b) Évolution de l'ETP sur la même période 52
Figure 24 : a) Cycle annuel des Tmin et Tmax et b) de l'ETP pour chacun des climats inter-rupture projetées sur le 21ème siècle selon la trajectoire RCP8.5 régionalisée par WRF 53
Figure 25 : Cartes des anomalies des cumuls journaliers des pluies corrigées à l'échelle de la Bourgogne et pour chacun des climats inter-rupture 54
Figure 26 : a) Cycle annuel moyen corrigé pour chaque climat inter-rupture et b) cycles annuels moyens des pluies stratiformes et convectives calculés sur l'ensemble de la période 2006-2098 54
Figure 27 : a) Cycle annuel moyen des pluies non-corrigées et corrigées simulées par Arpege (CNRM-CM5.1) sur la Bourgogne pour la période historique (1980-2005) et projeté (2006-2098) 55

Figure 28 : Le bassin versant de la Tille dans l'environnement dijonnais 58
Figure 29 : Le bassin versant de l'Arroux-Bourbince Figure 30 : Le bassin versant de l'Armançon 60
Figure 31 : La co-construction des ateliers du climat..... 80
Figure 32 : Principales étapes suivies lors des ateliers de design territorial..... 82

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Récapitulatif des principaux travaux constitutifs du projet HYCCARE 4
Tableau 2 : Récapitulatif des personnels impliqués dans les travaux de recherche d'HYCCARE 5
Tableau 3 : Récapitulatif des principaux temps d'échanges au cours du projet HYCCARE 7
Tableau 4 : Financements d'HYCCARE et leur répartition entre partenaires 10
Tableau 5 : Superficie des 13 bassins versants sélectionnés dans le cadre d'HYCCARE et leur distribution relative sur chacun des 3 bassins hydrographiques 17
Tableau 6 : Superficie relative des grands types d'occupation du sol (Corine Land Cover 2012, niveau 1 ; MEDDE/CGDD/SOeS, 2015) sur chacun des 13 bassins versants sélectionnés et sur l'ensemble du territoire bourguignon 17
Tableau 7 : Superficie relative des grands ensembles géologiques sur chacun des 13 bassins versants sélectionnés dans le cadre d'HYCCARE et sur le territoire bourguignon 18
Tableau 8 : superficie relative des grandes catégories d'occupation du sol sur les 3 bassins versants sélectionnés pour la modélisation SWAT (d'après la BD Corine land Cover 2012 ; MEDDE/CGDD/SOeS, 2015) 19
Tableau 9 : Performance des modèles hydrologiques (Critère de Nash-Sutcliff) sur la période entière d'observation (1980-2011), alimentés par la désagrégation dynamique de ERA-INTERIM et les précipitations observées interpolées 25
Tableau 10 : Entretiens réalisés dans le projet HYCCARE pour l'axe 2 par François Bertrand, Delphine De Fornel, Marion Poncet, Sandrine Petit, Marie-Hélène Vergote, Hélène Toussaint. 29
Tableau 11 : Caractéristiques des bassins versants de la Tille, de l'Arroux, et de l'Armançon et déclinaison des SAGE sur ces territoires 30
Tableau 12 : Caractéristiques des cinq bassins versants complémentaires et des démarches de gestion de l'eau en cours sur ces territoires 32
Tableau 13 : Travaux réalisés sur les treize bassins versants sélectionnées dans le cadre du projet HYCCARE ... 35
Tableau 14 : Classement des observations du changement climatiques exprimées par les participants aux ateliers du design de l'Armançon 37
Tableau 15: Amplitude du réchauffement annuel et saisonnier pour les Tmin et les Tmax sur la Bourgogne (table de gauche) et évolution des précipitations avant et après rupture de 1987/88 (table de droite) 41
Tableau 16 : Paramètres climatiques et indicateurs hydriques sur les deux périodes 47
Tableau 17 : Résultats d'estimation de modèles économétriques du prix des terres agricoles en Côte-d'Or 50

LISTE DES ANNEXES

Annexes 1/2 :

- A. Figures supplémentaires
- B. Le changement climatique en Bourgogne et ses impacts sur la ressource en eau - Synthèse
- C. Les ateliers du climat du bassin versant de l'Armançon - Compte-rendu
- D. Les ateliers du climat des bassins versants de la Tille, de l'Ouche et de la Vouge - Compte-rendu
- E. Rapport ERACLES

