HAL open science

Étude SOCLIM : Savoirs climatiques et gestion de l'eau en Rhin-Meuse Le cas du Massif des Vosges

Sophie Liziard, Sara Fernandez, Gilles Drogue, Clément Bernard

To cite this version:

Sophie Liziard, Sara Fernandez, Gilles Drogue, Clément Bernard. Étude SOCLIM : Savoirs climatiques et gestion de l'eau en Rhin-Meuse Le cas du Massif des Vosges. [Rapport de recherche] UMR GESTE - Gestion Territoriale de l'Eau et de l'environnement; Engees; INRAE; LOTERR. 2020. hal-02998708

HAL Id: hal-02998708

https://hal.science/hal-02998708v1

Submitted on 10 Nov 2020

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

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

ÉTUDE SOCLIM

Savoirs climatiques et gestion de l'eau en Rhin-Meuse
Le cas du Massif des Vosges

Rapport final
Février 2020

Sophie LIZIARD, Sara FERNANDEZ, Gilles DROGUE

avec la contribution de Clément BERNARD[1]

Étude financée par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse

[1] Sophie Liziard et Sara Fernandez ont conjointement réalisé l'analyse qualitative et rédigé ce rapport, excepté la partie 4.1. Gilles Drogue a réalisé la synthèse des connaissances sur la circulation de l'eau dans le massif des Vosges et rédigé la partie 4.1. Clément Bernard, stagiaire à GESTE, a participé à l'étude des politiques nationales d'atténuation et d'adaptation, et des effets de la loi NOTRe dans la gestion des services d'eau des communes enquêtées.

Résumé

La problématique du changement climatique s'est d'abord construite, scientifiquement et politiquement, à l'échelle globale. Depuis les années 2000 et surtout 2010, on observe un renforcement de la place de l'adaptation associée à une demande de prévision des changements climatiques au niveau régional et à la promotion d'une science davantage dédiée à des utilisateurs locaux. La territorialisation du changement climatique s'incarne, en particulier en France, dans la production de politiques d'atténuation et d'adaptation au niveau national, qui sont ensuite déclinées localement. Les efforts de « climatisation » des politiques de l'eau concernent aujourd'hui en particulier la planification décidée par les comités de bassin (SDAGE) et mise en œuvre par les Agences de l'eau (programmes d'intervention). Dans ces processus, l'action publique accorde une place importante au développement de connaissances et à la maîtrise des incertitudes, tous deux considérés comme des conditions nécessaires à la conception et mise en œuvre des politiques d'adaptation localement. Aujourd'hui, en Rhin-Meuse, plusieurs résultats d'études sont disponibles. Ils fournissent des ordres de grandeur des impacts et de l'évolution future des risques d'inondation et d'étiage. Quel rôle conférer alors à ces savoirs ? Quels usages en sont faits ? Plus largement, comment l'action publique locale conçoit les relations entre changement climatique et gestion de l'eau ?

L'étude SOCLIM réalisée par l'UMR GESTE, avec la contribution du LOTERR et financée par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse (2018-2020) traite de ces questions. L'analyse est menée à l'échelle du district Rhin-Meuse et de communes ou intercommunalités du massif des Vosges. Le sud du massif connait en effet des problèmes récurrents de sécheresses qui impactent l'approvisionnement en eau brute pour la production d'eau potable. Il fait aussi face à une baisse de la durée moyenne d'enneigement ces dernières décennies. L'enquête s'est fondée sur une analyse des documents d'action publique à différentes échelles, et sur 35 entretiens semi-directifs auprès d'acteurs qui produisent des études ou les commanditent, auprès d'acteurs impliqués dans les politiques de l'eau et la gestion des services d'eau ou de stations de ski.

L'analyse des pratiques de production de données et de modélisation sur le climat et l'hydrologie montre qu'elles sont à la croisée d'enjeux scientifiques et politiques. La question des incertitudes est certes inhérente à ces pratiques, mais elle a aussi acquis une importance nouvelle avec l'évaluation du changement climatique et de ses effets. Certaines incertitudes sont actuellement très investies (l'état initial du système, la descente d'échelle, la représentation de la pluie et des extrêmes hydrologiques). D'autres en revanche sont émergentes (usages de l'eau, végétation et usages des sols). Si les résultats s'avèrent très dépendants des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre choisis, la considération d'une pluralité de scénarios, et donc d'une gamme de futurs possibles contrastée, n'est pourtant pas une pratique largement répandue. Par ailleurs, si les modélisations permettent de dire que cela va évoluer et dans quel sens, ils ne peuvent pas non plus, à eux seuls, définir le sens politique des problèmes étant donnée la complexité des interactions entre dimensions humaines, sociales et naturelles qui contribuent à façonner l'avenir, et l'importance des antagonismes en jeu.

L'analyse menée dans le massif des Vosges montre qu'il y a bien des signaux à la fois perçus, expérimentés et objectivés d'un changement du climat localement. Elle montre aussi qu'on a essentiellement affaire à une adaptation « par ajustement technique », qui vise à sécuriser ou à augmenter la disponibilité en eau ou en neige. Les solutions techniques portent une promesse, celle de pouvoir faire l'économie de négociations complexes et politiquement risquées pour penser, mettre en œuvre ou accompagner la sobriété et les transitions, rediscuter voire interdire certains usages de l'eau, identifier les perdants et concevoir des compensations. Ces solutions techniques peuvent générer de nouvelles impasses, parce que les effets du changement climatique sur les températures et la pluviométrie s'intensifient, ou encore parce qu'une nouvelle offre en eau ou en neige stimule le plus souvent de nouveaux usages. Mais ces questions n'ont pas pu être traitées jusqu'à aujourd'hui dans les initiatives de climatisation des politiques locales d'aménagement des territoires. Pour enrôler les acteurs locaux et susciter l'adhésion en faveur d'une gouvernance territorialisée de l'adaptation au changement climatique, ces initiatives se sont appuyées sur des dispositifs participatifs qui ont produit des consensus mous et évacué les dissensus.

Mots-clés : eau, changement climatique, savoirs, Rhin-Meuse, adaptation, action publique, massif des Vosges.

Sommaire[2]

Table des sigles et acronymes 5

Introduction 7

1 Questions de recherche, démarche et terrains d'étude 8

2 Eau, changement climatique et action publique aux échelles internationales, nationale et du bassin Rhin-Meuse 12

3 Mesurer, modéliser l'eau et le climat : savoirs et pratiques 28

4 Savoirs et actions locales en matière d'adaptation au changement climatique 45

5 Quels sont les instruments de l'action publique aujourd'hui mobilisés pour adapter la gestion de l'eau au changement climatique ? 73

Conclusion générale 94

Annexes 97

Table des figures 131

Sommaire détaillé 133

Bibliographie 136

[2] Une version détaillée du sommaire est disponible page 133.

Table des sigles et acronymes

AEP : Alimentation en eau potable

AERM : Agence de l'eau Rhin-Meuse

AMICE : projet de recherche « Adaptation of the Meuse to the Impacts of Climate Evolutions »

ANR : Agence nationale de la recherche

BNPE : Banque nationale des prélèvements quantitatifs en eau

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

CCHV : Communauté de communes des Hautes Vosges

CCI : Chambre de commerce et d'industrie

CD88 : Conseil Départemental des Vosges

CERC Grand-Est : Cellule économique régionale de la construction Grand-Est

COP : Conférence des parties

DCE : Directive cadre sur l'eau

DDT : Direction départementale des territoires

DREAL : Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement

EES : Évaluation environnementale stratégique

EPR : réacteur nucléaire de troisième génération (*European Pressurized Water Reactor*)

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

INRA : Institut national de la recherche agronomique

INRAE : Institut national de la recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (établissement créé le 1er janvier 2020, issu de la fusion entre l'INRA et IRSTEA).

IRSTEA : Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture

LHyGeS : Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie de Strasbourg

MOSARH21 : projet de recherche « Evolution des débits de la MOselle, de la SArre et des affluents du RHin en France au cours du 21ème siècle »

Niv'OSE : association Nivologie Observations et Suivi de l'Enneigement (département 88)

PCAET : Plan climat-air-énergie territorial

PNACC : Plan national d'adaptation au changement climatique

PNUE : Programme des Nations unies pour l'environnement

PPE : programmation pluriannuelle de l’énergie

SAGE : Schéma d'aménagement et de gestion de l'eau

SCHAPI : Service central d’hydrométéorologie et d’appui à la prévision des inondations

SDAGE : Schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux

SNBC : Stratégie nationale bas-carbone

SRADDET : Schéma régional d’aménagement, de développement durable et d’égalité des territoires

TECV : loi « transition énergétique pour la croissance verte »

ZRE : Zone de répartition des eaux

Introduction

Alors que l'adaptation au changement climatique s'institutionnalise dans les années 2000, de nouvelles formes et options d'adaptation sont explorées et conceptualisées dans la littérature, même si le champ reste encore dominé par une « adaptation par ajustement » (Labbouz et al., 2017). L'adaptation au changement climatique est, aujourd'hui, un concept polysémique dont la portée normative prête à de nombreuses interprétations, un peu comme le développement durable.

Depuis le début des années 2010, en France, le Ministère de l'écologie et du développement durable adopte des plans nationaux pluriannuels d'adaptation au changement climatique qui demandent de « climatiser » les programmes d'intervention des Agences de l'Eau et les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE). Dans le bassin Rhin-Meuse, le Comité de bassin a estimé qu'il ne disposait pas d'informations suffisamment régionalisées et actualisées et l'Agence de l'eau (AERM) a cofinancé des études qui modélisent les impacts du changement climatique d'origine anthropique sur les écoulements des principaux cours d'eau du bassin. Ces recherches ont permis de développer des chaînes de modélisation, de fournir des ordres de grandeur des impacts en fonction des usages de l'eau actuels, et d'identifier des risques d'inondation et d'étiage dans le futur.

Le projet SOCLIM s'interroge sur la manière dont l'action publique, notamment à l'échelon communal et intercommunal, pense et prend en compte le changement climatique dans la gestion quantitative de l'eau au sein du bassin Rhin-Meuse. Il étudie plus particulièrement quels sont les savoirs sur les relations entre eau et changement climatique et la place qu'ils occupent dans la gestion de la ressource et dans la mise en place de mesures d'adaptation.

Ce rapport est organisé en 5 parties. Dans un premier temps, nous présentons les questions de recherche traitées par le projet, la démarche et les méthodes adoptées ainsi que les terrains d'étude choisis (section 1). Nous interrogeons la place de l'eau et du changement climatique dans l'action publique à l'échelle internationale, nationale et du bassin Rhin-Meuse (section 2). Ensuite, les sections 3, 4 et 5 présentent les résultats de l'étude relatifs aux savoirs et politiques territoriales en matière d'eau à l'échelle du bassin Rhin-Meuse et plus localement dans les Vosges. La section 3 porte sur les activités de métrologie et de modélisation déployées pour représenter les relations entre eau et climat. La section 4 s'intéresse quant à elle aux savoirs et l'action publique en matière d'approvisionnement en eau brute et d'enneigement à l'échelle communale. La section 5, enfin, analyse les principaux instruments d'action publique actuellement développés pour adapter les territoires au changement climatique : les études et les dispositifs de concertation qui leur sont associés, le financement d'infrastructures et les réformes territoriales.

1 Questions de recherche, démarche et terrains d'étude

1.1 Une approche exploratoire

Le projet SOCLIM s'est fondé sur l'hypothèse selon laquelle il existe des points de convergence, leviers, ruptures et contradictions entre adaptation au changement climatique, savoirs, stratégies d'acteurs et gestion de l'eau. Nous les avons étudiés avec une approche exploratoire, en particulier à l'échelon local. Cette recherche soulève la question de l'anticipation et de la prise en compte des incertitudes liés au changement climatique dans les activités de gestion locale, où ce sont « *les intérêts et les temporalités plus courtes [qui] prévalent* » (Marquet, 2014).

Afin d'identifier l'adaptation telle qu'elle se pense, se déploie ou s'évite, le projet SOCLIM a exploré la façon dont est pris en compte – ou non – le changement climatique dans la gestion quantitative de la ressource en eau au sein du bassin Rhin-Meuse ; et a interrogé plus particulièrement la place et le statut des savoirs sur les relations entre eau et changement climatique vis-à-vis de l'action publique.

Les questions suivantes ont guidé notre approche :

- **Quelle est la prise en compte du changement climatique sur la gestion de l'eau dans le bassin Rhin-Meuse ?** *Comment les acteurs locaux se saisissent du changement climatique et traduisent cet enjeu global en termes d'action publique locale? Le changement climatique vient-il revisiter la gestion de l'eau ? Quelle prise en compte dans la gestion à l'échelle locale de potentielles évolutions climatiques? Sur quels scénarios (implicites ou explicites) les acteurs fondent-ils leur gestion ? Quelles interférences avec d'autres politiques et enjeux de la gestion de l'eau ? Quels savoirs mobilisent-ils ?*

- **Quelle(s) place(s) et statut(s) des savoirs dans la mise en place de mesures/stratégies d'adaptation ?** *Quelles sont les connaissances mobilisées ? Qui les produit ? Comment ces savoirs sont-ils liés à des pratiques ou politiques ? Comment viennent-ils nourrir les représentations de l'avenir des acteurs? Comment ces savoirs sont-ils mobilisés par les acteurs dans leurs stratégies ? Quelles sont les zones d'ombre (flou, méconnaissance, incertitudes) ? Comment les savoirs circulent-ils entre les différentes sphères d'acteurs ? Quelles sont les modalités de transfert et d'appropriation des savoirs climatiques vers les sphères décisionnelles locales ?*

1.2 Une analyse des discours et des supports matériels de l'action publique

Notre travail s'est basé sur l'analyse de la littérature grise et scientifique et sur une enquête de terrain (Figure 1). La littérature grise produite par les acteurs de la gestion intentionnelle (documents de gestion, archives, articles de presse locale et nationale) et la littérature scientifique, qui relève de la recherche finalisée, sont utilisées à la fois en complément aux enquêtes et en tant qu'objets autonomes.

Les entretiens nous permettent d'accéder au savoir et aux récits des acteurs locaux. Ils constituent un moyen de produire des données discursives. Ils ont deux dimensions : une plutôt stratégique car l'entretien fait évoluer la problématique et l'autre plutôt tactique parce qu'il fait aussi évoluer les questions qu'on pose en entretien. Les entretiens réalisés sont semi-directifs. Il s'agit donc d'entretiens ouverts, avec un "canevas". Cela nous permet de respecter la dynamique de l'entretien tout en nous assurant de ne pas oublier nos hypothèses de départ. Les entretiens portent à la fois sur le savoir de l'acteur interrogé et sur son expérience personnelle.

La littérature scientifique, la littérature grise et les retranscriptions d'entretien procurent un matériel brut pour l'analyse à la fois des discours et des supports matériels de l'action publique. Un discours ou un récit, c'est à la fois une rhétorique et la retranscription d'une expérience humaine, avec une histoire, des attachements et du vécu. La rhétorique établit un lien entre ce qu'un acteur dit et l'action, puisqu'elle vise l'adhésion pour influencer les comportements. Elle n'est cependant pas non plus complètement l'action, comme aurait tendance à la considérer tout un mouvement actuel de la pensée pour qui parler c'est agir.

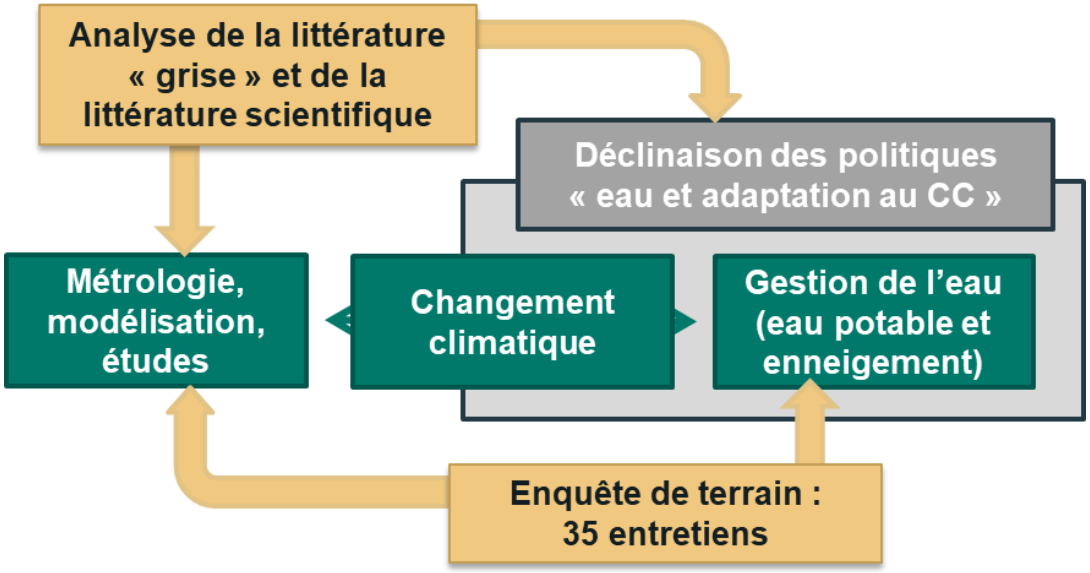


Figure 1 : Démarche du projet SOCLIM

Nous avons mené différentes tâches :

- nous avons opéré un cadrage de l'étude (en gris sur la Figure 1 et en section 2 du rapport). L'objectif était de caractériser la place de l'eau et du changement climatique dans l'action publique, à l'échelle internationale, nationale et au sein du bassin Rhin-Meuse. Pour ce faire, nous avons analysé dans les documents d'action publique comment sont traités les enjeux de l'eau et du changement climatique, quelles sont les formes d'adaptation mises en avant.

- Nous avons analysé les savoirs et leurs articulations avec la gestion de l'eau (en vert sur la Figure 1 et en sections 3, 4 et 5 du rapport) à partir d'une enquête de terrain menée à différentes échelles, au

sein de Rhin-Meuse. 35 entretiens ont été menés auprès d'une diversité d'acteurs : élus locaux, agents des collectivités et services déconcentrés de l'État, agents d'établissements publics producteurs de connaissances (BRGM, AERM, etc.) ou encore de laboratoires de recherche (Figure 2). Il s'agit d'acteurs qui produisent ou commanditent les connaissances, de ceux qui sont en charge de définir et de mettre en œuvre les politiques ou encore d'assurer la gestion des services d'eau. L'enquête a comporté deux volets. D'une part, 21 entretiens ont eu trait à la gestion des services d'eau, au niveau local, avec notamment 16 communes enquêtées. D'autre part, 14 entretiens ont porté sur la production de savoirs en termes de métrologie, de modélisations climatiques et hydrologiques ou encore d'études opérationnelles et stratégiques. Notre enjeu était à la fois (i) d'identifier les connaissances et les scénarios (implicites ou explicites) sur lesquels les acteurs fondent leur gestion, et (ii) de caractériser les savoirs d'action publique développés sur l'eau et le changement climatique.

Gestion des services d'eau (21 entretiens)	Collectivités locales et services déconcentrés de l'État	16 communes du massif des Vosges	14 maires + 1 adjoint + 1 directeur des services techniques
		Communauté de Communes des Hautes Vosges	1 agent (et 3 élus)
		DDT 88	2 agents
		Conseil départemental 88	2 agents
	Autres	Opérateur privé de services d'eau en Lorraine	4 agents
		AERM (subventions)	1 agent
Métrologie, modélisation et études (14 entretiens)	Collectivité	DREAL Grand-Est	1 agent
	Établissement public à caractère industriel et commercial	BRGM Grand-Est	2 agents
	Établissement public à caractère administratif	AERM (planification/études)	3 agents
		CCI Strasbourg	1 agent
		Météo-France Nord-Est	1 agent
	Établissement public à caractère scientifique et technologique	Irstea Anthony (eau)	2 agents
		Irstea Grenoble (enneigement)	2 agents
		Laboratoire LHyGeS (UMR CNRS / Université de Strasbourg)	2 agents
		INRA (Unité SAD-ASTER)	1 agent
	Associations	Comité départemental du tourisme 67 (Alsace Destination Tourisme)	1 agent
		NIV'OSE	1 agent
		Terra Genesis	1 agent

Figure 2 : Liste des organisations enquêtées

La littérature grise et la littérature scientifique ont été mobilisées préalablement à l'enquête pour l'élaboration d'hypothèses exploratoires et de questionnements particuliers nourrissant les entretiens. Nous avons réalisé une synthèse de la littérature scientifique en géographie physique sur la circulation de l'eau dans le massif des Vosges. Elle est présentée en amont des résultats du volet de l'enquête portant sur la gestion des services d'eau (section 4).

1.3 De la modélisation climatique et hydrologique régionale à la gestion de l'eau potable et de l'enneigement au sein du massif des Vosges

Au sein du bassin Rhin-Meuse, l'analyse porte sur le massif des Vosges et se centre sur la gestion de l'eau potable et de l'enneigement.

Bénéficiant de précipitations importantes[3] et de la fonte des neiges au printemps, le massif des Vosges possède un réseau hydrographique dense. Le « château d'eau » de la Lorraine a cependant connu ces deux dernières décennies plusieurs sécheresses conduisant à des ruptures d'alimentation en eau potable. En 2018, suite à une sécheresse exceptionnelle, les mesures de restriction de l'usage de l'eau ont été maintenues de juillet jusqu'à décembre par le Préfet des Vosges. Dans le nouveau programme de l'AERM, la question de l'approvisionnement en eau potable dans le massif vosgien est désormais identifiée comme « défi territorial » dans une optique d'adaptation au changement climatique. Les précipitations neigeuses sont aussi un fort enjeu économique pour les communes du massif accueillant les skieurs. Les périodes d'ouverture des stations de sports d'hiver sont contraintes par la nivométrie aléatoire dans un massif d'altitude moyenne. Des travaux soulignent une tendance à la diminution de la durée moyenne d'enneigement attribuée pour les dernières décennies au réchauffement climatique (Giacona et al., 2019).

Le volet de l'enquête sur la gestion des services d'eau porte sur une portion du massif (secteur des Hautes Vosges, rencontrant les enjeux décris et présentés en préambule des résultats de l'enquête, section 4). Dans le secteur des Hautes Vosges, nous nous sommes intéressés à la place du changement climatique dans l'explication des situations de manque d'eau et aux actions déployées pour gérer ces évolutions, en enquêtant auprès des maires, des agents d'une communauté de communes, de la DDT, etc. Pour autant, nous avons aussi intégré d'autres périmètres et échelles d'étude pour analyser des articulations entre savoirs climatiques et gestion de l'eau qui sont élaborés par des acteurs intervenant à des échelons territoriaux divers. À titre d'exemple, nous avons interrogé le BRGM qui mène une étude visant à mieux connaître la circulation de l'eau dans le massif, ou encore des chercheurs ayant développé des modélisations hydrologiques à l'échelle régionale.

Pour le volet de l'enquête sur la gestion de la neige, nous avons opéré de la même manière. Nous avons étudié comment les communes vosgiennes envisagent les impacts du changement climatique sur le tourisme lié à la neige et le type d'adaptations déployé. Nous avons également analysé deux études sur l'adaptation au changement climatique dont le périmètre est supra-communal : une démarche d'urbanisme de projet et un projet de recherche à l'échelle du massif.

[3] Plus de 2000 mm par an en moyenne selon Météo France

2 Eau, changement climatique et action publique aux échelles internationales, nationale et du bassin Rhin-Meuse

2.1 Brève histoire politique et scientifique de la construction des relations entre changement climatique et eau

Si l'effet de serre a été étudié depuis le XIXe siècle, c'est surtout lors de la seconde guerre mondiale puis de la guerre froide que les sciences du climat se développent de manière significative avec le déploiement de systèmes de mesures et de modélisations numériques, en particulier aux États-Unis d'Amérique (USA) autour de projets de modifications artificielles du temps (ensemencement de nuages, etc.). Dans les années 1970, autour du rapport du Club de Rome et des travaux de modélisation qu'il suscite, de la conférence de Stockholm et de la montée de mouvements militants environnementalistes et pacifistes, les recherches étasuniennes du climat changent de paradigme : il ne s'agit plus de manipuler le climat à des fins économiques et militaires, mais plutôt de mieux comprendre les changements dont il fait l'objet, ses causes et ses effets. Dès le début des années 1980 cependant, l'administration Reagan ignore l'alerte sur les risques que pourrait engendrer une augmentation de la température moyenne du globe et favorise des expertises qui misent sur l'adaptation, jugée moins coûteuse qu'une transformation des consommations d'énergie, et l'innovation technologique, jugée moins incertaine que le climat. Certains de ces experts deviendront ensuite ce que Naomi Oreskes et Erik M. Conway (Oreskes et al., 2012) ont qualifié de « marchands de doute », très médiatisés dans les années 2000. Depuis les années 1980, aux USA, démocrates, républicains, différents ministères ou agences gouvernementales s'opposent sur l'appréciation du risque climatique.

Dès le début des années 1980, à l'échelle internationale, l'Organisation météorologique mondiale (OMM) investit aussi la question du climat en créant un programme de recherche mondial puis, avec le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE), le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) en 1988. C'est le succès du protocole de Montréal (1987) conçu pour lutter contre le trou de la couche d'ozone qui sert de modèle aux agences onusiennes pour structurer les négociations internationales sur le changement climatique. Le cadrage du problème climatique dans les négociations internationales et dans l'espace public qui se met en place à partir de la fin des années 1980 a conféré un rôle primordial aux sciences et à l'expertise (Dahan and Guillemot, 2006). La science du changement climatique organisée autour du GIEC a largement contribué à structurer les discussions et les négociations. Le rapport de 1990 a préparé le sommet de la Terre de Rio, celui de 1995 l'élaboration du protocole de Kyoto, celui de 2001 le tournant de l'adaptation. Les rapports du GIEC, publiés tous les 4 ou 5 ans, sont approuvés par les gouvernements lors d'une procédure de relecture complexe. Ces rapports ont établi la responsabilité humaine dans le réchauffement global et bénéficient d'une large médiatisation internationale.

Pour Aykut et Dahan (Aykut and Dahan, 2014), dans les années 1980, ce sont certes l'alerte mais aussi les tensions entre pays occidentaux et puissances émergentes pour l'accès au pétrole polarisées au Moyen Orient qui expliquent la volonté, en particulier des USA, de mettre en place des engagements internationaux lors du sommet de la Terre en 1992. Les USA voient alors dans la perspective d'un marché unique du carbone un moyen de mettre en place une transition énergétique pacifique sans nuire à l'économie américaine. Dans les années 1990 se met en place un régime climatique organisé autour d'une conception globale à la fois du problème et de ses solutions, de négociations entre États hétérogènes, nourries par les rapports du GIEC. Cependant, la plupart des tentatives pour réorienter la consommation d'énergie vers des sources non carbonées (fiscalité écologique…) font aussi face à des oppositions qui réussissent à les faire échouer, que ce soit aux USA, au niveau de la Commission européenne, en France ou en Allemagne. Seuls les instruments de marché sont finalement inscrits dans le protocole de Kyoto, protocole qui ne sera jamais ratifié par les USA. L'expérience du marché de carbone européen montre des limites que ce soit en matière d'efficacité environnementale ou en tant qu'instrument redistributif. En parallèle de négociations onusiennes sur le climat particulièrement lentes, difficiles et peu concluantes, de nombreux accords concernant le commerce international sont, eux, adoptés dans les années 1990 et 2000. Ils contribuent à une hausse significative du volume des échanges de biens dans le monde, soutenue par un pétrole bon marché, et ils stimulent les activités polluantes. En matière de développement des pays du Sud ou d'énergie, les cadres internationaux et les circuits financiers associés continuent aussi de favoriser l'économie carbonée (Aykut and Dahan, 2014).

Après le 11 septembre 2001, les USA ajournent encore plus explicitement la prise en charge des enjeux climatiques. Après la COP de Copenhague (2009), et malgré la mobilisation massive qui l'a caractérisée, la construction d'une stratégie globale de répartition des objectifs de réduction (« partage du fardeau ») est officiellement abandonnée au profit d'engagements volontaires. C'est aussi à ce moment-là que le GIEC subit de violentes attaques sur ses méthodes, ce que l'on appelé le « climategate » (Hulme 2013). Au-delà de la question des climato-sceptiques et des intérêts qu'ils représentent, la fragilité du GIEC s'expliquerait aussi par le décalage entre la représentation qu'il revendique de sa relation au processus politique (« *policy-relevant, but not policy prescriptive* », « *science-speaks-truth-to-power* ») et ses pratiques qui sont beaucoup plus complexes et hybrides (Aykut, 2015).

L'échec des négociations à Copenhague met en exergue plusieurs hiatus : entre ce qui devrait être fait et ce qui est fait pour lutter contre le changement climatique, entre les lenteurs du processus et l'accélération d'autres dynamiques économiques, politiques et sociales qui aggravent la situation du climat, entre un cadrage top-down, la volonté de mettre en place une régulation centralisée à l'échelle mondiale et des questions de souveraineté nationale (Aykut, 2015; Aykut and Dahan, 2011). Les années 2010 sont ensuite marquées par plusieurs réorientations politiques : la promotion des politiques nationales dans les négociations, l'abandon d'un objectif de partage du fardeau au profit de la promotion des opportunités offertes par une décarbonisation de l'économie, le renforcement de la place de l'adaptation associée à la demande de prévision des changements climatiques au niveau régional, des appels à réformer le GIEC pour le rendre plus réactif aux demandes politiques ou

plus « réflexif », la promotion d'une science dédiée à ses utilisateurs locaux… (Aykut, 2015). Ces réorientations révèlent aussi l'abandon de solutions qui s'inscrivaient dans les canons de l'économie néoclassique pour éliminer les dysfonctionnements du marché mondial grâce à l'instauration de taxes ou d'un marché carbone à l'échelle globale. Il s'agirait désormais de valoriser davantage la réflexivité et l'intelligence collective, grâce à des processus plus démocratiques qui donneraient plus de voix aux savoirs locaux et à la société civile.

2.2 La construction d'un cadre national de lutte contre le changement climatique

Le cadre national français s'articule autour des deux pôles que sont l'atténuation (réduction des émissions de gaz à effet de serre) d'un côté et l'adaptation (réduire la vulnérabilité aux changements du climat et à ses implications) de l'autre.

2.2.1 L'atténuation et l'eau

Depuis 2015, l'atténuation est cadrée par la loi relative à la « transition énergétique pour la croissance verte » (TECV). Cette loi est le produit de plus d'une décennie de débats et de controverses autour de la place du nucléaire dans la politique énergétique française. Dans les années 2000, un groupe d'experts, avec des outsiders des politiques énergétiques françaises, promeut un scénario « négawatt », qui donne à voir ce que pourrait être une société française plus sobre dans sa consommation d'énergie, plus efficace dans sa production d'énergie, et avec une production qui privilégierait le recours aux énergies renouvelables. Leurs propositions trouvent un écho dans l'espace public alors que, au début des années 2010, la catastrophe de Fukushima, les déboires de la construction de l'EPR à Flamanville et les difficultés financières d'Areva participent d'un renouvellement de la critique du nucléaire. C'est alors que les tenants de la politique énergétique construite sur le « *tout électrique, tout nucléaire* » investissent politiquement la catégorie « énergies renouvelables », de laquelle le nucléaire est exclu, pour la remplacer par la décarbonisation de l'économie dans les débats sur la transition (Aykut and Evrard, 2017). Lors de la campagne électorale de 2012, la notion de transition énergétique s'inscrit dans l'agenda gouvernemental. Après l'élection, le gouvernement organise un débat dont l'objectif est d'aider à définir les contours de la notion de transition et à préciser ses modalités d'application. Très rapidement, la question du nucléaire se retrouve au cœur des controverses. À l'issue du débat, l'administration reprend la main et privilégie un consensus mou qui lui permet d'agréger des visions contradictoires, en ne tranchant pas sur la question du nucléaire. La loi de 2015 fixe quant à elle des objectifs quantifiés en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre, de consommation énergétique finale et primaire, de type d'énergie mobilisée (augmentation de la part d'énergie renouvelable, réduction du nucléaire), d'autonomie énergétique des départements d'outre-mer, à deux horizons (2030 et 2050). L'atteinte de ces objectifs dépend cependant de l'adoption d'un texte réglementaire complémentaire : la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE). Or ce texte, dont la publication a été plusieurs fois repoussée, parait finalement un an plus tard, en juillet 2016, et il n'aborde pas la question de

l'évolution du parc nucléaire. Entre temps, le rapport annuel de la Cour des comptes de février 2016 observe que la combinaison des différents objectifs de la LTECV (50 % de nucléaire en 2025, 40 % d'électricité renouvelable en 2030 dans un contexte de stagnation de la demande électrique) signifie mécaniquement la fermeture d'une vingtaine de réacteurs à cet horizon, sur un total de 58. En 2017, le Plan Climat de N. Hulot propose, quant à lui, de parvenir à la "neutralité carbone" pour traduire à l'échelon national l'Accord de Paris sur le climat signé en décembre 2015, tout en repoussant aussi l'échéance de fermeture programmée des centrales. Depuis 2019, le gouvernement envisage une nouvelle loi, modifiant les objectifs fixés à moyen et long terme de la loi TECV. L'avant-projet de loi proposé envisage en particulier de :

- remplacer l'objectif de division par 4 des émissions de gaz à effet de serre du pays en 2050 par rapport à 1990, dit « facteur 4 », par un objectif dit de « neutralité carbone » à cet horizon ;
- limiter à 17% l'objectif intermédiaire de réduction en 2030 des consommations d'énergie par rapport au niveau de 2012 (objectif qui est fixé à 20 % par la LTECV);
- augmenter en revanche de 30 à 40 % la baisse prévue à cette même échéance des consommations d'énergie fossile ;
- reculer de 2025 à 2035 l'objectif fixé par la LTECV d'une baisse à 50 % pour la part de l'énergie nucléaire dans le mix de la production d'électricité.

La loi TECV prévoit l'élaboration d'une Stratégie nationale bas-carbone, pour organiser la politique d'atténuation du changement climatique en France. La première SNBC, pour la période 2015-2019, est publiée quelques mois après l'adoption de la loi, à l'issue d'un travail important de structuration, de mise en perspective et d'articulation des objectifs et mesures avec des enjeux sociétaux dépassant la sphère des politiques énergétiques. La production de ce type de document est considérée comme un cadre d'apprentissage itératif et collectif, dans une logique de gestion adaptative, fondée sur l'idée que les révisions successives dont la SNBC feront l'objet s'appuieront sur des retours d'expériences ou d'expérimentations pour en tirer des enseignements et réorienter les actions.

La deuxième SNBC (2020-2024) fait de la préservation de la qualité des sols et de l'eau un de ses trois enjeux majeurs de son évaluation environnementale stratégique (EES).

En ce qui concerne l'eau, les deux SNBC l'abordent de trois manières en relation avec les mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre: (i) en tant que levier/moyen direct (ii) en tant que co-bénéficiaire et (iii) en tant qu'enjeu qui pourrait être négativement impacté (Figure 3).

Type de relation avec les mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre	Mesures identifiées
L'eau, un levier/moyen direct	• l'eau, un moyen de produire des énergies renouvelables : hydroélectricité, géothermie, récupération de la chaleur fatale[4] issue du traitement des eaux usées, production d'hydrogène par électrolyse de l'eau[5]. • réduire les émissions de GES dus au transport ou à la production d'eau (eau potable, eau chaude…) : recours à l'énergie solaire thermique pour l'eau chaude sanitaire, développement de procédés de traitement des eaux usées moins émetteurs de GES
L'eau, co-bénéficiaire indirect	• mesures concernant le secteur agricole La promotion de l'agro-écologie : amélioration des capacités de rétention de l'eau des sols, moindres pollutions diffuses lessivées. • mesures concernant le secteur forestier les arbres (forêts, ripisylves) ont un impact positif sur la qualité de l'eau. • mesures concernant les transports, les déchets, etc. considérées comme des risques de pollution de l'eau évités.
L'eau, négativement impactée (« point de vigilance »)	• impacts qualitatifs de la promotion des énergies renouvelables (photovoltaïque, éolien et surtout hydroélectricité) • impacts quantitatifs de la promotion d'énergies renouvelables (production de biomasse, hydroélectricité)

Figure 3 : L'eau dans les deux SNBC

Par ailleurs, la production d'énergie nucléaire ou thermique constitue le secteur qui prélève le plus d'eau à l'échelle nationale, et de loin, si on comptabilise les prélèvements des usines à circuit ouvert (Figure 4 : Quelques chiffres sur les prélèvements et consommations d'eau par les centrales nucléaires et thermiques

Une fermeture de centrales nucléaires signifierait donc une diminution significative des pressions (quantitatives mais aussi qualitatives) sur les eaux de surface (cours d'eau et plans d'eau).

[4] Production de chaleur dérivée d'un site de production, qui n'en constitue pas l'objet premier et qui de ce fait n'est pas nécessairement récupérée.

[5] L'électrolyse consiste à faire passer un courant électrique dans l'eau, pour obtenir de l'oxygène ou de l'hydrogène gazeux. Le courant électrique peut être issu des surplus de production des énergies renouvelables tels que l'éolien ou le photovoltaïque. Cet hydrogène peut ensuite être utilisé dans les réseaux de distribution ou de transport de gaz naturel. La 2e SNBC envisage le recours à l'hydrogène pour le secteur des transports terrestres et maritimes.

L'intégralité de l'eau prélevée par les centrales à circuit ouvert est restituée, avec un gradient de température de l'ordre de la dizaine de degrés Celsius. Pour les centrales à circuit fermé 20 % de l'eau prélevée est évaporée, le reste étant restitué au milieu avec un gradient de température de l'ordre du 10e de degrés Celsius.

Quelques chiffres…

À l'échelle nationale :
Les prélèvements des centrales thermiques représentent plus de 55 % des prélèvements totaux annuels.

En Rhin-Meuse :
Les prélèvements des centrales nucléaires et des centrales thermiques à flamme du bassin Rhin-Meuse représentent plus de la moitié des prélèvements totaux : Fessenheim sur le Rhin (Bas-Rhin, 2,5 milliards de $m^{3,}$ circuit ouvert) Cattenom et Blénod-lès-Pont-à-Mousson sur la Moselle (Moselle, 800 millions de m^3, circuits fermés), Chooz sur la Meuse (Ardennes, 200 millions de m^3, circuit fermé).

En Adour-Garonne :
Les prélèvements de la centrale nucléaire à circuit fermé de Golfech représentent de l'ordre de 20 % des prélèvements totaux annuels (Tarn-et-Garonne, 200 millions de m^3/an), alors que les prélèvements d'eau saumâtre dans l'estuaire de la centrale nucléaire à circuit ouvert du Blayais (Gironde, 4, 6 milliards de m^3/an) représentent cinq fois la totalité des autres prélèvements annuels comptabilisés du bassin Adour-Garonne.

Figure 4 : Quelques chiffres sur les prélèvements et consommations d'eau par les centrales nucléaires et thermiques

2.2.2 L'adaptation et l'eau

La stratégie française d'adaptation au changement climatique a évolué après trois séries de recommandations en 2006, 2011 et 2018. La première stratégie s'articule autour de 9 domaines d'action thématiques face aux risques sectoriels. La deuxième, qui a donné naissance au PNACC-1 (2011-2015), met l'accent sur la coordination entre les institutions et spécifié les risques climatiques pour plusieurs politiques sectorielles (santé, eau, biodiversité, etc.). Le PNACC-2 (2016-2022) s'articule différemment du PNACC-1, autour de 58 actions prioritaires regroupées en six domaines (gouvernance, prévention et résilience, connaissances et information, nature et environnement, économie et action internationale), avec des thèmes émergents sur le renforcement de la résilience des écosystèmes, les solutions fondées sur la nature, la réduction des risques de catastrophes naturelles et la mobilisation des instruments financiers. Le PNACC-2 précise aussi des approches pratiques pour intégrer les risques climatiques et les objectifs d'adaptation dans les plans locaux de développement durable (élaborés dans le cadre du SRADDET, schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires) et le PCAET (Plan climat-air-énergie territorial).

Les deux PNACC insistent sur un besoin de nouveaux savoirs sur les effets locaux du réchauffement climatique pour pouvoir développer des actions d'adaptation dans les territoires. Ils identifient tous deux différents enjeux pour l'eau en matière d'adaptation, dus à :

- une augmentation de l'intensité d'évènements extrêmes (sécheresses et inondations)

- l'apparition de situations plus structurelles de pénurie d'eau,
- l'augmentation de la température de l'eau,
- des risques de disparition des zones humides ou d'une érosion de la biodiversité aquatique.

La Figure 5 présente la manière dont le PNACC1 a abordé les enjeux de l'adaptation concernant spécifiquement l'eau. Le PNACC1 a en effet accordé une place significative à la question des situations de pénuries aggravées dans le futur, en lien en particulier avec l'agriculture et la production d'énergie.

Qualification du problème	**Focale**	**Actions préconisées**
Ressources en eau	S'adapter à une baisse de l'offre en eau. « *En cas de stabilité de la demande en eau, un déficit de 2 milliards de m^3 à l'horizon 2050* »	• Se doter d'outils efficaces de suivi des phénomènes de déséquilibre structurel: réseaux piézométriques, observatoire national des étiages, banque nationale des prélèvements. • Renforcer l'intégration des enjeux du changement climatique dans la planification et la gestion de l'eau, en particulier dans les prochains programmes d'intervention des agences de l'eau (2013-2018) et les prochains Schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (2016-2021) • Économies d'eau: Objectif quantifié : Économiser 20% de l'eau prélevée, hors stockage d'eau d'hiver, d'ici 2020. <u>Eau potable</u> : a) amélioration des performances des réseaux : conditionnement des financements par les Agences pour l'AEP à un rendement minimal du réseau, inventaires et sectorisation du patrimoine pour une suppression des fuites dans les réseaux prioritaires, dispositifs de détection des fuites, comptage, réhabilitation des réseaux b) réduction des consommations : sensibilisation, équipements hydro-économes… <u>Assainissement collectif :</u> réutilisation des eaux usées domestiques par l'agriculture irriguée ou les espaces verts, récupération des eaux de pluie, favoriser l'infiltration des eaux pluviales (limiter l'imperméabilisation des sols) <u>Eau industrielle</u> : innovations pour limiter les prélèvements et consommations d'eau (focale sur les centrales électriques) et recyclage <u>Eau agricole :</u> réduction des prélèvements, avertissements agricoles en irrigation irri-mieux et soutien au développement de filières économes en eau.

		• Construire des ouvrages de stockage **dits de substitution**, optimisation de la gestion des ouvrages existants. • Accompagner le développement d'activités et une occupation des sols compatibles avec les ressources en eau disponibles localement.
Risques naturels	Retrait-gonflement des sols argileux, incendies de forêt et pression généralisée sur les côtes basses.	• Développer la connaissance (aléas, enjeux, méthodes) dans les différentes zones sensibles, développer l'observation et prévoir la mise à disposition des données, Généraliser les notions de vigilance et d'alerte, et les dispositifs associés, et systématiser le retour d'expérience (REX) • Prendre en compte l'impact du changement climatique sur les risques naturels dans la maîtrise de l'urbanisation • Réduire la vulnérabilité, améliorer la résilience et l'adaptation au changement climatique
Biodiversité	Milieux aquatiques	• Recenser les espèces, habitats… • Mettre en œuvre et préserver la Trame verte et bleue
Agriculture	Faire face à des pénuries d'eau structurelles	• promouvoir des cultures peu consommatrices et améliorer l'efficience de l'usage de l'eau • optimiser le fonctionnement des ouvrages de stockage • promouvoir de nouveaux systèmes assurantiels
Énergie		• évolution des consommations : Gérer l'émergence de pointes de consommation électrique estivales à travers un système d'obligation de capacité électrique • évolution de la production : Favoriser le recours à des équipements de refroidissement plus efficaces ou utilisant des sources d'énergies renouvelables ou de récupération. • gestion des impacts sur les milieux aquatiques Intégrer la dimension changement climatique dans le cadre des indicateurs de suivi de la Directive cadre sur l'eau afin que l'effet des rejets thermiques puisse être isolé de celui du réchauffement global.

Figure 5 : L'eau dans le PNACC-1 (2011-2015)

Le PNACC-1 a fait l'objet d'une évaluation en 2015. Pour les ressources en eau, cette évaluation met l'accent sur les avancées dans le domaine du développement des connaissances. Elle estime en revanche que les actions opérationnelles relevant des économies d'eau ou plus largement d'une adaptation des activités qui prélèvent ou consomment le plus d'eau (agriculture et centrales thermiques) à des ressources en eau plus faibles ne sont pas encore véritablement déployées. Elle note aussi que les financements n'ont pas été un facteur limitant pouvant expliquer la faible mise en œuvre de ces actions opérationnelles. Pour l'agriculture, l'évaluation pointe entre autres le besoin d'associer les filières pour stimuler les changements de production.

L'évaluation estime que « *les instances de gouvernance territoriales telles que les comités de bassin ou les comités de massif constituent des lieux qui ont permis de faire progresser la prise de conscience des enjeux liés au changement climatique dans certains domaines, tels le secteur de l'eau et les zones de montagne.* ***Pour autant, si le dialogue ainsi instauré a permis de faire place à l'adaptation dans les schémas de gestion, il reste encore difficile de faire adopter par certaines parties prenantes des mesures structurelles d'adaptation, ainsi que cela a été constaté pour les économies d'eau vis-à-vis des usagers les plus consommateurs (en particulier l'agriculture) ou pour la mutation des stations de moyenne montagne en vue de réduire leur dépendance au tourisme hivernal lié à la pratique du ski*** » (p. 61-62).

Ainsi, le PNACC-2 met l'accent sur la nécessité de davantage territorialiser les politiques d'adaptation et d'associer les parties-prenantes localement vue comme un gage d'une mise en place effective de l'adaptation au changement climatique, entre autres dans le domaine de l'eau. Il insiste en particulier sur le déploiement de stratégies foncières par l'État pour limiter l'artificialisation des sols (limiter la consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers, promouvoir l'infiltration des précipitations) et la nécessité de se fonder sur des « solutions basées sur la nature », que ce soit pour répondre à des enjeux de prévention des risques ou de restauration de la biodiversité. En ce qui concerne les ressources en eau, l'agriculture, les sols ou la biodiversité, les préconisations s'inscrivent dans la continuité du PNACC-1. Concernant les ressources, les deux PNACC privilégient le déploiement d'une société sobre en eau. Pour autant, ils jugent aussi possible et légitime le déploiement de projets de développement d'ouvrages de stockage, là où ils s'avèreraient « durables ». Le PNACC-2 à la différence du PNACC-1 n'aborde plus les enjeux quantitatifs ou qualitatifs liés à la production d'énergie (voir Figure 6).