Annexes 2/2 :

- F. Rapport du BRGM

RÉSUMÉ

HYCCARE (HYdrologie, Changement Climatique, Adaptation, Ressource en Eau) Bourgogne est un projet de recherche-action partenarial et pluridisciplinaire qui vise à mettre à disposition des décideurs locaux des outils leur permettant de mieux prendre en compte le changement climatique dans la gestion de l'eau. Pour atteindre cet objectif opérationnel, le projet a été construit autour de deux axes : l'élaboration de connaissances sur le changement climatique et ses impacts sur la ressource en eau (débits des cours d'eau, réserve en eau des sols) à une échelle fine et en continu ; l'analyse des perceptions et de l'intégration du changement climatique dans la gestion actuelle de l'eau sur plusieurs bassins versants bourguignons.

Le projet a été mené sur trois ans et demi (octobre 2012 à avril 2016) grâce au soutien du ministère de l'Environnement via le programme Gestion et impacts du changement climatique, des agences de l'eau Loire-Bretagne, Seine-Normandie et Rhône Méditerranée Corse, ainsi que de l'ADEME Bourgogne. Il a impliqué sept organismes de recherche : l'Université de Bourgogne, le CNRS, l'INRA, AgroSup Dijon, le BRGM, l'Université François Rabelais de Tours et l'Université Pierre et Marie Curie de Paris. Alterre Bourgogne, agence régionale pour l'environnement et le développement soutenable, en a assuré la coordination du fait de son rôle reconnu de plate-forme d'échanges entre chercheurs, institutionnels et acteurs locaux. Une attention particulière a été donnée à ces derniers afin de recueillir leurs avis et besoins tout au long du projet, de leur restituer régulièrement les résultats, voire de co-construire certains travaux (indicateurs, ateliers…).

Les travaux d'HYCCARE montrent que le changement climatique est déjà en cours en Bourgogne, avec une hausse de 1°C des températures moyennes annuelles depuis les décennies 1960-1970. Ce réchauffement fait suite à une rupture climatique observée en 1987-1988. Le cumul annuel moyen des précipitations est resté constant, alors que les débits observés ont globalement diminué en lien avec l'augmentation de l'évapotranspiration. Les simulations du bilan hydrique suggèrent une baisse du nombre de jours de percolation et une augmentation du nombre de jours de stress hydrique avec des disparités territoriales nettes. Les projections climatiques à l'horizon 2098 simulent, comme pour l'observation, une accélération du réchauffement climatique par paliers successifs. Cette hausse supplémentaire des températures devrait, sous l'hypothèse de précipitations constantes et toutes choses égales par ailleurs, conduire à une diminution des débits des cours d'eau avec une mise en tension sur les territoires. Un des enseignements d'HYCCARE est que, selon ce scénario, l'adaptation doit être pensée en continu.

Ce changement climatique est perçu dans les territoires qui ont été étudiés, mais n'est pas pris en compte dans la gestion "courante" de l'eau. Si le déficit est parfois présent, il est peu visible : la question de la pénurie d'eau n'est pas vraiment posée. Pourtant, des épisodes de sécheresse ont marqué les esprits et donnent prise sur le futur. Les impacts du changement climatique et de la moindre disponibilité de l'eau se concrétisent de plus en plus dans les territoires (ex : difficultés d'abreuvement des troupeaux, l'arrivée en limite de capacité des réseaux pour éteindre les incendies estivaux, modification du prix du foncier agricole...). Ils invitent à une réelle réflexion prospective collective sur les moyens d'adaptation.

Le projet montre finalement qu'une connaissance incertaine sur l'évolution de la ressource en eau n'est pas un frein à l'action. Les ateliers du climat, qui se sont appuyés sur la méthode de design territorial et sur une co-construction avec les acteurs du territoire, sont un des leviers qui permettent de penser l'action et d'imaginer les futurs possibles malgré les incertitudes, lorsque ces dernières sont clairement explicitées.

ABSTRACT

HYCCARE Burgundy (HYdrology, Climate Change, Adaptation, "*Ressource en Eau*" (Water Resources)) is a multidisciplinary research and action project carried out in partnership with other bodies to provide local decision makers with systems to improve water management under the impact of climate change. To achieve this operational objective the project was designed around two approaches. First, building up knowledge about climate change and its effects on water resources such as water-course flows and groundwater reserves at a fine level of detail and as a continuous process. Secondly, analysing perceptions and incorporating climate change into the current water management policy for several of the Burgundy catchment areas.

The project spanned three and a half years from October 2012 to April 2016 and was funded by the Ministry of the Environment's Climate Change Impact Management Programme, ADEME Burgundy and the water authorities of Loire - Brittany, Seine – Normandy and Rhône – Mediterranean – Corsica. Seven research bodies were involved: the University of Burgundy, CNRS, INRA, AgroSup Dijon, BRGM, University François Rabelais de Tours and University Pierre and Marie Curie of Paris. Alterre Bourgogne, the regional agency for the environment and sustainable development, coordinated the project due to its recognised role as an information exchange between researchers, institutes and local bodies. Particular attention was paid to local stakeholders to obtain their feedback and requirements throughout the project, regularly provide them with results and sometimes jointly perform various activities such as defining indicators or holding workshops.

The work carried out by HYCCARE shows that climate change is already underway in Burgundy with a rise in average temperatures of 1 °C since the 1960s and 1970s. This warming follows a climatic shift observed in 1987 – 88. Total average annual rainfall has remained constant but water flows have globally diminished as evaporative transpiration has increased. Water balance simulations suggest a reduction in the number of percolation days and an increase in the number of days of water stress with distinct regional differences. In line with observations, climate forecasts out to the year 2098 simulate an acceleration in global warming through successive stages. Assuming precipitation levels remain constant and all other things being equal, this additional increase in temperatures will lead to a drop in water course flows and increased pressure on water resources in the region. One of the findings of HYCCARE is that in this scenario, an ongoing process of continuous adaptation must be implemented.

There is awareness of climate change in the regions which were studied but it has not yet been taken into account in current water management policy. While there may be water shortages from time to time people are not highly aware of it. The question of how to deal with a permanent lack of water has not really been asked. Nevertheless, occurrences of drought have made a psychological impression and presage the future. The impact of climate change and decreased water availability is being felt more and more in the region, such as difficulties in watering livestock, water system capacity limits for putting out summer-time fires, changes to agricultural land prices and so forth. This is leading to a definite collective review on how to adapt to these changes.

Finally, the project shows that uncertainty as to how water resources will change in future does not mean action cannot be taken now. The climate change workshops which are based on a methodology of regional design and cooperation with those affected directly at local level, are one of the ways to think about what to do and imagine possible futures, despite the uncertainties, when these uncertainties are clearly stated.

SYNTHÈSE

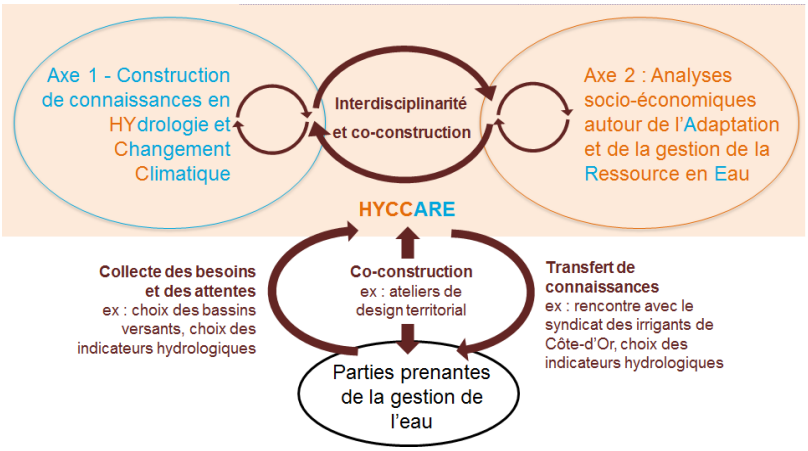
HYCCARE : HYdrologie, Changement Climatique, Adaptation, Ressource en Eau

HYCCARE Bourgogne est un projet de recherche-action partenarial et pluridisciplinaire qui vise à mettre à disposition des décideurs locaux des outils leur permettant de mieux prendre en compte le changement climatique dans la gestion de l'eau. Pour atteindre cet objectif opérationnel, le projet a été construit autour de deux axes : l'élaboration de connaissances sur le changement climatique et ses impacts sur la ressource en eau (débits des cours d'eau, réserve en eau des sols) à une échelle fine et en continu ; l'analyse des perceptions et de l'intégration du changement climatique dans les dispositifs actuels de gestion de l'eau sur plusieurs bassins versants bourguignons.