Qualification du problème	**Focale**	**Actions préconisées**
Ressources en eau et écosystèmes aquatiques	S'adapter à une baisse de l'offre en eau. « *En cas de stabilité de la demande en eau, un déficit de 2 milliards de m^3 à l'horizon 2050* »	• encourager la sobriété et l'efficience des usages et réguler en amont la ressource, grâce notamment à l'innovation et à la modification des pratiques • faire émerger, dans l'ensemble des territoires, des solutions adaptées aux besoins et aux contextes locaux, notamment dans le cadre de projets de territoires pour la gestion de l'eau • continuer à améliorer la qualité de l'eau et à veiller à la sécurité sanitaire de l'eau dans un contexte climatique en évolution, et à préserver les écosystèmes aquatiques. • organiser un débat national avec l'ensemble des parties prenantes sur la réalimentation artificielle des rivières sur la base d'un état des lieux • stimuler la concertation et la co-construction, le développement d'outils pour définir l'adaptation des besoins en eau aux ressources utilisables et, là où c'est utile et durable, envisager des projets de

		stockage hivernal de l'eau, en priorité sur les territoires en déséquilibre quantitatif ou susceptibles de l'être dans un futur proche
Les sols	Le sol en tant que milieu et agent du cycle de l'eau	• limiter l'artificialisation et l'imperméabilisation des sols, en cherchant à les stopper à terme, grâce aux différents outils de planification mobilisables à différentes échelles (ex. Schéma de cohérence territoriale, Plan local d'urbanisme intercommunal) ou du projet (modification de pratiques, recyclage de friches après restauration) ; • étudier les possibilités de rendre à la nature, voire remettre en culture, des territoires anthropisés (ex. : dépollution, restauration de friches industrielles)
Biodiversité		• préservation, restauration et renforcement des continuités écologiques, en s'appuyant sur la trame verte et bleue et les infrastructures agro-écologiques, les meilleures pratiques de gestion agricole, piscicole, aquacole et forestière • développement d'un réseau cohérent, connecté et représentatif d'aires protégées mettant en place une gestion adaptative • identification et développement d'outils contractuels, fonciers, réglementaires et financiers permettant de rendre conciliable les activités avec la biodiversité dans le cadre de l'adaptation au changement climatique • intégration des enjeux de résilience des écosystèmes et de disponibilité en eau, présente et future, dans toutes les politiques publiques et schémas sectoriels des activités économiques pertinents.
Risques naturels		• urbanisme : utiliser les labels existants voire des moyens réglementaires pour le bâti • accroître la robustesse des mécanismes assurantiels privés et public (CAT-NAT)
Agriculture		• évolution des politiques publiques pour accompagner la transition, pour développer une agriculture respectueuse de la biodiversité, des paysages et des sols, multi-performante et plus économe en eau, • réaliser, là où c'est utile et durable, des projets de stockage hivernal de l'eau afin d'éviter les prélèvements en période sèche lorsque l'eau est rare et accompagner la transition des filières

Figure 6 : L'eau dans le PNACC-2 (2016-2022)

2.3 Les traductions des politiques d'adaptation par le Comité de bassin Rhin-Meuse

La question du changement climatique commence à être formellement intégrée dans la politique du Comité de bassin Rhin-Meuse avec le SDAGE 2016-2021, en s'appuyant sur le PNACC-1.

Les propositions du SDAGE se fondent sur plusieurs travaux de modélisation réalisés au sein de Rhin-Meuse (MOSARH21 : affluents français du Rhin, ANR Vulnar : vallée du Rhin et plaine d'Alsace, AMICE : bassin de la Meuse, RheinBlick2050 : Rhin et principaux affluents) et à l'échelle nationale où ils ont aussi constitué les scénarios retenus pour l'élaboration du PNACC-1 (Explore 2070).

Ces travaux permettent de dessiner un futur de l'eau en Rhin-Meuse à deux horizons, sur lequel s'est appuyé le SDAGE (Figure 7).

Le futur de l'eau en Rhin-Meuse sous l'effet du changement climatique dans le SDAGE 2016-2021

À l'échelle du bassin Rhin-Meuse (compilation d'analyses):

Horizon proche (2021-2050)

Une hausse des températures moyennes, comprise entre 0,6°C et 1,3°C, toutes saisons confondues, par rapport à la moyenne calculée sur la période 1976-2005.
Une augmentation du nombre de jours de vagues de chaleur en été, comprise entre 0 et 5 jours sur l'ensemble du territoire.
Une diminution des jours anormalement froids en hiver sur l'ensemble de la France métropolitaine, entre 1 et 6 jours au Nord-Est du pays.
Une légère hausse des précipitations moyennes, en été comme en hiver, avec une forte incertitude sur la distribution géographique de ce changement.
De faibles changements des pourcentages de précipitations extrêmes.

Horizon plus lointain (2071-2100)

Une forte hausse des températures moyennes : En hiver : + 0,9°C à + 3,4°C / 3,6°C ; en été : + 1,3°C à + 2,6°C / 5,3°C (selon les scénarios utilisés).
Une forte augmentation du nombre de jours de vagues de chaleur en été.
Une augmentation des épisodes de sécheresse.
Une diminution des extrêmes froids sur l'ensemble du territoire. Elle est comprise entre 6 et 10 jours de moins que la référence dans le Nord-Est de la France.
Une hausse des précipitations hivernales.
Un renforcement du taux de précipitations extrêmes sur une large part du territoire, dépassant 5% dans certaines régions avec le scénario d'émission le plus fort, mais avec une forte variabilité des zones concernées selon le modèle utilisé.

À l'échelle du bassin de la Meuse (partie française, projet AMICE):

Horizon proche (2020-2050)

Une hausse des températures moyennes annuelles, comprise entre + 1,4°C et + 1,6°C : En hiver : + 1,3°C à + 1,5°C ; En été : + 1,2°C à + 2,1°C ;
Une diminution des précipitations moyennes, particulièrement en automne et hiver jusque de - 5 à - 8 % en précipitations annuelles ;
Une augmentation du pic de crue horaire centennal (Qhx100) de + 15 % ;
Une accentuation de l'étiage (débit moyen minimum sur 7 jours MAM7) de - 10 %.

Horizon plus lointain (2070-2100)

Une hausse des températures moyennes, comprise entre + 3,3°C et + 4,1°C : En hiver : + 2,6°C à + 4,2°C ; En été : + 2,7°C à + 5,6°C ;
Une diminution des précipitations, toute l'année mais encore plus particulièrement en été, de - 17 à - 24 % en précipitations annuelles ;
Une augmentation du pic de crue horaire centennal de + 30 % ;
Une accentuation de l'étiage (débit moyen minimum sur 7 jours) de - 40 %.

À l'échelle du bassin du Rhin (projet RheinBlicke2050):

Horizon proche (2021-2050)

Une augmentation des débits moyens annuels pour le Rhin de 0 à + 15 % ;
Une augmentation de débits moyens hivernaux (novembre à avril) de 0 à + 25 % ;
Peu de modification des étiages estivaux ;
Une augmentation des niveaux des bas débits hivernaux de 0 à +15%.

Horizon plus lointain (2071-2100)

Pas de tendance pour les débits moyens annuels (compensation des changements opposés entre hiver et été) ;
Une augmentation des débits moyens hivernaux (novembre à avril) de + 5 à + 40 % ;
Une accentuation des étiages estivaux (mai à octobre) très marquée pour la Moselle de - 50 à - 30 % ;
A priori une augmentation des crues pour la Moselle et le Rhin inférieur ;
Un décalage temporel des extrêmes, qui deviennent plus précoces et plus longs par rapport aux observations actuelles dans les parties amont du bassin, sur le Rhin supérieur notamment (accentuation du régime hydrologique pluvial).

Figure 7 : Les futurs de l'hydrologie en Rhin-Meuse liés au changement climatique dans le SDAGE 2016-2021

Le SDAGE identifie aussi les mesures qui ont été adoptées pour répondre à d'autres enjeux environnementaux dans le 10e programme (2013-2018) et qui contribuent à l'adaptation au changement climatique (Figure 8).

Usages, espaces concernés	Mesures
Milieu urbain	Favoriser l'infiltration et limiter la pollution par temps de pluie Limiter apports de pesticides hors agriculture
Milieux aquatiques	Restaurer les cours d'eau et les zones humides
Agriculture	Réduire les apports diffus et développer des pratiques pérennes à faibles intrants (amélioration de la qualité des eaux de surface et souterraine en période estivale)
SAGE des grès du Trias inférieur	Mettre en place des ressources de substitution ou complémentaire et des mesures d'économies d'eau

Figure 8 : Les mesures du 10e programme contribuant à l'adaptation au changement climatique

Le 10e programme a par ailleurs fait l'objet d'une révision pour la période 2016-2018 afin d'afficher plus explicitement l'enjeu de l'adaptation. Cette révision a aussi permis d'augmenter le niveau d'aides pour des actions jugées importantes pour l'adaptation mais qui avaient fait l'objet d'un nombre réduit de projets. C'est le cas en particulier des aides pour la réduction des fuites. Lors de la révision, le taux des aides a été augmenté sur les zones prioritaires (collectivités sujettes aux pénuries d'eau et ZRE) à un financement maximum de 100 % (35 % de subvention + avance remboursable de 65 %). Le soutien aux études liées au changement climatique pour la production de données plus fiables a aussi été renforcé. Le 10e programme révisé a aussi prévu des appels à projets pour favoriser l'innovation sur des sujets considérés cruciaux pour l'adaptation: « Gestion intégrée des eaux pluviales dans les projets d'aménagement », « Eau durable et énergie », « Fuites dans les réseaux d'eau potable»…

Ensuite, en février 2018, le Comité de bassin Rhin-Meuse a adopté un plan d'adaptation et d'atténuation pour les ressources en eau du bassin Rhin-Meuse. Ce plan vise des objectifs à l'horizon 2030 :

- Une protection améliorée contre les événements extrêmes via la restauration d'au moins 20% du linéaire des cours d'eau en champs d'expansion des crues, et l'augmentation des surfaces de zones humides.
- Une sécurisation des approvisionnements en eau potable pour tous en 2030 en qualité et en quantité, avec un minimum de traitement.
- Le développement de solutions pérennes pour garantir une eau brute de qualité, en quantité.
- Une réduction de 40 % des émissions de gaz à effet de serre en 2030 et de 75% en 2050.
- une baisse de 20 % des prélèvements en 2030.
- Aménager autrement : promouvoir une économie du foncier, réduire le taux annuel d'imperméabilisation, viser la cohérence avec la Trame Verte et Bleue, végétaliser la ville
- Augmenter de 15% en 2030 les réserves de carbone (milieux remarquables et ordinaires) favorables à la préservation des ressources en eau.

Le 11e programme de l'AERM (2019-2024) est une contribution à la mise en œuvre de ce plan et à l'atteinte de ses objectifs. Il mise en particulier sur les potentialités offertes par « les solutions fondées sur la nature » devenues une nouvelle catégorie d'action publique, qui se veut transversale. Ainsi, toutes les réponses aux défis territoriaux du 11e programme qui peuvent relever d'une lutte contre la pollution (ex. : nappe d'Alsace, sillon mosellan…), de la restauration de la continuité écologique (ex. : vallée rhénane), de la lutte contre les inondations ou de la gestion de déséquilibres quantitatifs (ex. : nappe des grès du Trias inférieur à Vittel) sont censées, aussi, contribuer à une meilleure adaptation aux effets du réchauffement climatique. Un des défis est spécifiquement dédié à l'adaptation au changement climatique et il concerne le massif vosgien (défi n°6, p. 29). Le massif des Vosges est jugé particulièrement vulnérable au changement climatique du fait « des faibles réserves des eaux souterraines et de la forte dépendance aux conditions pluviométriques », en particulier pour l'approvisionnement en eau potable de communes rurales (sources peu productives, réseaux morcelés, agressivité des eaux, tourisme et besoin saisonniers…) qui a déjà connu des difficultés ces dernières années.

L'agence et le Comité de bassin lient gestion quantitative et qualitative de l'eau, dans la mesure où la capacité auto-épuratoire ou encore de dilution intervient dans la gestion de certains polluants en particulier lorsqu'ils sont d'origine « ponctuelle », où ces capacités sont mises en balance avec les possibilités techniques de traitements des eaux usées. Nous reprendrons cependant ici la distinction qui est opérée entre enjeux qualitatifs et quantitatifs et que l'on retrouve dans les distinctions entre types de redevances ou d'actions proposées. Une telle distinction est en effet ici plutôt opérante pour identifier les ressources financières dont peuvent bénéficier les acteurs de la gestion des services d'eau potable dans les Vosges pour résoudre des problèmes en grande partie dus à un manque de disponibilité en eau brute.

D'un point de vue financier, les enjeux quantitatifs représentent 15 % des recettes du 11e programme (redevances prélèvements, Figure 9). En ce qui concerne les autorisations de programme, les enjeux quantitatifs sont minoritaires mais présents à la fois dans les mesures générales (36 % de la totalité des autorisations de programme) et territoriales (36% de la totalité des autorisations de programme). L'eau potable représente 26 % des autorisations de programme pour les mesures générales, et la gestion quantitative 2 % des autorisations de programme pour les mesures territoriales (voir Figure 10).

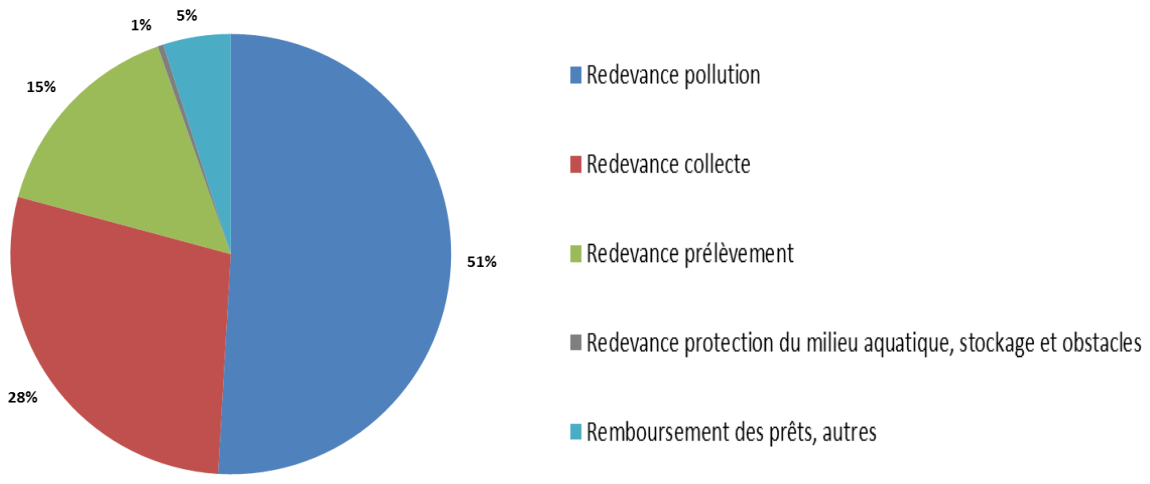


Figure 9 : Répartition des recettes du 11e programme de mesures de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse (2019-2024)

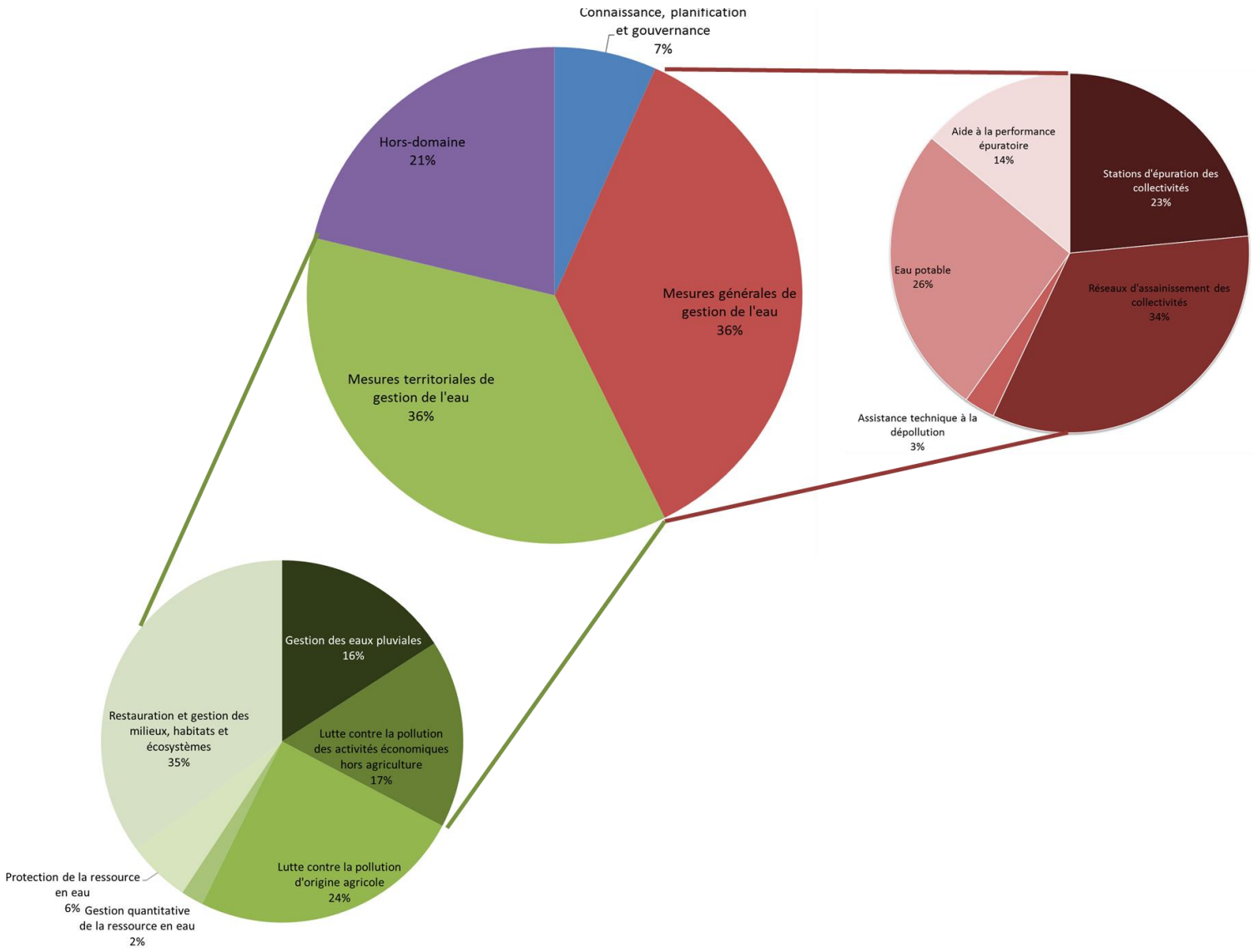


Figure 10 : Répartition des autorisations du 11e programme de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse (2019-2024)

3 Mesurer, modéliser l'eau et le climat : savoirs et pratiques

Que ce soit à l'échelle nationale, avec le projet Explore 2070 par exemple (2010-2012) ou à des échelles plus locales dans le bassin Rhin-Meuse, plusieurs travaux ont été développés depuis une dizaine d'années pour évaluer les effets du changement climatique sur les ressources en eau. Ces travaux s'appuient sur des modèles climatiques et hydrologiques et sur des données, qui n'ont, pour la plupart, pas été produits pour répondre à la question du changement du climat, mais qui se retrouvent réinvestis par cette question.

Les variables, données, relations causales ou temporalités considérées dans toute modélisation portent toujours la marque de leur contexte de production. Les modèles ou la métrologie qui nous intéressent ici s'inscrivent dans une représentation de l'eau en tant que ressource. Il s'agit là d'une manière particulière de penser et de gérer la nature selon ses utilités, sa valeur d'usage ou d'échange, exprimée en stocks, flux d'eau, ou en concentrations en polluants, organisés grâce à des infrastructures sociotechniques. La question des infrastructures, tout comme celle de l'organisation des pouvoirs et des flux financiers sont en effet centrales pour comprendre comment l'eau circule. Ces calculs prennent souvent la forme de bilans « besoins-ressources », « demandes-ressources », « usages-ressources ». Pour la réflexion prospective, il nous paraît important de garder en tête que la catégorie « ressources » n'épuise pas la complexité des relations entre sociétés humaines et eaux.

Dans cette section, nous proposons d'analyser (i) la métrologie et (ii) les modélisations et simulations, en fonction (Barbier et al., à paraître) :

- des enjeux auxquels ils répondent,
- des dispositifs, méthodes et acteurs sur lesquels ils s'appuient,
- des conditions auxquelles les acteurs leur font confiance/leur accordent un intérêt,
- de la manière dont ces savoirs sur l'eau et l'enneigement contribuent à une compréhension territorialisée du changement climatique (difficultés, apports et usages).

Nous nous sommes appuyés sur une étude de documents et des entretiens semi-directifs avec les acteurs qui commanditent, créent ou utilisent ces savoirs.

3.1 Métrologie

La métrologie est une activité qui permet d'instaurer des états élémentaires de l'environnement. Elle consiste à acquérir des données grâce à un système de mesure, lui-même composé d'un ensemble de capteurs (techniques et/ou humains) et d'une organisation capable de compiler et de mettre en forme les informations recueillies. Les données collectées proviennent d'instruments dédiés (capteurs, etc.). La promesse de la métrologie, c'est de capter de manière fidèle et opératoire une variable d'intérêt, fondée sur le recueil uniforme, stabilisé et représentatif – dans le temps et l'espace – de valeurs caractéristiques.

Les enjeux liés à l'activité métrologique sont de :

- s'accorder sur la variable qui compte,
- s'accorder sur les capteurs qui permettent de la mesurer de manière fiable (standardisation, enjeu de représentativité des points de mesure…) : questions du coût des appareils et de mise en place de systèmes de suivi,
- connecter différentes communautés d'usagers des données.

Dans la mesure où il s'agit de savoirs d'action publique territorialisée, un enjeu est de pouvoir connecter la mesure, plus ou moins directement, à une capacité à agir, et comme nous le verrons plus loin, cette connexion implique en elle-même des modélisations.

L'analyse s'appuie, de manière transversale, sur deux cas (Figure 11) :

- les données sur les hauteurs d'eau relevées sur le bassin versant expérimental du Strengbach. Localisé dans le massif vosgien à des altitudes comprises entre 800 et 1100 mètres, le bassin du Strengbach est le site d'étude de l'Observatoire Hydro-Géochimique de l'Environnement (OHGE). Des données météorologiques, hydrologiques et géochimiques y sont suivies en continu depuis 1986. L'OHGE a été labellisé en 1997 par l'Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre de Strasbourg (EOST) et en 2007 par l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU) du CNRS comme Service National d'Observation. Ce bassin versant granitique de 80 ha constitue un site de référence au niveau national et mondial. Les travaux de recherche menés portent sur l'évolution des ressources en eau et en sol, et plus particulièrement sur la compréhension des réponses du milieu naturel face aux perturbations naturelles et anthropiques, telles que le changement climatique, l'exploitation forestière et les pollutions atmosphérique (Pierret et al., 2018). De manière plus ponctuelle, on prendra aussi des références concernant les données sur des usages de l'eau (difficultés rencontrées dans le cadre du projet CHIMERE 21 par exemple).

- les données sur le manteau neigeux produites par des acteurs variés, à différentes échelles : les données issues du réseau institutionnel de Météo-France au niveau national, les données relevées par l'association Niv'OSE au sein du massif des Vosges ou encore les données relevées par les chercheurs de l'OHGE sur le bassin versant du Strengbach.

Ce que disent les analyses des séries chronologiques sur l'enneigement

• **Analyse des données du Strengbach** : Sur le bassin versant, depuis 1986, la température journalière moyenne a significativement augmenté (entre +0.7 et +1 degré). Elle n'a pas vraiment augmenté durant les mois de janvier à mars depuis 1986 et la quantité de neige tombée n'a pas diminué. L'augmentation concerne l'automne et le printemps, en particulier les mois d'avril et de novembre. Ainsi, on assiste à une fonte plus précoce de la neige [chercheuses, enquête].

• **Analyse des données relevés par l'association Niv'OSE** : les sondages journaliers effectués par l'association de novembre à mai depuis 1976 montrent une grande variabilité interannuelle de l'enneigement (Niv'OSE, enquête).

• **Analyse des données Météo-France** :

- « *Malgré ces difficultés pour établir une évolution climatique, des tendances ont pu être identifiées. Par exemple, le nombre de jours d'enneigement est resté relativement le même de 1880 à 1990, mais il a commencé à réduire après 1990. Il est également à noter que le réchauffement dans les zones de montagnes est environ deux fois supérieur au réchauffement moyen. Actuellement, il semblerait que le Massif des Vosges descende d'un centimètre par jour, soit d'environ 400 mètres sur l'échelle d'un centenaire.* » (B. Vermot-Desroches, Météo-France, cité dans Greuez 2018).

- Les impacts constatés du changement climatique sur les conditions climatiques dans le Massif des Vosges : en hiver +0.4°C par décennie depuis 1990 (+0.5°C pour l'été), 6 jours d'enneigement en moins par décennie, 16 jours d'enneigement supérieur à 1 mètre en moins par décennie, baisse de la durée d'enneigement de 20 à 50 % (basses altitudes), limite pluie/neige montée d'environ 200m d'altitude depuis 1970… (Météo-France et Deutscher Wetterdienst cités dans Lévy, Amat, et Martin 2019)

- « *Le réchauffement séculaire d'origine naturelle lié à la sortie du "petit âge glaciaire" a été relayé au cours des dernières décennies par le réchauffement rapide d'origine humaine, ce qui a conduit à "raboter" progressivement le manteau neigeux, en particulier aux altitudes basses et moyennes du massif* » ; « *A 600 mètres d'altitude en particulier, la précipitation neigeuse hivernale a nettement diminué en lien direct avec la baisse du coefficient de nivosité, conduisant à un recul drastique de l'enneigement depuis la fin des années 1980. En revanche, au niveau des crêtes, sur la même période, le coefficient de nivosité n'a été que peu impacté ; on constate seulement une baisse très légère de la précipitation neigeuse* »; « *Si les crêtes vosgiennes sont restées pour l'instant plus épargnées du fait de leur altitude, il est probable qu'elles seront-elles aussi fortement impactées dans un futur proche* » (Giacona et al., 2019).

Figure 11 : Ce que disent les analyses des séries chronologiques sur l'enneigement

3.1.1 Des enjeux entre représentativité spatiale et ajustement au terrain

Pour être crédibles et être utilisées, les données hydrologiques ou nivologiques doivent être jugées représentatives du phénomène physique étudié. Pour cela, les données doivent être produites selon une méthodologie qui réponde à des enjeux d'ajustement au terrain et à ses spécificités, tout en

garantissant l'uniformité du protocole de mesure. La qualité de la mesure dépend non seulement des techniques employées mais aussi de facteurs externes qui influencent la mesure. Le contrôle de cette influence demande de nouveaux ajustements visant à circonscrire les biais.

À titre d'exemple, pour la mesure de la neige, l'influence du vent sur le déplacement des flocons ou le tassement de la neige est difficile à évaluer. Les différentes techniques de mesure de la hauteur de la neige, par une sonde ou une mire, n'intègrent pas la présence ou l'absence de vent, ni son effet sur la nivologie mesurée. Lorsque la mesure de la neige est réalisée grâce à des pluviomètres : « *il y a un phénomène de sous-captation de la neige sur les pluviomètres à cause du vent, des phénomènes aérodynamiques qui font que quand il y a du vent, la neige ne fait que passer au-dessus du pluviomètre sans tomber dedans parce qu'il y a une turbulence autour. Cela peut aller de 30 à 40-50 % de sous-captation de la neige* » [chercheur-modélisateur, enquête].

Pour limiter les biais, les gestionnaires des stations de mesure et les chercheurs associés démultiplient les sondages : « *Par exemple, pour faire des mesures de neige, on avait établi un protocole avec des climatologues et des météorologues de l'université de Strasbourg. C'est la table à neige sur laquelle se dépose tranquillement la neige. Ici, c'est impossible, la neige est balayée, elle est très fine, poudreuse, et elle s'envole au moindre coup de vent. Et donc on a établi un protocole beaucoup plus complexe qui repose sur des transepts sur des sites qu'on connaît bien, avec des sondages successifs tous les 2-3 mètres, sinon c'est impossible de faire une mesure précise* » [association Niv'OSE, enquête].

La localisation des mesures est en effet un critère déterminant de leur qualité. Les contraintes topographiques et d'accès à la mesure peuvent se traduire par une sous-estimation de la pluviométrie : *« Première chose, les stations météo sont souvent dans les vallées et non en haut des montagnes parce que c'est difficile d'accès : il pleut plus en altitude que dans la vallée* » (enquête, chercheur-modélisateur). Même sur des terrains très instrumentés, des compromis sont réalisés entre la représentativité du maillage spatial et la durée/fréquence des mesures d'une part, et leur faisabilité technique et financière d'autre part. Ainsi, dans le bassin versant du Strengbach, sept tubes totalisateurs sont répartis sur l'ensemble du site afin de caractériser la variabilité spatiale des précipitations. Ces tubes sont relevés deux à trois fois par an, tandis qu'au niveau de la station météorologique, située dans une clairière en amont du site, la pluviométrie fait l'objet d'un suivi continu, avec une valeur minimale de mesure des précipitations de 0,1mm. Ce dispositif est plus précis, mais ne pourrait être déployé sur l'ensemble des 7 sites, pour des questions de coût et d'alimentation électrique [chercheuses, enquête].

D'autre part, les données produites doivent généralement faire l'objet d'une première mise en variable et en modèle pour pouvoir être diffusées, exploitées et utilisées dans d'autres travaux de modélisation hydrologique ou hydraulique. C'est le cas des hauteurs d'eau qui doivent être transformées en débits. Cette transformation, grâce à la production préalable de courbes de tarage, implique toujours des marges d'erreur et elle demande à être réévaluée régulièrement.

Jusqu'ici, l'investissement dans la production, le formatage et la standardisation des données sur l'eau à l'échelle nationale a surtout concerné des paramètres physiques. Les usages de l'eau font quant à eux l'objet de suivis moins systématiques et moins facilement accessibles, au niveau des Agences de l'eau, via les redevances : *« On est allé à l'AERM il y a quelques mois et on a fait le tour des bureaux, on est remonté jusqu'aux archives. On sait qu'ils ont une base de données avec une vingtaine d'années de données de manière organisée mais qui n'est pas dans le format de la BNPE, ce qui fait que ce n'est pas dans la BNPE. On sait aussi que si on veut vraiment aller plus loin, il y a tout un tas de documents disponibles aux archives qu'ils peuvent photocopier et nous envoyer. »* [chercheur-modélisateur, enquête].

3.1.2 Des enjeux entre homogénéité et épaisseur temporelle des données

Pour contribuer à représenter et étudier le changement climatique, les données doivent permettre d'appréhender les phénomènes physiques avec une certaine épaisseur temporelle. Cependant, le suivi temporel soulève des questions de continuité et d'homogénéité des séries de données.

En France, le budget total annuel des services d'hydrométrie s'élève à environ cinq millions d'euros : « *On considère que la création d'une station hydrométrique coûte initialement environ 25 000 € et que son coût annuel de fonctionnement (maintenance, téléphone, alimentation électrique…) revient à environ 1 000 €. Si l'on compte les frais de personnel associés à l'entretien des stations, à la réalisation de jaugeages et au dépouillement et la bancarisation des données, il faut rajouter environ 3 000 € par an et par station* » (Lebecherel et al., 2015). La capacité limitée à obtenir de tels financements contribue à rendre difficile le maintien de réseaux de mesure sur de longues périodes. Des logiques de rationalisation du réseau d'observation de Météo-France ont conduit à une diminution du nombre de stations météorologiques *: « Depuis la fermeture du chalet en 1997, il n'existe plus de station météorologique mesurant l'épaisseur de neige sur les crêtes des Hautes-Vosges. La station Météo-France d'Altenberg (1084 m), où étaient mesurées aussi des données d'enneigement, a fermé en 1985. »* (Wahl et al., 2007). Ainsi, les séries d'observation de la neige dans les Vosges sont pour la plupart discontinues (Giacona et al., 2019). La continuité est considérée comme une qualité rare pour l'étude du changement climatique, même quand celle-ci n'est pas la raison première du suivi de l'enneigement. C'est le cas de l'association Niv'OSE dont les données récoltées sur le manteau neigeux servent à la prévention du risque avalanche : « *Au départ, je voulais aider le public, nos amis avec lesquels on partait en montagne ou les autres. Mais j'avais quand même déjà une arrière-pensée scientifique, à savoir d'exploiter tout cela un jour. Et voilà que soudain on ne parle que des évolutions climatiques aujourd'hui. Et là, on a une donnée extraordinaire : c'est la seule série continue dans les Vosges, alors vous comprenez que c'est un trésor archéologique !* » [association Niv'OSE, enquête]. Ainsi, l'existence de séries temporelles longues de données est souvent liée à la présence d'un autre enjeu antérieur à celui du changement climatique. Dans le cas du bassin versant expérimental du Strengbach, ce sont les pluies acides qui ont motivé la création de l'Observatoire : les données collectées depuis 1986 - écologiques, chimiques, hydrologiques et météorologiques - ont initialement servi à en étudier l'impact sur la forêt vosgienne.

Outre les questions de continuité nuisant à la représentativité temporelle des données, les séries d'observation ne sont pas homogènes les unes par rapport aux autres. Des évolutions tant institutionnelles que méthodologiques ont pu affecter le recueil des données : « *Après le retour à la France, en 1918, l'ensemble du réseau d'observation est repris par la Météorologie nationale, puis par Météo France, avec le concours de réseaux bénévoles et de différentes institutions* » (Giacona et al., 2019) ; « *C'est aussi un problème d'étalonnage. Durant cette décennie, on n'avait pas forcément les mêmes méthodes que plus tard* » [association Niv'OSE, enquête].

L'obtention de données représentatives de l'évolution climatique est contrainte par la variabilité météorologique de l'enneigement, d'un hiver à l'autre : « *Pour cette première intervention, Bruno Vermot-Desroches, chef du Centre Météo France de Besançon et référent neige pour le Jura et les Vosges, a présenté les évolutions climatiques dans ces deux massifs montagneux au cours des années passées. Les courbes d'enneigement présentées ont permis de mettre en évidence la variabilité naturelle qui existe au niveau de l'enneigement, puisque l'on pouvait constater que tous les hivers différaient les uns des autres, tantôts froids ou modérés, tantôt précoces ou tardifs. Brunot Vermot-Desroches a ainsi souligné la difficulté d'obtenir des données représentatives liées à l'enneigement compte tenu de ces variations météorologiques […] »* (Greuez, 2018). Malgré ces difficultés pour établir une évolution climatique, des tendances d'évolution du climat ont tout de même pu être identifiées.

Afin de pallier à une absence locale de données, des données issues de stations voisines sont utilisées et/ou croisées dans les travaux de recherche en climatologie : « *Les données de la station météorologique du Feldberg, point culminant de la Forêt-Noire en Allemagne (1493 m) et situé à 75 km à l'ESE du massif du Hohneck, ont donc été aussi utilisées comme données de référence (Deutscher Wetterdienst : DWD). Les données quotidiennes de température et de précipitations ont été obtenues depuis 1994 pour la station automatique ouverte par Météo-France au Markstein (1184 m) »* (Wahl et al., 2007). Des procédés sophistiqués ont été développés par Météo France afin de pallier aux limites des observations en termes d'homogénéité et de représentativité dans l'espace, à travers des procédures de réanalyse, permettant de reconstruire et harmoniser les données (voir section suivante). Ces réanalyses font intervenir non seulement toutes les observations météorologiques de terrain disponibles, mais aussi des modélisations liées à la météorologie et au manteau neigeux (Giacona et al., 2019).

3.2 Modélisations et simulations numériques

Depuis la fin des années 1960, la climatologie, la météorologie, l'hydrologie et l'hydraulique se sont appuyées de plus en plus largement sur des modèles numériques pour représenter les différents processus en jeu : circulation atmosphérique, températures, précipitations, infiltration, ruissellement, propagation des débits… Pour une présentation générale de la modélisation dans les champs de la climatologie, de la météorologie, de l'hydrologie et de l'hydraulique, le lecteur peut se reporter à l'annexe 1.

Les modélisations et simulations numériques constituent des représentations d'une réalité donnée dont la complexité ne permet pas de se satisfaire d'une métrologie seule. Elles visent aussi à produire des représentations sur lesquelles on peut construire des projections plausibles. Elles sont utilisées à la fois pour comprendre un phénomène (fonction heuristique) et se représenter ses évolutions possibles (fonction prédictive). Elles s'intègrent en particulier dans de nombreux exercices de prospective au sein desquels elles sont associées à la construction de scénarios (récits).

La confiance dans les modèles ou les simulations ne va pas de soi. L'enjeu pour une modélisation ou une simulation c'est qu'on ne dise pas d'elle que « c'est une simple fiction », mais qu'elle est « une fiction réaliste ». Le travail de modélisation revient à sélectionner les variables, mécanismes, compartiments environnementaux d'intérêt, et à déterminer la résolution spatiale et temporelle adaptée à l'objectif de gestion. Il s'agit donc de mobiliser, d'adapter ou de développer des modèles théoriques jugés les plus pertinents pour chaque dimension retenue. Ce faisant, des hypothèses, des simplifications sont opérées et les incertitudes sont alors cadrées et mises en risque. Les modèles conservent toujours une forme d'opacité irréductible même pour leurs concepteurs. Pour autant, les modélisateurs déploient aussi des ressources pour construire une confiance dans leurs modèles, grâce à leur maîtrise des raisonnements mathématiques et physiques, en repérant des régularités de comportement, en développant une intuition concernant le comportement du système, etc. Ils empilent donc des vérifications pour assurer la confiance sur les résultats hors de la communauté des modélisateurs. Mais il y a aussi des facteurs qui peuvent ébranler cette confiance: lorsque les simulations sont en décalage trop important avec les résultats d'autres modélisations, lorsqu'elles sont trop éloignées des représentations habituelles du phénomène et ne parviennent pas par exemple à reproduire des traits familiers et porteurs de sens pour des utilisateurs, lorsque les hypothèses et sources d'incertitude ne sont pas suffisamment explicitées ou enfin lorsque les hypothèses et simplifications opérées paraissent trop fortes…

Nous portons ici une attention plus particulière aux pratiques de validation des simulations (comparaison avec des mesures in situ, inter-comparaison avec d'autres simulations, aptitude à reproduire des phénomènes passés…). Nous nous intéressons aussi au format de représentation des simulations et à leur capacité à susciter l'adhésion et à favoriser la circulation des résultats.

3.2.1 Modélisations et gestion des incertitudes

Risques, incertitudes et complexité sont liés. La complexité produit des incertitudes, incertitudes que les sociétés modernes cherchent à « mettre en risque ». Pour autant, le risque et l'incertitude ne sont pas seulement le produit d'un monde toujours plus complexe : ils sont aussi socialement et politiquement construits (Reghezza, 2015). En général, on distingue les notions de risques et d'incertitudes par la capacité à inscrire un évènement et ses conséquences dans un espace standardisé de calcul. Si on retient avec Beck (Beck, 2001) que la notion de « risque » renvoie à la volonté de contrôler les effets imprévisibles des décisions ou des actions humaines et sociales, on peut aussi, comme le propose Reghezza (2015) voir dans l'incertitude radicale pas tant un type

d'évènement que ce que la société du risque n'arrive pas à inscrire dans les dispositifs cognitifs ou discursifs qu'elle forge.

Cette section montre comment des chercheurs construisent de la confiance dans les chiffres qu'ils produisent grâce à leurs modèles, en les combinant à des approches statistiques ou en développant des approches multi-modèles. Cette section met en exergue les difficultés liées à la représentation des extrêmes et comment les modélisateurs gèrent ces difficultés. Elle montre aussi les incertitudes qui sont laissées de côté (occupation des sols par exemple) et celles qui sont irréductibles.

Les modélisations climatiques et hydrologiques mobilisées pour évaluer les effets du changement climatique sur les ressources en eau sont représentées dans la Figure 12. Ce schéma montre (i) ce que les modèles climatiques et hydrologiques représentent par des algorithmes, (ii) les relations entre les modèles, (iii) les données sur lesquelles ils s'appuient et (iv) la manière dont ils conçoivent la construction de la confiance dans leurs résultats, à partir de l'estimation des biais.

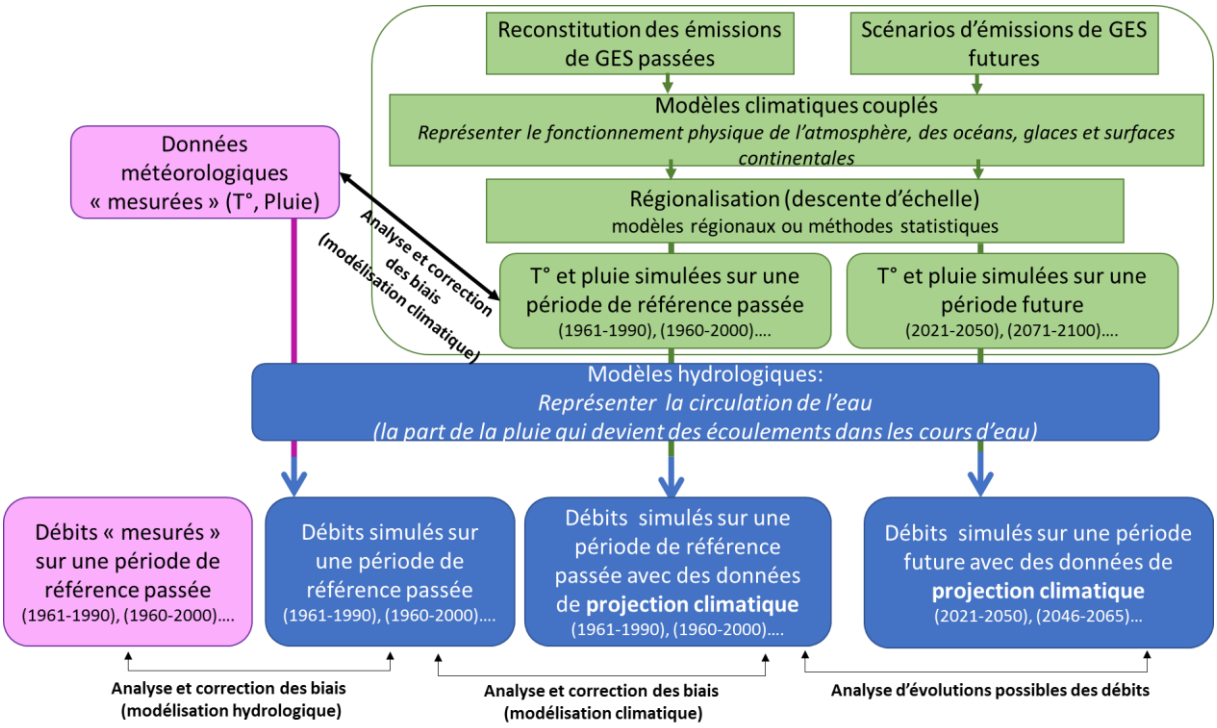


Figure 12 : Schéma des relations entre modélisations climatiques, hydrologiques et données

Dans les travaux de modélisation, ce qui est qualifié d'incertitude correspond à ce qui est associé à une promesse de maîtrise : l'incertitude est valorisée dans la mesure où elle est transformable en risque calculable, où elle peut être apprivoisée. L'incertitude est interprétée comme un risque en devenir. L'incertitude radicale, elle, n'est jamais explicitement discutée, même si on peut faire l'hypothèse qu'elle est décelable, en creux, dans certains choix de modélisation opérés et dans les effets de cadrage.

Les travaux déploient différentes méthodes pour quantifier l'incertitude et la mettre en risque : approches multi-modèles, outils statistiques ou prise en compte d'une diversité de scénarios

d'émissions. Il s'agit en particulier d'estimer les biais entre les résultats de la modélisation, les données mesurées du passé au présent et de les corriger. Ce travail renvoie à plusieurs notions : le calage, la réanalyse et le débiaisage.

Le calage intervient dans la construction d'un modèle[6]. Il s'agit de modifier des paramètres du modèle, de les optimiser, pour que ses résultats se rapprochent d'un jeu de données observées, pour réduire au maximum la différence entre les deux. Ensuite, pour valider le modèle et juger sa robustesse, il faudrait pouvoir s'appuyer sur un jeu de données différent : « *Et c'est là qu'après les gars me disaient :* « *Théoriquement, si on voulait vraiment bien faire le travail, il faudrait qu'on se garde une série de données pour faire du calage, et une autre série indépendante de débits mesurés pour faire de la validation ». Ils m'ont dit que malheureusement ils n'ont pas toujours le temps et les moyens de faire ça* » [DREAL, enquête].

De nombreux travaux en hydrologie considèrent que, pour représenter de manière robuste un régime hydrologique, des chroniques de données d'au moins 30 à 40 ans sont nécessaires. Si on veut des données distinctes pour le calage et la validation, il faudrait alors des chroniques d'au moins 60 à 80 ans, ce qui n'existe que sur certains grands fleuves. Certains travaux montrent aussi qu'il est possible d'obtenir un calage robuste en vue d'un exercice de prévision avec moins de 10 ans de données tant que ces données incluent une variabilité des conditions hydrométéorologiques jugée suffisante (Perrin et al., 2007). Pour la projection, pour tester la robustesse des modèles en situation de projection à plus long terme, des travaux proposent de les tester sur des bassins versants non jaugés qui ont les caractéristiques climatiques projetées (Singh et al., 2011).

Ainsi le changement climatique interroge les pratiques de calage dans la modélisation hydrologique, dans la mesure où ce changement implique une non-stationnarité des régimes hydrologiques. Ces pratiques concernent aussi les modèles dits « à base physique », qui sont souvent construits en fonction des données disponibles. C'est le cas par exemple des sous-modèles du modèle LARSIM (voir annexe 3).

Le modèle peut aussi, ensuite, faire l'objet d'un « débiaisage » qui correspond à une procédure de traitement statistique de correction des sorties d'un modèle, alors qu'il a déjà été calé. L'enjeu est de chercher à éliminer ou à minimiser les écarts résiduels entre simulations et observations. À la différence du calage, la procédure ne revient donc pas à modifier le modèle lui-même et il agit seulement sur ses sorties. On a plutôt affaire ici à une approche « curative » des erreurs de simulation : « *ensuite, il y a une autre étape, qui est faite ou pas (…) qu'ils appellent le débiaisage. C'est-à-dire qu'on essaye de faire coller au mieux les résultats du modèle avec la réalité observée. À ce moment, on applique des coefficients maille par maille, en fonction du paramètre qu'on a déjà utilisé, pour faire correspondre au mieux ce que sort le modèle météo avec ce qu'on mesurait dans le passé. Pour faire ça, il y a plusieurs façons, on le fait soit sur des moyennes interannuelles, soit en essayant de représenter la distribution des valeurs mesurées, la méthode quantile-quantile. Et une fois qu'on a fait ce débiaisage dans le présent, on met les mêmes coefficients dans le futur* »

[6] Même si le modèle est à base physique, un calage du modèle reste toujours nécessaire.

[Administrateur, enquête]. Sur les vertus du débiaisage, les positions divergent au sein de la communauté des modélisateurs : « *À l'IRSTEA j'ai discuté avec des personnes de l'équipe de Lyon qui me disaient : « Je trouve que ce n'est pas bon le débiaisage, ça fausse les choses ». Je me rends compte qu'il y a plein de façons de faire différentes qui peuvent expliquer qu'on ait des tas de résultats différents*» [DREAL, enquête]. Pour certains chercheurs, les incertitudes qui entourent le débiaisage et qui ne sont pas vraiment explicitées ne les rend pas inutiles pour autant : « *l'impact de la méthode d'ajustement statistique est souvent passée sous silence dans la littérature, qu'on ne sait pas forcément très bien évaluer, même si, a priori, on peut quand même penser que c'est mieux de faire des corrections de biais que de ne pas en faire du tout* » [Modélisateur, enquête].

La réanalyse est considérée par les modélisateurs comme un processus itératif entre modélisation et observations. Le processus suppose une évaluation des différences entre les sorties du modèle et les observations pour ne retenir que les « données » pour lesquelles la différence entre les deux approches reste sous un seuil que le modélisateur définit. Le produit de la réanalyse est donc une combinaison de « données » issues de la modélisation et d'observations: *« La réanalyse est une notion importante en climatologie, en gros on fait tourner un modèle sur le passé en optimisant son adéquation avec ce qui a été réellement observé. Cela nous permet de décrire au mieux quelles ont été les conditions météorologiques ou climatiques partout dans l'espace, à n'importe quelle altitude etc., pour toutes les variables, y compris celles qu'on n'observe pas »* [Modélisateur, enquête].

Nous proposons maintenant de centrer l'analyse sur d'autres incertitudes que les communautés de modélisateurs ou les usagers de la modélisation (administration d'État en particulier) identifient et qui ne sont pas encore toujours intégrées dans les pratiques de modélisation. Certaines ne sont pour l'instant pas explicitement traitées dans la conduite des projets et la présentation des résultats, d'autres le sont et les modélisateurs déploient différentes tactiques pour les aborder.

Nous traitons ici des incertitudes liées aux modèles climatiques et concernant : (i) l'état initial du système retenu pour faire des simulations climatiques, (ii) la procédure de descente d'échelle des analyses du climat, (iii) la représentation de la pluie (et des nuages) et (iv) la représentation des extrêmes. Ces incertitudes peuvent être exprimées par des modélisateurs ou des usagers des modélisations qui n'en sont pas spécialistes. Nous analysons enfin les incertitudes liées aux modèles hydrologiques autour de la représentation des extrêmes (sécheresses hydrologiques, crues). Les incertitudes que nous abordons ci-après peuvent être liées à ce que nous avons écrit précédemment sur la gestion des biais des modèles.

Pour l'administration qui fait localement appel à des modélisations pour répondre à des enjeux gestionnaires, en particulier en situation de fleuve transfrontalier, les conditions initiales retenues, à partir desquelles on fait tourner les modèles climatiques impactent significativement leurs résultats : *« avec un même modèle météo, on n'avait pas forcément les mêmes résultats en fonction des conditions initiales, c'est-à-dire la teneur initiale de dioxyde de carbone que je prends à la date initiale à partir de laquelle je fais tourner mon modèle météo, 1850»* [DREAL, enquête]. Depuis les années 1970, les modèles climatiques et météorologiques ont convergé : les GCM sont en effet utilisés à la

fois pour la prévision météo et pour l'étude du climat. Les fondements de la modélisation sont donc les mêmes pour la météo et le climat. Pour autant, il y a bien des différences, en particulier dans les pratiques de paramétrisation physique, pour rendre compte de phénomènes de court terme pour la météo, et de long terme pour le climat. Cela concerne en particulier les conditions initiales. La prévision météo y est extrêmement sensible. La modélisation du climat à long terme l'est moins, dans la mesure où elle ne vise pas à obtenir une prévision à une date précise, mais des caractéristiques statistiques du climat passé et futur. Pour cette dernière, l'enjeu va plutôt être d'être capable d'intégrer des facteurs physiques, dont la prévision de court terme peut s'abstraire, tels que les variations océaniques, les transports de chaleur ou la végétation (Guillemot, 2007). Or dans les projets analysés ici, qui portent sur la modélisation hydrologique des effets du changement climatique, l'horizon (2050) est un horizon intermédiaire entre les horizons privilégiés pour la prévision climatique (de l'intra-saisonnier au décennal) et pour la projection statistique du climat (plutôt horizon centennal). On se situerait donc entre la prévision climatique et la modélisation du climat. Cet horizon intermédiaire, ainsi que les enjeux de couplage entre modèles météo/climatiques et modèles hydrologiques, peuvent expliquer les difficultés exprimées par un utilisateur que nous avons interrogé, et retranscrites ci-après.

La descente d'échelle a fait l'objet depuis plusieurs années d'importants investissements : « *[il y a] la méthode classique où on fait une descente de maille en se basant sur les moyennes interannuelles des paramètres comme la température, la pluie, etc. Et j'ai découvert que Météo France avait développé une autre méthode basée sur les quantiles-quantiles. C'est-à-dire qu'on ne se contente pas de regarder si on est bon en moyenne, mais on essaie de respecter la distribution des valeurs faibles et fortes. Ce qui est important en hydrologie parce que si l'on veut travailler sur l'étiage où les crues, il ne faut pas qu'on loupe l'épisode sec et l'épisode humide On avait testé les deux méthodes dans le cadre du projet FLOW MS, et ô surprise, c'était une confirmation qu'en fonction de la méthode qu'on utilisait, on n'avait pas forcément les mêmes résultats au bout du compte, à scénario météorologique équivalent* » [DREAL, enquête] *; [Pour le projet CHIMERE 21], on devrait donc avoir plusieurs modèles climatiques et plusieurs modèles de descente d'échelle pour évaluer et quantifier les différentes sources d'incertitudes le long de la chaîne de modélisation »* [Modélisateur, enquête]. *« C'est en théorie un problème insoluble, c'est-à-dire comment arriver à quelque chose de juste localement partout, alors qu'on a des informations seulement à quelques points ou sur des mailles plus grosses. C'est infaisable, mais on essaie de faire au mieux »* [Modélisateur, enquête].

Par ailleurs les projections concernant la pluviométrie montrent une grande variabilité selon les exercices du GIEC et les travaux de modélisation qu'il synthétise. Cela conduit les modélisateurs à innover dans la manière dont ils présentent leurs résultats *« on avait utilisé des projections climatiques du dernier exercice du GIEC (plus récentes qu'Explore 2070) qui sont disponibles sur le portail DRIAS (un portail de service climatique géré par Météo France) où ils ont mis des projections « officielles » françaises et plusieurs scénarios d'émission de gaz à effet de serre. Et, on s'est rendu compte que ces projections étaient complètement différentes en termes de précipitations* [que celles de l'exercice précédent du GIEC sur lesquelles les modélisateurs s'étaient appuyés pour Explore 2070]. *Donc, quand on a vu ça, on a décidé avec l'agence de l'eau de ne pas donner des chiffres*

définitifs sur les projections hydrologiques futures mais de leur donner des trajectoires possibles, de faire des fiches synthétiques, et de leur proposer des choix pour qu'ils puissent faire des choses à partir de là » [Modélisateur, enquête].

Enfin, la question de la représentation des étiages et des crues par la modélisation paraît assez paradoxale. D'un côté, les synthèses du GIEC et les analyses reprises localement à partir de travaux de modélisation à l'échelle régionale centrent leur information sur l'augmentation de la fréquence ou de l'intensité des évènements extrêmes. De l'autre, il s'agit de ce que les modèles hydrologiques ont le plus de difficultés à représenter : « *dans certains cas, sur le projet FLOW MS, on avait parfois des réponses assez bonnes sur les crues mais qui ne marchaient pas du tout à l'étiage. Sachant qu'à l'étiage, l'un des gros problèmes qu'on a est aussi la qualité de la mesure… c'est paradoxalement plus difficile d'avoir une bonne mesure de débit lorsqu'il n'y a pas beaucoup d'eau que lorsqu'il y en a beaucoup (…) on est donc obligé en permanence de recaler les stations, les collègues travaillent en permanence pour faire des adaptations qui tiennent compte de la surélévation de la hauteur, du fait de la présence d'habitats aquatiques et dès qu'il y a peu d'eau, le moindre caillou fait que le niveau d'eau est influencé. Autant on a pris l'habitude de faire ces corrections depuis une dizaine d'années, autant on ne sait pas comment c'était mesuré dans le passé. On n'est pas sûr qu'il y a eu les mêmes correctifs, le même soin pris par les collègues pour faire les mesures de débit* » [DREAL, enquête] ; *« si on s'intéresse aux crues, l'aspect le plus important est quand même la précipitation, et on sait que c'est très mal représenté par les modèles climatiques »* [Modélisateur, enquête].

Enfin, certaines incertitudes sont identifiées, tout en étant pour l'instant laissées hors du champ du travail de modélisation. Il s'agit en particulier des usages de l'eau : *«Pour la plaine d'Alsace et L'Ill, les résultats étaient très incertains. Ils avaient du mal à reproduire l'hydrologie de cours d'eau très anthropisés. Du coup, leur modèle hydrologique n'était pas efficient (…) Du coup, on a globalement décidé de laisser tomber ces cours d'eau. On n'arrive pas à reconstituer les débits actuels, donc ça ne veut plus rien dire en termes de prévisions »* [AERM, enquête]. La prise en compte des usages de l'eau est l'un des enjeux du projet CHIMERE 21 (Terrier et al., 2018). C'est aussi le cas de l'évapotranspiration de la végétation et des relations entre occupation des sols et écoulements. Dans les modélisations, il s'agit pour l'instant d'un paramètre circonscrit à un pourcentage. Il n'y a pas de modélisation des effets du climat sur la végétation. Or la végétation peut se développer plus précocement ou tardivement, elle peut mourir et être remplacée naturellement ou par l'action de l'homme par d'autres espèces, etc.

Enfin, il y a des incertitudes qui sont irréductibles : ce qui relève de la décision, de l'action, de la volonté et du pouvoir, de la liberté et de l'indétermination. Les relations entre changement climatique et ressources en eau (Figure 13) se caractérisent par des interdépendances entre le climat, exprimé par des variables telles que la température et la pluviométrie, d'abord représenté à l'échelle globale pour ensuite être régionalisé, et des eaux qui restent largement représentées et gouvernées à l'échelle locale. Or que ce soit le climat futur ou le « milieu aquatique » futur, ils sont aussi largement dépendants de ce que sera la société du futur:

- ses émissions de GES en particulier, et donc le type de production et de consommation alimentaire, énergétique, les modalités de transport des biens et des personnes.
- Et les modes d'organisations politiques et de gestion qui organiseront ces productions, ces flux… les perceptions et les valeurs accordées aux différents éléments de nature, que ce soient les étiages ou les crues par exemple.

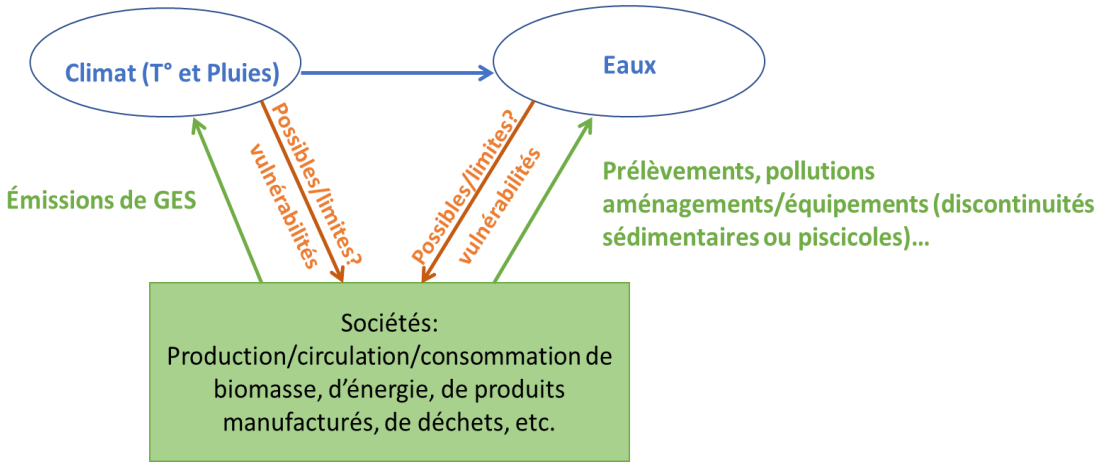


Figure 13 : Schématisation des relations entre climat et ressources en eau

3.2.2 Des modélisations à la croisée entre enjeux scientifiques et action publique

Les modélisations hydrologiques dont il est question ici ont la particularité de s'inscrire dans la production de savoirs pour l'action. Elles se retrouvent donc à la croisée d'enjeux scientifiques (robustesse de la méthode qui permet d'administrer une preuve) et d'enjeux politiques. Or, les critères qui comptent pour les modélisateurs et les gestionnaires ne sont pas nécessairement les mêmes. Par ailleurs, il y a ensuite tout un travail de traduction quand l'information ou les résultats des modélisations circule au sein de l'action publique. Enfin, Rhin-Meuse est un territoire qui a la particularité de faire l'objet d'une gestion transfrontalière des fleuves, ce qui impacte le type de savoirs produits et la manière dont ils sont utilisés.

Ainsi, les gestionnaires accordent une priorité à la validation par des « données de terrain » qui ont déjà été mises en modèle dans des indicateurs qui caractérisent l'hydrologie des cours d'eau et qui sont donc inscrites dans leurs pratiques de gestion: « *Dans le cadre d'études comme Explore ou FLOW MS, ils utilisent des critères de Nash, Nash inversé, ou je ne sais quoi d'autre, pour considérer que leur calage est bon. Ce qui m'intéresse en tant que gestionnaire, c'est de comparer vos modélisations sur la base de grandeurs que j'utilise pour la gestion, c'est-à-dire le QMN à 1/5ème, le débit de crue : 10, 20,30, 50, etc. Ce qui m'intéresse c'est de voir quel est l'écart pour l'étiage sur le QMN à 1/5ème entre notre modélisation et ce qu'on observe à partir des débits mesurés. Et là, j'ai pu me rendre compte que le signal se dégradait encore plus fort quand on utilisait des paramètres hydrologiques qui nous servent à la gestion mais qui n'ont pas servi pour le calage. Les résultats étaient moins bons* » [DREAL, enquête]. Les modélisateurs préfèrent quant à eux produire leurs propres indicateurs qui lient débits

mesurés et modélisés. Ils sont en effet très attachés à une maîtrise et à une traçabilité des différentes étapes de la modélisation.

Ensuite, ce sont d'abord les administrations et leurs agents impliqués dans l'élaboration des études qui s'en servent. Leurs résultats circulent relativement peu : « *je ne savais pas que cela existait et donc l'étude a vécu sa vie* » [DREAL, enquête]. Pour dépasser ce type de problème, dans le projet MOSARH21, les modélisateurs impliqués ont présenté leurs résultats sous forme de fiches : « *c'est un format pratique, qui passe bien, qui constitue un bon moyen de communiquer* » [Modélisateur, enquête]. La CCI ne connaissait pas l'existence de ces fiches. C'est grâce au projet Clim'Ability (voir section 5.1) que l'information a pu circuler. La CCI a ainsi utilisé ces fiches pour discuter avec des entreprises, des effets sur leurs activités du changement climatique sur le Rhin. Cette expérience a cependant été peu concluante. Elle révèle la tension entre (i) des demandes de prévision à court ou moyen terme des acteurs locaux et (ii) des travaux de modélisation, qui sont des outils de projection et qui s'intègrent plutôt dans des démarches prospectives : *« les informations de la fiche ne correspondent pas à ce dont l'entreprise de fret a besoin : l'entreprise, elle, fonctionne avec des hauteurs d'eau alors que la fiche fournit des débits, l'entreprise, elle, a besoin d'informations hebdomadaires ou bimensuelles alors que la fiche fournit des données mensuelles. J'ai dû expliquer à l'entreprise la différence entre prévision et projection* » [CCI, enquête].

Enfin, la gestion transfrontalière a aussi des effets sur les pratiques de modélisation et de projection.

Elle implique des compromis dans les choix des indicateurs : *« dans le cadre de MOSARH21 j'avais fait calculer le VCN7 en plus du VCN3, parce que je sentais que si l'on voulait discuter avec les partenaires situés à l'aval sur la problématique des étiages, il fallait pouvoir avoir le même instrument de mesure »,* ou des données météo : « *c'est aussi l'une des difficultés d'AMICE, c'est-à-dire qu'ils avaient fait un mix entre des résultats de Météo France, des résultats de la météo belge et des résultats de la météo néerlandaise. À un moment donné ils avaient touillé ça un peu et ils avaient dit : « on prend un scénario, c'est-à-dire qu'on répartit les résultats au prorata de la surface du bassin-versant ». Bon, ça me semble un peu difficile de prendre une température, de faire 30 % de la France, 25 % des Néerlandais et le restant de la Belgique, je ne suis pas sûr que ce soit très scientifique comme méthode d'interpolation, pour essayer de dégager un scénario humide, un scénario sec, un scénario médian, etc.* » [DREAL, enquête].

Pour les gestionnaires, dans un contexte transfrontalier, l'existence de données homogènes sur l'ensemble du cours d'eau est cruciale : « *Au niveau international, quand on veut mener une modélisation qui concerne plusieurs pays, il y a des soucis pour récupérer les données d'entrée, on n'a pas tous les mêmes formats, on n'a pas forcément la même discrétisation, ce qui pose des problèmes aux modélisateurs de manière générale. Des fois le cours d'eau s'arrête à la frontière parce qu'il n'y a pas le même modèle numérique de terrain ou des décalages etc. L'idéal est d'avoir des données européennes et donc le même format, ce qui évite de devoir recaler des choses aux frontières.* » [DREAL, enquête]. Cependant, pour les modélisateurs, ces données européennes ont une résolution moins bonne que les données nationales : *« des données européennes existent, mais elles ont une*

résolution moins bonne en termes d'horizontalité et de verticalité. Et comme il y a beaucoup de montagnes sur le Rhin, ça peut vraiment lisser l'altitude, et du coup en termes de neige… On sait déjà que les données les plus fines sous-estiment les précipitations en montagne, donc sur des données européennes, on craint le pire. » [Modélisateur, enquête]. Par ailleurs, d'autres facteurs interviennent dans les pratiques, qui relèvent d'attachements politiques et institutionnels encore largement nationaux : *« il serait malvenu de faire une étude sur l'impact du changement climatique, pour un maître d'ouvrage français sans utiliser les projections de Météo France ou du CNRM, le Centre National de Recherche Météorologique »* [DREAL, enquête], *« les Allemands veulent absolument leur modèle allemand, théoriquement, en tant que Français je devais dire qu'on prenait les bons résultats d'Explore 2070, généralement les Luxembourgeois suivent les Allemands, comment va-t-on pouvoir faire pour essayer de travailler en commun ? Sachant qu'en plus les Allemands disent : « Je veux travailler avec mon modèle hydrologique, c'est le modèle LARSIM », les Français disent : « Le modèle LARSIM c'est de la rigolade, on a le modèle GRP ». Je me suis donc dit que cela allait être rudement difficile de travailler ensemble sur un éventuel plan d'adaptation à l'étiage ou aux crues, si on a des tas de différences de modèles, qu'ils soient météo ou hydrologiques ; on risque d'avoir, à la frontière, de sacrés écarts »* [DREAL, enquête].

L'exercice de modélisation lui-même est un enjeu politique à différentes échelles. Cet enjeu s'incarne par exemple dans le choix de la crue de référence. Les débats autour de ces choix révèlent des différences dans la manière dont les territoires perçoivent leur vulnérabilité et l'urgence d'une action concertée. Ainsi, les Pays-Bas situés à l'aval du Rhin comme de la Meuse, tendent à privilégier des scénarios pessimistes concernant le risque d'inondation : *« les Néerlandais avaient même un scénario d'une augmentation de 30 % de la crue centennale, ce n'était donc pas rien. Lorsqu'on fait les calculs statistiques, actuellement c'est le niveau de la crue millénale, c'était donc assez décoiffant par rapport aux consignes nationales. Lesquelles, a priori, ne s'appuyaient pas sur rien puisqu'une étude assez sérieuse avait été faite »* [DREAL, enquête] ; « *les Néerlandais essayaient de (…) montrer que cela allait être la catastrophe, que les inondations allaient s'aggraver, qu'il fallait prendre des tas de mesures pour éviter cela. Et là, j'étais un peu perplexe parce que par ailleurs on avait des consignes de la DGPR (Direction générale de la Prévention des Risques) au niveau de la mise en œuvre de la Directive Inondation, qui nous disait que, d'après les résultats des études françaises (c'est à ce moment-là que j'ai entendu parler d'Explore 2070), le ministère avait estimé qu'il n'y avait pas lieu de changer, dans le cadre du changement climatique, les valeurs actuelles de référence au niveau des crues, que ce soit la crue fréquente, entre 10 et 30 ans, ou la crue moyenne, au sens de la Directive Inondation, qui est la crue centennale qui est celle qui nous sert de référence également pour la cartographie des risques au travers des PPRI. Ils ont dit qu'ils avaient fait l'analyse des tendances dans le présent, des projections avec Explore, et qu'a priori ils ne changeraient rien pour les inondations par débordement de cours d'eau. Le seul cas où ils majoraient la situation était dans le cas des submersions marines, ou là ils avaient décidé de relever d'un mètre les niveaux de submersion pour la crue centennale. Comme dans le bassin Rhin Meuse on est très loin de la mer du Nord, cela ne nous concernait pas »* [DREAL, enquête].

3.3 Conclusion

L'analyse des caractéristiques de ces modélisations nous permet de dégager des traits communs :

- l'importance, dans les pratiques, de l'avènement des ordinateurs qui a permis de trouver des solutions numériques à des équations qui n'admettent pas de solution analytique,
- le poids des paramétrisations.
- « l'interdépendance symbiotique » (Edwards, 1999) entre modèles et observations ainsi que l'importance de la représentation de l'état initial du système.

Dans cette conclusion partielle, nous souhaitons revenir d'abord plus précisément sur le dernier point qui renvoie aux relations entre la métrologie et la modélisation. L'analyse montre bien que « les données ne sont pas données » (Guillemot, 2009), et qu'elles relèvent aussi d'une construction scientifique. En effet, les « données », ou plus justement les « obtenues », demandent des efforts collectifs considérables de collecte et de formatage sur la durée, qui peuvent relever d'une modélisation. Les « données » ne servent pas seulement à construire un modèle (des observations qui servent à caler un modèle en construction), à valider les résultats qu'il produit (des observations qui servent à « débiaiser » les sorties du modèle), mais elles sont aussi elles-mêmes produites par des modèles (des observations sont réanalysées par des modèles, modèles qui permettent en retour de produire de nouvelles données qui viennent compléter ces « observations retravaillées»). Certes, dès que les modèles simulent le climat futur et ses effets, une mise en regard avec des « données observées » est impossible. Pour autant, on voit aussi que la représentation du passé n'est pas qu'une simple somme ou compilation d'observations, mais bien une construction complexe mêlant observations et modèles. Ainsi, la robustesse des modèles n'est pas strictement définie en fonction de l'adéquation de leurs simulations avec des « observations », dont la capacité à représenter directement des éléments de nature (température, débit, pluie, vents…) aurait été résolue en amont, une bonne fois pour toute, serait indiscutable et indiscutée. On a plutôt affaire à une co-construction entre la robustesse des modèles et des données.

Ensuite, cette analyse nous a permis d'identifier de nouvelles questions de recherche relatives aux pratiques et enjeux de la modélisation hydrologique sur le changement climatique :

- L'analyse suggère que les communautés de climatologues et d'hydrologues ces dernières décennies n'ont pas accordé le même rôle à la représentation des phénomènes physiques dans leurs pratiques de modélisation. Cela s'explique certainement par les dynamiques de la recherche dans les champs de l'hydrologie et de la météorologie et par leurs relations à des enjeux gestionnaires. Comment ces logiques s'articulent aujourd'hui dans des questions scientifiques communes sur le changement climatique ? Comment ces logiques transforment-elles en retour les pratiques de modélisation ?
- Comment les horizons temporels associés à des logiques de prévision météorologique ou de prédiction climatologique s'articulent avec les horizons de la modélisation hydrologique ? Comment ces articulations transforment-elles en retour les pratiques de modélisation ?

Enfin, se poser la question de la disponibilité en eau dans le futur pour le Grand Est, le bassin de la Meuse ou encore la ville de Strasbourg n'a pas vraiment de sens dans l'absolu mais en fonction de ce qu'on veut faire de l'eau et comment on veut vivre avec. La question des futurs de l'eau est donc aussi une question de choix collectifs. Dans les sections suivantes, nous proposons d'étudier comment localement, les acteurs se saisissent (ou pas) des enjeux que peuvent poser le changement climatique dans les territoires qu'ils occupent ou gèrent.

4 Savoirs et actions locales en matière d'adaptation au changement climatique

Est-ce que le changement du climat modifie, influence la gestion de l'eau ou de la neige localement ? Si oui comment ? Nous proposons d'explorer ces questions en cherchant plus spécifiquement à qualifier les relations entre savoirs/ignorance & actions/inactions.

Nous concevons l'ignorance comme étant constitutive des savoirs et c'est dans ce cadre que nous abordons les questions d'incertitudes. En quoi le savoir ou l'ignorance contribuent à expliquer le cours des actions ? En quoi les savoirs ou les incertitudes sur le changement climatique contribuent-elles à expliquer comment localement les gestionnaires des services d'eau potable dans les Vosges interprètent des crises et dessinent (ou pas) des solutions, ou encore s'inscrivent dans des logiques anticipatrices ?

Cette analyse s'est fondée sur des entretiens semi-directifs réalisés :

- sur la gestion des activités de sports d'hiver, auprès d'élus locaux.
- sur la gestion de l'eau potable (AEP), auprès (i) des services d'eau (collectivité : élus, adjoints ou directeur des services techniques, opérateur privé de services d'eau), (ii) de référents eau et changement climatique dans différentes administrations publiques (DREAL, DDT) et (iii) des financeurs : Agence de l'eau et Conseil départemental.

L'enquête a porté sur 16 communes[7], dont 12 font partie de la Communauté de Communes des Hautes Vosges, 3 de la Communauté d'Agglomération de Saint-Dié, et 1 de la Communauté de Commune des Ballons des Hautes Vosges (Figure 14).

[7] Vingt-sept communes ont été contactées, parmi lesquelles dix n'ont pas donné suite et une a répondu défavorablement.

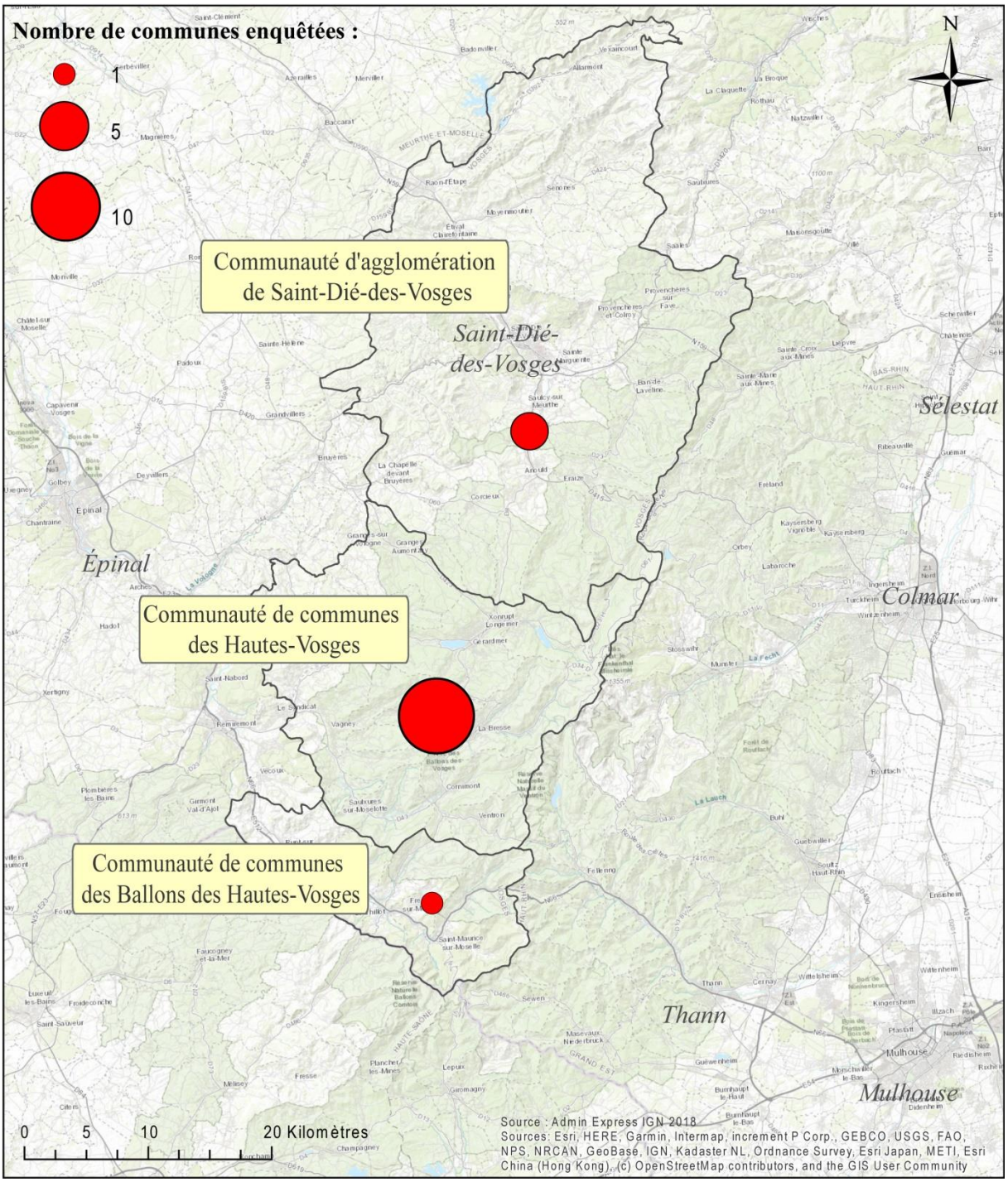


Figure 14: Distribution des communes enquêtées au sein des EPCI

La quasi-totalité des entretiens a été menée auprès des maires (14 communes), parfois accompagnés d'un adjoint ou du secrétaire général de la commune (3 cas). Les deux entretiens où le maire n'était pas présent ont été réalisés auprès d'un directeur des services techniques et/ou d'un adjoint.

Les entretiens ont été menés en face-à-face, excepté l'un d'entre eux réalisé par téléphone, entre mars et juillet 2019. La thématique de l'AEP a été développée dans l'ensemble des entretiens, tandis que l'enneigement a été abordé dans 7 communes. La place consacrée à l'enneigement et à l'AEP dépend du profil de la commune (présence de pistes de ski alpin notamment) et des personnes enquêtées (en fonction de la spécialité des adjoints). Des entretiens ont été réalisés auprès de trois

maires et d'un adjoint communal également ciblés pour leur fonction d'élus de la Communauté de Communes des Hautes Vosges.

L'objectif de ces entretiens était d'appréhender la place du changement climatique dans la gestion de la disponibilité de l'eau et de l'enneigement à l'échelon communal. Plus particulièrement, il s'agit de comprendre sur quelles représentations, diagnostics et hypothèses d'évolution se basent les politiques mises en œuvre. Les acteurs ont ainsi été interrogés sur les causes des évolutions perçues (ou attendues), sur les facteurs à l'origine d'éventuels problèmes de disponibilité, ou encore sur les justifications données aux actions mises en place et/ou envisagées.

Avant de présenter les résultats de l'enquête sur l'eau potable (section 4.2) et l'enneigement (section 4.3), nous proposons une synthèse des savoirs issus de la géographie physique sur la circulation de l'eau dans les Hautes Vosges (section 4.1). La synthèse relative à l'ensemble du massif des Vosges est disponible en annexe 4.

4.1 Que nous dit la géographie physique de la circulation de l'eau dans les Hautes Vosges ?

4.1.1 Les précipitations liquides et solides

La pluviométrie annuelle est abondante (1200 à 1500 mm/an) voire, localement, très abondante dans la zone d'étude (plus de 2100 mm/an) et très contrastée spatialement. La carte des précipitations moyennes annuelles (Figure 15) fait ressortir l'augmentation très forte des lames d'eau par effet orographique le long de la ligne de crêtes principale des Vosges. Le gradient pluviométrique qui en résulte est très accusé (Figure 15) de l'ordre de 600 mm sur 20 km à l'est de Remiremont.

La connaissance de la pluviométrie annuelle est imprécise pour certains bassins (par exemple la Moselotte à Vagney) en raison d'un sous-échantillonnage pluviométrique, on peut néanmoins l'estimer avec un certain réalisme par la connaissance du débit moyen et d'une valeur approchée de l'évapotranspiration réelle (ETR).

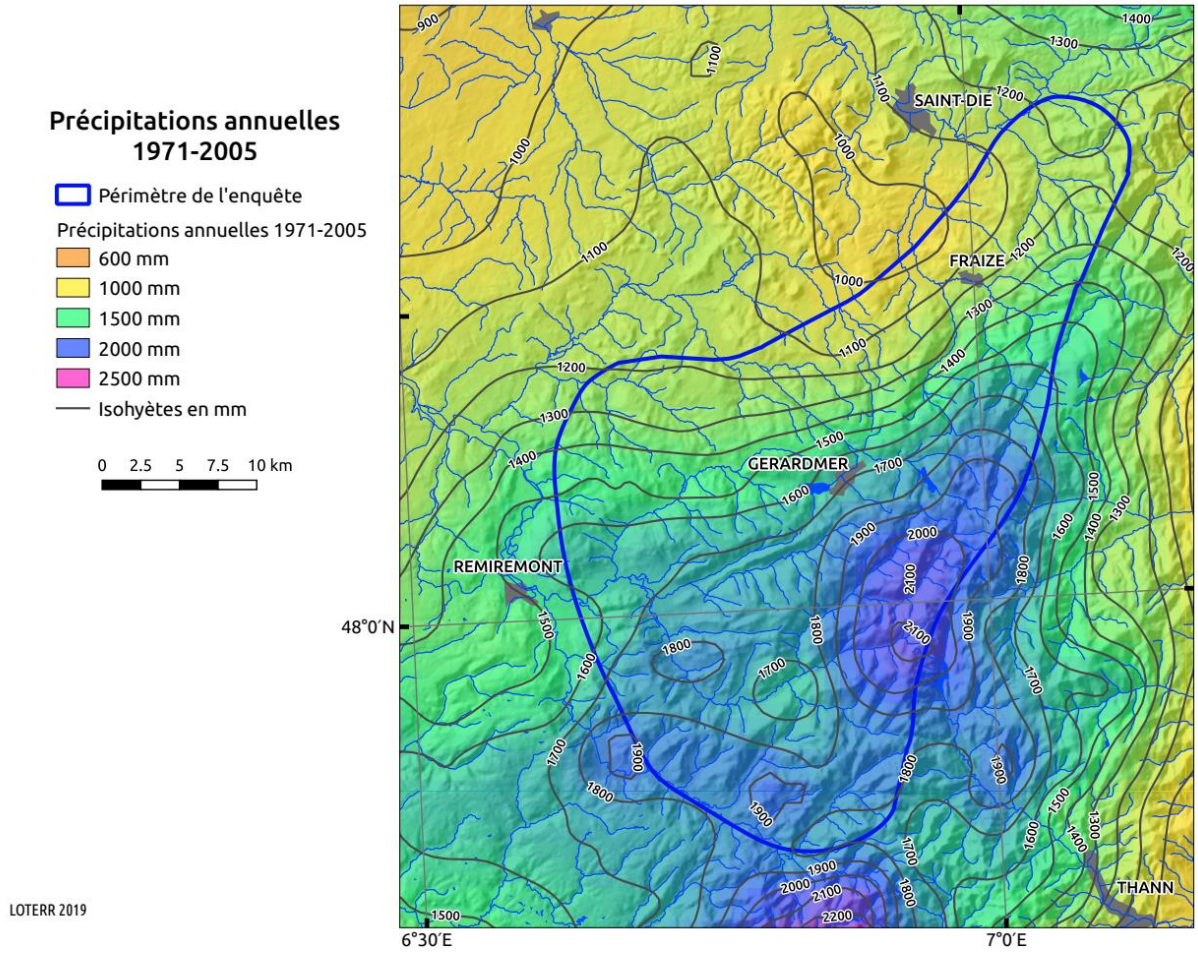


Figure 15 : Cartographie des précipitations moyennes annuelles sur la période 1971-2005. Source des données : Météo-France.

La neige représente une part importante des précipitations du semestre froid (novembre à avril) mais l'irrégularité interannuelle est très grande. N'importe quel mois d'hiver peut connaître une disparition du manteau neigeux pendant plus de 15 jours même en février (Paul, 1998). D'autres années, le manteau neigeux peut dépasser 2 mètres au-dessus de 1100 m d'altitude pendant plusieurs semaines.

4.1.2 Les pertes par évapotranspiration

L'offre évaporatoire ou évapotranspiration réelle, qui dépend simultanément de la disponibilité en énergie et en eau du milieu, a pu être quantifiée dans des petits bassins forestiers situés sur le versant alsacien des Hautes-Vosges granitiques grâce à des dispositifs expérimentaux mesurant l'interception du feuillage des arbres et la transpiration forestière (Ambroise et al., 1995). La comparaison des précipitations mesurées hors et sous couvert forestier a permis d'y confirmer le rôle important de l'interception qui réduit sensiblement l'apport d'eau au sol en forêt : en moyenne sur le semestre estival, l'interception de la pluie incidente est de l'ordre de 30 % dans une pessière de 100 ans, de 25 % dans une pessière de 30 ans et de 20 % seulement dans une hêtraie de 120 ans. La reprise par évaporation directe de l'eau interceptée par le feuillage représente la composante principale de l'ETR de ces peuplements d'altitude (Biron, 1994; Viville et al., 1993).

Ces bassins expérimentaux, situés sur le versant oriental des Vosges, sont en dehors du périmètre enquêté. Néanmoins ils se situent à des altitudes et dans des conditions physiographiques similaires à celles des bassins suivis par Angeli (2006) dans le secteur de Cornimont. Les pertes par évapotranspiration qu'observe ce dernier sont du même ordre de grandeur que celles de Ambroise et al. (1995) et Viville et al. (1993). Elles représentent une part importante du bilan hydrologique, et sont de l'ordre de 500 à 600 mm/an. L'interception quant à elle peut être évaluée à 2/3 de cette quantité.

4.1.3 L'écoulement superficiel

Les débits moyens (ou abondance spécifique) les plus élevés sont compris entre 30 et 50 l/s/km^2 dans la zone enquêtée où la pluviométrie excède 1500 mm/an. Autour et dans toutes les Hautes-Vosges, drainées par les cours d'eau du bassin amont de la Moselle et de la Meurthe, les débits moyens sont un peu inférieurs sans s'abaisser en dessous de 17 l/s/km^2 (Corbonnois and Humbert, 2000). La lame d'eau écoulée varie entre 650 mm/an pour la Meurthe à Saint-Dié (55 % des précipitations annuelles) à 1450 mm/an pour la Moselle à Fresse, ce qui représente plus de 70 % des précipitations annuelles.

En étiage, alors que les rendements des terrains sont élevés (débit spécifique supérieur à 17 l/s/km^2), les débits d'étiage ne dépassent pas ceux des régions voisines (Corbonnois and Humbert, 2000). Ils enregistrent la faiblesse des réserves du substratum, dont les apports au réseau hydrographique sont très sensibles au déficit de pluie. Le soutien par les nappes de capacité modeste (nappe du socle vosgien ou nappes alluviales des cours d'eau) s'avère peu efficace (Corbonnois and Humbert, 2000).

4.1.4 Les eaux souterraines

Les secteurs aquifères du socle vosgien (Figure 37, annexe 4) sont les zones de fracture et les arènes granitiques[8]. Ces terrains peu perméables renferment localement des nappes peu puissantes qui ont pu se constituer à la faveur de zones de broyage ou d'arénisation. Les vitesses de circulations des eaux souterraines dans le socle vosgien sont très variables et peu connues. Les circulations des eaux souterraines peuvent revenir à la surface par l'intermédiaire de sources ou rejoignent directement les nappes de fond de vallées. D'une manière générale, les petits aquifères des arènes granitiques sont très utilisés pour l'alimentation des fermes des crêtes des Vosges. Un certain nombre de communes vosgiennes sont tributaires de ces sources pour leur approvisionnement en eau. Les débits de ces sources prises individuellement sont de l'ordre d'un (à l'étiage) à plusieurs litres/seconde (hiver). D'une manière générale, les aquifères du socle du Massif Vosgien ne semblent donc disposer que de faibles réserves en eau, les rendant fortement dépendants des variations pluviométriques saisonnières (BRGM, 2017).

[8] Ce paragraphe s'inspire en grande partie de la page web http://sigesrm.brgm.fr/Socle-vosgien

4.1.5 Origines et temps de transit de l'eau

Marçais (2018) définit le temps de transit de l'eau comme « le temps que l'eau passe pendant son séjour dans le bassin versant depuis le moment où elle tombe sous forme de précipitation jusqu'à la fin de son parcours à l'exutoire de son bassin versant ». Cette notion reflète la manière dont l'eau a « voyagé » à travers les différentes parties du bassin versant, la façon dont celui-ci la conserve et la libère. Cette donnée est particulièrement importante à connaître pour estimer la vulnérabilité d'un bassin versant à des pollutions ponctuelles comme à des pollutions diffuses (Marçais, 2018) mais aussi par exemple, pour prédire les effets d'une sécheresse persistante.

Au cours des vingt dernières années, quelques bassins des Vosges notamment cristallines (devenus pour certains, comme le Strengbach à Aubure, des observatoires de l'environnement), ont fait l'objet de travaux de recherche sur l'isotopie et la géochimie des eaux de pluie, des eaux superficielles et des eaux souterraines dans le but de mieux comprendre comment « voyage » l'eau dans ces bassins (Angeli, 2006; Brenot, 2006; Viville et al., 2006).

Brenot (2006) déduit de ces données et analyses de terrain conduites sur les rivières du bassin amont de la Moselle que les « temps de réponse » estimés sont de quelques jours pour les eaux de sols collectées par drainage en période de haut régime hydrique (hiver hydrologique), à plusieurs semaines pour les eaux de rivières, jusqu'à plusieurs mois (temps de transit long) pour les eaux de sols collectées par bougies poreuses (eaux liées du sol) et les eaux de sources. L'effet saisonnier est important, la saison végétative étant propice à un faible renouvellement de l'eau du sol et à un allongement du temps de transit de quelques mois. Quelle que soit la saison, les eaux de drainage, qui transitent rapidement dans le sol, sont toujours un mélange entre les eaux de précipitations (eaux « nouvelles ») et des eaux déjà présentes dans le sol (eaux « anciennes »), leurs proportions respectives variant au cours du temps.

A partir d'un système de données collectées sur un aquifère cristallin, Viville et al. (2006) diagnostiquent un temps de transit moyen de 3 ans pour les eaux du ruisseau du Strengbach à Aubure (versant alsacien des Vosges) et une puissance d'aquifère de 2 à 3 m ce qui laisse présager, pour stocker un tel volume d'eau, d'une zone fracturée épaisse de plus de 45 m sous la zone altérée et le sol.

Enfin les recherches d'Angeli (2006) menées dans les Vosges cristallines (Cornimont) ont permis de caractériser le fonctionnement hydrologique sur granite : « *sur granite, l'analyse de la dynamique du traceur chlorure montre que les eaux de sol alimentent rapidement les zones humides et le ruisseau, tandis qu'une faible fraction s'infiltre profondément dans l'arène.* » Une fraction mineure des eaux d'infiltration pénètre plus profondément dans les arènes et soutient avec l'eau des zones humides les débits lors des étiages. Ces conclusions analytiques sont en accord avec celles des auteurs précités : sur granite, les interactions sont fortes entre écoulements de nappe, écoulements de subsurface et écoulements de surface surtout en saison humide, lorsque les nappes affleurent en surface et que les tourbières, quand elles existent, sont hautes, ce qui favorise le ruissellement par saturation du sol.

4.1.6 Essai de synthèse : bilan hydrologique et temps de résidence de l'eau dans un bassin versant des Hautes-Vosges granitiques (secteur de Cornimont)

Le schéma de la Figure 16 tente de synthétiser les différents termes du bilan hydrologique d'un bassin versant typique des Hautes-Vosges granitiques (secteur de Cornimont) d'après les observations d'Ambroise et al. (1995), Angeli (2006), Brenot (2006), Viville et al. (2006) et les analyses hydrologiques de Lang (2007) sur quelques bassins cristallins de la banque HYDRO situés sur le versant vosgien. Il convient de conserver à l'esprit la différence de taille et donc d'échelle entre les petits bassins expérimentaux suivis par Angeli (2006) dans les Hautes-Vosges granitiques (moins de 2 km²) et les bassins de la banque HYDRO analysés par Lang (2007) qui font plusieurs dizaines de km².

Les pourcentages indiqués à droite de la figure 16 correspondent à la part de Cl exportée par le ruisseau après épandage par hélicoptère sur le bassin, le chlorure étant utilisé comme traceur hydrologique pour évaluer le temps de résidence des eaux dans le bassin (Angeli, 2006).

La valeur de l'évapotranspiration réelle (ETR), non mesurée, est estimée par le déficit d'écoulement en supposant les variations de stock sur l'année négligeable et en fixant les exportations souterraines à 50 mm/an (cf. *infra*). Ainsi l'ETR représente 90 % de l'évapotranspiration potentielle (ETP)[9] ce qui est cohérent pour des milieux humides et frais comme ceux des Vosges cristallines où l'énergie est limitante (faible ETP) mais l'eau du sol généralement disponible en toute saison sauf année très sèche.