Un projet de recherche-action partenarial et pluridisciplinaire

Le projet de trois ans et demi (octobre 2012 à avril 2016) a été mené grâce au soutien du ministère de l'Environnement via le programme Gestion et impacts du changement climatique, des agences de l'eau Loire-Bretagne, Seine-Normandie et Rhône Méditerranée Corse, ainsi que de l'ADEME Bourgogne. Il a impliqué sept organismes de recherche : l'Université de Bourgogne, le CNRS, l'INRA, AgroSup Dijon, le BRGM, l'Université François Rabelais de Tours et l'Université Pierre et Marie Curie de Paris. Alterre Bourgogne, agence régionale pour l'environnement et le développement soutenable, en a assuré la coordination du fait de son rôle reconnu de plate-forme d'échanges entre chercheurs, institutionnels et acteurs locaux. Une attention particulière a été donnée à ces derniers afin de recueillir leurs avis et besoins tout au long du projet, de leur restituer régulièrement les résultats et parfois de co-construire certains travaux (cf. Figure 1).

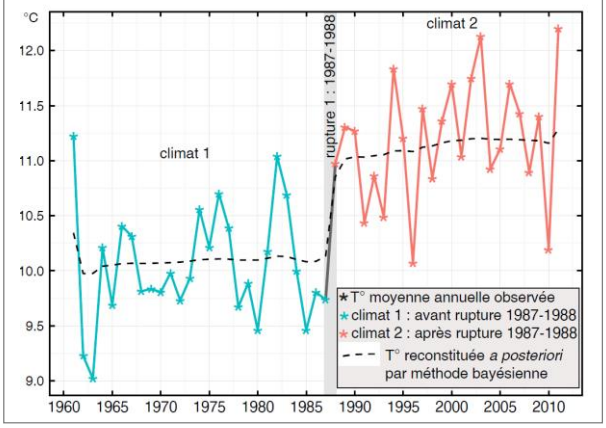
Figure 1 : Interactions entre les équipes de recherche et avec les acteurs du territoire au cours du projet



L'analyse de l'observé : un climat plus chaud depuis 1988, peu d'évolution des pluies et moins d'eau disponible dans les territoires

En Bourgogne, comme partout en France, la température annuelle moyenne a augmenté d'au moins 1°C entre les années 1960-1970 et aujourd'hui. Ce réchauffement ne s'est pas opéré progressivement : il y a eu une rupture climatique en 1987-1988 et une hausse brutale des températures, marquant le passage à un climat plus chaud (cf. Figure 2). Les quantités précipitées sont, elles, restées en moyenne annuelle inchangées depuis les décennies 1960-1970.

Figure 2 : Évolution des températures moyennes annuelles en Bourgogne de 1961 à 2014 (Richard et Castel 2012, Castel et al. 2014, Brulebois et al. in prep)



Les débits moyens des cours d'eau bourguignons sont presque partout en baisse par rapport à ceux mesurés avant la rupture de 1987-1988, et ce de janvier à septembre (cf. Figure 3). L'étiage est plus précoce et plus marqué. Seul l'automne connaît des débits inchangés. Plus finement, au niveau des sols, on observe une baisse du nombre de jours de percolation (au cours desquels s'effectue la recharge des nappes souterraines) et une augmentation du nombre de jours de stress hydrique pour la végétation, avec des disparités territoriales notables. Cette baisse de la ressource en eau, malgré des pluies inchangées, s'explique par l'augmentation de l'évapotranspiration stimulée par la hausse des températures (cf. Figure 4).

Figure 3 : Taux d'évolution des débits en Bourgogne après la rupture climatique (Brulebois et al. in prep)
Q : différence relative des débits moyens avant et après 1988. Un taux négatif signifie une baisse entre les deux périodes concernées.
AN : valeur annuelle ; J, F, M, A, M, J, J, A, S, O, N, D : valeurs mensuelles correspondant à la moyenne mobile sur trois mois.

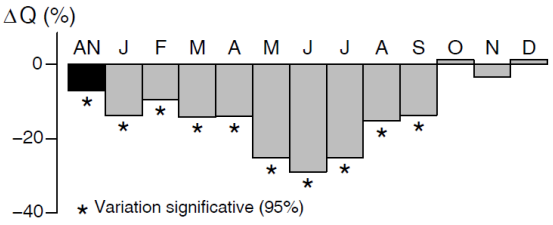
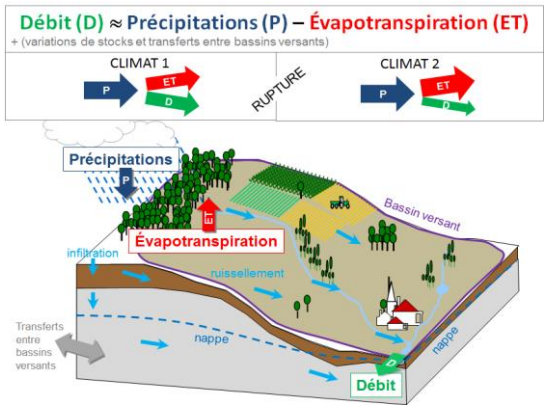


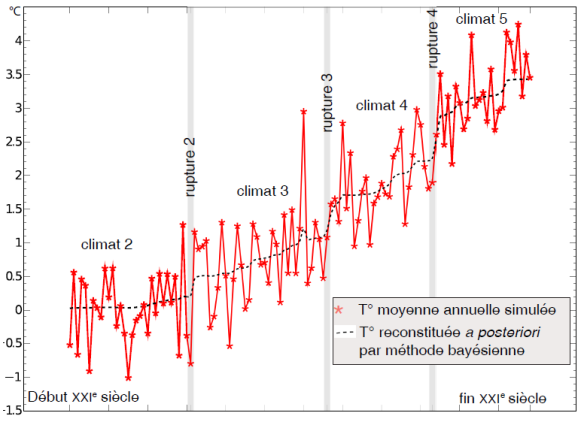
Figure 4 : Schéma simplifié du cycle de l'eau à l'échelle d'un bassin versant (d'après Ubertosi)



Les simulations : vers une accélération du changement climatique avec des températures qui continuent à augmenter par paliers successifs, entraînant une diminution des débits des cours d'eau encore plus forte ?

Le réchauffement se poursuivra par paliers, mais son ampleur, surtout à partir de la seconde moitié du XXIe siècle, dépendra des quantités émises de gaz à effet de serre. Le nombre de paliers et les dates de rupture varient selon les simulations. Cette incertitude ne peut être levée, car elle est inhérente au système climatique. Mais la présence de paliers séparés par des ruptures est systématique : c'est une certitude. Les ruptures seraient de plus en plus rapprochées et, au sein d'un même palier, la température moyenne augmenterait encore (cf. Figure 5). Concernant les précipitations, il s'est avéré que le modèle a tendance à les surestimer et que ce biais n'est pas constant. C'est pourquoi il ne reproduit pas correctement le cycle annuel des pluies et les résultats ne peuvent être utilisés pour alimenter les modèles hydrologiques.

Figure 5 : Évolution possible des températures moyennes annuelles en Bourgogne au XXIe siècle, par rapport à la période 1980-2006
Les températures sont simulées par le modèle régional selon la trajectoire RCP 8.5 de 2006 à 2100 produite par le modèle climatique global Arpege-Climat du CNRM.



Malgré ces difficultés de simulation des pluies et des débits, il est possible d'avancer l'hypothèse d'une baisse des débits du fait de l'augmentation des températures. Cette assomption est conforme aux enseignements du passé et aux résultats d'autres projets de recherche.

Le changement climatique s'incarne localement

Ce changement climatique est perçu dans les territoires qui ont été étudiés, directement ou indirectement (évolution de la faune et de la flore, de l'habitat, des risques, etc.). Certains « observateurs » (agriculteurs, pêcheurs, etc.) gardent des traces datées et quantifiées de ces changements. Le changement climatique n'est donc pas une réalité lointaine, future et globale. Il s'incarne localement comme un changement en cours avec des effets visibles aujourd'hui. La construction d'une connaissance partagée entre chercheurs et observateurs de terrain permet d'initier un débat sur les impacts du changement climatique à une échelle locale et sur les actions d'adaptation.