La vitesse de circulation de l'eau indiquée sur la Figure 16 (écoulement « rapide », écoulement « retardé », écoulement « lent ») correspond aux trois composantes identifiées par Angeli (2006) et Brenot (2006) après traçage environnemental sur les bassins expérimentaux des Vosges cristallines, à savoir :

- Un écoulement « rapide » (mensuel) issue des zones humides et ruisselantes connectées hydrauliquement au réseau de drainage du bassin (zones tourbeuses et temporairement humide sur les pentes, chemins de débardage, nappes dans les fonds de vallon ou vallée, sources),
- Un écoulement « retardé » (intermédiaire) issu du drainage latéral des sols vers les zones humides (assimilable à l'écoulement hypodermique des hydrologues) décrit comme « une décrue lente après les pics de crue »,
- Un écoulement « lent » (pluriannuel) décrit comme une contribution « minoritaire ». Il correspond aux eaux des nappes de la zone altérée rendues au réseau de drainage du bassin en période d'étiage après infiltration profonde dans l'arène granitique.

La quantification de ces composantes d'écoulement (Figure 16) n'est pas triviale. Notre calcul est initialisé par la connaissance de l'indice d'écoulement de base (IEB) de trois bassins des Vosges cristallines occidentales issus de la banque HYDRO : la Moselotte à Vagney (184 km²), la Moselle à Rupt (153 km²) et la Moselle à Fresse (72 km²). L'IEB moyen se situe autour de 30 % (Lang, 2007). Il

[9] Calculée selon Penman ou Oudin voir par exemple la lame d'eau de la Moselotte à Vagney : https://webgr.irstea.fr/wp-content/uploads/fiches/A4140202_fiche.png

correspondrait peu ou prou à la part des débits de base ou débits de tarissement (c'est-à-dire non influencés par les précipitations et l'action de l'homme) dans l'écoulement total. Cette valeur de 30 % est cohérente avec l'idée que les bassins du socle vosgien ont une alimentation souterraine qui est plutôt faible mais elle reste évidemment entachée d'incertitude. Elle est également en accord avec la contribution minoritaire de l'écoulement « lent » sur granite selon Angeli (2006).

Une faible partie de l'écoulement « retardé » (Ert) et la totalité de l'écoulement « lent » (El) représenteraient donc 30 % de la pluie nette interannuelle (P-ETR) (Figure 16).

L'estimation des lames d'eau annuelles liées respectivement à l'écoulement rapide (Er) et à l'écoulement « retardé » (Ert) est une tâche délicate. Compte tenu des informations connues, nous préférons englober Er et la part majoritaire de Ert et leur attribuer 70 % de la pluie nette interannuelle (P-ETR) (Figure 16).

Enfin, en partant du principe qu'il existe des pertes profondes dans la zone fracturée mais qui *a priori* sont faibles (elles sont fixées arbitrairement à 50 mm), les pourcentages sont calculés sur une pluie nette (P-ETR) de 1050 mm/an et non de 1600-500 = 1100 mm/an.

Notons enfin que la valeur de l'écoulement total (Q) donnée sur la Figure 16 (1050 mm/an) est en parfaite adéquation avec les valeurs de précipitations efficaces moyennes annuelles (fraction des précipitations incidentes qui contribue soit à l'infiltration souterraine -recharge des aquifères- soit à l'écoulement superficiel ou de sub-surface) estimées dans le secteur d'étude par le BRGM à l'aide du logiciel Gardenia et sous 3 hypothèses différentes de réserve utile (cf. annexe 3 du rapport BRGM, 1996).

4.1.7 Utilisation de l'eau *in situ*, voies d'eau artificielles et retenues d'eau

Dans la zone enquêtée, la production d'énergie au fil de l'eau (micro-centrales) représente la principale utilisation *in situ* de l'eau. Dans la catégorie d'usage des voies d'eau artificielles, on peut citer la rigole d'alimentation de Bouzey[10] qui alimente le canal des Vosges et influence le régime de la Moselle à Remiremont (en réalité très faiblement en période de basses eaux[11]). L'utilisation *ex-situ* de l'eau nécessite un prélèvement qui détourne l'eau de son cycle naturel : dans les Vosges, il s'agit principalement de l'AEP, de l'AEI, de l'AEA qui prélèvent et consomment de l'eau des rivières.

Mais nous faisons le constat, au terme de notre recherche bibliographique, que les données sont trop fragmentaires voire inexistantes pour évaluer à la fois la circulation des eaux souterraines et la ressource dans les aquifères du socle du Massif Vosgien ainsi que la pression de prélèvement, notamment par l'AEP et l'AEI, sur ces aquifères. Les sécheresses consécutives de 2003, 2011, 2015 et la sécheresse persistante de 2018 et 2019 ont montré la sensibilité des captages AEP et des rivières

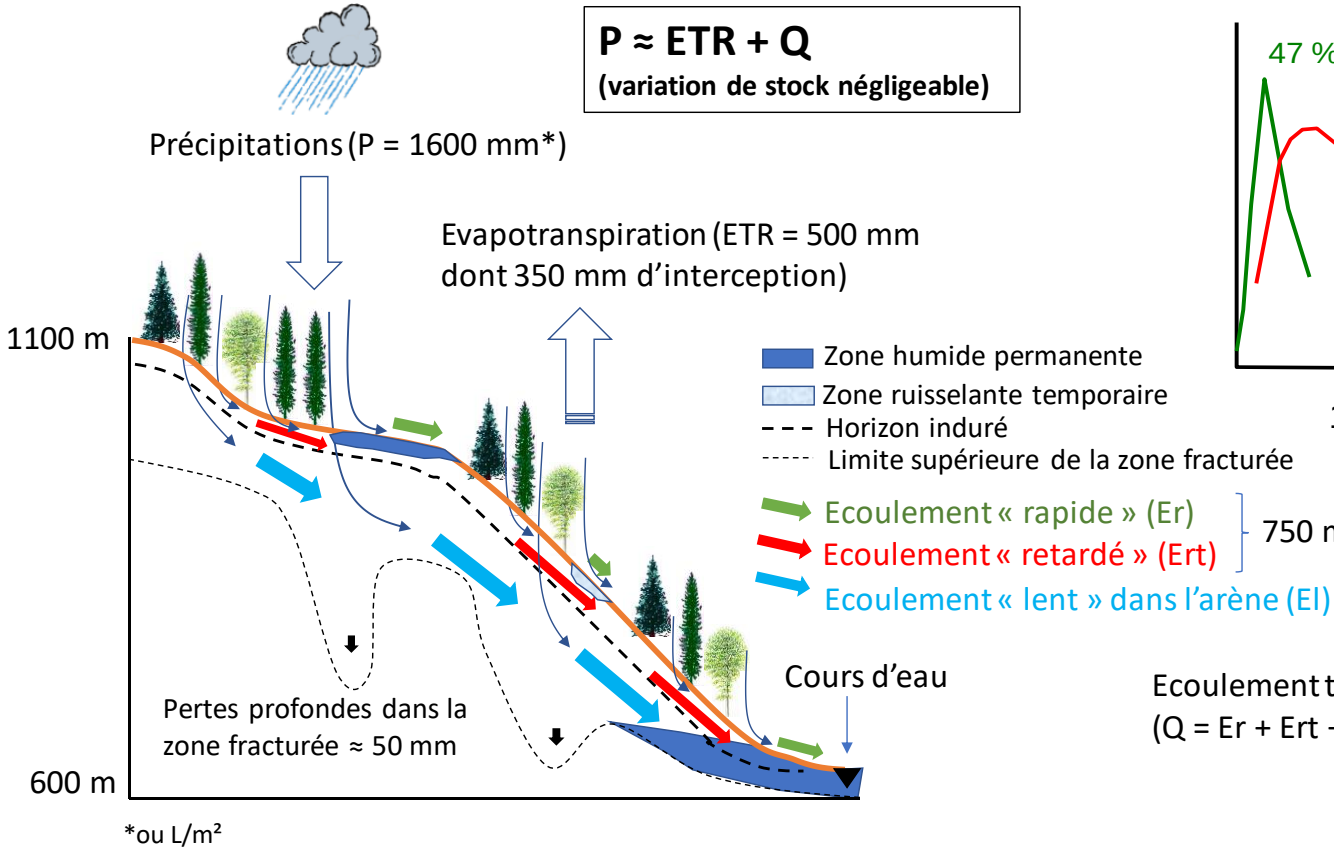
[10] http://www.nordest.vnf.fr/spip.php?article1835

[11] 0,5 m^3/s pour la prise d'eau navigation à Remiremont (ce qui représente 11 % du débit mensuel d'étiage dépassé 1 année sur 2) et 0,4 m^3/s pour la prise d'eau d'Epinal (port d'Epinal) (ce qui représente 6 % du débit mensuel d'étiage dépassé 1 année sur 2) voir http://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/moselle.pdf

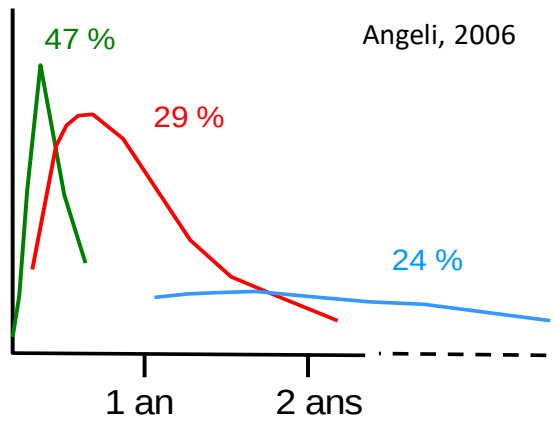
dans les Hautes-Vosges granitiques pendant les périodes de déficit pluviométrique (faible recharge hivernale et déficit printanier) et de très fortes chaleurs. Des ruptures d'alimentation locale en eau potable ont eu lieu dans les vallées vosgiennes (vallée de la Moselotte notamment), nécessitant du transport d'eau par camions[12]. Cela interroge sur les effets possibles du réchauffement climatique rapide que l'on observe actuellement dans le Nord-Est de la France sur la circulation de l'eau dans les Vosges et sur sa gestion à court et moyen terme.

[12] http://sigesrm.brgm.fr/Ressources-en-eau-souterraine-dans-les-Vosges-et

Bilan hydrologique annuel et temps de résidence de l'eau dans un bassin des Hautes-Vosges granitiques (secteur de Cornimont, granite du Ventron)



distribution des différents temps de résidence de l'eau



Ecoulement total à l'exutoire du bassin (Q = Er + Ert + El = 1050 mm)

Figure 16 : Bilan hydrologique annuel et temps de résidence de l'eau dans un bassin des Hautes-Vosges granitiques (secteur de Cornimont, granite du Ventron)

4.1.8 Points saillants à l'échelle de la zone d'intérêt

- La ressource en eau météorique est abondante voire, localement, très abondante et spatialement hétérogène.
- La connaissance de la pluviométrie annuelle est imprécise pour certains bassins (par exemple la Moselotte à Vagney) en raison d'un sous-échantillonnage.
- L'ETR est limitée par la quantité d'énergie disponible, la composante interception (évaporation) est majoritaire dans l'ETR en raison de la forte présence de peuplements de résineux.
- Cela vaut au réseau hydrographique d'être généralement bien alimenté en hiver.
- Les aquifères du socle du Massif Vosgien ne semblent disposer que de faibles réserves en eau, les rendant fortement dépendants des variations pluviométriques saisonnières.
- Les données sont trop fragmentaires voire inexistantes pour évaluer à la fois la circulation des eaux souterraines et la ressource dans les aquifères du socle du Massif Vosgien ainsi que la pression de prélèvement, notamment par l'AEP et l'AEI, sur ces aquifères.
- Les sécheresses consécutives de 2003, 2011, 2015 et la sécheresse persistante de 2018 et 2019 ont montré la sensibilité des captages AEP et des rivières dans les Vosges cristallines pendant les périodes de déficit pluviométrique (faible recharge hivernale et déficit printanier) et de très fortes chaleurs.

4.2 Résultats de l'enquête concernant l'approvisionnement en eau potable

4.2.1 Caractéristiques principales de la gestion de l'eau potable dans les communes enquêtées

Les 16 communes enquêtées sont généralement des villages et de petites villes du secteur des Hautes Vosges. Onze communes comptent moins de 2000 habitants. Les populations communales sont comprises entre 100 et 9000 habitants, avec une densité globale de 73 habitants par km². Le tourisme induit de fortes variations saisonnières de la population, avec des pics pendant les vacances d'été et d'hiver. Ces variations se répercutent sur les consommations d'eau, qui peuvent doubler par rapport au reste de l'année. Des activités consommatrices en eau sont présentes de façon variable (scierie, fromagerie, textile, base nautique, élevage, etc.). Dans des communes de taille réduite, elles peuvent représenter une part importante des consommations communales, et/ou avoir leur propre captage.

Les services d'eau des communes interrogées partagent un ensemble de caractéristiques typiques de cette partie du Massif des Vosges :

- Ils sont gérés en **régie, généralement municipale** (un seul cas de syndicat intercommunal d'eau), avec leur matériel et personnel communal, parfois appuyé par une entreprise privée via un contrat de maintenance.
- Les captages d'eau potable se font à partir de **sources** (14 communes) et de **forages** ou de puits (7 communes, dont 2 qui n'ont pas de sources). Le prélèvement en eau superficielle est

rare (une seule commune, qui recourt aussi aux sources). Neuf communes sont **interconnectées** au réseau d'une ou plusieurs autres communes.

- Les eaux sont « agressives ». Leur **faible minéralisation** entraîne la corrosion des matériaux en contact. Toutes les communes ne sont pas équipées de stations de traitement. Les eaux de source sont jugées de très bonne qualité malgré le fait que leur pH ne rentre pas toujours dans la fourchette de l'ARS.
- Du captage gravitaire et des traitements réduits résulte un **faible prix de l'eau**. Le prix moyen TTC du m^3 d'eau (pour $120m^3$) est de 1,74 euros[13]. La moyenne française était de 2,04 euros en 2014[14]. Dans la majorité des communes enquêtées, le prix est bien inférieur à cette valeur (Figure 17).

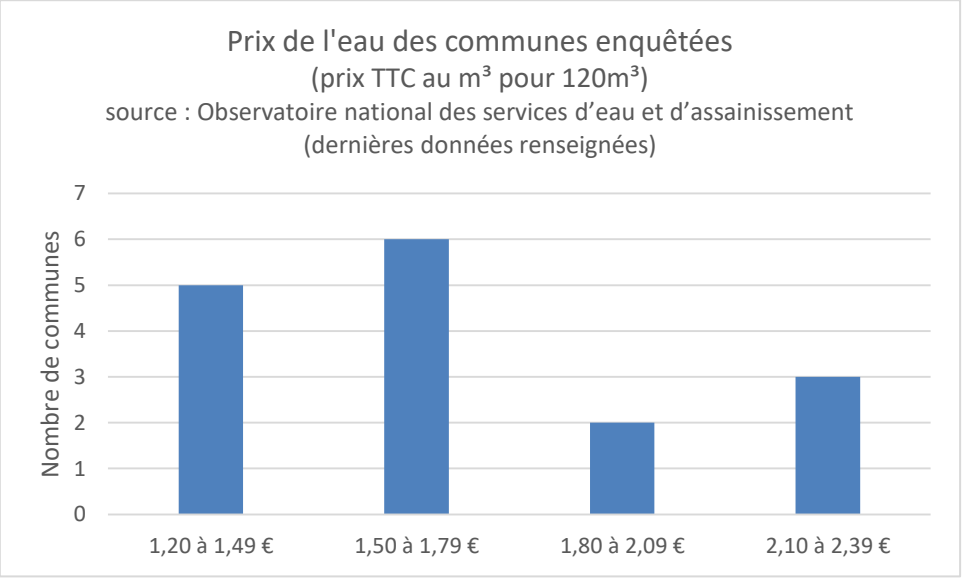


Figure 17 : Distribution des communes enquêtées en fonction du prix de l'eau

- Des habitations et fermes-auberges, situées en altitude, sont alimentées uniquement par des **captages de source privés**. Ces situations ne concernent parfois que quelques cas isolés, mais elles peuvent dans certaines communes correspondre à une part importante des habitations (jusqu'à 15-20% d'après les élus rencontrés). Certaines communes emploient des surpresseurs pour alimenter des hameaux en altitude.
- Les paramètres de **performance des réseaux** sont variables. Les rendements des réseaux (ratio entre le volume consommé et le volume distribué) des communes enquêtées s'échelonnent entre 50 et 96%[15]. La moyenne des **rendements** est de 75,2%. Cette valeur est **légèrement inférieure** au rendement moyen du département des Vosges - estimé à 76,4% en 2015 par le CERC Grand-Est (CERC Grand-Est, 2018) - et au rendement moyen à l'échelle du bassin Rhin-Meuse (estimé à 81%).

[13] Source : dernières données renseignées disponibles sur l'Observatoire national des services d'eau et d'assainissement (www.services.eaufrance.fr). Seules les données de 3 communes sont antérieures à 2016.
[14] Source : Eaufrance, le service public d'information sur l'eau (www.eaufrance.fr/le-prix-de-leau)
[15] Source : dernières données renseignées disponibles sur l'Observatoire national des services d'eau et d'assainissement (www.services.eaufrance.fr). Les données de 4 communes sont antérieures à 2016 et 2 communes n'ont pas de valeur renseignée.

- Les **taux de renouvellement** (ratio entre le linéaire renouvelé du réseau de desserte et la longueur du réseau de desserte calculé sur 5 ans) varient entre 0 et 1,6%[16]. La moyenne des taux de renouvellement des communes enquêtées (0,4%) est aussi **légèrement inférieure** à la moyenne du département des Vosges - estimé à 0,5% en 2015 par le CERC Grand-Est (CERC Grand-Est, 2018) - et du bassin Rhin-Meuse (estimé à 0,6%). Les taux de renouvellement sont globalement relativement faibles par rapport à un optimum gravitant autour d'1,5% (CERC Grand-Est, 2018).
- D'autre part, la moitié des communes enquêtées sont inscrites dans la **liste des collectivités à risque de pénurie récurrente** de l'AERM. Cette liste est établie par l'AERM afin de prioriser ses subventions sur les communes les plus vulnérables. Le secteur étudié constitue une zone de concentration de communes identifiées à risque par rapport au reste du département, mais toutes les communes ne sont néanmoins pas concernées par les pénuries.

4.2.2 Quelles représentations du cycle de l'eau localement ?

« *Et peut-être qu'on pourrait répondre à cette question : d'où vient l'eau ? Parce que c'est quand même un grand mystère !* » [Maire, commune n°1, enquête]

Peu de savoirs experts sont institués à l'échelle du massif (cf. étude du BRGM en cours). Au sein des communes, des analyses locales sont menées ponctuellement sur des sites afin de répondre à des besoins spécifiques (recherche de sources, etc.). Les maires des communes enquêtés ont beaucoup d'interrogations sur la circulation de l'eau à l'échelle du massif et en son sein (relations pluies/débits des cours d'eau et des sources/niveaux des nappes). Différents phénomènes observés étonnent et restent inexpliqués, par exemple :

- la présence de sources abondantes situées en ligne de crête [Maire, commune n°1, enquête] ;

- la rupture d'approvisionnement en eau d'une commune voisine alors que les rivières y étaient « pleines d'eau » [Maire, commune n°15, enquête] ;

- l'incapacité des précipitations à recharger les sols : elle est observée à travers une baisse très rapide du niveau des cours d'eau après des épisodes pluvieux [Maires, commune n°8 et 13, enquête] et du rendement des sources quand il ne pleut pas : « C*'est même à se demander si nos captages ne sont pas… on croirait qu'ils sont en liaison directe avec de l'eau de ruissellement […] En deux mois, on est passé de 1 100 à 500… [mètres cubes captés]*» [Maire, commune n°15, enquête]. En outre, ces observations sont parfois opposées d'une commune à l'autre : « *Ce qui était assez surprenant, c'est que nos sources sont très réactives à la pluie, mais en même temps, elles sont très inertes en période de sécheresse (on a le beurre et l'argent du beurre !)* » [Maire, commune n°1, enquête].

[16] Source : dernières données renseignées disponibles sur l'Observatoire national des services d'eau et d'assainissement (www.services.eaufrance.fr). Les données de 2 communes sont antérieures à 2016 et 2 communes n'ont pas de valeur renseignée.

La représentation qui domine est celle d'une forte variabilité spatio-temporelle de l'eau, dont on connaît mal les ressorts et la dynamique. Ainsi, on considère que certains lieux ont de l'eau, alors que d'autres en ont peu. Des variations importantes sont observées au sein de certaines communes, selon les versants ou même d'une source privée à l'autre : « *On se rend compte que l'on a tout de même deux versants complètement différents. […] il y a beaucoup moins de sources, il y a moins d'eau sur ce versant-là alors que c'est là où sont les habitations.* » [Directeur de services techniques, commune n°11, enquête] ; « *ce qui était étonnant c'est que d'une maison à l'autre y'en a qui avaient de l'eau et d'autres qui n'en avaient pas* » [Maire, commune n°13, enquête]. Plus généralement, c'est entre communes que cette variabilité est décrite : « *On est considéré comme le château d'eau du secteur […] On alimente d'autres communes en aval qui sont en manque d'eau chronique* » [Maire, commune n°13, enquête]. Ainsi, certaines communes confrontées au manque d'eau estiment qu'il y a toujours une solution auprès de communes voisines qui ont de l'eau excédentaire : « *Face à ce problème, la solution qu'on a trouvée, c'est le maillage pour la bonne et simple raison que l'eau dans les Vosges, il y en a* » [Maire, commune n°4, enquête].

4.2.3 L'expérience des crises et le sens que leur donnent les maires

- La perception des sécheresses

> « *Depuis cette sécheresse de 2003 où il y a eu une canicule phénoménale, ça ne fait qu'empirer* » [Maire, commune n°8, enquête]

La sécheresse de 2018 est considérée comme exceptionnelle, du fait de son ampleur et sa durée. Les acteurs enquêtés témoignent de situations inédites :

- des sources privées durablement à sec (« *Avec des approvisionnements de maisons d'habitation, de résidences principales qui ont carrément lâché pour une première fois, des choses jamais vues* » [Maire, commune n°12, enquête]) ;

- des réservoirs d'eau de communes ayant atteint un niveau très bas (« *le plus bas jamais vu, en automne 2018* » [Adjoint, commune n°7, enquête]) et dont la capacité de remplissage a été fortement altérée (« *On n'avait jamais eu de souci d'approvisionnement, mais l'année 2018 a été difficile […] Normalement, quand le réservoir baisse dans la journée, la nuit évidemment il y a moins de consommation, et le lendemain, il y avait tellement d'eau qui arrive que ça re-déborde largement et il n'y avait aucun problème. Mais là, on avait du mal à re-remplir les réservoirs* » [Maire, commune n°1, enquête]).

Si l'année 2018 a ainsi été « *pleine de surprise* » [Maire, commune n°12, enquête], la sécheresse n'est cependant pas considérée comme un évènement ponctuel ou isolé. Plusieurs maires font état d'une situation qui se tend de plus en plus (« *plus les années avancent et plus il y a de sécheresses* » [Adjoint, commune n°11, enquête] ; « *le manque d'eau s'accentue quand même de plus en plus* »

[Maire, commune n°13, enquête]) et évoquent des épisodes passés de sécheresse (1976, 2003, 2006, 2013, 2015, 2016). Chez certains maires, la répétition des sécheresses et la sévérité de celle de 2018 ont ébranlé la représentation de château d'eau du massif des Vosges : « *Le château d'eau ce n'est plus pour longtemps* » [Maire, commune n°13, enquête], « *Je suis inquiet parce que franchement c'est déstabilisant de penser qu'on était une région distributrice d'eau quelque part, on était un château d'eau quand même, c'était l'image qu'on donnait, qu'on avait, et là brutalement on voit que... et en plus ça va très vite ! Je pourrais vous montrer sur l'écran l'évolution des captages [...] on était à 1100m3 capté au mois de mai [2019] et on est à 400-500m3 [début juillet 2019]* » [Maire, commune n°15, enquête]. Le contraste entre la récurrence des sécheresses et l'image de château d'eau du massif est généralement l'objet d'une surprise, voire d'une incompréhension pour les maires comme pour leurs administrés : « *On a tellement été protégé dans notre région, qui aurait pu dire que l'on allait être embêté avec l'eau dans les Vosges ? Les gens ne comprennent pas, et ils nous disent : "Vous êtes des cons les élus, dans le sud ils ont de l'eau et nous, dans les Vosges, on n'en a pas !"* » [Maire, commune n°10, enquête].

- **La matérialisation des difficultés d'approvisionnement en eau potable**

Au niveau des réseaux municipaux, les effets des sécheresses diffèrent selon les communes. Des tensions sur l'AEP lors de la sécheresse de 2018 sont rapportées dans la moitié des communes enquêtées. Il s'agit d'ailleurs des communes identifiées par l'AERM comme collectivités sujettes à risque de pénuries d'eau récurrentes. Ces communes sont généralement approvisionnées par des sources. La productivité de certaines sources est particulièrement impactée (exemple d'une source fournissant 180m³/jour en situation haute contre 2,5m³ d'eau/jour en période basse [Maire, commune n°5, entretien] ; exemple d'une autre source produisant 350m³/jour l'hiver et 50m³/jour l'été [Maire, commune n°11, entretien]). Les forages paraissent quant à eux ne pas poser de problème actuellement. Les communes ayant des forages n'ont généralement pas connu de tension. Deux élus indiquent néanmoins une baisse du niveau de la nappe.

Aucune des communes enquêtées n'a connu de rupture d'alimentation, soit parce que les quantités d'eau ont suffi, soit parce que des mesures ont été mises en place (camion-citerne ou achat d'eau aux communes voisines interconnectées). Certains maires ont évoqué le cas de communes ayant subi des ruptures d'approvisionnement ou ayant dû procéder à des coupures d'eau pour permettre le remplissage des réservoirs. Elles font partie des communes contactées avec lesquelles nous n'avons pas pu faire d'entretien.

En ce qui concerne les sources privées, les problèmes de pénurie d'eau ont concerné les trois quarts des communes enquêtées.

- **L'interprétation de la dynamique des sécheresses**

> *« On ne peut pas négliger cela […], on a trop souvent rigolé sur ce sujet, comment le climat pourrait changer, etc. […] mais je pense que quand même il y a un changement climatique oui, y'a du changement. […] On nous l'annonce, et c'est quand même étudié […] Moi je le vois par cette ressource en eau […] on n'avait jamais été ennuyé avec ce manque d'eau sur la commune* » [Maire, commune n°8, enquête]

L'ensemble des maires interrogés (ou leurs représentants, pour 2 communes) identifient et décrivent une évolution climatique locale d'augmentation des sécheresses au sein du massif des Vosges. Ils associent leur expérience des dernières sécheresses et de leur évolution depuis 2003 à quelque chose de nouveau, en rupture avec les conditions climatiques du passé. Interrogés sur les causes à l'origine des tensions sur l'AEP, les acteurs interrogés font très souvent le lien entre cette évolution locale et un changement climatique planétaire :

Dans 13 entretiens, l'évolution climatique locale est associée au changement climatique planétaire[17], du fait du caractère hors du commun des situations observées : « *Ah ben c'est le réchauffement climatique. On voit bien les sources des particuliers, des sources qui ne sont pas très performantes en général, ils me disent depuis plusieurs étés "ma source ne donne presque plus, comment je vais faire ?", depuis déjà plusieurs années, alors qu'au niveau de la commune, on ne voyait pas des manques d'eau comme ça. Donc ça a nous mis la puce à l'oreille.*» [Maire, commune n°1, enquête] ; « *La notion de changement climatique intervient pleinement, c'est sûr. Même si on a encore de l'enneigement, ce n'est plus les niveaux qu'on a pu connaître par le passé. On a aussi des printemps nettement moins pluvieux. Ça varie d'une année à l'autre, mais la tendance globale est plutôt là. Cette notion de réchauffement climatique, on la connaît.*» [Maire, commune n°14, enquête] ; « *Au niveau de l'eau, on n'a jamais eu, je dis bien jamais, de problèmes d'eau dans les Vosges, on ne s'en est donc jamais préoccupé. Aujourd'hui, avec le changement climatique, on commence à avoir des problèmes d'eau pour les sources de surface* » [Maire, commune n°10, enquête]. Certains imputent ce changement global à des origines naturelles : « *Non, ce n'est pas l'homme, le climat change tout seul, il n'a pas besoin de l'homme. On est dans des cycles, on sait qu'il y en a trois : l'inclinaison de la Terre par rapport au soleil, son orbite par rapport au soleil qui se rapproche, et la précession […]. Cela fait que l'on a trois facteurs qui sont prépondérants dans le sens du changement climatique.* » [Maire, commune n°10, enquête] ; « *Ne me demandez pas dans*

[17] Sans que nous ayons préalablement parlé de changement climatique durant l'entretien, ni lors de la demande d'entretien (excepté pour les 3 élus contactés pour nous par la Communauté de Communes des Hautes Vosges)

quel sens tournent les pôles ! » [Maire, commune n°8, enquête][18]. En réalité, les cycles climatiques évoqués se déploient sur des échelles de temps bien supérieures[19] à celle du changement climatique anthropique, lié à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre depuis la révolution industrielle.

Dans les trois autres entretiens, les personnes interrogées ne relient pas l'évolution locale perçue au phénomène global de changement climatique : ils se réfèrent à des causes locales uniquement (entretien des sources privées, infiltration et circulation souterraine de l'eau) ou questionnent l'existence d'un lien de cause à effet (« *Je ne suis pas assez expert pour vous le dire, mais on le constate. On va avoir 40° la semaine prochaine, ce n'est pas habituel au mois de juin. Maintenant, que ce soit le changement climatique ou autre chose… C'est autant d'éléments qui pourraient corroborer l'hypothèse d'un changement climatique, mais est-ce que c'est vraiment ça ?* » [Maire, commune n°2, enquête]. Interpréter le climat ne relève en effet pas du sensible[20].

Que l'évolution locale du climat soit associée ou non au changement climatique, ce n'est pas pour autant que les acteurs enquêtés considèrent que l'augmentation des sécheresses va se maintenir ou s'intensifier dans le futur :

Dans 9 entretiens, les maires (ou leurs représentants) font l'hypothèse que les sécheresses vont se poursuivre : « *Il y a eu l'année 2003 […] ils ont dit que c'était une année exceptionnelle. Mais après, lorsque j'ai vu que cela revenait et quand on connaît maintenant la tendance climatique qui nous dit que ça va revenir encore, j'ai raison, tous les ans j'ai une sécheresse […]. Pour moi maintenant, tous les étés vont se ressembler. Je ne suis pas voyant mais je pars du principe que maintenant ce sera ainsi tous les étés.* » [Maire, commune n°9, enquête] ; « *Parce que l'on sait qu'il vaut mieux anticiper parce que cela ira plutôt en s'aggravant.* » [Maire, commune n°5, enquête].

Six autres entretiens montrent un hiatus entre représentation du passé proche et représentation du moyen/long terme. Les maires (ou leurs représentants) ne projettent pas dans l'avenir l'évolution à la hausse des sécheresses qu'ils décrivent. Au contraire, ils

[18] Ces deux dernières citations font référence à la théorie astronomique des paléoclimats expliquant par certains paramètres astronomiques terrestres (dont l'inclinaison de l'axe de rotation de la terre) des changements climatiques naturels au cours des temps géologiques (périodes glaciaires et interglaciaires).

[19] De l'ordre de 100000 ans au cours du dernier million d'années (source : [http://www.ifremer.fr/lpo/thuck/nao/climat_glaciaire.html])

[20] L'attribution d'évènements météorologiques au changement climatique est empreinte d'incertitudes. Des recherches développent actuellement des méthodes pour estimer dans quelle mesure un évènement météorologique singulier est lié aux activités humaines. Par exemple, des chercheurs ont montré que la probabilité d'occurrence d'une canicule telle celle observée en France en juin 2019 était « multipliée au moins par cinq » en raison du changement climatique anthropique (World Weather Attribution, 2 juin 2019, URL : [https://www.worldweatherattribution.org/human-contribution-to-record-breaking-june-2019-heatwave-in-france/]).

interrogent voire mettent en cause sa pérennité, soit en l'associant à de la variabilité, soit en questionnant sa réversibilité :

- Dans le premier cas, qui correspond à deux communes, les maires associent le changement observé à une augmentation de la variabilité, qui n'implique pas de changement de fond du climat : « *D'après les prévisions, on aura de plus en plus d'années sèches. Mais bon, on nous prédisait déjà ça il y a vingt ans… Je ne suis pas certain que ça va arriver. Je pense qu'on aura de plus en plus d'amplitude et d'écarts* » [Maire, commune n°7, enquête].

- Dans le second cas, qui concerne quatre communes, le changement du climat décrit est considéré comme potentiellement cyclique : « *C'est peut-être des cycles, et qu'on aura le retour de cycles pluvieux, mais cette notion de sécheresse intervient de plus en plus tôt dans l'année* » [Maire, commune n°14, enquête] ; « *Aujourd'hui c'est la sécheresse, peut-être que dans 20 ans ce sera le contraire* » [Maire, commune n°13, enquête]. Les maires s'accordent sur une tendance d'évolution du climat, mais pas sur son irréversibilité : « *Est-ce qu'on peut dire que c'est un changement irréversible, je n'en sais rien, mais c'est quand même une tendance […] Je n'affirme pas que c'est fait, mais il y a une tendance au réchauffement* » [Maire, commune n°15, enquête]. Le caractère cyclique du changement climatique s'explique soit par une forte incertitude autour des phénomènes en jeu, soit par l'origine naturelle à laquelle le changement du climat est associé (« *ce sont des cycles naturels* » [Maire, commune n°13, enquête]).

Ces caractères du climat, cyclique et variable, légitiment l'inaction : ils justifient de ne pas modifier outre mesure le système en place ou d'entrer dans une logique d'anticipation, les changements étant temporaires ou incertains (« *J'ai proposé au conseil départemental […] d'acheter une boule de cristal parce que je n'en sais rien. Je n'en sais rien !* » [Maire, commune n°13, enquête]). Les maires qui projettent une poursuite de l'intensification des sécheresses ne sont cependant pas exempts de doutes : « *On sait qu'on va vers des difficultés d'approvisionnement d'eau, c'est clair. Après, on peut se tromper. Quand on parle de l'avenir, personne n'a la science infuse et peut-être qu'on se trompe complétement. Souvent, quand on fait des prévisions à long terme dans tous les domaines, on se trompe complétement dans tous les domaines ! La futurologie c'est… En tout cas, on pense actuellement (et c'est ça qui compte, ce qu'on pense à ce moment-là), qu'il va y avoir des difficultés sur l'eau, et pour tout le monde, pas que pour nous.* » [Maire, commune n°1, enquête].

- **L'interprétation des déséquilibres du système ressource-usages**

La crise est interprétée aussi comme le résultat de l'évolution jusque-là invisible de pratiques (perte de savoir-faire en matière d'entretien et de prospection des sources, évolution des pratiques domestiques liée à l'eau potable) et de l'aménagement du territoire (augmentation des surfaces boisées, développement résidentiel et touristique). Les maires mettent en avant une conjonction de facteurs pour expliquer les déséquilibres entre la ressource et les usages, complémentairement ou non au facteur climatique.

4.2.4 Des solutions techniques de gestion de l'offre « classiques »

Quelles sont les approches des communes enquêtées pour gérer leurs ressources en eau ?

Les communes cherchent à assurer des ressources suffisantes à leur commune, en améliorant les performances du réseau (et ainsi limiter les pertes), et éventuellement en cherchant de nouvelles ressources (maillage, nouvelles sources ou forages).

Les communes qui concentrent leur action sur l'amélioration du réseau correspondent à 3 situations distinctes :
↪ les communes n'ont **pas de tension** sur la ressource en eau (3 communes) ;
↪ l'état du réseau est tel que la **chasse aux fuites** constitue l'urgence (2 communes) ;
↪ les communes connaissent des **manques d'eau** mais ceux-ci sont gérés essentiellement au coup par coup (2 communes).

Parmi les communes qui considèrent qu'améliorer les réseaux n'est pas suffisant et qui cherchent aussi à sécuriser leur approvisionnement, on peut distinguer :

↪ les communes qui sont à la **recherche de ressources propres** (5) (sources/forages) : certaines n'ont pas d'interconnexion, d'autres font partie d'un maillage. Dans ce cas, il s'agit de communes dont les multiples ressources connaissent des tensions face à la demande des communes interconnectées (et aux sécheresses) et d'une commune dont le volume d'eau acheté dépasse régulièrement le volume prévu dans la convention ;
↪ les communes maillées clientes qui comptent essentiellement sur le **maillage et l'entretien des sources** pour satisfaire leur besoin en eau (4).

Les problèmes de disponibilité en eau sont gérés par des stratégies « classiques » d'optimisation des réseaux et de sécurisation des ressources.

- **Amélioration de l'efficience technique des réseaux :**

Pour pallier aux problèmes de disponibilité de la ressource en eau, dans des communes où les rendements sont bas, mais aussi dans les communes où ils sont corrects ou bons, ce sont les « économies d'eau » par l'amélioration du réseau qui, pour les maires, doivent en premier lieu être recherchées : « *S'il n'y avait pas eu de fuite on aurait pu faire face [à la sécheresse]. S'il faut investir c'est dans le remplacement des réseaux* » [Maire, commune n°16, enquête] ; « *C'est pas la peine d'amener plus d'eau […] il faut économiser l'eau […] on a des réseaux fuyards* » [Maire, commune n°3, enquête]. Les mesures mises en place sont le renouvellement des réseaux, les campagnes de recherche de fuite, la mise en place de la télégestion, ou encore la sectorisation du réseau.

L'amélioration des captages des sources entre dans cette même logique (« *il faut améliorer les captages existants, tant que la nature nous donne de l'eau* » [Maire, commune n°3, enquête]). Améliorer l'efficience technique du réseau constitue la réponse élémentaire, mise en œuvre dans

toutes les communes, avec plus ou moins d'ampleur. L'amélioration des captages et des réseaux ont amené des gains substantiels de volumes d'eau dans plusieurs communes. En termes de réduction des consommations, ces « économies d'eau » sont néanmoins discutables : les solutions mises en place ne visent pas à consommer moins mais à permettre le maintien de la demande, la satisfaire, voire l'augmenter. Ce qui est considéré comme des pertes du réseau n'est d'ailleurs pas perdu à tout point de vue, puisqu'il retourne dans le sol.

- **Sécurisation des approvisionnements :**

Certaines communes, même avec des rendements actuellement moyens, considèrent que l'amélioration du réseau ne sera pas suffisante pour satisfaire les besoins en période de sécheresse. De façon complémentaire à l'amélioration du réseau, neuf des communes enquêtées, soit un peu plus de la moitié, cherchent à sécuriser leurs ressources en eau, par le maillage (au sein d'une commune ou plus généralement entre différentes communes) et par la mise en place de nouvelles sources ou forages[21] :

  - **Le recours au maillage :**

Les interconnexions ne sont pas nouvelles dans le massif des Vosges. Dans certaines communes, elles ont été mises en place dès la création du réseau municipal, en l'absence de ressources locales suffisantes ou dans les décennies suivantes, face à des manques d'eau récurrents. De nouvelles interconnexions ont été réalisées après les sécheresses survenues ces dernières années, par ramification des maillages existants ou pour des communes qui n'avaient jusqu'alors pas d'interconnexion. Les entretiens montrent que, parmi les communes dotées d'une interconnexion, 5 d'entre elles ont recours à l'interconnexion pour compléter leurs besoins en eau sur plusieurs mois chaque année, 2 communes sont pourvoyeuses chaque année pour plusieurs communes, et 2 communes ne recourent à leur interconnexion qu'à l'occasion d'un problème matériel (fuite notamment).

En complément de l'amélioration de l'efficience technique des réseaux, l'interconnexion apparaît comme une solution privilégiée, à la fois par préférence mais aussi par manque d'alternative identifiée comme techniquement et économiquement viable : *« je ne vois pas d'autres solutions que d'aller puiser là [chez la commune voisine pourvoyeuse]»* [Maire, commune n°9, enquête]. En outre, toutes les communes n'ont pas accès à une nappe ou des sources (de même que l'interconnexion n'est pas toujours possible du fait de la topographie et de la distance des réseaux). L'interconnexion est choisie pour des raisons de moindre coût et/ou de meilleure garantie des capacités fournies par rapport à d'autres options envisagées : « *D'autres études avaient été réalisées, mais on n'était pas sûr que les autres options [pompage dans des eaux superficielles, etc.] permettraient d'assurer les besoins en eau. [La commune pourvoyeuse] a une bonne capacité avec une nouvelle station de pompage et dessert aussi [noms de plusieurs communes]* » [Maire, commune n°16, enquête].

[21] Plus marginalement, d'autres actions sont mises en place dans certaines communes comme l'augmentation des capacités de traitement ou des réservoirs, ou encore l'extension du réseau (afin de desservir des particuliers dont les sources ne suffisent plus).

La vente d'eau d'une commune à l'autre s'effectue via l'ouverture de vannes et la facturation des volumes distribués. Une convention fixe un volume maximal annuel. Celui-ci n'est pas atteint par toutes les communes [Maire, commune n°16, entretien], mais plusieurs d'entre elles souhaitent augmenter ce volume maximal. Un maire indique que le volume alloué à sa commune a déjà augmenté et qu'il est encore dépassé régulièrement et de façon importante [Maire, commune n°8, entretien]. C'est le seul maire qui s'interroge sur la limite du maillage : « *Je pense qu'il ne faut pas exagérer car il y a une limite à tout [...] d'ailleurs ils [commune pourvoyeuse] sont en travaux* » [Maire, commune n°8, enquête]. Les autres maires des communes clientes ne mettent pas en doute la capacité d'approvisionnement des communes pourvoyeuses et ne semblent pas forcément se poser la question de son évolution future : « *de l'eau dans les Vosges, il y en a* », « *la solution c'est le maillage* » [Maire, commune n°4, enquête] ; « *Avant on produisait plus [de volume d'eau] nous-mêmes, mais grâce aux voisins qui ne manquent pas…* » [Maire, commune n°2, enquête] ; « *Aujourd'hui il n'y a pas d'inquiétude par rapport à la capacité de [la commune pourvoyeuse], même s'ils ont une capacité réglementée* » [Maire, commune n°16, enquête]. Certaines communes enquêtées font partie d'un maillage avec deux communes pourvoyeuses interreliées : leur présence est considérée comme une sécurité, l'une pouvant se substituer à l'autre en cas de difficulté.

L'éventualité d'une rupture d'approvisionnement apparaît ainsi comme faiblement perçue. Pourtant, lors de la sécheresse de 2018, ces deux communes pourvoyeuses ont connu elles aussi des tensions sur leurs ressources. Celles-ci ont conduit une commune pourvoyeuse à exiger d'une commune en aval qu'elle utilise un forage qui n'avait jamais été mis en service : « *je leur ai dit : je vais vous couper l'eau, je suis obligé, on en a à peine pour nous, même quand on demande des restrictions, on a tout juste les 300 quelques mètres cubes qui arrivent par jour et donc on ne peut pas donner ce qu'on n'a pas »* [Maire, commune n°1, enquête].

Les maires des communes desservies via l'interconnexion, notamment celles qui le sont depuis longtemps et de façon récurrente, n'associent pas les enjeux de disponibilité de la ressource à leur commune, laissant parfois apparaître une certaine ambiguïté dans leurs propos sur la présence, ou non, de problème sur la ressource : « *C'est la ressource le premier enjeu. Il faut de l'eau et puis de l'eau de bonne qualité. Pour l'instant la qualité on n'a pas de problème. De l'eau, on en a. Mais oui c'est vraiment la ressource, c'est… Je ne me fais pas de soucis mais il faut… Tant que [noms des deux communes pourvoyeuses]… ont de l'eau, j'aurais de l'eau. » [Maire, commune n°2, enquête] ;* « *On se sent sécurisé, mais on est toujours en lien étroit [avec la commune pourvoyeuse] pendant la période de manque d'eau* » [*Maire, commune n°4, enquête]*. Certains maires perçoivent une autre limite, qui est celle des autorisations de captage délivrées à la commune pourvoyeuse par la Police de l'Eau. D'après le maire d'une commune cliente, la Police de l'Eau aurait demandé la réalisation d'une étude d'impact à la commune pourvoyeuse, dont les pompages dans une nappe mettraient à sec un ruisseau. Il s'interroge « *Les connexions sont déjà faites. Pourquoi chercher ailleurs pour 100-200 mètres de ruisseau, qui était déjà sec avant ? [...] Cela va être l'enjeu des discussions futures.* » [*Maire, commune n°4, enquête].*

- **Nouvelles sources et forages :**

Dans ce qui est considéré comme un pays d'eau, recourir au forage est considéré comme peu désirable (« *puiser dans l'avenir* » Maire, commune n°4, enquête]) par rapport à l'approvisionnement par les sources, et même si l'accès à celles-ci doit se faire en partie via l'interconnexion. L'attachement aux sources est fort chez les maires. Elles sont considérées comme une richesse, par leur abondance, la pureté de leurs eaux et le transport gravitaire limitant les coûts (« *c'est un privilège […] c'est un cadeau qu'on a tous les jours, c'est une eau parfaite* » [Maire, commune n°11, enquête]). Le forage constitue la solution de dernier recours : « *si vraiment on manquait d'eau, on taperait dans la nappe phréatique* » [Maire, commune n°4, enquête]. La recherche de nouvelles sources concerne des communes non maillées, mais aussi des communes pourvoyeuses. En effet, les communes pourvoyeuses sont dans des démarches de sécurisation réciproque par le développement de nouveaux maillages mais également par la recherche de nouvelles ressources communales : « *Vous allez me demander pourquoi capter cette source alors qu'on en a tellement ? Mais, d'abord, on alimente d'autres communes en aval qui sont en manque d'eau chronique. [...] On alimente les communes de [noms de cinq communes]. Voilà, un système de ramification. Et donc, cette cinquième source, il faut qu'elle soit captée.* » [Maire, commune n°4, enquête]. Les communes clientes enquêtées ne sont pas dans cette dynamique, excepté le maire qui a fait part d'inquiétudes sur les limites de la commune qui fournit la sienne et qui est dans une démarche de recherche de nouvelles ressources (« *Il faut qu'on tienne avec nos ressources* » [Maire, commune n°8, enquête]).

Ces mesures, d'optimisation et de sécurisation, permettent dans un cas de limiter les pertes et d'augmenter directement les volumes d'eau disponibles dans l'autre. Ainsi, la gestion de la disponibilité en eau est essentiellement circonscrite à des questions d'efficacité technique (on utilise « mieux » mais on ne modifie pas les usages). Les différentes mesures présentées sont mises en place aussi bien dans des communes où les maires n'inscrivent pas leur action vis-à-vis du changement climatique que dans des communes où il constitue une préoccupation.

Finalement, on constate que les tensions déjà existantes sur la ressource et/ou les problèmes de rendement déjà existants, justifient d'ores et déjà la mise en place d'actions (changement climatique ou non). La perspective d'une accentuation des tensions (par une intensité et fréquence accrue des sécheresses et par leurs impacts sur la disponibilité en eau), que les maires associent généralement au changement climatique, n'ouvre pas vers de nouvelles stratégies ou mesures. Elle contribue avant tout à justifier et renforcer ces mêmes actions. Le changement climatique ne modifie pas la nature des actions mises en place. Il vient donner plus de poids à ces stratégies déjà présentes. De même, l'opérateur privé de services d'eau enquêté promeut des solutions techniques d'adaptation, en lien avec son rôle d'exploitant de réseau : « *Quand on a une seule ressource, la solution est d'aller chercher une autre, ou s'interconnecter avec d'autres collectivités […]* » [Opérateur privé de services d'eau, enquête].

4.2.5 De l'enseignement des crises ?

« *Quand vous êtes maire et que vous passez dans le journal avec la fourniture de bouteilles ou de palettes d'eau, il n'y a pas un maire qui veut cela. Et pourtant, tout reste timide, dans la prise de conscience et dans l'action.* » [Maire et élu de la Communauté de Communes, commune n°13, enquête]

Pour les maires, les causes de l'inaction sont nombreuses : « *Pour eux c'est pas facile, généralement les maires quand ils arrivent ils héritent d'une situation antérieure, où personne n'a voulu faire trop de travaux parce que les démarches sont très longues, très coûteuses, et puis bon voilà on pense aussi toujours qu'on manquera jamais d'eau. Ça prend du temps de trouver des financements, de lancer des travaux* » [Maire, commune n°13, enquête]. Plusieurs maires indiquent que la prise de conscience grandit au sein des municipalités, notamment du fait de la récurrence des sécheresses : « *la première année où il y a eu la sécheresse, où j'ai voulu faire des choses, le constat n'était pas forcément partagé. Il y en a qui disaient "c'est bon c'est comme en 2003, c'est une année et puis voilà c'est bon", "2015 c'est comme 2003, ça va faire une année et puis ça ne va pas revenir. Il n'y a qu'à faire venir les camions encore une fois", "on verra dans 10 ans", "ça coûtera moins cher de faire venir des camions tous les dix ans que de devoir faire des travaux"* » [Maire, commune n°9, enquête]. La prise de conscience reste conditionnée à la rencontre de difficultés, mettant le risque et l'anticipation hors-champs (« *Et selon vous, qu'est-ce qui pourrait faire prendre conscience ?* » [enquêteur] « O*n n'est pas encore assez dans le mur* » [Maire et élu de la Communauté de Communes, commune n°13, enquête]). En outre, l'expérience des sécheresses et des crises n'a pas amené à revoir la manière dont l'eau est gérée :

- La gestion de la disponibilité en eau potable demeure basée des solutions techniques de sécurisation de l'offre (interconnexion entre communes, nouveaux captages, réhabilitation des captages, etc.). Dans les communes où ces solutions (mises en place suite à la sécheresse de 2003) se sont avérées insuffisantes, des ressources supplémentaires ont été mises en place ou sont actuellement recherchées. On peut noter une évolution liée au développement des systèmes de supervision et de télégestion, la connaissance plus fine de la disponibilité de la ressource pouvant contribuer à éviter les pénuries (« *Ce système d'alerte qu'on a mis en place début 2018, on a eu le fin nez quand même parce que sans ça, on aurait eu des coupures d'eau, parce qu'on ne se serait pas aperçu que le réservoir baissait.* » [Maire, commune n°1, enquête]). Globalement, on reste sur des solutions ponctuelles, d'urgence (arrêtés préfectoraux sécheresse et arrêtés municipaux, raccordements d'urgence, recours à des camions citernes, autorisation de s'approvisionner pour entreprise/agriculteur à la borne des pompiers, distribution par les municipalités de bouteilles d'eau).

- Si la majorité des maires pense qu'agir sur l'offre pourra suffire, certains estiment aussi qu'il serait nécessaire d'agir sur les usages de l'eau. Il est néanmoins assez difficile politiquement

de contraindre les activités et administrés. Incertains de leur capacité à assurer l'approvisionnement en eau, un maire indique délivrer les permis de construire « *au compte-goutte* » (« *si tout le monde fait pareil à savoir compter sur les autres, on pourrait avoir une tension sur l'eau alors il faut faire attention* » [Maire, commune n°2, enquête]) et un autre à en aviser ceux qui souhaitent développer une nouvelle activité sur le territoire communal (« *il y a une personne qui s'installe pour faire des petits fruits […] je lui ai dit : "tu le notes bien […] je ne peux pas t'assurer un approvisionnement en eau toute l'année" »* [Maire, commune n°10, enquête]). La réduction des consommations d'eau repose généralement sur des actions non-coercitives, reposant sur l'adhésion de la population (via des actions de sensibilisation : fête de l'eau, etc.) ou concernant les biens communaux (recherche d'économie d'eau dans les plantations municipales).

- Actuellement, les seules actions potentiellement contraignantes portant sur la demande demeurent les arrêtés préfectoraux de restriction des usages. C'est donc seulement en dernier recours que l'on cherche à agir sur la demande, afin d'éviter la crise. Les arrêtés préfectoraux ont un pouvoir réglementaire, pouvant conduire à une amende. Les maires indiquent cependant qu'ils sont peu respectés et que la Police de l'Eau n'a pas les moyens de les faire appliquer. Plusieurs maires sont assez pessimistes sur l'impact de la sensibilisation : « *les gens ne respectent pas, il faudrait sévir* » [Maire, commune n°13, enquête]. Les appels locaux semblent d'avantage porter leurs fruits : « *[…] les arrêtés préfectoraux passent un petit peu au-dessus de la tête des gens puisque c'est un arrêté départemental […]. Donc, on a fait plusieurs des mots dans les boîtes aux lettres, des articles de journaux etc., pour dire aux gens "Maintenant, il faut vraiment faire attention". En effet, ça a fait baisser la consommation […] entre 20 et 25 %»* [Maire, commune n°1, enquête].

L'ensemble de ces mesures et démarches ont été formalisées dans un guide sur la préservation de la ressource en eau en période d'étiage, réalisé à destination des collectivités par la Mission Inter-Services de l'Eau et de la Nature du Département des Vosges (MISEN 88). Cette initiative récente (juillet 2019) montre la nécessité de formaliser les procédures de gestion de crise dans un département qui est *« touché de plus en plus régulièrement par des épisodes de sécheresse qui se traduisent par des cours d'eau en assec et des communes privées d'alimentation en eau potable* » (MISEN 88, 2019). Mais l'objectif du guide est également de développer la prévention, et il promeut à ce titre des actions encore confidentielles telles que le bilan besoins/ressources en cas de projet de développement, la connaissance des consommateurs et la « *vigilance* » face aux prélèvements effectués. Une mise en œuvre effective de ces mesures, qui visent à agir non pas sur l'offre mais sur la demande, constituerait un changement de perspective majeur dans la gestion des questions de disponibilité de l'eau.

4.3 Résultats de l'enquête concernant l'enneigement

« *Donc, je vois plus un dérèglement climatique dans un premier temps. Je ne dis pas que dans vingt ans… mais dans l'immédiat, je ne pense pas qu'il y ait un changement énorme par rapport à… Par contre, comme je disais, il faut qu'on garantisse un enneigement, raison pour laquelle on a mis beaucoup plus de canons à neige qui nous permettent de produire en instantané beaucoup plus de neige. Et donc, on restitue cette eau à la chaîne du massif.* » [Adjoint au maire et élu de la Communauté de Communes, commune n°13, enquête]

Le massif des Vosges est considéré comme un massif de « moyenne montagne ». Il se caractérise par des « petites » et « moyennes » stations de ski.

En ce qui concerne la perception de l'enneigement, les entretiens montrent des discours semblables à ceux développés sur les sécheresses et leur dynamique : l'existence d'une évolution du climat est souvent soutenue, parfois avec vigueur, mais son ampleur et sa portée sont toujours questionnées ou mises à distance (au nom de la variabilité, des incertitudes, d'une réversibilité, etc.) : « *Il y a un changement climatique, c'est clair, il y a des évolutions, mais bon, je ne sais pas si on est capable de dire si la neige va revenir ou pas d'ici quelques années, ou bien disparaisse totalement, peut-être mais à quelle échéance…* » [Maire, commune n°16, enquête].

En ce qui concerne ensuite les sports d'hiver, les enjeux et logiques diffèrent selon la taille des stations (moyennes ou petites stations) :

- **Moyennes stations : une stratégie de résistance, jusqu'à quand ?**

Dans les moyennes stations, dotées d'infrastructures importantes et d'un fort enjeu économique, la stratégie repose sur une promesse technique centrale : des canons à neige plus efficaces pour sécuriser la présence de neige aux moments clés de la saison (vacances scolaires, etc.) et évacuer la perspective d'une reconversion. L'argumentaire, essentiellement économique, se base sur l'importance du ski alpin pour le territoire et sur l'incapacité du tourisme quatre-saisons à assurer de telles retombées économiques. Les canons à neige représentent un coût mineur comparé aux investissements réalisés par exemple pour les remontées mécaniques. Les acteurs du tourisme de la neige considèrent en effet que « *L'hiver ne va pas disparaître dans les 30 ou 40 ans. Après, on s'adaptera puisque les prêts vont sur 25-30 ans* » [Adjoint au maire, commune n°6, enquête]. Ils estiment aussi que les canons à neige bénéficient d'un temps de retour sur investissement très court (4 à 5 ans d'après un élu). Les dernières générations de canons à neige, dont la présence remonte aux années 1980 dans le massif des Vosges, permettent de produire de la neige de culture plus vite, à des températures moins basses (à 0°, contre -2/-3° avant), et avec moins d'eau (1m³ d'eau pour faire 2m³ de neige). Les quantités d'eau mobilisées restent néanmoins importantes (60 000 à 100 000m³ pour une des principales stations, d'après un élu) et de nouvelles retenues, dont les maires

minimisent les impacts sur l'hydrologie, sont mises en place pour le stockage de l'eau qui alimente les canons. Lors des hivers trop secs et trop chauds, les gestionnaires de stations acheminent par camions la neige prélevée sur les crêtes. Ces pratiques ne sont pas totalement nouvelles. Pour autant, dans le contexte politique actuel, elles sont de plus en plus décriées par des associations environnementales locales (SOS Massif des Vosges) et publicisées par la presse. Les gestionnaires de station doivent désormais s'en justifier, sans pour autant ouvrir à une discussion sur ces pratiques : *« Je ne comprends pas cet emballement médiatique, confie Benoît Perrin, directeur-adjoint de la station de ski, qui reçoit des appels de la presse depuis plusieurs jours. Ces rapatriements de neige par camion ne sont pas inhabituels (…) Selon lui, ils sont indispensables pour "réenneiger une rupture de 200 mètres sur une piste de 5 km". Ces trajets ne sont-ils pas une aberration écologique, comme l'assure SOS Massif des Vosges ? "Si la vallée veut survivre, il faut bien assurer l'enneigement, estime Benoît Perrin. C'est grâce au tourisme que l'on conserve une activité" »* (extrait de l'article du journal 20minutes : Wilcke 2020).

Enfin, les gestionnaires privés de ce type de station investissent également dans d'autres massifs afin d'assurer, par cette diversification géographique, une rentabilité globale de leur activité, face à la variabilité de l'enneigement selon les hivers. Le développement du tourisme quatre-saisons est recherché de façon additionnelle, et ne correspond pas, aujourd'hui, à l'amorce d'une éventuelle transition.

- **Petites stations : fermetures ou opportunités pour un tourisme 4 saisons ?**

Pour les petites stations, la rentabilité est difficile à trouver : les délégations de service public ont pris fin ou bien les délégataires souhaitent arrêter l'exploitation, les régies municipales qui les ont remplacées cherchent avant tout à atteindre l'équilibre financier. Dans les petites stations fonctionnant en régie municipale, la durée de retour sur investissement des canons à neige est trop importante pour envisager la production de neige de culture. L'enjeu est de limiter les pertes, en ouvrant les pistes dès que l'enneigement le permet ou par exemple en ne mettant du personnel aux caisses qu'en période de vacances scolaires. Ces communes conservent leurs pistes de ski alpin pour les retours sur l'économie touristique plus générale (nuitées), en complément à d'autres activités (ski nordique, randonnées, etc.). Il est important pour elles de conserver leur image et offre touristique familiale et de nature préservée, qui leur permet en outre de maintenir un cadre de vie agréable pour leur population. Du côté des DSP, le futur renouvellement est susceptible de poser la question de l'arrêt de l'exploitation, du fait des investissements nécessaires et de la difficulté à les amortir. L'arrêt de l'exploitation pourrait ainsi avoir du sens en dehors de toute considération sur le changement climatique. C'est néanmoins une position politiquement difficile à tenir : "*La population n'est pas prête à ce que les remontées mécaniques s'arrêtent […] Dans mon conseil, il y a une minorité qui pense comme moi. On n'ose pas le dire parce qu'on va se ramasser le goudron et les plumes !*" [Maire, commune n°15, enquête]. Cette perspective est évoquée par une minorité percevant des évolutions dans les pratiques hivernales des touristes et des potentiels de développement d'activités liées au tourisme 4 saisons.

4.4 Conclusion

Nous proposons ici d'inscrire les actions mises en œuvre, que l'enquête a permis d'identifier, dans les catégories de mesures d'adaptation au changement climatique. Ces actions correspondent à :

- des **mesures de diversification (**développement d'alternatives pour réduire le risque) ou **mesures d'immunisation au milieu par la technique** *:*

La diversification porte sur les ressources. Dans le domaine de l'eau potable, on mise sur la complémentarité sources/forages/interconnexion (interconnexion à plusieurs voisins ou en réseau pour réduire risque de manque d'eau). Cette diversité permet aussi de pallier à des problèmes de qualité (pollution ponctuelle, ou problème technique : pompe qui se décroche, etc.).
Dans le domaine de l'enneigement, il s'agit de construire de nouvelles retenues d'eau, pour la production de neige artificielle. La logique d'immunisation par la technique s'observe en particulier sur la problématique de l'enneigement avec la conception de canons à neige plus efficaces.

- des **mesures sans regret** (jugées bénéfiques pour résoudre une diversité de problèmes d'environnement, entre autres ceux liés à l'évolution du climat) avec l'amélioration des rendements des réseaux et la sensibilisation au gaspillage ; ou encore avec la mise en place de solidarités territoriales via le maillage (solutions qui améliorent le service à moindre coût, voire en faisant baisser la contribution de chacun aux coûts fixes du service).

Certaines mesures pourraient ne plus constituer des solutions « sans regret » si le problème perdure ou s'amplifie. C'est le cas par exemples des maillages. Ils ne fonctionnent que tant que la commune excédentaire n'est pas elle-même sujette à des tensions et à des limites de son offre en eau.

Les mesures envisagées ne cherchent pas à modifier les demandes ou les usages, elles agissent plutôt sur l'offre en eau ou en neige. Les solutions déployées visent à assurer un approvisionnement sans discontinuité, face à la variabilité des précipitations neigeuses et de la disponibilité en eau. L'action publique locale continue de miser sur la capacité du système à éviter la perturbation (grâce à des camions citernes) et à gérer des crises (restrictions d'usage temporaires). Elle ne déploie pas, à ce stade, d'actions en faveur d'une société plus sobre ou plus résiliente face aux perturbations.

On peut faire l'hypothèse que, si les ressources en eau souterraines étaient mieux connues, elles permettraient d'identifier les limites au-delà desquelles la gestion ne pourra plus faire l'économie d'une action sur la demande en eau, à l'échelle des ménages, mais aussi plus largement des territoires : aménagement, coopération intercommunale…

En ce qui concerne la coopération intercommunale dans le domaine de l'eau potable, les entretiens montrent que les maillages constituent une solution privilégiée. Cela révèle le rôle joué par le conditionnement des aides de l'Agence ou du Conseil départemental des Vosges. Les entretiens suggèrent aussi que les communes en déficit voient le maillage comme une solution techniquement intéressante et qui se traduit par une contractualisation ciblée et circonscrite avec la commune voisine. La coopération en matière de maillage n'empêche pas les réticences concernant les projets

de coopération et de mutualisation intercommunale plus larges, avec la loi NOTRe, comme nous le verrons dans la section 5.

Les temporalités de la prise en charge du changement climatique ne sont pas celles des élus rencontrés, dont l'horizon reste marqué par les prochaines municipales. Les entretiens mettent en évidence plusieurs cas de figure. Certains estiment que les situations qu'ils connaissent ne changeront pas. D'autres estiment plutôt que les situations futures sont tellement incertaines qu'elles ne peuvent constituer des guides pour l'action : les situations futures sont influencées par des facteurs trop disparates et peu maîtrisés (loi NOTRe, climat…) et cela empêche toute projection (« *On navigue à vue* » [Maire, commune n°1, enquête]). Dans un cas comme dans l'autre, le discours identifie des situations sans trajectoire, soit parce qu'elles seraient immuables, soit parce qu'elles sont au contraire trop chaotiques.

Finalement, le changement climatique est essentiellement mis en avant quand il vient stratégiquement renforcer des positions qui répondent à d'autres enjeux. À titre d'exemple, pour l'opérateur privé de services d'eau enquêté, l'alerte sur le changement climatique et sur l'intensification des situations de pénurie d'eau constituent un argument de sensibilisation de l'action publique quant à la nécessité de renouveler des réseaux souvent vétustes et devenus difficilement gérables. Pour certains acteurs, tels que les services de l'État ou des communautés de communes, c'est une ressource politique pour investir ou réinvestir leur action sur les territoires.

5 Quels sont les instruments de l'action publique aujourd'hui mobilisés pour adapter la gestion de l'eau au changement climatique ?

Dans la section 4, nous avons montré les difficultés rencontrées par une gestion à l'échelon communal des effets du climat sur les ressources en eau. Dans les Vosges, cet échelon est en interaction avec d'autres, via l'action des intercommunalités et du Conseil départemental (collectivités territoriales), de la Direction départementale des territoires (service déconcentré de l'État), de l'Agence de l'eau (établissement public), de la CCI (établissement public) ou de l'Agence départementale de développement touristique (association loi 1901), ou encore via des projets qui associent aussi Météo France ou des chercheurs, comme c'est le cas dans le projet Interreg Clim'Ability. Nous proposons ici d'étudier plus spécifiquement trois dispositifs qui caractérisent cette action, menée à un échelon supra-communal :

- les études, entre production de savoirs et instrument de concertation au service de la planification (section 5.1) ;
- les instruments contractuels pour le financement d'infrastructures, et leurs relations à la réforme territoriale induite par la Loi NOTRe dans le domaine de la gestion des services d'eau potable et d'assainissement (section 5.2).

5.1 Les études, entre production de savoirs et instrument de concertation

Les études s'appuient sur une multiplicité de formes de savoirs et de données hétérogènes qui doivent permettre de dessiner des stratégies ou de proposer des solutions très opérationnelles. Elles produisent des analyses qui peuvent être quantitatives, et s'appuyer alors sur de la métrologie, des modélisations, des simulations ou des indicateurs (débits, évaluations économiques, etc.), ou qualitatives, et se fonder alors sur des analyses de paysages ou des enquêtes sociales. Les deux approches, quantitatives et qualitatives, peuvent être croisées, par exemple dans le diagnostic de réseaux d'eau.

L'enjeu auquel doit répondre ces études est d'arriver à être un acte qui organise les acteurs, en sélectionnant des données, cartes ou indicateurs qui arrivent à la fois à structurer la problématique et à dégager des solutions.

Nous nous appuyons sur cinq études, qui concernent notre terrain d'enquête et qui s'inscrivent dans une logique d'adaptation, dans la mesure où elles visent à anticiper et à préparer le devenir du territoire vis-à-vis du changement climatique, ou bien parce qu'elles visent à apporter des solutions à un problème déjà existant susceptible de se renforcer avec les évolutions climatiques à venir. Nous avons cherché à caractériser la place et le rôle de ces études vis-à-vis de l'action publique territoriale. Comme pour la métrologie et la modélisation, il s'agissait d'identifier :

- les enjeux auxquels elles répondent,
- les dispositifs, méthodes et acteurs sur lesquels elles s'appuient,

- les conditions auxquelles les acteurs leur font confiance/leur accordent un intérêt,
- comment elles contribuent à une compréhension territorialisée du changement climatique (difficultés, apports et usages),

Il s'agissait aussi plus spécifiquement d'analyser comment elles contribuent à la prise en compte du changement climatique dans l'action publique locale.

Les cinq études analysées (voir en annexe 5 une présentation générale de ces études) sont :

- l'Atelier des territoires « Vivre et travailler en montagne à l'heure du changement climatique » de la Communauté de Communes des Hautes Vosges (portage DDT/Ministère de la cohésion des territoires) ;
- l'étude sur l'approvisionnement en eau des fermes auberges dans le massif des Vosges (portage ADT : Alsace Destination Tourisme) ;
- l'étude Clim'Ability sur le tourisme de moyenne montagne face au changement climatique dans le massif des Vosges et en Forêt Noire (projet de recherche Interreg) ;
- l'étude de l'AERM de prospective sur les activités économiques liées à l'eau à l'échelle de Rhin-Meuse ;
- et l'étude de l'AERM sur la vulnérabilité de ces activités économiques au changement climatique à l'échelle des bassins élémentaires de Rhin-Meuse.

Ces études sont toutes produites pour venir en appui à une planification à une échelle supra-communale : le plan de paysage de lutte et d'adaptation au changement climatique, le schéma de développement économique et touristique de la CCHV, ou encore le plan d'adaptation au changement climatique de l'AERM. Elles sont aussi toutes portées par des acteurs supra-communaux : AERM, intercommunalité, CCI, agence de développement touristique départementale (Alsace Destination Tourisme).

L'analyse s'appuie sur une étude de documents et des entretiens semi-directifs avec les acteurs qui commanditent, créent ou utilisent ces savoirs.

5.1.1 Une production de savoirs en appui à la planification

Ces cinq études diffèrent par leur focale et leur périmètre. Trois d'entre elles (Atelier des territoires, étude Clim'Ability et étude sur les fermes-auberges) portent sur le massif des Vosges, en partie ou en totalité. Elles ont aussi en commun de porter, au moins en partie, sur le tourisme (Figure 18). Dans l'Atelier des territoires, cet enjeu est inscrit dans des questions plus large liées à la vie en montagne (mobilité, urbanisme, activités économiques au sens large), à l'échelle de la CCHV. Dans l'étude sur les fermes-auberges, cet enjeu est spécifiquement associé à l'approvisionnement en eau. Dans Clim'Ability, comme dans l'Atelier de territoires, un point à la fois crucial mais aussi très sensible est celui de la production de neige. Les deux études de l'AERM couvrent à la fois un territoire plus large, l'ensemble du bassin Rhin-Meuse et un spectre plus large des enjeux liés à l'eau.

	Étude prospective et étude de la vulnérabilité au changement climatique des activités socio-économiques du bassin Rhin-Meuse	Étude sur les fermes-auberges	Atelier des Territoires « Vivre et travailler en montagne à l'heure du changement climatique »	Étude Clim'Ability sur le tourisme dans le massif des Vosges et en Forêt Noire
Commanditaire / Porteur	Agence de l'Eau Rhin-Meuse	Alsace Destination Tourisme	Communauté de Communes des Hautes Vosges – DDT88 – Ministère de la cohésion des territoires	Interreg (programme de recherche européen) / CCI Alsace Eurométropole - ADT
Réalisation	AERM et bureaux d'étude	Bureaux d'étude	Bureaux d'étude	Chercheurs
Terrain d'étude	Bassin Rhin-Meuse	Massif des Vosges	Territoire de la CCHV	Massif des Vosges (et Forêt Noire)
Fonction	Évaluation de la vulnérabilité des activités socio-économiques au changement climatique à l'horizon 2050. Hiérarchisation des enjeux par sous bassin	Identification des solutions à mettre en œuvre pour limiter l'impact des manques d'eau sur les fermes-auberges	Définition d'un projet de territoire avec les élus locaux	Identifier les vulnérabilités aux conséquences du changement climatique et les formes/pistes d'adaptation avec les acteurs du tourisme
Production de savoirs	Scénarios, matrices de vulnérabilité, tableaux d'impact, fiches-mesures	Diagnostic des besoins en eau et pratiques/équipements existants, identification de mesures et conditions de mise en œuvre	Orientations du projet de territoire (axes stratégiques et pistes d'action en matière d'aménagement et de paysage)	Perception des risques, chaînes d'impact, stratégies existantes du secteur touristique
Usages/ poursuites envisagées	Nourrir le Plan d'adaptation de l'AERM. Orientation des chargés d'affaire de l'AERM. Bonification des taux de subvention.	Engagement des actions par ADT. Demande de subventions. Organisation d'une visite de terrain en Autriche. Recrutement d'un stagiaire pour assurer le suivi.	Nourrir le schéma de développement économique et touristique et plan de paysage de lutte et d'adaptation au changement climatique	Co-construire de stratégie d'adaptation touristique en atelier (nouveau projet Clim'Ability Design)

Figure 18 : Caractéristiques des études analysées

Ces cinq études ont pour point commun d'être associées à une planification supra-communale et de viser à poser des jalons pour des actions futures. Ce qui diffère, c'est le type de planification et donc d'engagements et d'actions associés : cette planification peut être stratégique ou plus opérationnelle.

L'analyse montre que, pour quatre études (Atelier des territoires, étude Clim'Ability, étude prospective de l'AERM), il s'agit de venir en appui à une planification stratégique, visant à définir les orientations générales d'une organisation, sa mission, les objectifs qu'elle entend réaliser. Ces études s'inscrivent dans une logique d'anticipation de problèmes à venir qu'il s'agit aussi de circonscrire : « *Le volet opérationnel nous manque, mais il faut quand même prendre le temps de constituer les bases et de baliser correctement notre action là où notre action est attendue* » [CCHV, enquête]. Ce

qui fait problème n'est pas arrêté a priori : c'est à l'étude de le définir, grâce à l'élaboration de scénarios, l'identification ou la quantification d'impacts et la définition de priorités pour l'adaptation. Le produit de ce type d'études correspond alors à des orientations générales, peu engageantes ou contraignantes. Ainsi, pour l'Atelier des territoires, le produit est une « *feuille de route* » qui relève « *plus d'intentions, de chantiers à ouvrir que d'un programme d'actions opérationnelles avec un plan de financement* » (Faessel-Virole, 2018). Il s'agit d'une première étape pour l'élaboration par la CCHV du plan de paysage de lutte et d'adaptation au changement climatique et du schéma de développement économique et touristique, élaboration qui est elle aussi soutenue financièrement par le Ministère. L'étude Clim'Ability est, elle aussi, considérée comme un premier jalon vers de nouvelles études plus opérationnelles, dans le cadre d'un nouvel Interreg intitulé « Clim'Ability Design ».

Les deux autres études, celle sur l'approvisionnement des fermes-auberges et celle de l'AERM sur la vulnérabilité, viennent plutôt en appui à une planification opérationnelle, avec des actions concrètes pour répondre à un objectif à court ou moyen terme. Dans le cas des fermes-auberges, les problèmes déjà rencontrés d'approvisionnement en eau constituent le point de départ de l'étude. Le changement climatique en est un facteur potentiellement aggravant, qui vient renforcer l'urgence d'actions pour en réduire les impacts. Le produit de l'étude est ainsi une liste d'actions proposée par le bureau d'étude et validée par ADT, allant du suivi des consommations, à l'installation d'équipements hydro-économes ou à des aménagements paysagers pour modifier la circulation de l'eau. La deuxième étape pour ADT est celle de la recherche de financements. L'évaluation quantitative du problème et des solutions possibles a conclu que le potentiel d'économie d'eau lié à des modifications techniques des usages domestiques de l'eau (économiseurs) est limité et ne suffit pas à résoudre le déséquilibre. D'autres marges de manœuvre, qui pourraient être quantitativement significatives, sont mises hors champ : les toilettes sèches parce que les touristes ne seraient pas prêts : « *culturellement en France, les clients ne sont pas prêts à utiliser ce type de toilettes* » [ADT, enquête], et une réduction du cheptel parce que les fermiers-aubergistes y perdraient trop de revenus : « *une des personnes qui a fait l'étude me disait qu'une des solutions pour résoudre les problèmes d'eau serait de réduire les cheptels, mais cela, on ne peut pas le dire aux fermiers-aubergistes puisque c'est ce qui les fait vivre et c'est ce qu'ils préféreraient éviter* » [ADT, enquête]. Avec ce cadrage, le type de solution privilégiée revient à envisager des formes de stockage : des étangs destinés à abreuver le cheptel, remplis pendant les périodes hivernales et aménagés avec des arbres pour réduire la transpiration des vaches et limiter le réchauffement ou l'évaporation de l'eau.
Dans le cas de l'étude de vulnérabilité de l'AERM, l'identification de solutions prend appui sur les actions déjà promues par l'AERM. Le produit de l'étude est une liste de mesures que l'AERM s'engage à financer si elles intéressent les maîtres d'ouvrage (élus) et qu'ils s'en saisissent.

Quelle que soit le type de produits de ces études, et leur degré d'opérationnalité, il s'agit toujours d'une promesse d'action futures, mais qui n'implique jamais d'engagement fort des acteurs : « *Il [l'Atelier des Territoires] n'oblige personne à rien, il dégage des grandes lignes* » (élu de la CCHV, commune n°6, enquête).

L'analyse de ces études révèle deux niveaux de tensions, entre le consensus et la décision d'un côté et entre les temporalités environnementales et politiques de l'autre :

- Le consensus permet de structurer des collectifs grâce à des engagements mous, mais qui par conséquent n'en sont pas vraiment. Il revient aussi à évacuer la question des gagnants et des perdants que les actions d'adaptation pourraient générer. Or passer à l'action, c'est rendre visible cette question, ce que, politiquement, peu d'élus sont prêts à assumer, en particulier dans un contexte de budgets très contraints : « *il n'y a pas de problème [pour écrire un plan]. Après, quand il faudra mettre en priorité des actions et du budget en face, si l'on dit qu'un plan de paysage sur les 22 communes va nécessiter un temps plein et demi demain, là, on n'y est encore pas* » [Maire et élu de la CCHV, commune n°12, enquête] ; « *Dès lors qu'il leur faut […] donner des niveaux d'ambitions à la stratégie qu'ils [les élus locaux] veulent mettre en place avec le schéma de développement économique touristique, les techniciens auront beau faire tous les travaux, il faudra bien derrière des prises de décisions et des délibérations* » [DDT, enquête]. En outre, les regroupements intercommunaux impulsés par l'État rencontrent des réticences de la part de certaines communes. Ainsi, 7 des 22 communes de la CCHV ont demandé leur retrait[22].
- D'autre part, la capacité des études à promouvoir des actions de long terme entre en tension avec la temporalité d'action des élus, qui raisonnent à l'échelle du mandat : « *lorsqu'il s'agira de faire une campagne électorale pour les six ans à venir, on va se contenter de gérer six ans. On ne va pas faire campagne en disant qu'en 2030 ou en 2040, on sait qu'il va se passer ça.* » [Maire et élu de la CCHV, commune n°12, enquête].

5.1.2 Quelle mobilisation des acteurs locaux et avec quels effets ?

Dans la section précédente, nous avons vu qu'une fonction importante assignée aux études, en particulier lorsqu'elles s'inscrivent dans une logique de planification stratégique pour l'adaptation, réside dans leur capacité à organiser des collectifs autour d'une question encore relativement peu cadrée. L'objectif est de mettre en réseau des acteurs, de construire des diagnostics partagés, en faisant l'hypothèse que cela stimulera la capacité d'action collective future. Dans cette section, nous proposons d'analyser plus finement la manière dont ces collectifs sont convoqués ou mobilisés et leurs effets.

- **Des dispositifs participatifs au cœur des procédures**

Les démarches étudiées sont portées explicitement par un acteur : l'État (Atelier des territoires), l'AERM ou ADT, ou d'un groupement d'acteurs dans le cas de Clim'Ability, au sein duquel la CCI joue un rôle moteur. Ces acteurs mobilisent des dispositifs participatifs pour enrôler ceux qui ont des missions de gestion ou ceux qui utilisent les espaces et les ressources localement. Ils font le pari que la participation est un détour nécessaire pour la co-construction d'un projet d'adaptation du

[22] Voir par exemple à ce sujet : www.vosgesmatin.fr/edition-de-remiremont/2018/11/27/la-communaute-de-communes-des-hautes-vosges-a-la-croisee-des-chemins

territoire au changement climatique. Les dispositifs participatifs déployés vont des journées d'échanges rythmées par des présentations d'experts, à l'organisation de tables rondes, de groupes de travail ou de visites de terrain. Ces ateliers sont associés à un travail en chambre réalisé par des bureaux d'études, des entretiens individuels ou encore des questionnaires (Figure 19).

	Étude prospective et étude de la vulnérabilité au changement climatique des activités socio-économiques du bassin Rhin-Meuse	**Étude sur les fermes-auberges**	**Atelier de Territoire « Vivre et travailler en montagne à l'heure du changement climatique »**	**Étude Clim'Ability sur le tourisme dans le massif des Vosges et en Forêt Noire**
Démarche	Étude prospective : 3 ateliers thématiques + questionnaire en ligne. Étude vulnérabilité : méthodologie du ministère + 4 ateliers locaux de validation des résultats.	Enquête de terrain et diagnostic auprès de fermes-auberges volontaires. Restitution/discussion.	Enquête de terrain + 3 ateliers sous des formats variés (travaux en groupe, sortie terrain, etc.) + séminaire de restitution	Enquête de terrain et 2 ateliers
Acteurs mobilisés lors des ateliers	Ateliers thématiques : acteurs du secteur agricole et agro-alimentaire, secteur industriel, population et urbanisme	Acteurs du tourisme liés aux fermes-auberges	Acteurs variés du territoire	Acteurs du tourisme (hébergeurs, gestionnaires de stations de ski, écoles de ski, Offices de Tourisme, DDT, etc.)

Figure 19 : Démarches des études analysées

Si les porteurs des études misent sur la participation des élus locaux et la co-construction, elle n'est pour autant pas gagnée d'avance. À titre d'exemple, les élus locaux ont d'abord accueilli la démarche d'Atelier des Territoires, inédite dans le massif des Vosges, avec une certaine réserve : « *Ils étaient dans l'attente : "Qu'est-ce qu'il veut l'État avec son truc ?"* » [DDT 88, enquête]. Une des raisons est la difficulté à connecter une représentation « éloignée » du changement climatique, qu'il n'est pas aisé d'associer à des effets matériels sur le territoire, et les enjeux de gestion des élus locaux. Pour les élus, le changement climatique est le plus souvent un fait qu'ils reconnaissent mais qu'ils renvoient à une forme d'abstraction qui doit être gouvernée à d'autres échelles, nationales ou supranationales (Folléa, 2018a). Cette connexion est justement l'un des défis des études menées. Dans l'Atelier des Territoires, pour réduire le caractère abstrait du changement climatique, le bureau d'études a par exemple mobilisé une approche par le paysage et la perception sensible qu'ont les habitants de leur territoire et de la vie quotidienne (Folléa, 2018a). La DDT des Vosges a fait appel à des méthodes plus classiques, avec par exemple une conférence introductive sur le changement climatique donnée par un scientifique pour les élus locaux. Pour la DDT, cette conférence revêtait deux objectifs complémentaires : c'était à la fois une « *réunion d'acculturation* » [DDT 88, enquête] et un moyen de désamorcer les discours climato-sceptiques (« *On avait senti encore quelques élus climato-sceptiques dans les premiers échanges, et donc on avait fait venir le grand témoin […]* » [DDT 88, enquête]).

Les acteurs qui portent ces études assignent plus largement aux ateliers une fonction d'« *espace de dialogue entre acteurs hors de tout cadre institutionnel ou procédural* » (Faessel-Virole, 2018), dans des situations où ce dialogue est absent ou dans l'impasse. Dans les Hautes Vosges par exemple, l'Atelier a été concomitant à la création de la CCHV et lui a fourni une arène pour s'organiser, dans un contexte où les élus qui la composent avaient des relations plutôt conflictuelles et parce qu'il ne s'agissait pas d'un instrument de politique publique contraignant : « *Et ces ateliers leur ont vraiment permis de travailler ensemble. Et ça a bien marché, justement parce qu'on n'était pas en train de faire un PLU ou un SCoT par exemple avec une portée juridique » [DDT 88, enquête].* L'Atelier des Territoires a permis de rassembler pour la première fois non seulement les élus et agents des trois communautés de communes alors en cours de fusion, mais aussi le Conseil départemental, le Parc Naturel Régional du Ballon des Vosges, le Commissariat à l'aménagement, au développement et à la protection du massif des Vosges, etc. Il s'est appuyé sur plusieurs dispositifs pour favoriser les interactions régulières et les relations interpersonnelles (visite en bus, travaux en groupe, repas partagés, etc.) entre élus, services déconcentrés de l'État et services techniques de la CCHV : « *Pour nous [DDT], c'est le territoire qu'on connaît mieux parce qu'on travaille avec. Ils [la CCHV] ont aussi organisé un atelier permanent, c'est-à-dire qu'on participe deux fois par an à des réunions, on va dire, un peu plus stratégiques, avec des élus* » (DDT 88, enquête). Enfin, ce type d'initiative contribue aussi à équiper la CCHV en attirant sur le territoire des groupements de bureaux d'étude avec des compétences d'animation et des capacités à embrasser des thématiques larges et transversales, que les acteurs intercommunaux seuls auraient du mal à mobiliser.

Cette fonction d'espace de dialogue est également étendue aux comités de pilotage des études eux-mêmes. Pour l'étude sur les fermes-auberges par exemple, la présence des services de l'État dans le comité de pilotage a constitué un moyen pour ADT de favoriser l'accompagnement financier et technique non seulement de l'étude mais aussi de ses suites : « *Ce sont des organismes d'État ou des administrations et c'est mieux de les avoir dans le comité de pilotage que de les avoir contre nous, pour leur dire qu'on commence cette réflexion et ce projet : "Aidez-nous, accompagnez-nous pour qu'on aille tous dans la même direction"*» [ADT, enquête].

- **Des difficultés que les approches participatives ont du mal à surmonter**

Malgré les dispositifs de co-construction déployés, nos entretiens montrent que la mobilisation sur la durée des acteurs locaux, qu'ils soient publics ou privés, reste encore assez limitée. Si les actions mises en place dans l'Atelier des Territoires ont pu contribuer à sensibiliser les élus locaux, l'approche n'a cependant pas permis de susciter un engagement de tous dans la démarche : alors que, d'après les entretiens, la première réunion semble avoir beaucoup rassemblé, avec une cinquantaine de personnes dont une majorité d'élus, les trois suivantes ont bien moins mobilisé, avec 17 élus sur les 49 de la Communauté de Communes et une douzaine de communes représentées sur 22. Si certains élus s'inscrivent pleinement dans ce type de démarches, d'autres ne participent jamais : « *Il n'y avait pas grand monde et vous retrouvez les mêmes* » [élu de la CCHV, commune n°6, enquête]. Par ailleurs, les motivations de ceux qui participent peuvent être très variables, de l'obligation institutionnelle à la curiosité ou encore à l'intérêt stratégique : « *certains*

viennent un peu par obligation, comme les représentants des commerçants. D'autres viennent par intérêt, comme les accompagnateurs de moyenne montagne, pour voir comment ils pourraient se positionner » [élu de la CCHV, commune n°6, enquête]. Selon le bureau d'étude, les élus et les techniciens des collectivités présents ont fait preuve d'une « *intense participation* » (Folléa, 2018a). Enfin, alors que les services de l'État considèrent que l'Atelier des territoires vosgien a été un succès, couronné par un financement complémentaire post-atelier du Ministère, certains contestent encore la démarche au niveau local : « *Vu de l'extérieur, notre démarche est donc jugée exemplaire, et en local on se bat parfois encore pour essayer de justifier ce que l'on fait* » [Maire et élu de la CCHV, commune n°12, enquête]. On voit bien là la difficulté à évaluer ce type de démarche.

Par ailleurs, des chercheuses ont analysé la place des acteurs économiques dans les Ateliers de territoire de montagne et les conditions de réussite de la transition touristique en moyenne montagne (George and Achin, 2018). Leur analyse croisée des Vosges, du Jura et des Alpes du Nord, montre que la démarche Atelier des territoires a réussi à impliquer ces acteurs économiques dans la durée sur un seul des sites, dans les Alpes-du-Nord (Bauges, station des Aillons-Margériaz). C'est le seul cas où la démarche a suscité des interactions régulières pour définir collectivement l'avenir d'une station de ski.

Finalement, la capacité des études à constituer des collectifs dépend grandement de l'intérêt que trouvent des acteurs à une résolution collective de problèmes. Ainsi, si les propriétaires des fermes-auberges ont adhéré à l'étude pilotée ADT c'est parce qu'ils considéraient que les réponses individuelles qu'ils avaient pu jusqu'alors apporter à leurs problèmes d'approvisionnement en eau ne suffisaient pas. Ce qui compte c'est le problème vécu, problème que le changement climatique pourrait intensifier, mais qui n'est pas central dans la dynamique. D'ailleurs, dans l'étude des fermes-auberges, la question du changement climatique n'est mentionnée que brièvement en amont, dans le cahier des charges, et par le bureau d'étude en toute fin du diagnostic. Si la question du changement climatique intervient dans cette étude, même si c'est de manière marginale, c'est surtout parce que des personnes d'ADT ont été associées à l'étude Clim'Ability. Pour les Ateliers des Territoires, il s'agit d'abord d'une demande du Ministère de la cohésion des territoires liée au devenir économique de territoires en marge (montagne, péri-urbain, littoral…), dans un contexte de changement climatique, et dont les DDT se font le relai localement pour proposer des sites. Dans les Vosges, pour les élus, le changement climatique n'est pas vraiment un problème vécu mais plutôt une question que l'État leur soumet, « *quelque chose de plutôt philosophique, des considérations actuelles sur lesquelles on les oblige à réfléchir* » [CCHV, enquête].

5.1.3 Le contenu des débats dans et autour des études

Dans les sections précédentes nous avons discuté de la capacité des études à être un acte organisant. Dans cette section, nous nous focalisons sur l'objet même des études et des débats qui leurs sont associés.

- **La place de l'enneigement et de l'AEP :**

« *Je pense qu'au départ on pensait beaucoup neige de culture, parce que changement climatique, vivre et travailler en montagne… finalement, en pratique dans l'atelier c'était un peu tabou* » [DDT 88, enquête]

La question de l'enneigement et du modèle économique des stations de ski, bien qu'elle soit présentée comme la *« cible première »* pour le Ministère dans le cadre des Ateliers des territoires de montagne (Diaz, 2018), a été très vite évacuée des débats dans les Hautes Vosges [DDT 88, enquête]. Ainsi, le discours du directeur de la station de ski visitée par les participants lors de la première journée d'atelier a insisté sur la dépendance économique du territoire aux sports d'hiver et l'incapacité de toute autre activité à assurer des revenus équivalents. Le directeur a cité une évaluation des Domaines skiables de France selon laquelle 1 euro dépensé pour le ski génèrerait six euros de dépenses additionnelles (cité dans DDT des Vosges 2017a). Dans sa station, il estimait que 71% du chiffre d'affaire était lié au domaine skiable. Par la suite, la question du ski a été évacuée des débats de l'atelier [DDT 88, enquête].

Le poids de l'économie des sports d'hiver constitue un « *verrou* » à l'identification de stratégies de substitution à long terme (George and Achin, 2018), et ce d'autant plus que la neige de culture, et les promesses d'innovation technologique qui lui sont associées, reste le moyen privilégié par les acteurs locaux pour l'adaptation aux variations du climat, à l'horizon qui les intéresse.

Pour Georges et Achin (2018), les acteurs impliqués dans les Ateliers de territoire de montagne s'inscriraient « *dans une logique de "pari" avec l'aléa météorologique, faisant fi des scénarios d'évolution climatiques* ». Nos entretiens dans les Vosges montrent qu'il ne s'agit pas vraiment pour les acteurs de s'en remettre au hasard ou d'ignorer les évolutions du climat, mais plutôt d'une rationalité fondée sur le temps de retour sur investissement des canons à neige. Pour ces acteurs, les durées de retour sur investissement sont compatibles avec les projections climatiques de moyen terme : « *Quand on leur a posé la question du réchauffement climatique, les gestionnaires disent qu'ils ont un modèle économique… Quand on dit vingt ans, ils disent "On a encore trois cycles d'investissement"* » [DDT88, enquête] ; « *Les gestionnaires le disent clairement, aujourd'hui ils continuent d'investir parce que ce sont des temps de retour sur investissement très courts, même s'ils savent que dans vingt ou trente ans ce sera très compliqué, les temps de retour sur investissement d'une flotte de canons à neige c'est quatre ou cinq ans, pour le moment il n'y a donc pas de raison que ça s'arrête* » [maire et élu de la CCHV, commune n°12, enquête]. Leurs discours s'appuient sur des études réalisées par Domaines skiables de France : « *En fait, ils ont tout un discours apparemment qui vient de [Domaines skiables de France], où ils ont des niveaux de développement de la neige de culture sur d'autres pays, en Italie, en Autriche etc., et ils expliquent qu'ils sont là et*

nous on est là, et donc on a encore beaucoup de marges de progrès, et donc qu'on peut s'adapter même en cas de réchauffement climatique » [DDT 88, enquête][23].

Les ateliers n'ont donc pas réussi à constituer un espace légitime ou stratégiquement intéressant pour aborder la question d'une transition avec un tourisme qui ne soit pas fondé sur le ski. Reposant sur l'adhésion des acteurs, ces dispositifs n'ont pas pu imposer un débat sur ces sujets.