Les situations de pénurie actuelles comme prises sur le futur

Si le changement climatique est une réalité locale, il est toutefois peu pris en compte dans la gestion "courante" de l'eau. Dans les bassins versants étudiés, lorsque le déficit en eau est présent, il est peu visible : la question de la pénurie d'eau n'est pas vraiment posée. Pourtant, les impacts du changement climatique et de la moindre disponibilité de l'eau sont concrets (ex : difficultés d'abreuvement des troupeaux, arrivée en limite de capacité des réseaux pour éteindre les incendies estivaux, modification du prix du foncier agricole, etc.). Si des épisodes de sécheresse ont marqué les esprits et donnent prise sur le futur, la pénurie n'est pas formulée comme problème durable, du fait du caractère transitoire du déficit et de son traitement technique par des échanges avec les territoires voisins où l'eau est disponible. Le changement climatique interroge sans précédent la question de la pénurie mais ce sujet semble manquer d'arènes pour être traité.

Les vertus de l'incertitude et de la co-construction dans la recherche-action

L'implication des acteurs locaux était prévue dès le départ du projet, afin de prendre en compte leur expertise locale et de leur transmettre les résultats efficacement. Mais le projet a finalement été plus loin : à plusieurs reprises les acteurs ont été co-décideurs, en particulier lors des ateliers de design territorial et lors de la réflexion sur les indicateurs hydrologiques à calculer. Les travaux de recherche en ont été enrichis mais aussi infléchis. Si le projet n'a pas pu proposer de simulations complètes et robustes sur l'évolution des pluies et des débits, les ateliers de design territorial ont montré qu'il était tout de même possible d'imaginer les futurs possibles et de se mettre en action lorsque les incertitudes sont clairement explicitées.

Liste des principales valorisations réalisées et disponibles pour les acteurs :

- *Le changement climatique en Bourgogne et ses impacts sur la ressource en eau.* Synthèse, 2015, 2p.
- *Les ateliers du climat du bassin versant de l'Armançon.* Synthèse d'échanges, 2015, 32p.
- *Les ateliers du climat des bassins versants de la Tille, de l'Ouche et de la Vouge.* Synthèse d'échanges, 2016, 6p.
- *Faire de l'eau et du climat nos proches, pour s'adapter ensemble ici et maintenant.* Restitution des ateliers du climat des bassins versants de la Tille, de l'Ouche et de la Vouge par Sandrine Petit et Marie-Hélène Vergote, 2016, 2p.
- *HYCCARE Bourgogne - De la connaissance du climat aux leviers d'adaptation*. Intervention au Comité de bassin Loire-Bretagne, Orléans, le 20/03/2016 : diaporama (15p.), vidéo (24:53 -> 45:04) et interview (3min15).
- *Le changement climatique et la ressource en eau : s'adapter ensemble, ici et maintenant*. Séminaire de restitution d'HYCCARE, Dijon, le 25/03/2016 : diaporamas, interviews (à paraître) et actes (à paraître).

Ces documents sont disponibles sur la page du projet HYCCARE sur le site d'Alterre Bourgogne : www.alterre-bourgogne.org/r/127/projet-de-recherche-hyccare

SUMMARY

HYCCARE: HYdrology, Climate Change, Adaptation, *Ressource en Eau* (Water Resources)
HYCCARE Burgundy is a multidisciplinary partnership research and action project to provide local decision makers with systems to improve water management under the impact of climate change. To achieve this operational objective the project was designed around two approaches. First, building up knowledge about climate change and its effects on water resources such as water-course flows and groundwater reserves at a fine level of detail and as an ongoing continuous process. Secondly, analysing perceptions and incorporating climate change into the current water management policy for several of the catchment areas serving Burgundy.

A multidisciplinary partnership research and action project
The project spanned three and half years from October 2012 to April 2016 and was funded by thanks to support from the Ministry of the Environment's Climate Change Impact Management Programme, ADEME Burgundy and the water authorities of Loire - Brittany, Seine – Normandy and Rhône – Mediterranean – Corsica. Seven research bodies were involved: University of Burgundy, CNRS, INRA, AgroSup Dijon, BRGM, University François Rabelais de Tours and University Pierre and Marie Curie of Paris. Alterre Burgundy, the regional agency for the environment and sustainable development, coordinated the project due to its recognised function as an information exchange between researchers, institutes and local bodies. Particular attention was paid to those involved locally to obtain their feedback and requirements throughout the project, regularly provide them with results and sometimes perform joint activities.