Au sein des différents sites des Ateliers des Territoires de montagne, George et Achin (2018) montrent que les bureaux d'études ont eu des approches plus ou moins directives, avec des résultats contrastés : alors que certains sites de l'Atelier des Territoires ont réussi à aborder ces questions, au prix d'une importante phase d'appropriation par les acteurs et au risque de la démobilisation de ceux-ci, l'approche de type « *bottom-up* » mise en place dans les Vosges a conduit à ce que l'atelier *« se resserre autour de thématiques faisant consensus, tel le paysage, sans que ne soit véritablement questionné "l'après" sports d'hiver ni la diversification…* ». On peut ajouter le cas de l'Atelier des Territoires des Pyrénées-Orientales, qui n'a pas abouti : les travaux y ont en effet été suspendus, le bureau d'études n'ayant pas su contourner les problématiques liées à la concurrence directe des stations de sports d'hiver du territoire [DDT 88, enquête]. Dans les Vosges, le bureau d'étude justifie son approche par le contexte politico-administratif de la communauté de communes des Hautes Vosges, *a priori* défavorable à la tenue de l'Atelier : le but était de « *cimenter la nouvelle intercommunalité* » par une démarche de projet s'attachant à « *dégager des objectifs partagés sur des points communs* », « *plutôt que de travailler sur la diversité et les différences* » (Folléa, 2018b).

À la différence des Ateliers de territoire, dans l'étude Clim'Ability - explicitement focalisée sur le tourisme - la diversification a pu être traitée. Cependant, cela n'a pu être possible qu'à la condition de venir en complément et non pas en remplacement des activités liées à la neige. Dès la première réunion du projet Clim'Ability, en mars 2018, ADT a voulu mettre le sujet au cœur de la discussion : « *On n'enterre pas le ski, mais un massif ne pourra plus vivre que de cette activité. Il y a une vulnérabilité économique, un véritable enjeu d'emplois* » nécessitant « *de commencer à engager une mutation, car elle prendra 15, 20 ou 50 ans* » (cité dans Woehl 2018). Suite à cette réunion, plusieurs gestionnaires de station ont vivement réagi auprès de la CCI Alsace Eurométropole, en dénonçant un discours qui signifiait pour eux la fin de la neige, vitrine du massif des Vosges [CCI AE, enquête]. Lors de l'atelier de restitution d'octobre 2019 à la fin du projet Clim'Ability, pour la CCI AE et ADT: « *le ski restera une composante de l'offre mais pas la principale* » (Lévy et al., 2019). Les deux types de stratégies d'adaptation (Figure 20) identifiées par l'enquête Clim'Ability dans le massif des Vosges[24]

[23] À ce sujet, on peut se référer au texte de Laurent Reynaud, délégué général de Domaines skiables de France (Reynaud, 2010) : « *Mais, malgré nos efforts (VTT, piétons, luges d'été, etc.), quelle activité est susceptible de générer autant d'emplois que le ski ? Aucune. Nous poursuivons les efforts de diversification des usages de nos remontées mécaniques et pistes, mais il faut être réaliste : la montagne l'hiver sans neige ce n'est pas "vendable". C'est ce qui explique que pour l'instant, en matière d'adaptation, nous nous sommes organisés pour exploiter les domaines skiables en situation ponctuellement d'enneigement déficitaire, et garantir l'emploi dans les vallées pour plusieurs dizaines d'années, et sur des durées supérieures à celles du retour sur investissement des équipements mis en place.* »

[24] Les entretiens ont été réalisés auprès de 9 domaines skiables, 3 offices du tourisme, une association, un climatologue et un PNR.

vont également dans ce sens : l'une a pour but de « *protéger la ressource/valeur neige* », l'autre de « *créer de la valeur au-delà de la* neige ». Seuls trois gestionnaires de station étaient présents ce jour-là, concomitant au congrès de Domaines Skiables de France (octobre 2019, Besançon)[25].

Stratégies identifiées dans l'étude Clim'Ability)	**« Protéger la valeur »**	**« Créer de la valeur »**
Principes	- Renforcer la robustesse actuelle des infrastructures en réduisant le coût des dommages - Sécuriser les investissements futurs en prenant en compte le changement climatique - Améliorer la rentabilité actuelle et future en optimisant les activités dépendantes des ressources (eau, énergie, neige) - Anticiper les nouvelles demandes des investisseurs vis-à-vis de la résilience de l'entreprise au changement climatique	- Créer des avantages compétitifs en anticipant les besoins en nouveaux produits/services - Identifier des complémentarités - Identifier les potentiels d'innovation - Rôle de la communication collective réaliste et positive
Actions	**L'adaptation technique :** 1. Équiper les stations de canons à neige 2. Améliorer la pratique du damage 3. Installation de nouveaux équipements adaptables et agiles en 4 saisons (télésièges, etc.)	**La diversification :** 1. Développer la multi-activité en hiver à basse et moyenne altitude (ski de fond, skating, randonnée nordique, raquettes, etc.) 2. Développer le 4 saisons (randonnée, VTT, escalade, offre d'hébergement typique, etc.) 3. Développer le transport et tourisme durable (tourisme responsable/nature et transports en commun)

Figure 20 : Stratégies d'adaptation des stations de ski du massif des Vosges (d'après les résultats de l'enquête Clim'Ability présentés en octobre 2019 à Colmar : Lévy, Amat, et Martin 2019)

Ainsi, passer à la moulinette de la concertation des enjeux sensibles revient à les éviter, ou à les transformer ou encore à des contestations et des désengagements. Dans l'Atelier des Territoires des Vosges, la question de la neige a été exclue du débat collectif, pour éviter l'opposition et le désengagement des acteurs locaux, au profit d'autres enjeux du territoire : mobilité, urbanisation,

[25] Ce congrès semble marquer un tournant dans la stratégie de Domaines Skiables de France, qui a appelé à la mobilisation générale des acteurs de la montagne face à la menace du réchauffement climatique. Un plan d'action est annoncé dans les six mois pour « *mutualiser des financements pour la recherche de solutions concrètes autour de la réduction des gaz à effet de serre, de la ressource en eau, de la biodiversité et des déchets* » (Les Echos, 2019; Rey, 2019).

artisanat, etc. Dans Clim'Ability, si la question des canons à neige n'a pu être discutée collectivement, elle a toutefois été traitée dans les entretiens individuels menés. Ces entretiens montrent que, si les canons à neige sont qualifiés d'indispensables pour les stations ayant beaucoup investi dans les remontées et l'accueil des touristes, ils ne constituent non plus une solution pour les autres, qui arrêtent l'activité. Par ailleurs, des discussions collectives ont été possibles sur les modalités du développement du 4 saisons[26], ainsi que sur des problématiques de mobilité. Dans ce territoire, les questions de mobilité et de diversification du tourisme apparaissent comme moins clivants, même s'ils constituent aussi de vrais enjeux : les transports constituent une problématique majeure à l'échelle intercommunale et le tourisme 4 saisons ne va pas de soi pour certains élus [CCHV, enquête].

Les questions d'approvisionnement en eau potable n'ont quant à elles pas été abordées : « *Ils [les élus] en ont conscience mais on n'en a pas parlé. C'était peut-être trop concret […] je ne sais pas s'ils pensaient que cette réflexion allait les aider à arriver à des actions* » [DDT, enquête]. Ces questions ne concernent pas toutes les communes. Elles sont encore gérées essentiellement à l'échelle communale, en régie, et font l'objet, au mieux, de contractualisations entre deux communes. On peut penser que ces questions ne sont pas considérées comme des problèmes appelant des solutions à l'échelle de la communauté de communes.

• Penser le long terme, les ruptures ou les transitions

Les études révèlent une difficulté à se projeter dans un futur lointain et à envisager des ruptures.
L'étude prospective de l'AERM, explicitement cadrée par le changement climatique, s'inscrit à l'horizon 2050. Les acteurs industriels n'ont pas participé à l'atelier qui leur était dédié et ils expliquent leur refus par leur incapacité ou leur désintérêt à se projeter à si long terme : « *On a essayé de les contacter pour les motiver à venir, et la réponse a été de dire qu'il pourrait avoir une vision de leur activité sur 3 ou 4 ans mais pas au-delà car ce n'était pas vraiment leurs préoccupations* » [AERM, enquête].
Le long terme peut aussi rendre difficile l'émergence d'un débat contradictoire : « *Au final, quand un expert parlait sur une thématique spécifique, les autres l'écoutaient et il était rare qu'il y ait des contradictions […] le débat était plutôt très consensuel et il n'y avait pas vraiment d'opinions divergentes* » [AERM, enquête].
La difficulté à se projeter à long terme se traduit également par une incapacité à rendre crédible des ruptures, alors que c'est l'une des fonctions d'un exercice prospective, qui se déploie sur le long terme, et qui est censé libérer le futur des limites du présent pour penser les changements. Cela a conduit l'AERM à demander aux participants de choisir le scénario qui leur semblait le plus probable, ce qui par définition exclut les scénarios de rupture, et conduit à sortir d'une démarche prospective pour privilégier une logique de prévision : « *On s'est aperçu au final que 90 % ont répondu que c'était le scénario tendanciel qui était le plus probable, c'est-à-dire il y a moins de rupture et qu'on prolonge un peu*

[26] en termes de gouvernance, concertation, pilotage, communication, valorisation des activités « gratuites » (randonnée…), et concernant l'émergence de conflits d'usage ou encore l'intégration des problématiques environnementales, notamment par une offre d'hébergement et des activités économes en eau, etc.

les tendances actuelles. Les gens n'ont pas forcément envie de se mouiller vers un scénario un peu plus extrême, ou alors ils n'ont pas forcément les connaissances ou la vision nécessaire pour se dire qu'il y aura une rupture par exemple au niveau agricole et qu'il faudrait changer totalement de modèle agricole. » [AERM, enquête]. Et c'est donc finalement le scénario tendanciel que l'AERM a aussi retenu pour l'analyse de la vulnérabilité des activités socio-économiques au changement climatique à l'horizon 2050.

Pour autant, dans les autres études analysées, on trouve des techniques destinées à penser le changement. Elles ont par exemple recours à des cas concrets pris dans d'autres territoires qui ont mis en place des organisations, modèles ou actions, différents de ceux observés dans le massif des Vosges. Il s'agit par exemple de la diversification touristique en Forêt Noire, de la station écologique des Rousses (39) au label « Flocon vert » ou encore de la ferme du Krameterhof en Autriche qui a développé certaines pratiques de permaculture.

• Quête d'exhaustivité et action en tension

L'étude sur la vulnérabilité des activités socio-économiques au changement climatique de l'AERM avait un caractère exploratoire. L'étude a alors cherché à avoir une visée exhaustive pour identifier les vulnérabilités. Mais, cette quête d'exhaustivité requiert la mobilisation et le croisement d'une quantité massive de données. Ainsi, dans l'étude de l'AERM, des matrices de vulnérabilité ont été établies pour chacun des 34 bassins élémentaires de Rhin-Meuse. Ces matrices ont croisé six milieux physiques, huit catégories d'activités socio-économiques (dont l'importance de chacune est définie par un indicateur spécifique) et vingt aléas relatifs au changement climatique. Il en résulte différents niveaux de vulnérabilité/opportunité par aléa et par milieu physique, qui ont été croisés avec les probabilités d'occurrence des différents aléas à l'horizon 2050, afin d'appréhender l'ampleur des conséquences économiques (tableau d'impacts). Cela produit donc une multiplicité de résultats, qui rendent difficiles la hiérarchisation, la synthèse et la définition de priorités d'action : « *On a des matrices vraiment démentielles pour chaque bassin élémentaire, des tonnes de résultats, et c'était difficile de digérer tout cela en quelques synthèses. On a essayé et je pense qu'on y est arrivé globalement, mais c'était vraiment un gros travail* (…) *À trop vouloir bien faire et à trop avoir de résultats, on n'arrive plus trop à savoir comment les utiliser et finalement vers quoi aller, et voir qu'est-ce qui est le plus important et ce qu'on peut, entre guillemets, un peu laisser tomber pour le moment »* [AERM, enquête].

Pour autant, un travail de synthèse a bel et bien été mené, mais les conventions présidant les sélections n'ont pas été systématiquement explicitées ou justifiées et on ne sait pas aujourd'hui les expliquer : « *On a quand même réussi à avoir quelques conclusions intéressantes et quelques pistes de travail pour la suite, mais globalement comme je dis souvent, il ne faut pas prendre non plus tous les résultats de cette étude pour argent comptant. On a un peu élagué le travail, on a réussi à cibler certaines vulnérabilités à certains endroits* (…) *Et donc, le fait d'arriver à faire une synthèse et à montrer l'essentiel, on a dû faire quelques raccourcis et peut-être que par moments vous ne comprenez pas forcément pourquoi l'aléa sécheresse peut être très important sur un bassin et qu'il*

est moins important sur le bassin d'à côté, voire qu'il n'apparaît pas (…) *Il y a tellement d'hypothèses de travail et tellement de résultats que quand on a fait la synthèse, on est peut-être passé à côté de certaines choses* » [AERM, enquête].

Pour autant, pour l'AERM, l'étude a déjà permis d'identifier des priorités par bassin élémentaire : « *Ce qui était aussi intéressant, c'est qu'on a utilisé les résultats de l'étude pour faire des priorités territoriales avec ces fiches mesures. C'est pour cela qu'on a une carte dans chaque fiche mesure où on a ciblé les bassins élémentaires qui nous paraissent prioritaires pour mettre en œuvre les mesures mises en avant* » ; « *Pour chaque fiche, un travail a été mené avec le bureau d'études (c'est le dernier travail qu'on a fait) et en interne à l'agence pour mettre en avant les mesures déjà existantes qu'on pouvait développer où aller plus loin sur ces mesures, ou des mesures nouvelles qu'on pourrait mettre en œuvre et qui n'étaient pas menées par l'agence. Ensuite, on a essayé de les regrouper en grands thèmes – par exemple, sur l'eau, il y a 4 grands thèmes –, puis on a décliné en mesures un peu plus opérationnelles* ». Ces fiches-mesures définissent aussi ce qui peut bénéficier de taux bonifiés de l'Agence.

5.2 Articuler infrastructures matérielles et échelles de gestion

Outre le financement d'études, des acteurs supra-communaux interviennent également localement avec des instruments contractuels qui soutiennent des changements au niveau des infrastructures hydrauliques ou des systèmes de suivi (section 5.2.1). Comment ces leviers orientent-ils l'action locale en matière d'adaptation au changement climatique ? Comment le fléchage des subventions et les règles de financement évoluent-ils ? Comment intègrent-ils les enjeux liés au changement climatique ?

Par ailleurs, les intercommunalités ont été dotées par la loi NOTRe de nouvelles compétences obligatoires, au détriment des communes (section 5.2.2). Cette réforme peut-elle contribuer à une plus grande intégration des enjeux liés à l'adaptation au changement climatique dans la gestion des services d'eau ?

5.2.1 Instruments contractuels

Pour les élus des communes et des intercommunalités, les instruments contractuels de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse et du Conseil départemental des Vosges constituent un levier important parce qu'ils peuvent permettre de financer une mise aux normes ou la sécurisation du réseau, sans que cela n'impacte trop le prix de l'eau : « *Ça a été : on a été bien financé, c'est ça qui faisait peur je pense "des gros travaux, ça va coûter cher*" [à propos d'une interconnexion]» [Maire, commune n°9, enquête].

- **L'Agence de l'Eau Rhin-Meuse : part de l'AEP et règles de financement**

Le 11ème programme d'intervention de l'AERM (2019-2024) prévoit une enveloppe de 101 millions d'euros dédiée à la protection de la ressource en eau et gestion de l'alimentation en eau potable

(dont lutte contre les fuites et économies d'eau, tous contributeurs confondus) sur un budget total de 994 millions d'euros, soit de l'ordre de 10 % : « *En eau potable, notamment sur le volet quantitatif, les enveloppes allouées sont quand même importantes. D'autres champs d'intervention ont rencontré des baisses plus importantes […] Le pluvial a augmenté. Les interventions dans le domaine agricole, ça ne baisse pas. Ce qui a baissé, c'est le budget en assainissement parce qu'on a recentré sur des priorités milieux* » [AERM, enquête]. Le 11ème programme reflète une réorientation politique de l'attribution des aides dans un contexte budgétaire restreint : « *Les agences resserrent leur champ d'intervention sur les enjeux qualité/quantité avec des moyens en baisse. On a fait le choix de maintenir des interventions à des niveaux intéressants qui permettent aux collectivités de se mobiliser, mais en resserrant le champ d'intervention, plutôt que diluer nos aides à des taux plus bas et en maintenant éligibles toutes les opérations.*» [AERM, enquête]. La priorité donnée au milieu suscite certaines incompréhensions localement : « *Mais l'agence de bassin subventionne de moins en moins (…) Par contre (je suis enregistrée mais tant pis!), il y a de l'argent pour préserver les petites grenouilles ! (…) Cela nous dérange parfois un peu par rapport aux travaux, mais on n'est pas contre, on est quand même une commune branchée là-dessus* » [Maire, commune n°5, enquête] ; « *Puisque vous dites que vous allez revoir l'agence de l'eau, dites leur bien qu'on a besoin de subventions. C'est bien de faire des manifestations pour faire connaître la « trame bleue » et la « trame verte », mais ce n'est pas le but de l'agence de l'eau. Le but de l'agence de l'eau est d'améliorer la qualité et la distribution* » [Maire, commune n°4, enquête].

L'Agence de l'Eau intervient sur la sécurisation de l'approvisionnement et sur la réduction des fuites. Trois critères principaux interviennent pour l'accès aux aides et ils doivent tous être respectés : (i) le niveau de pénurie d'eau incarné par le statut de « commune prioritaire », (ii) le rendement du réseau et (iii) le prix de l'eau.

La distinction entre communes prioritaires et non-prioritaires a été renforcée. Les premières listes des collectivités sujettes à risque de pénurie d'eau récurrente (et des collectivités exploitant des ressources en provenance de zones de répartition des eaux) ont été mises en place en 2013-2014. Une actualisation des listes a été faite pour le 11ème programme, en concertation avec l'ARS, le département et la DDT et est amenée à se poursuivre. L'AERM souhaite cibler au total environ 200 collectivités prioritaires (certaines sont des intercommunalités) pour leurs interventions sur les volets sécurisation quantitative et réduction des fuites. Les collectivités non-prioritaires ne sont plus éligibles depuis le 11ème programme, tandis que le taux de subvention a augmenté pour les communes prioritaires[27]. La rationalisation s'opère ainsi via un ciblage, qui a suscité des

[27] Au début du 10ème programme (2013-2015), les taux de subvention étaient à 20 % (+40 % d'avance remboursable) pour les collectivités prioritaires, et 10% (+40 % d'avance remboursable) pour les non-prioritaires. Après la révision de mi-parcours du 10ème programme (2016-2018), les taux de subvention pour la réduction des fuites sont passés à 35 % sur les collectivités prioritaires, et 20 % pour les non-prioritaires. Ce passage du taux de subvention 10 à 20% pour les non-prioritaires est devenu incitatif pour les collectivités, une dynamique s'est mise en place. Avec le 11ème programme, les collectivités identifiées prioritaires sont subventionnées à hauteur de 30 % (+10 % pour les collectivités qui sont en zone de revitalisation rurale ou en zone de montagne) pour la réduction des fuites, comme pour la sécurisation quantitative des ressources. Le changement majeur concerne ainsi les collectivités non-prioritaires, qui ne sont plus éligibles.

incompréhensions au niveau des collectivités devenues inéligibles. D'une part, malgré les discours et priorités développés lors des Assises de l'eau (importance du maintien du patrimoine eau potable) et lors de la définition du 11ème programme d'intervention (sécurisation de l'alimentation dans les Vosges par exemple), l'AERM aide moins de collectivités qu'avant. D'autre part, certaines collectivités avaient lancé des études avec l'aide du 10ème programme, mais les travaux devant en découler ne peuvent plus être subventionnés. Pour gérer la transition, un appel à projet ponctuel a été validé par le Conseil d'Administration de l'AERM de juin 2019[28].

En ce qui concerne le rendement du réseau, ne sont éligibles aux subventions pour la réduction des fuites que les collectivités prioritaires au sein desquelles il est inférieur à 85%[29]. En outre, la réduction des fuites est une étape nécessaire pour avoir accès à des aides relevant de la sécurisation : « *Pour les collectivités qui nous sollicitent pour la sécurisation de l'approvisionnement (en gros, c'est de se connecter avec une collectivité voisine ou créer une nouvelle ressource), si elles ne font pas 85 %, on va déjà leur demander de s'inscrire dans un programme de réduction de fuites (qu'on pourra d'ailleurs aider) pour qu'elles puissent bénéficier d'une aide pour la sécurisation de leur approvisionnement* » [AERM, enquête].

Enfin, l'AERM a défini un seuil de prix minimum pour l'octroi des subventions. Il est aujourd'hui fixé à 1,10 € HT et hors redevance, et augmentera progressivement dans les prochaines années : « *Le renouvellement des réseaux incombe aux collectivités, cela fait partie de l'amortissement qu'ils doivent financer par le prix de l'eau* » [AERM, enquête]. Nos entretiens montrent que le conditionnement des aides par le prix de l'eau constitue une incitation efficace dans les communes : « *On l'augmente régulièrement pour suivre les aides de l'agence de bassin, pour être dans les clous pour avoir les aides, sinon on n'en a pas. On est donc toujours un peu au-dessus. On surveille ça de près* » [Maire, commune n°3, enquête] ; « *L'agence de l'eau dit clairement : "On ne subventionnera plus les gens qui sont en dessous de 1,10 €". Nous, on était à 0,80 €, on est un pays d'eau. […] Cette année, pour la première fois, on a augmenté à 0,90 €, on va donc vers 1,10 € petit à petit mais pas d'un coup, et progressif, c'est-à-dire que l'on est à 1,10 € si l'on va au-delà de 130 m³ par foyer. Parce que c'est pareil, on ne peut pas faire ce que l'on veut, j'aurais aimé le faire mais par rapport au nombre d'habitants dans le foyer, pour ne pas pénaliser les familles nombreuses non plus, mais on ne peut pas. Et également pour dissuader aussi les agriculteurs* » [Maire, commune n°10, enquête].

---

[28] Cet appel à projet vise à aider ponctuellement des projets de renouvellement de conduites fuyardes pour des collectivités qui ne sont pas en pénurie d'eau ou en zone de répartition des eaux, sous forme d'une subvention de 20 % dans le cadre d'une enveloppe de 3 M€.

[29] Ce seuil est issu du décret « fuites » du Grenelle de l'Environnement : « *Le décret 2012-97 du 27 janvier 2012 dit décret "fuites" issu de l'engagement 111 du Grenelle de l'environnement a pour objet d'inciter les collectivités en charge de services d'eau à améliorer leur rendement d'eau potable dès lors que celui-ci est inférieur à un rendement seuil dont le calcul est adapté à chaque situation. En cas de non-conformité du service, l'élaboration d'un plan d'actions visant à réduire les fuites (donc à améliorer le rendement) est exigée : en cas de non présentation de ce plan d'action ou, dans tous les cas, de non présentation d'un descriptif détaillé des réseaux de transport et/ou de distribution, une pénalité financière équivalente au double de la redevance "préservation des ressources" de l'agence de l'eau (chargée de la mise en œuvre de ce décret) sera appliquée*. » (source : http://www.services.eaufrance.fr/observatoire/aide/decret-rendement)

- **Le Conseil Départemental des Vosges : sa politique de financement et ses relations à l'AERM**

Le Conseil départemental des Vosges intervient au nom de la solidarité territoriale et de l'assistance technique du département aux collectivités territoriales (décret du 14/06/2019) visant les communes rurales, montagnardes et ayant peu de moyens. Sur l'AEP, le Conseil départemental, par sa mission d'assistance technique, incite également les collectivités à faire leurs diagnostics : « *Leur réflexe est de vouloir faire de nouvelles sources alors que les captages et les réseaux ont de mauvais rendements. […] On leur apporte une méthodologie à appliquer : entretenir les captages, etc.* » ; « *Pour nous, la subvention est la finalité d'un accompagnement de la collectivité* » [CD88, enquête]. Le taux de subvention dépend des caractéristiques de la commune. D'après l'entretien réalisé auprès du Conseil départemental, le taux moyen est de 20% (entre 17 et 27%). L'aide aux collectivités représenterait 13 millions d'euros par an, dont 2 millions d'euros pour l'eau potable, montant qui a baissé puisqu'il avait pu monter jusqu'à 4 millions d'euros [CD88, enquête].

Avec le nouveau conditionnement des subventions du 11ème programme de l'AERM, ses relations avec le CD88 ont changé : « *on est passé d'un partenariat à un rapport de force »* [CD88, enquête]. La rationalisation des ciblages opérés par l'AERM génère des tensions avec le CD88 qui déplore devoir mettre la main à la poche sur certaines collectivités où l'AERM n'intervient plus : *« Il est hors de question que le département des Vosges compense les économies des Agences de l'eau alors que l'AERM reporte ces aides sur d'autres départements qui n'ont pas de politique de l'eau* » [CD88, enquête]. Le CD88 estime que le recentrage de l'AERM sur certaines priorités soulève des questions d'équité territoriale.

5.2.2 L'opportunité des réformes territoriales des services d'eau ?

Promulguée en août 2015, la loi NOTRe prévoyait de transférer les compétences eau et assainissement aux EPCI à fiscalité propre ou syndicats mixtes à compter du 1er janvier 2020. La loi Ferrand d'août 2018 a permis le report du transfert de compétences à janvier 2026 pour les communautés de communes se prononçant en ce sens. Après plusieurs rebondissements, en décembre 2019, une commission mixte paritaire relative à la future loi « Engagement et proximité » a confirmé l'obligation de transfert des compétences eau et assainissement aux intercommunalités, avec possible délégation aux communes jusqu'en 2026, sous réserve d'un schéma directeur et d'un plan de programme pluriannuel d'investissement agréés par l'intercommunalité.

Au sein du terrain d'enquête, seule la communauté d'agglomération de Saint-Dié-des-Vosges a été concernée par l'obligation de transfert au 1er janvier 2020. Les municipalités de la communauté de communes des Hautes Vosges (CCHV) se sont quant à elles officiellement prononcées en faveur du report à janvier 2026.

- **Une mutualisation favorable à une vision plus globale et anticipative**

Le transfert de la compétence eau a pour objectif de mutualiser les moyens et de réaliser des économies d'échelle au sein de structures intercommunales. Il répond à des enjeux d'amélioration de la qualité du service (mises aux normes, sécurisation, etc.) et de la capacité à en assurer la durabilité (connaissance patrimoniale, renouvellements, etc.). Il s'accompagne d'un renforcement de certaines exigences réglementaires liées à la taille du service. Au niveau national, il est attendu que l'exercice de la compétence à l'échelle intercommunale contribue à améliorer la gestion des services d'eau par des ressources financières, techniques et humaines accrues, notamment pour les « petits » services pratiquant souvent des tarifs très bas pour un niveau de service minimal et ne respectant pas toujours les obligations réglementaires. La mise en commun et l'exercice de la compétence eau au sein d'un périmètre élargi devrait également favoriser l'exercice d'une solidarité entre les territoires (Bellier and Taisne, 2016).

Au sein du périmètre d'enquête, le transfert de compétence divise fortement les maires. Pour autant, certains maires perçoivent aussi les avantages qu'ils pourront retirer de la mise en commun des différentes ressources, et notamment la montée en compétences et en moyens : « *La petite commune qui n'a pas d'agent spécialisé, elle pourra profiter de l'agent qui travaille à la communauté de communes. Elle pourra aussi profiter du matériel de la comcom.* » [Maire, commune n°14, enquête]. Pour ces élus de communes à dominante rurale, la dimension financière est centrale : « *Le problème des communes c'est des problèmes de trésorerie, en majeure partie. Car il faut pouvoir financer les travaux, et avant d'avoir reçu les aides, il faut que ce soit fini et payé […]. Donc avec la mutualisation des services d'eau, la communauté de communes aura plus de compétences. Plus elle aura de compétences, plus elle aura de trésorerie, car elle aura des budgets importants. Et la trésorerie, c'est le nerf de la guerre.* » [Maire, commune n°3, enquête]. Il s'agit également pour ces maires de maintenir leur éligibilité aux subventions de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, qui demande que les projets soient validés par les structures intercommunales pour être éligibles : « *Moi je suis favorable à remonter ça en comcom, la compétence de l'eau. En communauté de communes on a plus de moyens, en plus il faut savoir que l'Agence de l'Eau, elle donne des subventions au plus haut niveau, et moins en dessous. […] Même sans l'obligation de la loi, on est obligé, l'Agence de l'Eau elle nous tient par ses subventions.* » [Maire, commune n°10, enquête].

Via l'interconnexion et la vente d'eau, des formes de coopération entre communes sont déjà présentes sur certains secteurs du périmètre de l'enquête. Pour certains maires de ces communes, « […] *on coopère avec ceux qui sont en aval et en amont, et donc le fait que ce soit géré de façon intercommunale, ce n'est pas illogique puisque dans les faits on coopère déjà entre communes. Donc que ce soit officiellement intercommunal, pourquoi pas ?* » [Maire, commune 1, enquête]. Cette vision d'ensemble permettrait de mieux anticiper et de mieux gérer les situations de pénurie d'eau à venir, par exemple par un système de télésurveillance du réseau géré par un service commun : « *Nous en été, notre réseau sera alimenté à terme presque à 100% par [commune Y]. Actuellement, j'ai des alertes via le système de télésurveillance quand il n'y a plus d'eau. […] Mais tout ça, si ça arrivait directement à [commune Y], ou dans un service unique, ils géreraient ça. Et s'il en faut plus à la [commune Z], moins là… Eux justement ils pourraient gérer ça.* » [Maire, commune n°9, enquête].

Le Conseil départemental des Vosges estime que cette organisation intercommunale permettra de se saisir des enjeux nécessitant une vision plus globale, tel que le changement climatique : « *On sait que les élus qui ont 300 habitants l'hiver, et le triple en été parce qu'il y a les touristes qui arrivent, mais qu'ils n'ont pas d'eau au robinet, pour l'instant ces élus ce qu'ils veulent essayer de savoir c'est comment ils vont faire pour qu'il y ait de l'eau qui arrive au robinet. Mais de là à se faire une vision plus globale (sur le changement climatique) … Et du coup ça recoupe les problèmes de réorganisation de compétence de l'eau. C'est-à-dire qu'une commune de 200 habitants ne fera rien sur les questions de changement climatique, elle n'aura pas les moyens de le faire. C'est pour ça que la compétence eau à l'échelle d'un EPCI à fiscalité propre, elle paraît plus logique.* » [CD 88, enquête].

- **Du rejet à l'anticipation du transfert**

La question du transfert de la compétence eau fait l'objet d'un vif rejet chez près de la moitié des maires enquêtés. La première de leurs craintes concerne le prix de l'eau. Lors du transfert de compétence, les disparités d'équipement devraient mener à des plans d'investissement par l'intercommunalité, financés par le prix de l'eau. Pour les communes dont les tarifs sont actuellement parmi les plus bas, cela représenterait ainsi une hausse des prix significative sur laquelle ils auraient moins de prise. Les maires craignent également une dégradation de la qualité du service liée à une moindre réactivité d'une gestion à distance, par exemple en cas de fuite sur le réseau d'alimentation, et à une perte de la connaissance du réseau, dont le fontainier est parfois actuellement le seul possesseur. Dans les communes du massif, les maires affichent un fort attachement à la gestion du service d'eau et à un approvisionnement par des sources communales jugées de qualité. Enfin, le transfert de la compétence fait craindre que le service d'eau géré jusqu'à maintenant en régie ou via des syndicats, soit délégué à un opérateur privé. Pour certains cette crainte est un argument supplémentaire pour s'opposer au transfert de compétence, pour d'autres elle justifie sa bonne anticipation et préparation.

Lors des entretiens, certains maires ont exprimé leur espoir de voir le transfert de compétence encore repoussé, espoir alimenté par les rebondissements entourant le projet de loi « Engagement et proximité » jusqu'en décembre 2019. Certaines communes jugeaient qu'il était « *urgent d'attendre* » [directeur des services techniques, commune n°11, enquête], d'autres refusaient de coopérer lors de l'étude de gouvernance : « *À [la communauté d'agglomération], une dizaine de communes ont pris comme axe de ne pas répondre à l'audit (préalable au transfert). […] Ils veulent continuer à gérer leur eau par eux-mêmes, et ils refusent toute fusion au 1er janvier, donc ils ne répondent pas et ils ne font rien* » [Opérateur privé de services d'eau, enquête]. Cette position n'était cependant pas partagée par l'ensemble des maires, et notamment par certains élus de la CCHV qui ont la volonté d'être proactifs dans la démarche du transfert de compétence afin de s'y préparer au mieux : « *La loi nous dit qu'on peut reporter à 2026 […], par contre on est quand même dans le court terme, demain, il faut regarder les choses en face et s'organiser. […]. On a déjà un peu l'état des lieux, et l'objectif est justement, dès l'année prochaine, de commencer à mener une étude pour voir comment cette prise de compétence sera faite et actée dans cinq ans.* » [Maire et élu de la CCHV, commune n°12, enquête]. Selon la CCHV et certains élus, ce travail préparatoire permettra

d'atténuer le scepticisme avec lequel certains maires appréhendent le transfert de compétence : « *Il y a des élus qui disent qu'ils se sont bien fait avoir avec la fusion des communautés de communes, avec plein de choses à tout mettre en commun trop vite, et qu'on va faire les choses différemment pour l'eau. En tout cas la volonté est là.* » [Maire, commune 10, enquête]. À la CCHV, plusieurs réunions ont été organisées pour mobiliser les maires et engager la réflexion. Les intercommunalités ont un rôle central pour sensibiliser, mobiliser et fédérer les communes dans cette démarche. Le transfert au plus tard en 2026 a bien été confirmé en décembre 2019. Tout l'enjeu réside maintenant dans la capacité de la CCHV a effectivement préparer ce transfert.

5.3 Conclusion

Les résultats montrent que l'adaptation est portée par des acteurs supra-communaux, à travers la réalisation d'études stratégiques et opérationnelles d'une part, et par des instruments contractuels et financiers d'autre part.

Les cinq études analysées ont conduit à une production variée de savoirs : scénarios, tableaux d'impacts, fiches-mesures, diagnostic des pratiques et des équipements, axes stratégiques et pistes d'action, ou encore identifier des représentations et des stratégies d'acteurs du secteur du tourisme. Le point commun de ces études est qu'elles viennent en appui à une planification à une échelle supra-communale (communauté des communes, massif des Vosges, ou encore sous-bassins élémentaires de Rhin-Meuse).

Ces études se distinguent selon le type de planification qu'elles appuient, pouvant être plutôt stratégique ou plutôt opérationnel :

- Dans le premier cas, la production de savoir a une visée plutôt exploratoire et exhaustive. Elle cherche à construire des représentations communes des problèmes et des solutions. Ce qui fait problème n'est pas arrêté a priori : c'est à l'étude de le définir, grâce à l'élaboration de scénarios, l'identification d'impacts ou encore la définition d'enjeux pour l'adaptation. Les dispositifs participatifs reposent sur la mobilisation et l'adhésion des acteurs, qui entrent en tension avec la capacité à maintenir les enjeux stratégiques dans le débat. L'importance des enjeux économiques liés au ski alpin maintiennent la question d'une transition, même à long terme, complétement hors de portée de la concertation.
- Dans le second cas, la production de savoirs s'ancre dans une approche plus pragmatique, orientée sur des problèmes déjà matériellement inscrits dans les territoires. Ces problèmes, qui risquent de s'amplifier avec le changement climatique, ne sont investis que dans la mesure où les acteurs ont un intérêt à trouver une solution collective au problème (approvisionnement AEP des fermes auberges) ou bien que les acteurs les associent à des solutions qu'ils maîtrisent, techniquement, financièrement ou politiquement et qui ne signifient pas des bouleversements profonds, voire même qui viennent renforcer leur stratégie d'action (mobilisation de l'argument climatique par les gestionnaires de station de ski et Domaine skiable de France pour asseoir la nécessité de développer les retenues d'eau

et les canons à neige , ou encore par l'opérateur privé des services d'eau enquêté pour sensibiliser les communes à la nécessité de renouveler leurs infrastructures).

Ainsi, les études, même si elles contribuent à objectiver l'urgence du changement du climat, ne sont pas à même d'impulser, à elles seules, des transitions profondes à l'échelle locale. L'analyse montre que d'autres freins que les seules questions du savoir, de l'ignorance, du scepticisme, ou encore de la connaissance réciproque entre acteurs interviennent. L'un des freins est le caractère de plus en plus contraint des moyens financiers de l'action publique environnementale, et des difficultés de coopération à la fois politique et financière des organismes concernés. Par ailleurs, l'État et les collectivités circonscrivent aussi leur action à des dispositifs incitatifs. Les moyens accordés à une intervention directe ou coercitive sur les usages de l'eau ou des territoires reste limitée.

Plus largement, le problème est bel et bien que la gestion de l'eau revient encore à gérer des flux d'eau (réduction des fuites, interconnexions…) permettant de rendre possible certains choix pris en amont par des filières de gestion des espaces (Narcy, 2003; Narcy and Mermet, 2003). La question de la gestion des antagonismes entre une gestion de l'eau plus environnementale et certaines filières de gestion des espaces (urbanisme, agriculture…) ou de l'eau n'est pas abordée de front dans les cas que nous avons étudiés.

Conclusion générale

Le changement climatique est aujourd'hui considéré comme le problème qui affecte le plus significativement notre futur, tout en étant difficile à appréhender au présent et à s'incarner dans des transitions effectives de nos modes de vie. Le changement climatique suscite-t-il des formes d'action publique inédites en matière d'eau ou bien recycle-t-il des questions déjà mises à l'agenda politique ? Marquet et Salles (2014) ont montré comment, dans le sud-ouest de la France (Adour-Garonne), l'adaptation au changement climatique a constitué un moyen de renégocier des enjeux préexistants autour de la pénurie d'eau. Ils mettent en évidence la tension entre un consensus sur l'importance d'une gouvernance collaborative pour s'adapter au changement climatique à long terme et le refus de céder sur des intérêts sectoriels à court terme.

L'analyse que nous avons menée dans le nord-est de la France (Rhin-Meuse) montre à la fois des similitudes et des divergences. Il n'y a pas, en Rhin-Meuse, de polarisation de l'action publique autour d'un enjeu dominant tel que le partage de l'eau en Adour-Garonne. En Rhin-Meuse, on a plutôt affaire à différents enjeux qui se partagent l'agenda politique de l'eau tel qu'il est discuté et défini par le Comité de bassin, sans que l'un domine complètement l'autre. Dans le SDAGE 2016-2021 ainsi que dans le 10e et 11e programmes de mesures, les enjeux s'articulent autour d'une meilleure gestion des extrêmes hydrologiques (crues, étiages) pour s'adapter au changement climatique qui en augmentera la fréquence. Les actions promues sont en grande partie à la jonction entre enjeux économiques et écologiques autour de la gestion des inondations. Elles répondent aux cadres définis par la Directive inondation et la GEMAPI. Il s'agit en effet de promouvoir des actions en faveur des milieux aquatiques (restauration hydromorphologique, de la continuité écologique et protection des zones humides) et de l'assainissement (réhabilitation du réseau pluvial) qui constituent aussi des moyens de gérer les inondations, à coût moindre que le « tout endiguement ». Elles viennent aussi renforcer les orientations du Comité de bassin et de l'Agence déjà prises dans le cadre de la mise en œuvre de la Directive cadre sur l'eau, tout en permettant de renégocier la question de l'état de référence.

Le 11e programme voit aussi émerger un nouveau « défi territorial » qui concerne le massif des Vosges et son adaptation au changement climatique. La mise à l'agenda de ce défi est, entre autres, une des réponses proposées aux problèmes d'approvisionnement pour la production d'eau potable qui se sont multipliés et intensifiés dans plusieurs communes. Notre analyse montre que, localement, les élus interrogés associent de nombreuses causes aux tensions sur l'eau brute : le changement du climat mais aussi l'extension de la forêt, l'évolution des consommations des ménages, ou encore le développement touristique. Ainsi, ils insistent sur le poids de la pluviométrie mais aussi de l'aménagement du territoire, des activités économiques, ou encore des pratiques des usagers de l'eau dans la matérialisation de situations de tension quantitative sur l'eau. Pour autant, si les élus identifient des causes au manque d'eau qui sont liées à la gestion des espaces, ce constat n'est pas associé à un changement de référentiel, en particulier en ce qui concerne les relations (de soumission) entre gestion de l'eau et gestion des espaces, ou encore entre gestion du petit et du grand cycle de l'eau. Ces problèmes sont plutôt pris en charge par une augmentation ou une

rationalisation de la gestion de l'offre en eau brute (interconnexion, nouvelles sources) ou en eau potable (réduction des fuites), déjà inscrites dans les programmes successifs de plusieurs Agences de l'eau depuis les années 2000. Les mesures envisagées et déployées ne cherchent pas à modifier les usages en eau, ou alors de manière très marginale. L'action publique locale continue de miser sur la capacité du système à éviter la perturbation (grâce à des camions citernes) et à gérer des crises lorsqu'elles adviennent (restrictions d'usage temporaires). Elle ne déploie pas, à ce stade, d'actions en faveur d'une société plus sobre ou plus résiliente face aux perturbations.

En ce qui concerne la neige, des études récentes montrent une baisse de la durée moyenne d'enneigement ces dernières décennies, baisse qui est attribuée au réchauffement climatique. Certains élus adhérent à une telle représentation de l'évolution de l'enneigement, mais sans nécessairement l'expliquer par un changement du climat. L'ambiguïté vient du fait que la forte variabilité de l'enneigement est aussi une caractéristique climatique des Vosges. Cela rend difficilement perceptible des changements qui seraient le signe d'une modification plus profonde de la dynamique de l'enneigement. Les acteurs du tourisme en montagne, même lorsqu'ils entérinent le changement du climat, déploient de manière dominante une stratégie de résistance, grâce à la promesse d'accéder à des techniques de production de neige artificielle toujours plus efficaces. En ce qui concerne la neige, encore plus que la production d'eau potable dans le contexte vosgien, penser des trajectoires alternatives pour les territoires de montagne se heurte encore plus frontalement à des intérêts sectoriels antagonistes, particulièrement puissants et structurés, dans les stations de ski dites de taille moyenne.

Les enquêtes montrent aussi certaines difficultés à appréhender localement des risques environnementaux quand ils échappent aux cadres de l'expérience et qu'ils ne sont pas nécessairement tangibles pour ceux qui y sont exposés. Pour autant, le manque d'eau relève bien de l'expérience tangible pour certaines communes, tout comme la pluie ou la neige qui est tombée (ou pas) les derniers mois. C'est bien moins le cas pour le climat : la variabilité spatio-temporelle et ses effets relève à la fois d'une construction cognitive moins sensible, plus distante, qui donne prise à de multiples interprétations. Pour autant, au-delà d'une question d'appréhension et d'expérience, l'analyse montre que le manque d'intégration de la question du climat et de ses effets dans l'action publique locale s'explique aussi par le risque politique et financier qu'elle représente pour les élus et d'autres acteurs du territoire.

Dans les années 2000, de nombreux auteurs considéraient que la publicisation des risques associés aux effets du changement climatique pouvait être à même de stimuler des transformations fondamentales de nos économies et des relations entre les sociétés et leurs environnements. Il s'agissait au fond de démontrer le caractère insoutenable de pratiques « *business as usual* » qui deviennent une sorte d'oxymore : à la fois tendancielles et impossibles, pour déclencher des changements profonds (Boyd et al., 2009; Brooks et al., 2009; Goklany, 2007; Huq et al., 2004; Klein and Smith, 2003; Klein et al., 2005; Lemos et al., 2007; McGray et al., 2007; Persson and Klein, 2009). Pourtant, l'intégration du changement climatique dans les politiques de l'eau depuis les années 2010, en particulier en Rhin-Meuse, revient aujourd'hui essentiellement à privilégier des solutions

technologiques qui s'inscrivent dans un scénario plutôt tendanciel, susceptible alors de produire un accroissement des tensions sociales et environnementales à moyen et long terme. L'étude SOCLIM montre par ailleurs que la difficulté à sortir de la tendance n'est pas toujours due à un manque de connaissances ou de sensibilisation de l'action publique ou collective locale. Elle s'explique aussi par des intérêts sectoriels et des filières de gestion des espaces qui ne voient pas aujourd'hui dans des scénarios alternatifs des ressorts stratégiques, et qui ne sont pas non plus contraints à changer.

Considérons maintenant plus spécifiquement la politique contractuelle de l'AERM. Les entretiens montrent qu'une telle politique incite bien les élus à l'échelle communale ou intercommunale à développer certaines solutions, via le levier financier. On pourrait alors imaginer que ce levier financier soit davantage orienté vers un changement de la relation entre gestion de l'eau et gestion des espaces, pour qu'il ne se limite plus à privilégier des solutions techniques d'ajustement à la marge (réduction des fuites, équipements hydro-économes, interconnexions, nouvelles sources ou ouvrages de stockage), et accompagne plus directement la transition des filières d'usages ou de gestion des espaces. Une telle réflexion pourrait, dans un premier temps, être menée en interne à l'Agence, en s'appuyant sur l'expérience de ses chargés de mission et avec une visée stratégique. Elle pourrait prendre par exemple la forme d'un débat structuré et ouvert sur l'avenir de l'Agence et de son action (pluralisme des cadrages grâce à des scénarios contrastés pour une conversation stratégique et un apprentissage organisationnel), en distinguant ce qui relève :

- du normatif : vers une gestion de l'eau support des activités économiques du territoire et du développement urbain ? vers une gestion de l'eau plus écologique et dont les enjeux cadrent les dynamiques spatiales et économiques des territoires ? autre ?
- et de l'analytique : travail d'objectivations de l'état du « système » en jeu (bassin Rhin-Meuse, région Grand-Est ou massif des Vosges…) et des variables qui l'expliquent, à différentes échelles, dans le passé, le présent ou le futur.

Il pourrait s'agir d'une démarche centrée sur le ressort critique de la prospective (plausibilité et pluralité des scénarios produits) pour construire ou discuter des politiques passées, présentes et futures de l'Agence de l'eau.

Annexes

Annexe 1 : Météorologie/climatologie, hydrologie/hydraulique et modélisation

- **Météorologie, climatologie et modélisation**

Les modèles numériques du climat et de prévision du temps calculent l'évolution temporelle de l'atmosphère sur l'ensemble du globe, représenté par un maillage.

Ces modèles se fondent sur les équations de la physique et de la thermodynamique. Ils sont composés de deux grandes parties :

- une partie « dynamique » qui décrit les mouvements des masses d'air à partir des équations de la dynamique des fluides ;
- et une partie dite « physique » qui représente des échanges verticaux entre l'atmosphère et l'espace et entre l'atmosphère et la surface du globe – océan, continent ou glace.

La dynamique des fluides est exprimée sous forme d'un système d'équations différentielles dont il est encore impossible de connaître mathématiquement les solutions. Pour autant, il est possible d'exprimer des solutions approchées en faisant appel à des méthodes numériques.

Les échanges – de rayonnement, d'énergie, d'eau, etc. – se situent à des échelles très inférieures à la maille des modèles et on les représente par des paramétrisations qui reproduisent statistiquement, à l'échelle d'une maille, les effets climatiques des phénomènes considérés (Guillemot, 2009).

En prévision météorologique, il existe deux grands types d'approches : déterministe et probabiliste. La différence entre les deux types réside dans la manière d'appréhender la représentation de l'état initial du système (pression, température, vent, pluviométrie…) et ses évolutions. Ils sont utilisés à des échelles temporelles différentes.

Ainsi, l'état futur de l'atmosphère est calculé de façon déterministe à partir de son état mesuré quelques heures ou jours plus tôt. La première étape de la prévision déterministe consiste à établir à partir des observations une représentation cartographique du temps qu'il fait, c'est-à-dire un état initial de l'atmosphère. Le modèle calcule ensuite l'évolution des paramètres météorologiques (pression, température, vent) au fil du temps. En partant d'un état déterminé de l'atmosphère, le modèle élabore un seul scénario d'évolution de ces paramètres, c'est pour cela qu'on parle de prévision « déterministe ». Les simulations sont ensuite analysées par un prévisionniste qui connaît les limites du modèle. Il ajuste, modifie et traduit les résultats en termes de temps « observable », comme la durée et l'intensité des précipitations, les températures minimales et maximales, l'apparition d'orages, de rafales de vent ou de brouillards. Cette approche déterministe ne permet pas d'évaluer les incertitudes qui pèsent sur l'unique scénario de prévisions retenu. La prévision d'ensemble, elle, fournit, en complément du scénario le plus probable, les incertitudes associées (degré de confiance, scénarios alternatifs,...). Elle s'appuie sur une logique probabiliste.

Les modèles de prévision probabiliste s'appuient quant à eux sur l'idée que la représentation de cet état initial est elle-même incertaine et proposent des prévisions simultanées à partir d'états initiaux

un peu différents. La première est l'approche appelée prévision d'ensemble « du pauvre » qui regroupe plusieurs prévisions déterministes de différents modèles numériques de prévision du temps. Cette approche s'est montrée efficace pour la courte échéance (horizon de prévision inférieur à 2 jours ; Ebert 2001; Arribas, Robertson, et Mylne 2005), mais a montré aussi quelques inconvénients liés, notamment, au nombre souvent très limité de modèles à disposition pour une interprétation probabiliste, la difficulté (voire l'impossibilité) d'estimer de manière homogène les erreurs des différents modèles, ainsi que le fait que tous les modèles peuvent avoir des « mauvaises » prévisions en même temps s'ils partent de la même analyse globale de l'état initial de l'atmosphère.

La deuxième approche, appelée « super ensembles », regroupe plusieurs prévisions météorologiques d'ensemble de différents centres de prévision météorologique. L'exemple le plus connu est celui de la base TIGGE (pour THORPEX Interactive Grand Global Ensemble) de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). Le projet qui a produit la base TIGGE a été mené afin d'examiner l'efficacité d'une approche multi-modèle pour la prévision à moyenne-échéance. TIGGE propose plusieurs prévisions d'ensemble de modèles météorologiques indépendants à travers le monde, avec des caractéristiques différentes et des approches différentes de construction des ensembles.

Par ailleurs, pour des échéances supérieures à quelques semaines, la dynamique de l'atmosphère étant chaotique, seules les propriétés statistiques qui ne dépendent pas de l'état initial font l'objet de prédictions. On ne prédit pas le temps du 30 juillet 2072, mais on fournit des moyennes (ou variabilités, etc.) de températures, précipitations…

- **Hydrologie, hydraulique et modélisation**

L'hydrologie est la science qui étudie l'eau, ses propriétés, sa circulation et sa distribution. Elle analyse plus spécifiquement les effets des précipitations et de l'évaporation sur la présence et les caractéristiques de l'eau dans les cours d'eau et les lacs, ainsi qu'en surface ou sous terre. Elle cherche à établir des bilans quantitatifs, à partir d'une analyse des flux. On distingue le plus souvent différentes branches, selon la portion ou l'étape du cycle de l'eau qui est plus spécifiquement étudié[30]. La trajectoire de cette discipline a conduit à une focalisation sur les eaux continentales, les eaux marines relevant plutôt de l'océanologie.

La mécanique des fluides constitue la base théorique de l'hydraulique. L'hydraulique est la science qui étudie les propriétés mécaniques de l'eau. L'hydraulique à surface libre est la branche de l'hydraulique qui porte sur les écoulements à surface libre, dans les rivières, les canaux, les lacs, les estuaires…

L'histoire de l'hydraulique et de l'hydrologie sont très entremêlées. En première approche, on peut considérer que pour ce qui relève de la question des écoulements dans les rivières, l'hydrologie s'intéresse à la transformation de la pluie en débit alors que l'hydraulique porte davantage sur la

[30] L'hydrométéorologie étudie les relations entre hydrologie et météorologie, la limnologie les lacs, la cryologie la neige et la glace, l'hydrogéologie les eaux souterraines, la potamologie les cours d'eau…

propagation du débit dans le cours d'eau. L'objectif des hydrologues est de comprendre les mécanismes expliquant la répartition de l'eau dans l'espace et dans le temps. L'intérêt que portent les hydrauliciens à l'hydrologie réside dans sa capacité à fournir des règles qui leur permettent de prédire, pour mieux la maîtriser, la disponibilité en eau aux entrées des systèmes qu'ils analysent ou qu'ils gèrent.

Les modèles hydrologiques

À partir des années 1990, plusieurs auteurs proposent de classer les différents types de modèles hydrologiques (voir Figure 21).

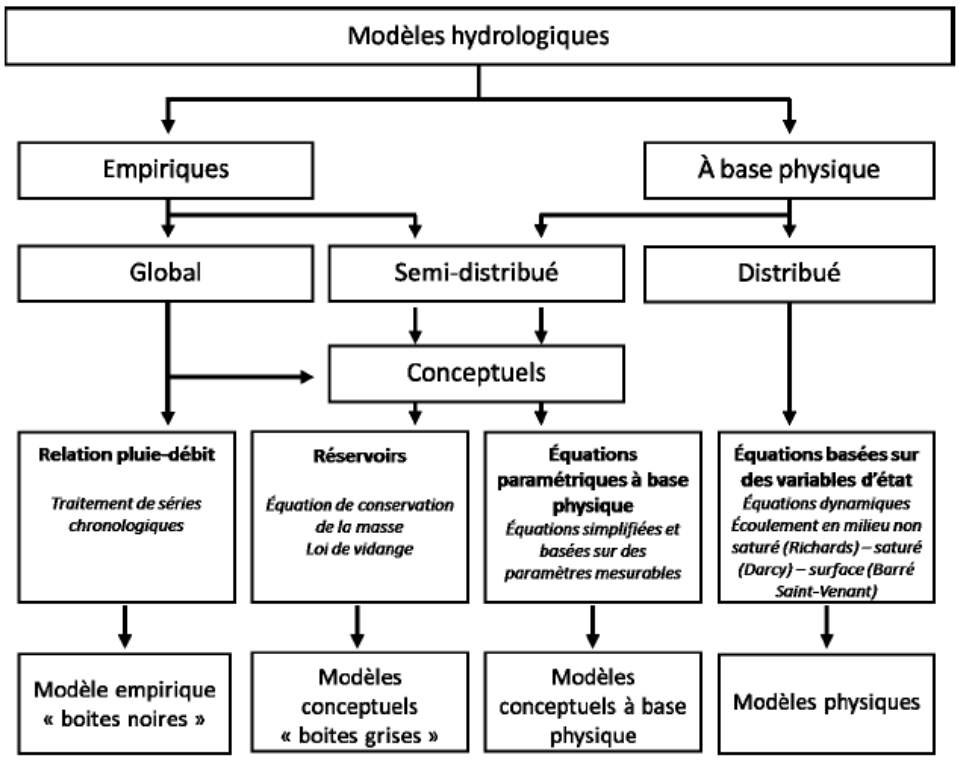


Figure 21 : Typologie des modèles hydrologiques (Fossey, 2016)

Les classifications des modèles hydrologiques distinguent généralement trois grand types, selon la méthode de représentation des processus hydrologiques : empiriques, conceptuels et à base physique. Au sein des modèles conceptuels, on trouve également des modèles qui peuvent avoir une base physique. On distingue par ailleurs les modèles selon leur résolution spatiale (globaux ou distribués) et temporelle des processus (évènementiels ou continus). Il existe une continuité d'approches entre ces catégories : de nombreux modèles sont des hybrides entre plusieurs d'entre elles.

Les modèles empiriques sont les plus anciens et ils visent à répondre à des besoins opérationnels de connaissance des débits, en particulier pour la production hydroélectrique. Ils requièrent des séries climatiques longues. Ils se sont avérés satisfaisants pour les besoins opérationnels mais comme ils ne

se basent sur aucune hypothèse quant au fonctionnement hydrologique, ils ne permettent pas de l'analyser (Cicéri and Rimbert, 2012).

Les modèles à base physique cherchent à exprimer, selon des lois physiques, chacune des phases du cycle de l'eau (précipitation, solidification, fusion, évaporation, transpiration, infiltration, écoulements surfaciques et souterrains, ruissellement...), pour ensuite en déduire les débits en différents points s'ils sont distribués, ou à l'exutoire s'ils sont globaux. Les équations de Richards (1931) qui représentent les écoulements souterrains font appel à des équations différentielles et n'ont pas de solution analytique. Avec des capacités de calcul limitées, l'évaluation des écoulements souterrains avait un coût prohibitif ; avec l'avènement des ordinateurs elle est devenue possible.

Ces modèles ont été développés à partir de la fin des années 1960 en se fondant sur la promesse que le coût d'acquisition des données diminuerait rapidement et que l'on pourrait facilement disposer de données permettant de remplacer la paramétrisation ou le calage par des démarches statistiques. Cette promesse ne s'est pas matérialisée et les modèles à base physique requièrent toujours des formes de paramétrisation, tout comme les modèles conceptuels, tout en nécessitant aussi beaucoup de données. En effet, les processus du cycle de l'eau sont aujourd'hui relativement bien connus à l'échelle locale. Cependant, le passage à l'échelle du bassin versant et à l'analyse de son évolution dans le temps représentent encore un enjeu de recherche (hétérogénéité des sols, de leurs usages et de leurs dynamiques : urbanisation, déforestation…, variabilité spatiale des précipitations, etc.). Ainsi, les modèles dits à base physique contiennent toujours des paramètres. Ces paramètres concernent le sol (ex. : contenu en eau du sol à saturation, à la capacité au champ, etc.) et la végétation (ex. : indice foliaire, résistance stomatique, etc.). Enfin, si ces modèles ne font pas l'objet de calages avec les données mesurées, ils requièrent aussi de nombreuses mesures et observations de terrain concernant les différents paramètres physiques.

Enfin, les modèles conceptuels, eux aussi développés à partir de la fin des années 1960, assimilent le bassin versant à un assemblage de réservoirs en cascade. Ce type de modèle cherche à représenter les principaux processus de la relation pluie-débit sans utiliser les lois physiques régissant les processus concernés. Ainsi, les équations fixant l'alimentation et la vidange des réservoirs font intervenir des paramètres sans grande signification hydrologique, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas corrélés à des caractéristiques mesurables du bassin. Ces modèles s'appuient sur des algorithmes qui représentent des fonctions de production, de routage et d'échange au sein d'un bassin versant. Ils se nourrissent de deux types de données d'entrée : la pluviométrie et l'évapotranspiration potentielle pour simuler le débit en différents points s'ils sont distribués ou seulement à l'exutoire s'ils sont globaux. Ils peuvent faire appel à des équations empiriques. Les paramètres, qui n'ont pas de signification physique directe, sont définis par ajustement entre débits simulés et des débits « mesurés », par calage. Le calage des paramètres vise à minimiser les écarts entre les séries observées et les séries calculées par le modèle. Les résultats de la modélisation sont donc tributaires de l'existence de jaugeages et de la période choisie pour le calage. Ce type de modèle est privilégié pour les bassins disposant de stations de suivi des hauteurs d'eau. Il existe aussi aujourd'hui des méthodes qui permettent d'estimer des débits en l'absence de station de mesures

(« régionalisation »). La logique qui prévaut dans la construction des modèles conceptuels revient à se fonder sur une représentation très simplifiée du système pour ne la sophistiquer qu'à la lumière d'une évaluation de sa performance, calculée en quantifiant les différences entre les sorties du modèles et les données issues de la métrologie (mesure des hauteurs d'eau et transformation en débits grâce à des abaques appelés courbes de tarage) sur un grand nombre de bassins versants. Le choix du nombre de paramètres à caler est alors le produit d'un travail d'optimisation entre (i) la qualité des sorties (comparées aux données mesurées) et (ii) les difficultés à introduire de nouveaux paramètres, selon les chroniques de débits disponibles (idéalement plus de 15 ans).

Les modèles hydrauliques

Les modèles hydrauliques cherchent à représenter la propagation du débit en différents points d'un canal ou d'une rivière (lit mineur, lit majeur) pour mieux le contrôler et le valoriser (distribution des hauteurs d'eau, des vitesses, caractérisation des contraintes à l'écoulement…).

Ils se sont développés pour pallier aux limites des mesures dans l'espace et dans le temps des hauteurs d'eau et des caractéristiques de la rivière.

On distingue les modèles conceptuels, fondés sur des compartiments reliés entre eux par des flux, et qui s'apparentent aux modèles conceptuels hydrologiques, et les modèles mécanistes.

Dans les modèles mécanistes, le système représenté obéit à des principes de conservation universels (masse, énergie, etc.) complétés par des lois statistiques (formule de Manning), empiriques et des équations différenciées de la mécanique des fluides (frottement, rhéologie, etc.).

Ils s'appuient sur les équations de Barré-Saint-Venant et de Navier-Stoke développées au XIXe siècle.

Ces équations constituent les premières représentations du mouvement de l'eau, fondées sur l'analogie mathématique, avec une visée universelle. Leur utilité a d'abord été théorique pour l'hydrodynamique. Ces équations font cependant appel à des équations différentielles hyperboliques aux dérivées partielles non-linéaires qui n'admettent pas de solution analytique. En d'autres termes, on ne peut pas, en connaissant l'hydrogramme amont et le descriptif de la rivière, définir analytiquement l'hydrogramme aval. On peut en revanche trouver des solutions numériques : de proche en proche, on peut estimer l'hydrogramme aval à partir de l'hydrogramme amont, car il existe bel et bien une relation entre les deux. Avec des capacités de calcul limitées, l'évaluation de la propagation du débit sur de longues distances avait un coût prohibitif ; avec l'avènement des ordinateurs elle est devenue possible.

On distingue différents modèles mécanistes selon qu'ils incluent 1, 2 ou les 3 dimensions de l'espace pour représenter les écoulements (écoulement amont-aval, latéral, vertical). Plus un modèle a de dimensions, moins il a besoin de paramètres à caler. Ainsi par exemple, un modèle 1D ne représentera pas les méandres d'un cours d'eau et la courbure et ses effets sont intégrés dans le coefficient de frottement. Un modèle 2D, lui, les représentera. Par conséquent, le coefficient de frottement d'un modèle 1D ou 2D n'intègre pas les mêmes dimensions : il n'a pas la même

signification et il peut différer pour une même rivière représentée. Par ailleurs, plus un modèle a de dimensions, plus les paramètres sont difficiles à ajuster, et plus la géométrie et les conditions aux limites sont importantes. Pour caler les paramètres, ce type de modélisation requiert donc des mesures de terrain.

Modélisations hydrologiques, hydrauliques, incertitudes et changement climatique

L'objectif assigné à la modélisation hydrologique comme hydraulique n'est pas tant de produire de nouvelles théories ou des explications générales que de représenter des comportements produits par des interactions complexes, difficiles à saisir. La pratique des recherches en hydrologie et en hydraulique se caractérise par une grande prolifération de modèles depuis les années 1970, certains couplant hydrologie et hydraulique. On peut donner plusieurs explications à ce phénomène. D'abord de nombreux modèles ont été conçus comme une réponse à des questions opérationnelles qui s'inscrivaient essentiellement à des échelles locales, de sous-bassins ou de bassins versants pour reconstituer ou prévoir des débits. Les travaux se focalisant sur la mise en relation entre débits observés et débits calculés, ont eu tendance, depuis les années 1960, à privilégier le développement de nouvelles techniques numériques au détriment de l'observation et de la mesure. Une des explications proposées par les hydrologues eux-mêmes relève de la faisabilité. Chercher à produire des mesures qui permettent ou facilitent la validation des modèles est difficile : il s'agit d'activités de long terme, qu'il est difficile de financer et qui relèvent le plus souvent de l'activité de l'administration. Produire un nouveau modèle est par contre une activité que les hydrologues maîtrisent davantage (savoirs, temporalité et moyens).

C'est surtout avec la mise à l'agenda du changement climatique que les hydrologues ou les hydrauliciens commencent plus largement à adopter des pratiques qui reviennent à comparer les résultats de différents modèles entre eux, à valoriser la pluralité pour évaluer les incertitudes associées aux simulations, et participer à une construction collective de la confiance dans les modèles.

On peut distinguer trois grandes sources d'incertitudes associées à la modélisation hydrologique et hydraulique :

- La variabilité spatio-temporelle des processus physiques en jeu. Pour l'hydraulique, il va s'agir de la bathymétrie, la topographie, des coefficients de frottements… et pour l'hydrologie des précipitations, de l'évapotranspiration, des ruissellements, etc.
- La qualité des données mesurées et de leurs traitements statistiques et des méthodes d'interpolation (voir la section 3.1, dédiée à la métrologie).
- La structure du modèle et son paramétrage : types de simplifications opérées par la modélisation pour représenter les processus en jeu (méthodes de discrétisation des équations aux dérivées partielles, prise en compte des aménagements, etc.).

Les travaux de modélisation hydrologique et hydraulique se sont développés de manière significative après la seconde guerre mondiale. Ils cherchaient d'abord à reproduire les débits « mesurés » passés, en général sur un nombre limité de cas d'études, avec deux grands types d'objectifs reliés entre eux :

(i) reconstituer des mesures manquantes et (ii) dimensionner des ouvrages de stockage ou de protection contre les crues extrêmes.

Ainsi, les périodes et les lieux considérés pour le calage des modèles et la représentation du fonctionnement hydrologique ou hydraulique coïncidaient généralement. Ensuite, les modèles ont été utilisés en situation d'extrapolation, qu'elles soient spatiales (régionalisation), temporelles ou climatiques, avec, de ce fait, des différences entre les situations qui servaient à leur calage et les situations modélisées, que ce soit pour représenter des phénomènes extrêmes (crues ou sécheresses), pour représenter des bassins non jaugés ou encore pour faire des projections de long terme dans un climat changeant.

C'est dans ce contexte que les hydrologues ou les hydrauliciens se sont retrouvés à devoir davantage administrer la preuve de la robustesse de leurs modèles et à traiter plus explicitement de la question des incertitudes.

Analyse des publications à l'échelle mondiale

À partir de la base de données disponible sur Scopus, nous avons analysé l'évolution du nombre de publications portant sur la modélisation et les incertitudes, dans les champs de l'hydraulique et de l'hydrologie (recherche par mots-clés, réalisée sur le titre, le résumé et les mots-clés des articles référencés dans Scopus). Les résultats montrent que la question de la modélisation est systématiquement présente dans plus de 30 % des publications dans le champ de l'hydraulique à partir de 1990 et dès le début des années 1970 dans celui de l'hydrologie (Figure 22, Figure 23). La question des incertitudes dans les publications relevant de la modélisation devient particulièrement significative à partir de la fin des années 1990 pour ce qui concerne l'hydraulique (plus de 30 % des publications, Figure 24) et dans une moindre mesure à partir du milieu des années 2000 (plus de 10 % des publications, Figure 25) pour l'hydrologie.

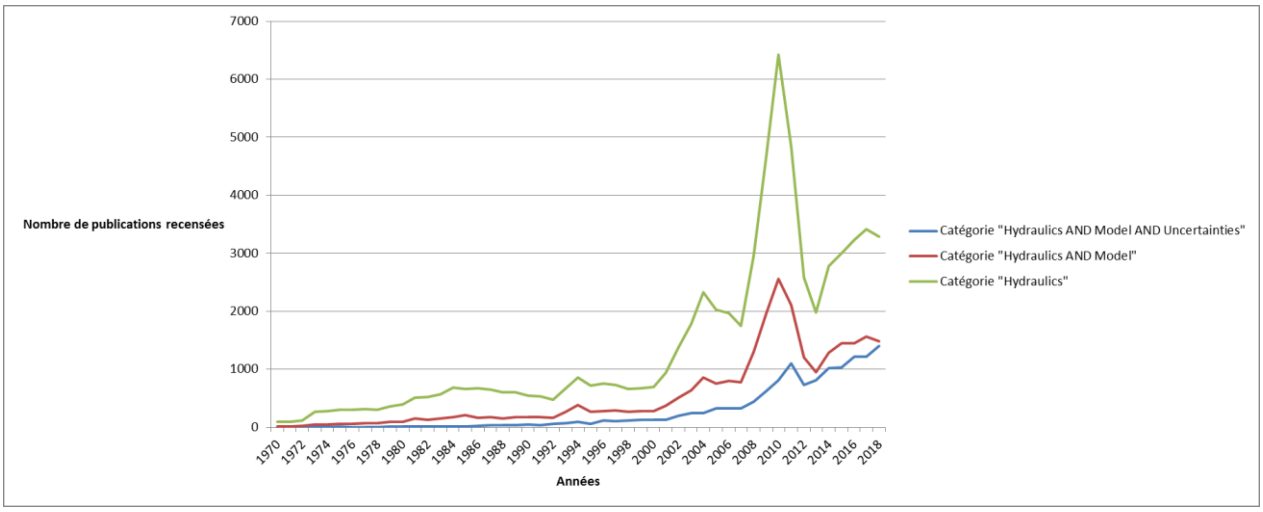


Figure 22 : Évolution du nombre de publications relevant (i) de l'hydraulique, (ii) de l'hydraulique et de la modélisation, et (iii) de l'hydraulique, de la modélisation et des incertitudes (période 1970-2018)

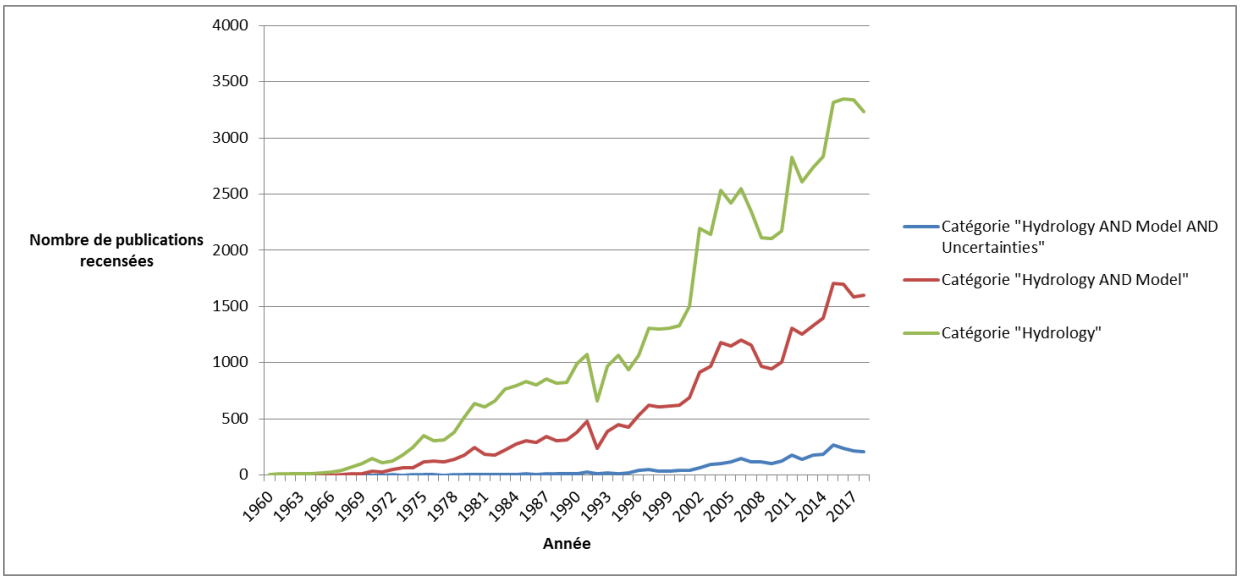


Figure 23 : Évolution du nombre de publications relevant (i) de l'hydrologie, (ii) de l'hydrologie et de la modélisation, et (iii) de l'hydrologie, de la modélisation et des incertitudes (période 1960-2018)

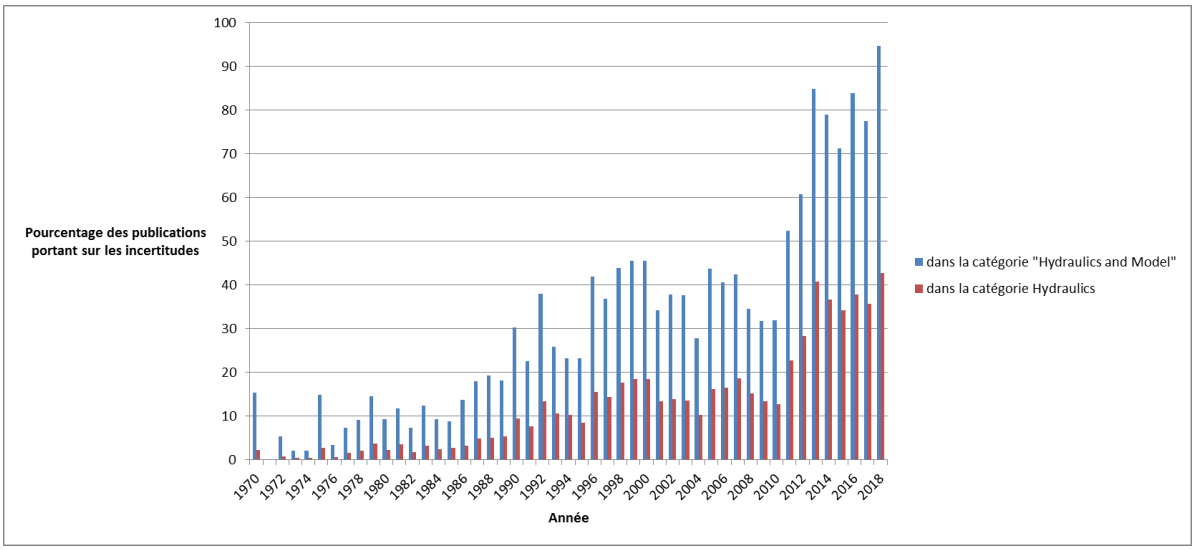


Figure 24 : Évolution de la part des publications sur les incertitudes dans les publications concernant (i) l'hydraulique et la modélisation et (ii) l'hydraulique (Source des données : Scopus)

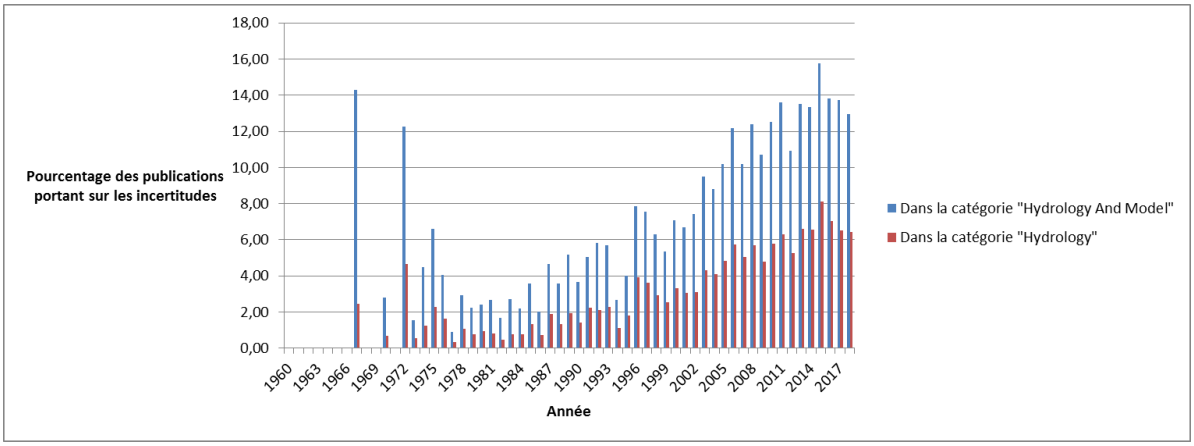


Figure 25 : Évolution de la part des publications sur les incertitudes dans les publications concernant (i) l'hydrologie et la modélisation et (ii) l'hydrologie (Source des données : Scopus, recherche réalisée sur le titre, le résumé et les mots-clés des articles

À partir des années 2000, à l'échelle internationale, les travaux de modélisation hydrologique cherchent de plus en plus à intégrer la question des changements du climat (Figure 26). Dans le champ de l'hydrologie, les publications qui traitent du changement climatique ne sont pas majoritaires mais concernent tout de même 17 % des publications en 2018.

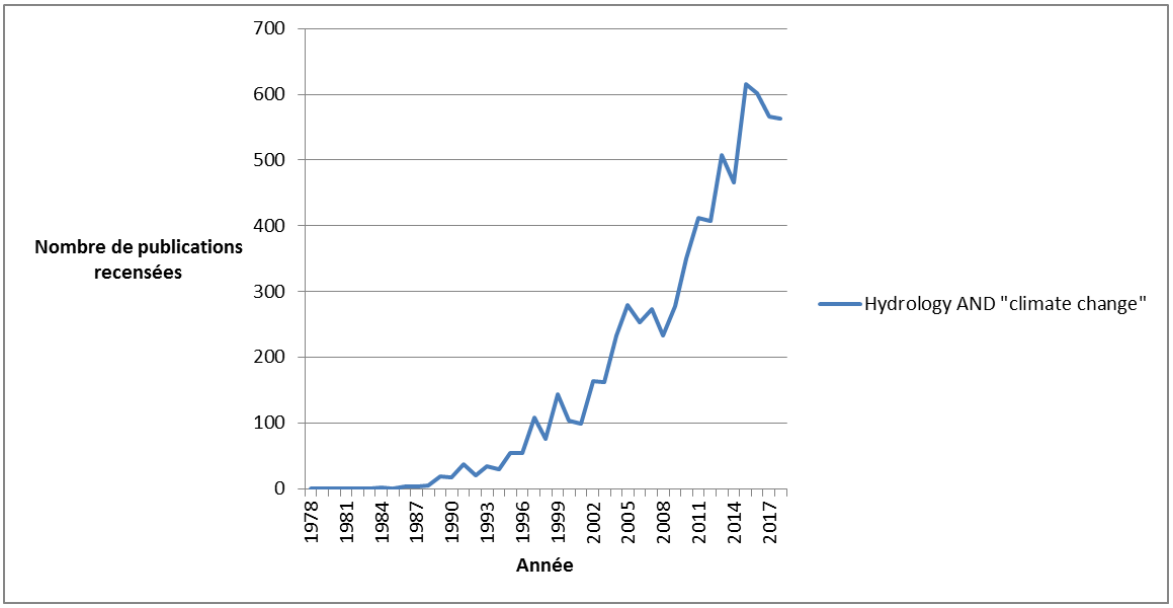


Figure 26 : Évolution de la part des publications associant les mots-clés « hydrologie » et « changement climatique » (Source des données : Scopus, recherche réalisée sur le titre, le résumé et les mots-clés des articles référencés)

Les travaux de prospective réalisés à différentes échelles (mondiales, régionales ou locales) entre les années 1970 et 1990 s'appuyaient tous sur une hypothèse de stationnarité des régimes hydrologiques. Ce qui variait dans les scénarios futurs, c'étaient les usages de l'eau. L'enjeu résidait alors dans une quantification des limites de la capacité du système hydrologique, considéré comme stationnaire, à satisfaire les usages ou demandes en eau futurs, à représenter et quantifier les risques de manque d'eau dans le futur (Treyer, 2006). À partir des années 2000, les évolutions possibles du climat (températures, précipitations) sont aussi intégrées dans les modélisations hydrologiques (Milano, 2012; Milano et al., 2013). Ce faisant, les sources d'incertitudes associées aux résultats délivrés par les modèles se sont multipliées, à la fois parce que ces incertitudes concernent maintenant plus significativement des données d'entrée cruciales que les modèles mobilisent (précipitations, températures), mais aussi parce que ces travaux s'intègrent dans un contexte plus global où l'idée selon laquelle nous vivons dans « un monde incertain » prend de l'ampleur à la fois politiquement et scientifiquement.

L'idée de comparer les résultats produits par différents modèles est une pratique nouvelle en hydrologie, qui s'inspire de celles qui ont été développées dans le champ de la météorologie au sein du GIEC.

Plus généralement, on observe que la comparaison de modèles est un champ de recherche en expansion depuis la fin des années 1990 (Figure 27). En 2018, la comparaison entre modèles concerne en particulier les sciences de la terre et de l'environnement (30% des publications, Figure 28).

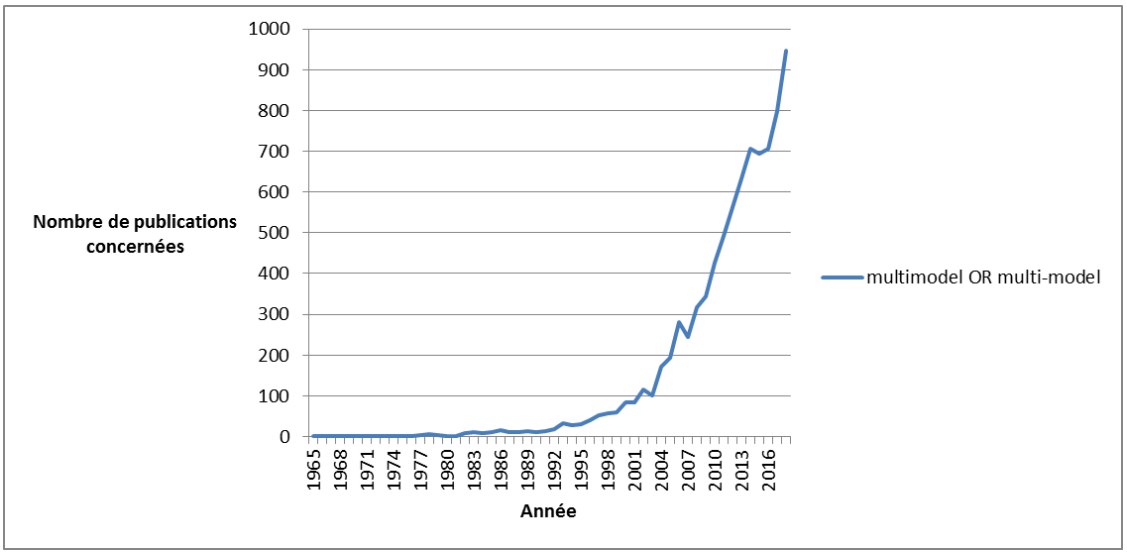


Figure 27 : Évolution de la part des publications incluant les mots-clés « multimodel » ou « multi-model » (Source des données : Scopus, recherche réalisée sur le titre, le résumé et les mots-clés des articles référencés)

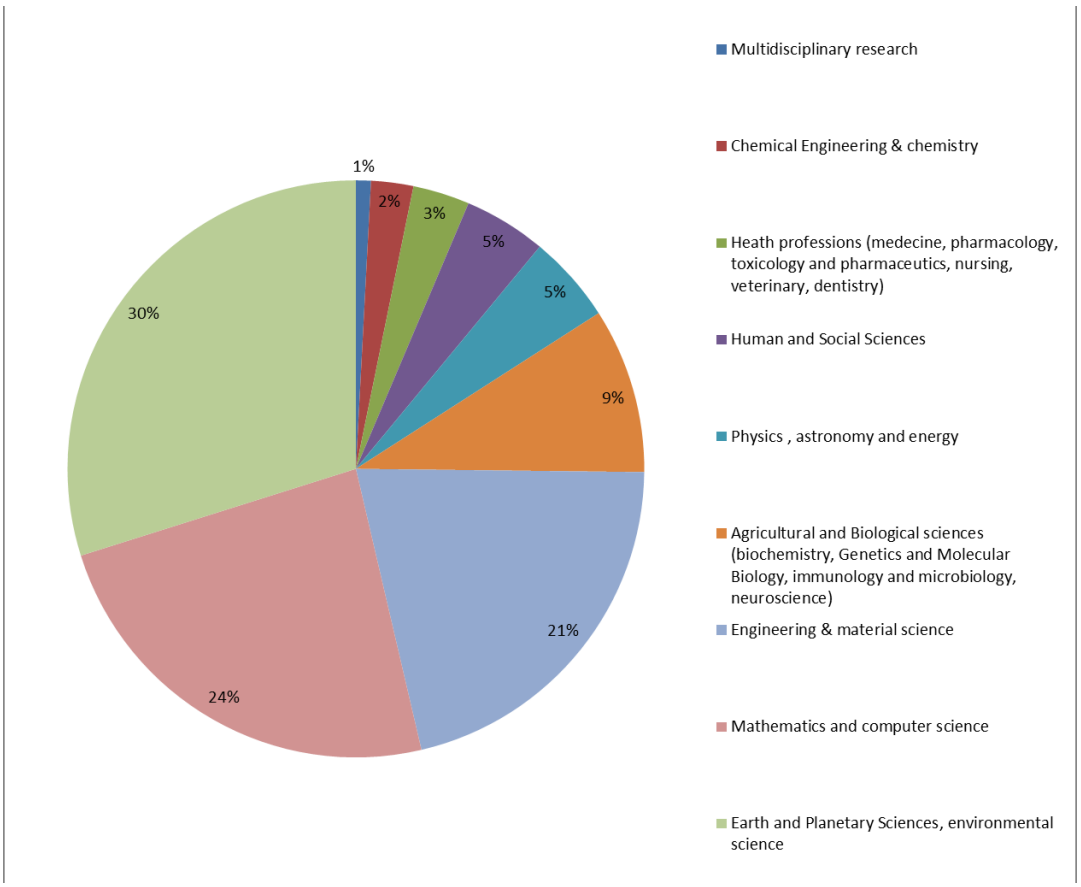


Figure 28 : Répartition par champs disciplinaires des publications incluant les mots-clés « multimodel » ou « multi-model » (Source des données : Scopus, recherche réalisée sur le titre, le résumé et les mots-clés des articles référencés)

Annexe 2 : Éléments de cadrage (GIEC, modèles de circulation générale et descente d'échelle)

Le 4e rapport du GIEC (2007) :

- **Les familles de scénarios**

Deux grandes familles de scénarios (A et B)
La famille A suppose une priorité donnée à l'économie et la famille B une priorité donnée à l'environnement. Chaque famille est subdivisée en type 1 (approche mondiale des problèmes) et type 2 (approche régionale et recherche d'optimums locaux). Le type de scénario A1 est enfin subdivisé en A1FI (utilisation majoritaire de combustibles fossiles), A1B (utilisation équilibrée) et A1T (mise en œuvre majoritaire de nouvelles technologies).

Famille de scénarios A1 :
Elle postule une croissance économique très rapide et répartie de façon homogène sur la planète. La population mondiale atteint un maximum de 9 milliards d'individus au milieu du siècle pour décliner ensuite et atteindre près de 7 milliards d'individus en 2100. Ces évolutions démographiques sont expliquées par une importante amélioration des conditions sanitaires et sociales des populations, se traduisant par de faibles taux de natalité et de mortalité. Cette famille de scénarios suppose que des investissements importants sont consentis pour produire et introduire rapidement de nouvelles technologies énergétiquement efficaces. Les variantes (A1FI, A1B et A1T) viennent de l'utilisation plus ou moins intense des combustibles fossiles.

La variante A1B suppose une utilisation de différentes sources énergétiques (fossiles, nucléaires et renouvelables) sans en privilégier une en particulier (scénario médian). Ce scénario prévoit une augmentation des émissions jusqu'en 2050 suivie d'une diminution pour la seconde moitié du siècle.

Ces scénarios d'émission servent d'abord à calculer des concentrations atmosphériques (modèles chimie-transport). Ils sont aussi utilisés par des modèles couplés océan-atmosphère pour calculer l'évolution des températures de l'océan et de l'étendue de banquise. Enfin, ils sont utilisés dans des modèles régionaux de climat, dont les résultats sont utilisés par les modèles d'impact.

- **Les modèles de circulation générale de l'atmosphère (GCM) dans le 4e rapport du GIEC**

Dans les années 1970 les modélisations du climat et du temps commencent à converger. D'un côté, les modèles opérationnels de prévision, jusqu'alors régionaux puis hémisphériques, deviennent sphériques et capables de reproduire la circulation globale de l'atmosphère. D'un autre, les modèles de circulation générale de l'atmosphère commencent à intégrer des représentations des surfaces qui leur permettent de calculer les températures et de faire des prévisions à long terme. Depuis, les modèles de circulation générale (GCM) sont utilisés à la fois pour prévoir le temps et pour étudier le climat.

Les GCM cherchent à simuler les mouvements de l'atmosphère en se basant sur les lois de la physique. L'atmosphère est représentée par un maillage à trois dimensions. Elle est caractérisée par des variables, calculées par le modèle pour chaque maille et à chaque pas de temps (température, pression, vent, humidité…). Les équations qui constituent les GCM décrivent les mouvements des masses d'air (mécanique des fluides). Les échanges physiques verticaux entre l'atmosphère et l'espace, et entre l'atmosphère et les surfaces océanique et continentales (échanges de rayonnements, de chaleur, de quantités de mouvement, d'eau)… se situent à des échelles inférieures que les mailles et font l'objet de paramétrages (estimations statistiques, pas de méthodologie générale). Les différences entre les GCM se situent en particulier dans ces paramétrisations.

Plusieurs auteurs estiment que plusieurs modèles donnent des résultats raisonnablement comparables, lorsqu'ils utilisent des hypothèses d'évolution des gaz à effet de serre identiques

Les mécanismes des circulations climatiques à l'échelle globale font intervenir des composantes chaotiques qui sont intégrées dans les modèles. Deux simulations (« runs ») d'un même modèle peuvent donc différer. Pour apprécier cet aléa, les exercices de projection à long terme s'appuient sur plusieurs simulations avec un même modèle et une même concentration en gaz à effet de serre. Il n'y a pas, cependant, systématiquement plusieurs simulations disponibles pour un modèle donné.

Des méthodes de descente d'échelle stochastiques sont ensuite appliquées à ces simulations.

Dans le 4e rapport du GIEC, les résultats des modélisations montrent à l'échelle mondiale et selon les scénarios d'émission :

- que l'accroissement simulé de la température de l'air près de la surface varie en moyenne entre environ 1,8 ° C pour le scénario B1 et 3,6 ° C pour le scénario A2 entre la fin et le début du siècle.

- une augmentation du total des précipitations avec la température. Pour le scénario A1B, les modèles simulent un accroissement des précipitations globales de 4,5 mm/j. ±1,5 % en 2100 par rapport aux conditions actuelles. Ces changements de précipitations sont loin d'être spatialement homogènes : dans certaines régions, les précipitations augmentent, dans d'autres elles diminuent.

- **Les modèles de circulation générale de l'atmosphère (GCM) et la descente d'échelle**

Le travail de descente d'échelle s'avère nécessaire car le climat local est à la fois le produit de phénomènes globaux et de caractéristiques locales. Les modèles de circulation globale ont du mal à prendre en compte les caractéristiques physiographiques (topographie, usage des sols,…), pourtant cruciales pour expliquer la pluviométrie.

Il existe aujourd'hui deux grandes familles de méthodes de descente d'échelle : les méthodes de désagrégation dynamique et statistique.

Les méthodes de désagrégation statistique s'appuient sur trois grandes hypothèses fortes concernant les conditions futures :

- Les relations entre climat global et climat régional ou local restent les mêmes.
- La paramétrisation des phénomènes physiques dans les modèles régionaux est inchangée.
- La capacité d'extrapolation des modèles n'est pas altérée par la possibilité de rencontrer des conditions complètement nouvelles par rapport à la période de référence.

Annexe 3 : Exemples de projets d'évaluation des effets du changement climatique sur l'hydrologie

1. Le projet Explore 2070 (2010-2012)

L'objectif du projet Explore 2070 était d'évaluer, à l'échelle nationale, les relations entre eaux et changement climatique, selon quatre axes : 1) la confrontation offre-demande en eau, 2) les risques côtiers, 3) les risques liés aux évènements extrêmes et 4) la vulnérabilité des écosystèmes aquatiques, et de proposer des stratégies d'adaptation.

Le projet a été porté par la Direction de l'eau et de la biodiversité du ministère en charge de l'écologie avec la participation de l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (ONEMA, aujourd'hui Agence française de la biodiversité, AFB), du CETMEF (aujourd'hui le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, CEREMA), des agences de l'eau, des Directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) de bassin, du Commissariat général au développement durable, de la Direction générale de l'énergie et du climat et de la Direction générale de la prévention des risques. Il a rassemblé une centaine d'experts venant d'établissements de recherche et de bureaux d'études spécialisés.

Le projet a comporté plusieurs volets, dont un consacré à l'hydrologie de surface, qui a fait l'objet d'un partenariat entre BRLi (Bas-Rhône Languedoc ingénierie, bureau d'études), Irstea et Météo France. Ce volet visait à la fois une quantification des impacts du changement climatique sur les ressources en eau et la construction et l'évaluation de stratégies d'adaptation à l'horizon 2050-2070. C'est ce volet qui fait l'objet de la présente analyse.

Il s'est appuyé sur une représentation classique du système eau-société articulé autour de deux blocs :

- d'un côté une représentation de la ressource, fondée sur des modélisations hydrologiques et hydrogéologiques,
- et, de l'autre une représentation des usages qui prélèvent de l'eau (pour la production d'eau potable, l'irrigation, et les usages industriels), assimilés à des besoins à satisfaire.