Analysis of Observations: a warmer climate since 1988, little change in rainfall and less water available in the region
In Burgundy like everywhere in France the mean annual temperature has increased by at least 1°C since the 1960s and 70s. This increase has not occurred gradually. There was a climatic shift in 1987 – 88 with a sharp increase in temperatures, marking the transition to a warmer climate. However average annual precipitation levels have remained unchanged since the 60s and 70s. Water course mean flow rates in Burgundy are down practically everywhere between January and September from what used to be seen before the 1987-88 shift. Low water levels come earlier and are more marked. Flowrates have only stayed the same in Autumn. In terms of groundwater, a reduction in the number of percolation days has been observed when the underground water table is replenished and the number of plant-life water stress days has increased, with distinct regional differences. This reduction in water resources despite unchanged rainfall levels is due to increased evapotranspiration caused by higher temperatures.

Simulations: accelerating climate change with temperatures which will continue to increase through successive stages, causing an even greater drop in water-course flowrates?
Global warming will continue by stages but the degree of increase, particularly in the second half of the 21st century will depend on the amount of GHGs emitted. The number of stages and dates of each step-up vary depending on the simulation. The uncertainty cannot be removed because it is inherent to the climatic system. But one thing is certain: the presence of stages separated by distinct upward transitions is systematic. The transitions will be more and more closely spaced and the mean temperature within each stage will increase further. In terms of rainfall, it has been proven that the model tends to overestimate precipitation levels and that this bias is not constant. For this reason it does not correctly reproduce the annual rainfall cycle and the results cannot be used to feed data into the hydrological models. Despite these difficulties in simulating rain and flowrates, it is possible to put forward the hypothesis that flowrates will drop due to increased temperatures. This assumption follows on from what has happened in the past and the results of other research projects.

Climate change takes root locally

There is direct or indirect awareness of this change to the climate in the regions which were studied, such as changes in flora and fauna, habitat, risks and so on. Some observers such as farmers and fishermen, keep quantitative, dated records of these changes. Therefore climate change is not some far-off, future global reality. It is happening locally as a change underway now with effects than can be seen today. Building up a shared knowledge base between researchers and local observers in the field would enable a debate to be started on the impact of climate change at a local level and on how to respond.

Current water shortages as a harbinger of what is to come

While climate change is a local reality it is not taken into account in current water management policies. In the catchment areas studied, when there is a water deficit people are not particularly aware of it. The question of how to deal with permanent water shortages has not really been asked. However the impact of climate change and decreased water availability is a definite reality, creating difficulties such as with watering livestock, water system capacity limits for putting out summer-time fires, changes to agricultural land prices and so forth. While occurrences of drought have made a psychological impression and foreshadow the future, shortages are not seen as a long term problem due to the transient nature of the problems and technical solutions such as bringing in water from adjoining regions where water is available. Climate change is raising the question of a lack of water like never before but there do not seem to be any forums for addressing it.

The benefits of uncertainty and collaboration in research - action

The involvement of local people was planned at the start of the project to incorporate their local expertise and distribute the results in an effective way. But in the end the project went further than that. On several occasions local people were joint decision makers, particularly during the regional design workshops and the review on hydrological indicators. The quality of the research was improved but it also shifted focus due to this. While the project was not able to design complete and robust simulations on future rainfall and water flow changes, the regional design workshops showed that it was still possible to imagine possible future scenarios and take action when the uncertainties were clearly stated.

List of main outcomes produced and available

- *Climate change in Burgundy and its impact on water resources.* Summary, 2015, 2p.
- *Climate workshops on the Armançon catchment area.* Summary of discussions, 2015, 32p.
- *Climate workshops on the Tille, Ouche and Vouge catchment areas.* Summary of discussions, 2016, 6p.
- *Make water and the climate our friends to adapt together here and now.* Presentation on climate change workshops for the Tille, Ouche and Vouge catchment areas by Sandrine Petit and Marie-Hélène Vergote, 2016, 2p.
- *HYCCARE Burgundy – From knowledge of the climate to levers for adapting.* Address by the committee for the Loire-Bretagne catchment area, Orléans, 20/03/2016: slide presentation (15p.), video (24:53 -> 45:04) and interview (3min15).
- *Climate change and water resources: adapting together, here and now.* HYCCARE results seminar, Dijon, 25/03/2016: slides, interviews (forthcoming) and actions (forthcoming).

These documents can be downloaded from the HYCCARE Project page on the Alterre Bourgogne website.
www.alterre-bourgogne.org/r/127/projet-de-recherche-hyccare