Il s'est fondé sur un des scénarios climatiques développés dans le 4e rapport du GIEC : le scénario A1B (voir annexe 2). Il s'est aussi appuyé sur sept modèles climatiques et deux modèles hydrologiques :

- les sept modèles climatiques de circulation générale suivants : CCMA-CGM3 (China Meteorological Administration, Chine), ECHAMS/MPI (Max Planck Institute for Meteorology, Allemagne), ARPEGE V3+ (Météo-France, France), GFDL-CM2.0, GFDL-CM2.1 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton, USA), GISS_MODEL_ER (NASA Goddard Institute for Space Studies, USA), MRI-CGCM2 3.2 (Meteorological Research Institute, Japon)
- les deux modèles hydrologiques : GR4J (Irstea, France) et Isba-Modcou (Centre National de Recherches Météorologiques et Centre de géosciences de Mines ParisTech, France).

Encadré
Approche multi-modèles dans Explore 2070

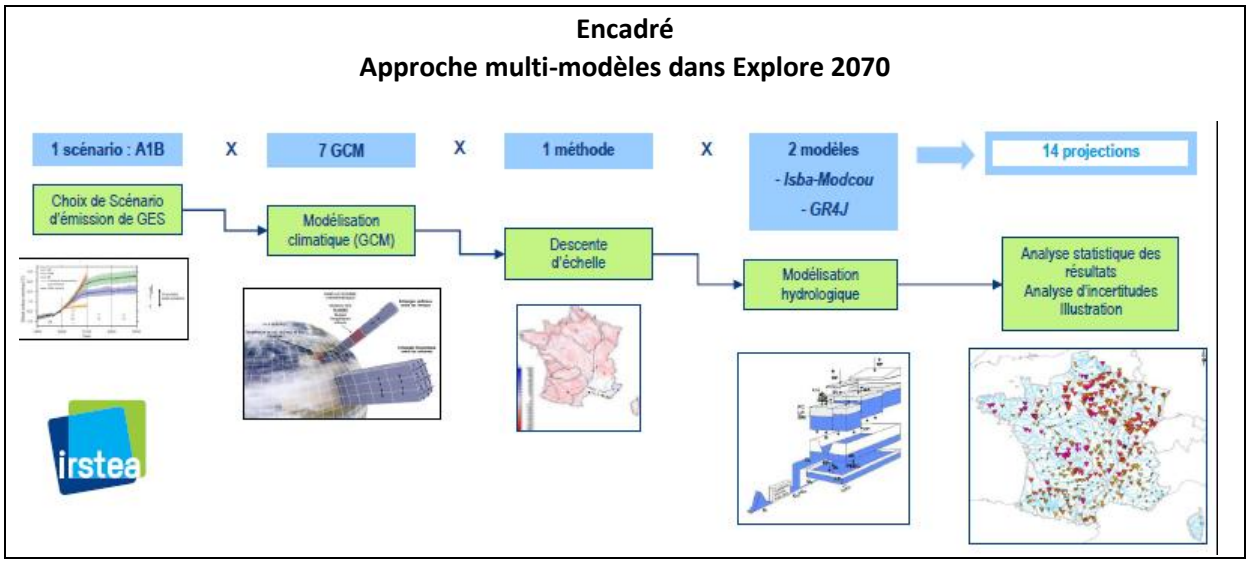


Figure 29 : Approche multi-modèles dans Explore 2070

Les chercheurs impliqués dans Explore 2070 utilisent les simulations produites par les sept modèles de circulation générale choisis, à partir du scénario d'émissions A1B et les résultats d'un travail de descente d'échelle statistique réalisé par ailleurs (Boé et al., 2007).

Les résultats de ces simulations (pluviométrie, évapotranspiration potentielle, etc.) constituent ensuite des données d'entrée de la simulation réalisée à l'aide des deux modèles hydrologiques. Le travail a ainsi produit au total 14 simulations (Figure 29).

Dans Explore 2070, la question des incertitudes associées à la modélisation climatique est traitée par une approche multi-modèle, en prenant 7 modèles climatiques et 2 modèles hydrologiques.

Plusieurs incertitudes sont alors mises hors champ dans les choix de modélisation réalisés. Il s'agit des incertitudes liées :

- au scénario d'émission de gaz à effet de serre,
- aux méthodes de descente d'échelle associées aux modèles de circulation générale, des travaux ont pourtant montré qu'elles sont susceptibles d'influencer significativement les résultats (Quintana Seguí et al., 2010) en particulier en ce qui concerne les crues,
- à la méthode d'évaluation de l'évapotranspiration potentielle,
- à l'évolution des usages de l'eau et de l'occupation des sols.

Les sept simulations climatiques s'accordent sur :

- une hausse des températures assez uniforme sur le territoire métropolitain français, comprise entre 1.4 °C et 3°C en moyenne annuelle,
- une tendance à la baisse des précipitations en été, comprise entre -16 et -23 %.

Elles présentent en revanche une grande disparité concernant l'évolution des précipitations en hiver et au printemps sur le territoire métropolitain.

Les deux modèles hydrologiques proposés renvoient à deux logiques différentes rencontrées dans les travaux de modélisation hydrologique.

Isba-Modcou est un modèle distribué à base physique (Thirel, 2009). Il relève d'une approche qui s'appuie d'abord sur une recherche de représentation fine du comportement du système (le bassin versant) pour ensuite en déduire les débits en différents points. Isba est un schéma de transfert eau-sol-atmosphère. Il simule les flux d'eau avec l'atmosphère (interception, évaporation, transpiration) et avec le sol (ruissellement des précipitations et drainage dans le sol). Modcou est un modèle hydrogéologique qui représente les transferts d'eau vers et dans les nappes et les rivières, ainsi que les relations entre nappes et rivières. Les résultats d'Isba en matière de ruissellement et de drainage superficiel constituent des données d'entrée de Modcou.

Ce type d'approche ne peut jamais faire l'économie d'un recours à des paramétrages. En effet, les processus du cycle de l'eau (précipitation, solidification, fusion, évaporation, transpiration, infiltration, écoulements surfaciques et souterrains...) sont aujourd'hui relativement bien connus à l'échelle locale. Cependant, le passage à l'échelle du bassin versant et l'analyse de son évolution dans le temps représentent encore un enjeu de recherche (hétérogénéité des sols, de leurs usages et de leurs dynamiques : urbanisation, déforestation…, variabilité spatiale des précipitations, etc.). Ainsi, les modèles dits à base physique tels qu'Isba-Modcou contiennent toujours des paramètres. Ils concernent le sol (ex. : contenu en eau du sol à saturation, à la capacité au champ, etc.) et la végétation (ex. : indice foliaire, résistance stomatique, etc.). Enfin, ces modèles ne font pas l'objet de calages avec les données mesurées, mais ils requièrent de nombreuses mesures et observations de terrain concernant les différents paramètres physiques.

GR4J (Coron et al., 2014; Perrin et al., 2003) est quant à lui un modèle global à 4 paramètres. Il appartient à la famille des modèles conceptuels, avec la particularité d'être à base empirique. La logique à l'œuvre avec ce type de modélisation est de partir d'une représentation très simplifiée du système pour ne la sophistiquer qu'à la lumière d'une évaluation de sa performance, mesurée en quantifiant les différences entre les sorties du modèles et les données issues de la métrologie (mesure des hauteurs d'eau et transformation en débits grâce à des abaques) sur un grand nombre de bassins versants. Ce type de modèle cherche à représenter les principaux processus de la relation pluie-débit sans utiliser les lois physiques régissant les processus concernés. Il est constitué de réservoirs connectés entre eux, dont les niveaux augmentent et diminuent au cours du temps, qui sont censés représenter les différents compartiments hydrologiques des bassins versants et qui traduisent la transformation de la pluie en débit. L'utilisation de différents réservoirs permet une première séparation des composantes de la relation pluie-débit. GR4J se nourrit de deux types de données d'entrée : la pluviométrie et l'évapotranspiration potentielle pour simuler le débit à l'exutoire grâce à des équations empiriques. Il comporte aussi quatre paramètres à caler, qui n'ont pas de signification physique directe. Le choix du nombre de paramètres à caler est le produit d'un travail d'optimisation entre (i) la qualité des sorties (comparées aux données mesurées) et (ii) les difficultés à introduire de nouveaux paramètres, selon les chroniques de débits disponibles (idéalement plus de 15 ans). A partir de données de pluie et d'évapotranspiration potentielle, GR4J

cherche à reproduire la réponse en débit à un point d'un bassin versant. Il s'appuie sur des algorithmes qui représentent des fonctions de production, de routage et d'échange au sein d'un bassin versant. Les paramètres sont déterminés par un calage qui vise à minimiser les écarts entre les séries observées et les séries calculées par le modèle. Les résultats de la modélisation sont donc tributaires de l'existence de jaugeages et de la période choisie pour le calage. Ce type de modèle ne peut pas être utilisé sur des bassins qui n'ont pas fait l'objet de suivi de leurs débits.

La démarche de modélisation hydrologique adoptée avec les deux types de modèle s'appuie sur des hypothèses fortes dans les conditions futures :

- Le paramétrage des modèles reste valable. C'est faire l'hypothèse que l'hydromorphologie des cours d'eau, la couverture des sols et les usages de l'eau restent les mêmes dans les conditions futures.
- Les biais que les modèles véhiculent restent du même ordre de grandeur.
- La capacité d'extrapolation des modèles n'est pas altérée par la possibilité de rencontrer des conditions complètement nouvelles par rapport à la période de référence.

Sources d'incertitudes			**Prise en compte dans Explore 2070 ?**
Scénarios d'émissions		Choix, contenu	Non
Modèles de circulation générale		Choix des modèles et des simulations qu'ils produisent	approche multi-modèle (7)
		Descente d'échelle des simulations produites par les GCM sélectionnés	Prise en compte des enjeux de la descente d'échelle, mais pas des incertitudes liées aux méthodes de descente d'échelle (1 seule approche statistique)
Modèles hydrologiques		Résultats des modèles	approche multi-modèle (2)
	GR4J	calage	tests de sensibilité
		Prise en compte des usages	Non
	Isba-Modcou	?	?

Figure 30 : Les sources d'incertitudes et leur prise en compte dans Explore 2070

2. Le projet FLOW-MS

Le projet transfrontalier FLOW MS (Gestion des crues et des étiages dans le bassin versant de la Moselle et de la Sarre, 2009-2013) a été lancé dans le cadre du programme opérationnel Interreg IV-A « Grande Région ». Si les enjeux concernaient la gestion transfrontalière à la fois des crues et des étiages, un effort particulier a été dédié à la prévention des inondations. Ce projet a associé les services de l'État en charge de la gestion de l'eau du Luxembourg, de la Rhénanie-Palatinat, du Land de Sarre et de la France, sous l'égide de la Commission Internationale pour la Protection de la Moselle et de la Sarre (CIPMS).

L'action 4 du projet portait sur le changement climatique. Elle s'est organisée autour d'un travail de modélisation hydrologique de l'impact du changement du climat sur les extrêmes hydrologiques (crues, étiages).

Ce travail s'est appuyé sur le modèle LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model), un modèle de bilan hydrologique également dédié à la simulation des crues.

Ce modèle a d'abord été développé dans le cadre du programme de recherche BALTEX (« Baltic Sea Experiment »), dans les années 1990, appliqué aux bassins versants de la mer Baltique, suivi du projet BALTIMOS (développement et validation d'un système de modèles intégré dans la région Baltique). L'enjeu était d'identifier les grands processus hydrologiques et de produire la composante hydrologique d'un modèle couplé hydrologie-atmosphère-océan. Il s'agissait aussi d'avoir une structure de maillage identique aux modèles climatiques d'alors (plusieurs centaines de kilomètres carrés). Le modèle LARSIM s'est appuyé sur des sous-modèles simplifiés, mais physiquement fondés autant que possible pour décrire le transport continental de l'eau (évapotranspiration selon la méthode de Penman-Montheith, accumulation, compaction et fonte des neiges, stockage d'eau souterraine, concentration d'écoulements dans le secteur et propagation des crues dans les chenaux). Ce modèle a ensuite été mobilisé et amélioré le cadre d'un projet Interreg portant sur les inondations (TIMIS flood, Transnational Internet Map Information System on Flooding, 2004-2008), dans les bassins de la Moselle et de la Sarre. La conception du modèle a été largement orientée par des enjeux opérationnels, en particulier en matière de gestion des inondations, et de compatibilité du modèle avec les données disponibles. Il est aujourd'hui le modèle utilisé par les administrations des pays riverains de la Moselle et de la Sarre pour la prévision des crues.

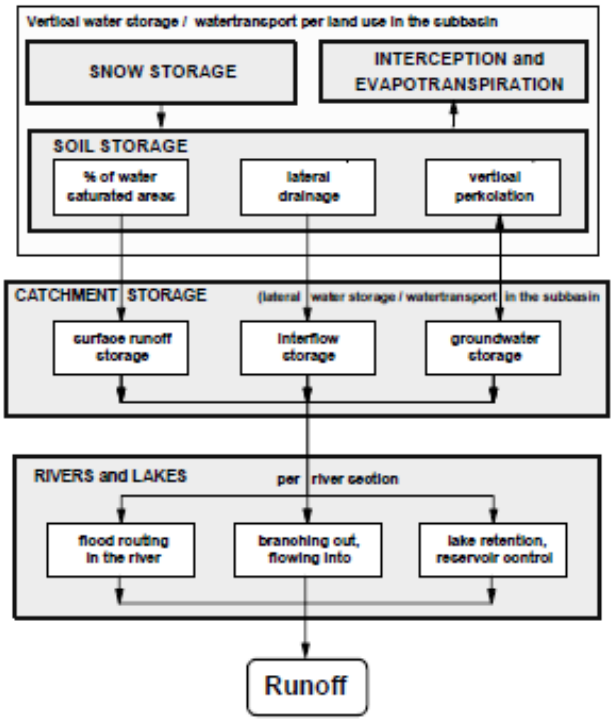


Figure 31 : Représentation schématique du modèle LARSIM (Ludwig and Bremicker, 2006).

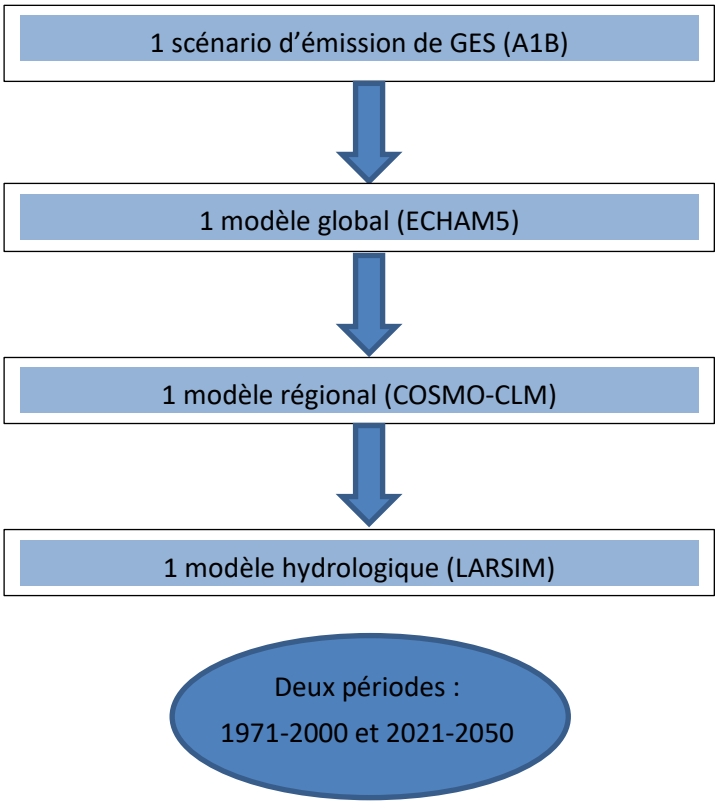


Figure 32 : Le travail de modélisation hydrologique des impacts du changement climatique dans le projet FLOW-MS

Le projet a sélectionné (Figure 32) un scénario climatique médian (A1B), dont les données d'émissions sont utilisées dans le modèle global ECHAM5. L'analyse a porté sur le futur proche (horizon 2050). La période passée comprise entre 1971 et 2000 (données mesurées et simulations à partir du modèle ECHAM5) est utilisée pour évaluer les résultats fournis par ECHAM5 sur le futur. Les données météo utilisées sont celles de l'institut de météorologie et de recherche climatique de l'Institut de technologie de Karlsruhe. L'enjeu de la descente d'échelle (prise en compte des particularités régionales) a été géré en faisant appel à un modèle régional.

Les résultats de ces modélisations climatiques montrent des étés plus secs et des hivers plus pluvieux en moyenne à l'horizon 2050.

Les résultats du modèle climatique régional ont été ensuite été utilisés comme données d'entrée du modèle hydrologique LARSIM, un modèle déterministe, conceptuel, distribué à base physique (déterministe), proche du modèle Isba-Modcou. Les différents sous-modèles (évapotranspiration, accumulation, fonte des neiges, rétention d'eau souterraine, stockage et transport latéral d'eau, propagation des crues) sont déterministes. Il fait l'objet d'une démarche longue de calage manuel suivant un protocole établi en différentes étapes pour ajuster les paramètres (opérations de traitement des valeurs de saisie manquantes, corrections des différences entre la simulation et les données mesurées de débit…). Les paramètres calés concernent la météorologie si le modèle s'appuie sur des données ponctuelles (spatialisation), le sol (indice de drainage, humidité du sol, saturation…), le transport latéral de l'eau (rétention souterraine, de sub-surface et écoulement de l'eau). La vérification du modèle se fait en comparant les résultats de simulation avec les débits mesurés sur une période donnée.

Les résultats de la modélisation sur 37 stations du bassin de la Moselle et de la Sarre ont été les suivants :

- Concernant les extrêmes :
    - une augmentation des débits d'étiage pendant l'hiver hydrologique (entre + 5 % et + 28 %) et une légère baisse ou un maintien pendant l'été hydrologique (- 13 % et + 5 %)
    - une augmentation des débits de crue moyens pendant l'hiver hydrologique (entre + 5 % et + 24 %), et une légère baisse ou un maintien pendant l'été hydrologique (entre - 13 % et + 8 %)

Les résultats suggèrent également une tendance à la hausse des crues extrêmes (hiver hydrologique) et à la baisse des étiages extrêmes (été hydrologique), mais les changements identifiés restent du même ordre de grandeur que les incertitudes.

- Concernant les débits moyens :
    - une augmentation pendant l'hiver hydrologique (15 % en moyenne)
    - une baisse pendant l'été hydrologique (4 % en moyenne)

Globalement, l'étude a conclu que les débits d'étiage ne s'aggraveraient pas significativement. En ce qui concerne les crues, les résultats montrent une grande diversité selon les stations. Certaines voient les débits de crue centennale augmenter de 15 à 30 %.

L'étude a montré que les résultats étaient très dépendants des conditions initiales (concentrations en CO_2) prises pour le modèle régional climatique. La technique de débiaisage opérée entre le modèle global et le modèle régional a également été très discutée.

Sources d'incertitudes			**Prise en compte dans FLOW-MS ?**
Scénarios d'émissions		Choix, contenu	Non
Modèles de circulation générale		Choix des modèles et des simulations qu'ils produisent	Pas d'approche multi-modèle (1 seul modèle) mais 3 simulations du modèle, avec des hypothèses de concentration initiale en CO_2 différentes
		Descente d'échelle des simulations produites par les GCM sélectionnés	Prise en compte des enjeux de la descente d'échelle, mais pas des incertitudes liées aux méthodes de descente d'échelle (1 seul modèle régional)
Modèle hydrologique		Résultats des modèles	Pas d'approche multi-modèle (1 seul modèle) mais 3 simulations réalisées avec différentes données d'entrée
	LARSIM	calage	?
		Prise en compte des usages	Le modèle distingue différentes classes d'utilisation du sol (calcul de l'ETP, de l'infiltration…). Mais il n'y a pas eu dans FLOW-MS d'évaluation des effets de changements d'usages du sol sur les résultats du modèle

Figure 33 : Sources d'incertitudes et prise en compte dans FLOW-MS

3. Le projet MOSARH 21

Le projet MOSARH 21 (Thirel, 2018; Thirel et al., 2015) a été financé par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse et commandité par la DREAL Grand-Est. Il trouve son origine dans la diversité des approches déployées pour produire des projections hydrologiques dans quatre projets précédents qui concernaient le Rhin ou ses affluents (FLOW-MS, Reinblick2050, VULNAR, Explore 2070). Cette diversité concernait les modèles de circulation générale utilisés, les méthodes de descente d'échelle, les modèles hydrologiques ainsi que les périodes de référence et de projection, ou encore les indicateurs utilisés pour représenter l'évolution des débits.

L'enjeu d'une homogénéisation se trouvait renforcé par l'importance des incertitudes associées aux résultats, dans un contexte de concertation et de négociation internationale (cours d'eau transfrontaliers), marqué par différentes représentations de l'importance des étiages ou des crues dans le futur.

Sources d'incertitudes			**Prise en compte dans MOSARH21 ?**
Scénarios d'émissions		Choix, contenu	Oui, plusieurs scénarios radiatifs
Modèles de circulation générale		Choix des modèles et des simulations qu'ils produisent	Oui, plusieurs modèles utilisés
		Descente d'échelle des simulations produites par les GCM sélectionnés	Oui, approche statistique et régionalisation des modèles
Modèles hydrologiques		Résultats des modèles	Oui
	LARSIM et GRSD	Périodes de calage	Oui
		Prise en compte des usages	Non

Figure 34 : Sources d'incertitudes et prise en compte dans MOSARH21

Annexe 4 : Synthèse des savoirs issus de la géographie physique sur la circulation de l'eau dans le massif des Vosges

Généralités sur la circulation de l'eau à l'échelle du massif des Vosges

Les flux atmosphériques : précipitations et évapotranspiration

Les Vosges appartiennent au domaine climatique de l'Europe occidentale et présentent un climat océanique de transition où les influences océaniques et continentales se combinent. L'éloignement de l'océan et l'effet d'abri spectaculaire du Massif Vosgien contribuent à une accentuation assez nette de la continentalité sur le versant alsacien des Vosges. Ainsi, les hauteurs pluviométriques moyennes annuelles sont parmi les plus contrastées de France sur un territoire d'aussi petite taille (Paul, 1998).

La pluviométrie dans les Vosges, bien qu'étant équitablement répartie tout au long de l'année est très hétérogène spatialement : abondante sur le versant lorrain, très abondante dans les parties sommitales grâce au mécanisme de soulèvement orographique (Figure 35), elle est beaucoup plus indigente en allant vers l'Alsace où le nombre de jours de pluie reste tout de même deux fois supérieur à celui du domaine littoral méditerranéen (env. 150 jours en moyenne). On enregistre en moyenne 800 mm/an dans les Vosges du Nord, 1300 mm/an dans les Vosges gréseuses et plus de 2300 mm/an dans le secteur du Ballon d'Alsace (Vosges du Sud).

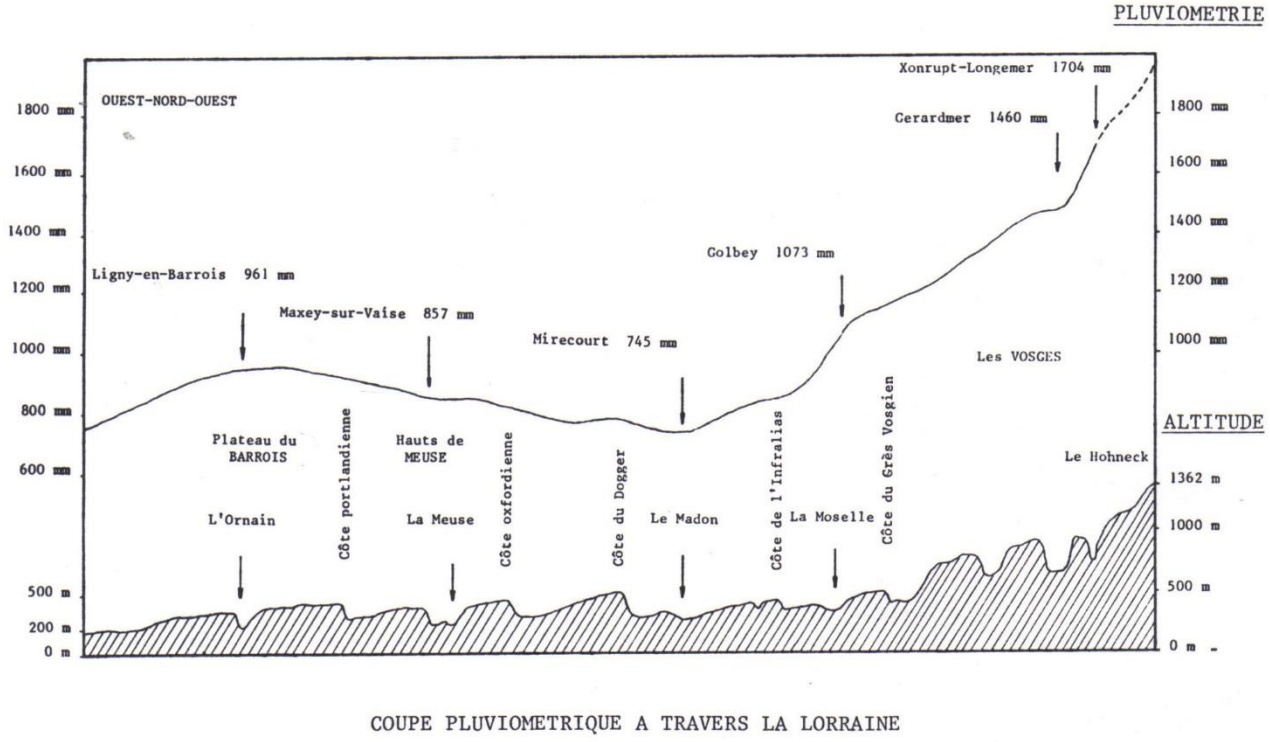


Figure 35 : Coupe pluviométrique à travers la Lorraine, de Bar-le-Duc (250 m) au Hohneck (1362 m). D'après Gille (1985)

D'après Wahl et al. (2007), le coefficient nivométrique (rapport des précipitations solides aux précipitations totales) est estimé à 4 % en plaine d'Alsace, 20 % vers 700 m, 30 % vers 1000 m et 60 % vers 1350 m d'altitude. L'enneigement moyen varie de 60 jours vers 750 mètres à plus de 160 jours vers 1200 m (autour de 160 jours au niveau du chalet universitaire).

Le Massif Vosgien se caractérise par un taux de boisement très élevé avec une majorité de conifères et de peuplements mixtes : il est de l'ordre de 75 %[31] pour le Massif Vosgien central incluant les Basses-Vosges gréseuses au nord ; les Hautes Vosges gréseuses, au centre et au centre-ouest ; les Vosges cristallines au centre-est et au sud. La présence de cet écran végétal dense (et de la litière associée) contribue à renvoyer dans l'atmosphère une part importante des précipitations incidentes sous forme de pertes par évapotranspiration. Celles-ci sont difficiles à quantifier à l'échelle d'un territoire comme celui des Vosges ; surtout en montagne, là où le relief provoque des variations importantes de l'énergie disponible et donc de la demande évaporatoire de l'atmosphère que les hydrologues appellent l'évapotranspiration potentielle.

Les écoulements superficiel et souterrain

Les Vosges se situent à l'est d'une diagonale Metz-Biarritz (Figure 36) où règne l'abondance en eaux superficielles (écoulements supérieurs à 600 mm soit 20 l/s/km^2 de bassin versant). Elles comprennent un réseau de drainage naturel dense dont les axes principaux, Moselle, Sarre et Rhin écoulent l'eau vers la mer du Nord. Les débits moyens (ou abondance spécifique) les plus élevés sont compris entre 30 et 50 l/s/km^2 dans la partie interne des Vosges (Figure 36) où la pluviométrie excède 1500 mm/an. Autour et dans toutes les Hautes Vosges, drainées par les cours d'eau du bassin amont de la Moselle et de celui de l'Ill, les débits moyens sont un peu inférieurs sans s'abaisser en dessous de 17 l/s/km^2. Ils sont compris entre 6 et 17 l/s/km^2 dans les Vosges gréseuses du Nord (Figure 36).

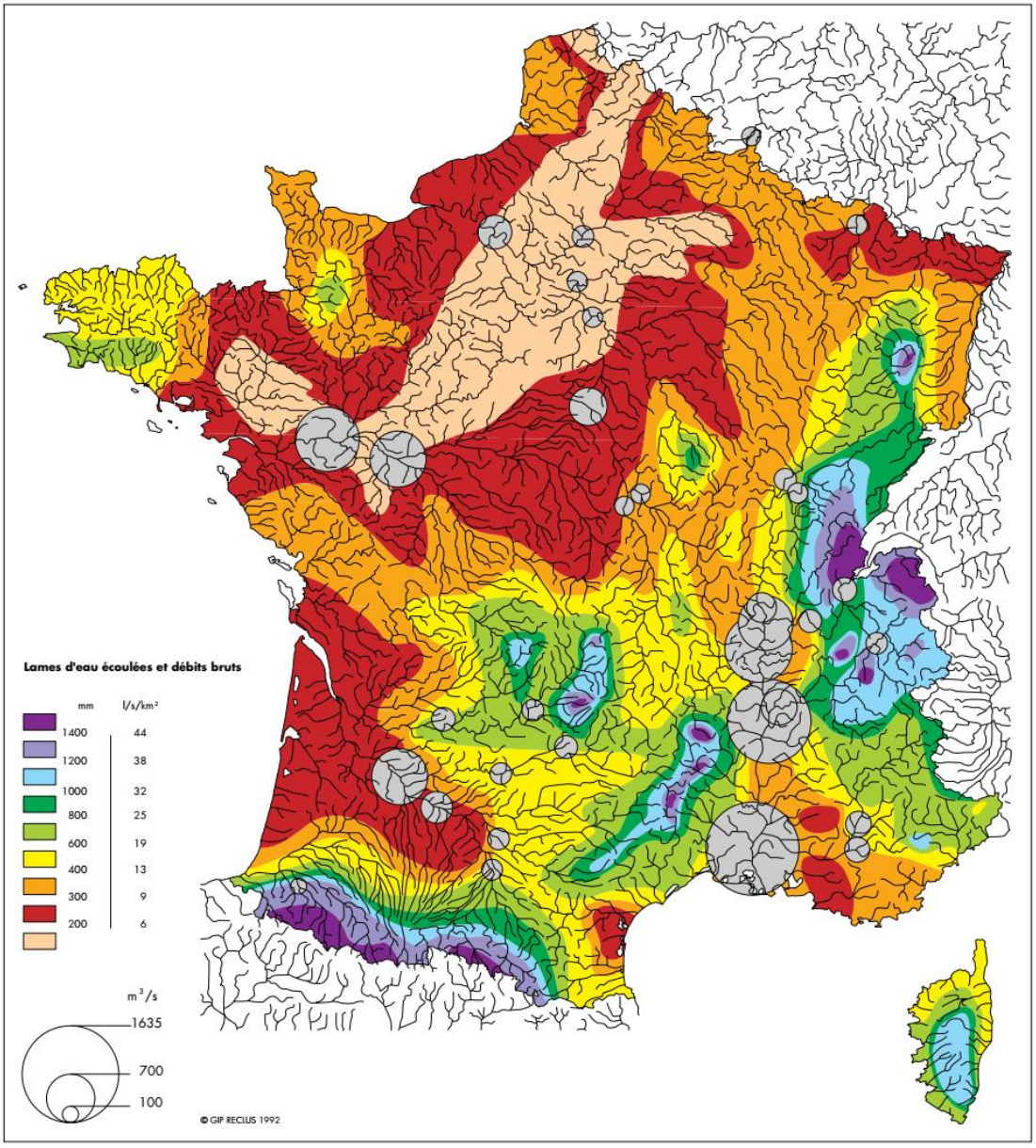
La variation du débit des cours d'eau dans le temps correspond au régime hydrologique. Hormis les cours supérieurs de quelques rivières des Hautes Vosges (au-dessus de 1000 m), apparentés au régime pluvio-nival, tous les cours d'eau ont un régime pluvial océanique (hautes eaux d'hiver et basses eaux d'été) (Frécaut, 1972).

L'influence de la neige sur les caractéristiques moyennes reste mineure pour les cours d'eau concernés (débit minimum secondaire de février sur la courbe de régime) et variable selon les années, même si elle est susceptible de jouer un rôle aggravant à l'occasion de certaines crues. Les contrastes plus ou moins grands entre les saisons de hautes et de basses eaux sont déterminés par le comportement des bassins versants, notamment au plan lithologique.

En étiage, les cours d'eau qui drainent les grès vosgiens, aux réserves abondantes, sont les mieux soutenus.

[31] https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/Tome_D.pdf

Le sous-sol vosgien comprend deux grands aquifères : la nappe du socle vosgien et la nappe des Grès du Trias Inférieur (Figure 37). Celle-ci affleure dans les Vosges du Nord où elle est alimentée par les précipitations et drainée par le réseau hydrographique. Le volume d'eau contenu dans le réservoir des grès du Trias inférieur est évalué à 30 milliards de m^3 en affleurement (SDAGE Rhin-Meuse, 1996), et à 500 milliards de m^3 sous couverture, dont 150 milliards de m^3 d'eau douce sont exploitables pour l'eau potable, le reste étant trop minéralisé. L'exploitation de cette nappe par forage se fait en-dehors du périmètre géographique couvert par cette étude (Figure 37).



L'échelle du document ne permet pas de prendre en compte des bassins versants inférieurs à 100 km²; l'inégale distribution spatiale des stations (beaucoup de stations EDF en quelques zones montagnardes, carences absolues en certaines zones basses) aurait d'ailleurs faussé la représentativité de la carte.
De bassin en bassin, on a tracé des lignes d'isoécoulements passant par les stations de mesure des débits et caractéristiques de l'écoulement du bassin, ou de la partie du bassin immédiatement à l'amont du point de mesure.
Les zones délimitées par les isolignes sont en fait emboîtées, et non juxtaposées comme les plages entre isohyètes dans les cartes de précipitations: ici, chaque zone aval est dépendante de la ou des zones d'amont, chaque fois que le bassin est supérieur à quelques centaines de kilomètres carrés.
Les volumes d'eau écoulée par les plus abondants des cours d'eau (débit brut > 100 m³/s) ont été rapportés à la station de mesure correspondante. Pour les grands fleuves, ont été choisies les stations pour lesquelles le débit changeait de classe (cf. légende), en évitant les redondances.

Figure 36 : L'abondance des cours d'eau en France (Vivian, 1992)

La contribution des eaux souterraines est variable dans l'écoulement superficiel qui transite dans les cours d'eau (Figure 37). Ainsi on peut distinguer les bassins versants développés sur le socle bénéficiant d'apports gréseux (par exemple la Meurthe à Saint-Dié, la Moselle à Epinal, la Vologne à Chénimenil ou encore la Weiss à Kaysersberg) dont l'indice d'écoulement de base (en gros la part d'alimentation du débit par les nappes dans l'écoulement annuel) se situe autour de 50 %, les bassins

versants gréseux (la Mortagne à Autrey-Ste-Hélène) autour de 60 % et les bassins versants imperméables du socle vosgien (la Moselle à Fresse, la Moselle à Rupt-sur-Moselle, la Moselotte à Vagney, la Fecht à Wintzenheim) qui sont les productifs en termes d'écoulement mais ont un indice d'écoulement de base plus faible, situé entre 20 et 40 % (Lang, 2007).

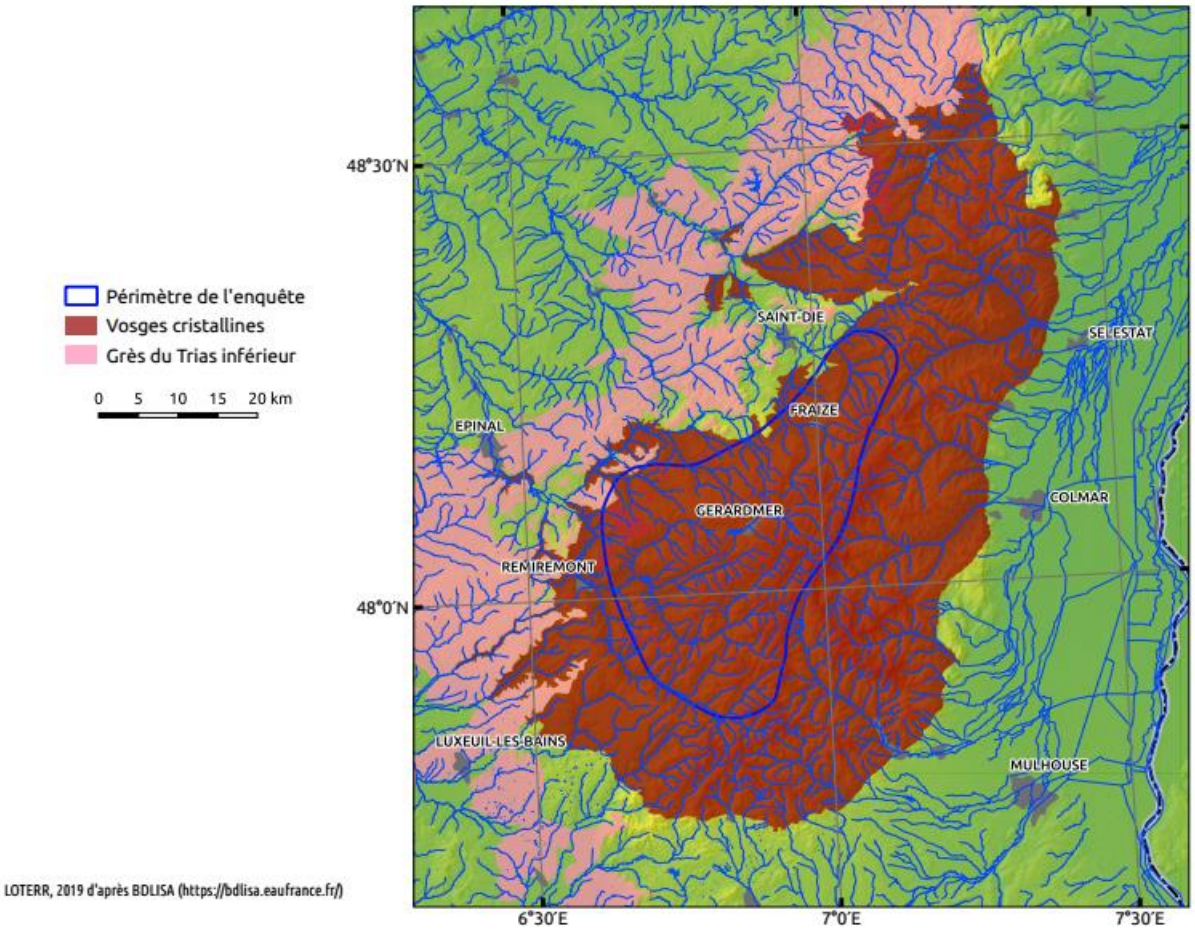


Figure 37 : Cartographie des formations aquifères à l'affleurement (Grès du Trias Inférieur et Vosges cristallines) d'après la BD Lisa du BRGM. Les limites des Vosges cristallines peuvent être interprétées comme celles de la "nappe du socle vosgien" bien que les terrains cristallins ne soient que localement aquifère dans les alluvions, les moraines, les arènes granitiques, etc.

Les utilisations de l'eau par l'Homme

Les perturbations du régime hydrologique naturel des cours d'eau dans les Vosges correspondent principalement aux prises et rejets du réseau navigable d'une part et aux réservoirs créés pour le soutien d'étiage et l'écrêtage de crue d'autre part. Dans la première catégorie d'usage, on peut citer le canal de la Marne au Rhin-Est qui bénéfice de deux prises d'eau et de leurs rigoles d'alimentation (influence sur la Sarre Blanche à Lorquin et sur la Sarre Rouge à Nitting) et de deux stations de pompage[32]. Dans la seconde catégorie d'usage on peut citer, d'après le Bulletin de Suivi d'Etiage Grand Est (2019)[33], les réservoirs de Vieux Pré (d'une capacité totale de 61,6 millions de m^3) destinés

[32] http://vnf-strasbourg.fr/nous-connaitre/les-unites-territoriales-ut/unite-territoriale-canal-de-la-marne-au-rhin

[33] http://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/bulletin-de-suivi-d-etiage-grand-est-a16960.html

au soutien de débit de la Meurthe et de la Moselle et celui de Kruth (d'une capacité totale de 11,6 millions de m^3) située sur la Thur dans le Haut-Rhin.

Annexe 5 : Présentation des études analysées en section 5

1. La démarche Atelier de Territoire « Vivre et travailler en montagne à l'heure du changement climatique » de la Communauté de Communes des Hautes Vosges

L'Atelier de Territoire est un dispositif d'animation associant services déconcentrés, élus et experts. Porté par le Ministère du Logement et de l'Habitat Durable, ce dispositif vise à construire une vision partagée du territoire et initier des projets co-construits sur un territoire en constitution. Depuis 10 ans, la démarche de l'Atelier des territoires accompagne « *des territoires contraints ou en manque d'ingénierie, confrontés à des difficultés les empêchant de préparer leur avenir* » (Ministère du Logement et de l'Habitat Durable, 2017). Une cinquantaine de territoires ont bénéficié de ce dispositif (zones périurbaines, territoires dévitalisés, territoires littoraux).

À l'occasion des 30 ans de la loi Montagne, une « *feuille de route pour la montagne, à l'heure du défi climatique* », a été présentée par le gouvernement en septembre 2015 lors du Conseil National de la montagne. Parmi ses actions, cette feuille de route prévoit une session d'Ateliers consacrée aux territoires de montagne, nommée « Vivre et travailler en montagne à l'heure du changement climatique ». Cette session indique cibler spécifiquement des « *territoires porteurs d'une activité touristique forte, déstabilisée par les effets du réchauffement climatique* » (Ministère du Logement et de l'Habitat Durable, 2017). La démarche s'organise autour de trois ateliers sur site, composés de visites de terrain, d'échanges techniques et de séances de travail, complétés d'une journée de lancement et d'un séminaire de restitution.

Le Massif des Vosges a été retenu avec trois autres territoires (Massif du Jura, Massif des Bauges, Massif des Pyrénées). La démarche a porté sur la Communauté de Communes des Hautes Vosges, alors en constitution (2016-2017). La DDT des Vosges, en lien avec le conseil départemental, le commissariat de massif et le PNR des Ballons des Vosges a proposé un territoire dans le Sud-Est du massif : trois communautés de communes qui allaient fusionner en 2017 pour devenir la Communauté de Communes des Hautes Vosges. La DDT des Vosges a assuré le rôle de maître d'ouvrage délégué, assurant le lien entre le Ministère et la communauté de communes. Un groupement pluridisciplinaire de bureaux d'étude a été recruté par la DDT afin d'assurer la maîtrise d'œuvre (groupement Folléa-Gauthier, paysagistes-urbanistes).

Les objectifs initiaux affichés pour l'Atelier vosgien sont de conforter l'activité touristique (offre touristique diversifiée et disponibilité du personnel), adapter le territoire aux phénomènes climatiques (diversification de l'offre touristique vers le « quatre saisons » et stratégie bas-carbone), prendre en compte les opportunités locales pour créer des passerelles entre les activités (offrir aux visiteurs des packages globaux, réfléchir à la mutualisation des offices de tourisme) et adapter les infrastructures aux besoins du territoire (gestion des déplacements, facture énergétique globale accès aux services et au numérique, modernisation et mise à niveau des infrastructures touristiques). L'ensemble de ces réflexions a pour but « *d'alimenter les travaux conduits dans le cadre de la stratégie touristique "destination Massif des Vosges"»* qui vise à « *positionner le Massif des Vosges*

comme une destination familiale quatre saisons » (Ministère du Logement et de l'Habitat Durable, 2017).

Si une place centrale est donnée aux enjeux liés aux ressources en énergie, la question de la disponibilité en eau n'est pas abordée. L'examen des objectifs des autres sites expérimentant les Ateliers de Territoires montre des objectifs similaires (diversification touristique, attractivité économique, transition énergétique, soutien des activités agricoles et sylvicoles, etc.). Les enjeux environnementaux semblent circonscrits à la transition énergétique et au paysage, « *support même de l'économie territoriale de montagne* ».

L'Atelier vosgien s'est traduit par la définition d'une feuille de route portée sur quatre axes :
- Axe 1 : Activités économiques et touristiques : Vers plus de qualité et d'ancrage
- Axe 2 : Urbanisme : vers plus de centralités
- Axe 3 : Mobilités : vers moins de pétrole
- Axe 4 : Ressources locales : vers plus de valeur

Au sein de ces différentes thématiques les mots d'ordre sont la diversification, la sobriété énergétique et la valorisation des ressources locales (circuits courts, coopération, etc.). Au niveau touristique (axe 1), le focus est fait sur la diversification des activités sur les quatre saisons (patrimoine culturel, activités sportives autour de la forêt et la pente : ski à roulettes, pratiques nordiques). La question du ski alpin n'est pas abordée. Dans l'axe 4, la ressource en eau apparaît sur des enjeux de qualité des milieux et de la ressource (préservation des zones humides, continuité écologique et paysagère, risques de pollution) et d'hydroélectricité (amélioration des performances, mix énergétique). Les enjeux quantitatifs liés à l'eau n'apparaissent pas explicitement, excepté dans un objectif transversal de sensibilisation à l'économie des ressources locales (énergie, eau, etc.).

La dynamique initiée par l'Atelier de Territoire se poursuit par la réalisation d'un plan de paysage de lutte et d'adaptation au changement climatique (DDT des Vosges, 2017b). Outil non réglementaire, il est attendu du plan de paysage que sa démarche fédératrice fasse avancer les réflexions collectives en vue du futur PLUi. Plus largement, le plan de paysage devrait être le pivot d'un ensemble d'actions dont certaines viennent d'être lancées : des actions annonciatrices de sensibilisation auprès de la population ; des économiques/touristiques, de mobilité, énergétique et hydraulique ; un atelier permanent du projet de territoire ; la réalisation du PCAET.

2. Le projet de recherche Clim'Ability, en lien avec la CCI Alsace Métropole et Alsace Destination Tourisme

Le projet de recherche Clim'Ability[34], financé par l'Union Européenne (INTERREG V 2016-2019) et porté par Florence Rudolf (INSA de Strasbourg), a pour objectif d'identifier les vulnérabilités des

[34] URL : [www.clim-ability.eu/]

entreprises du Rhin Supérieur[35] dans la perspective du changement climatique. Il vise à dégager des stratégies d'adaptation aux conditions climatiques et socio-économiques à venir. Une partie du projet, portée par Amandine Amat (direction Industrie et Développement Durable, CCI Alsace Eurométropole) et Brice Martin (maître de conférence à l'Université de Haute Alsace, CRESAT, UHA) a concerné l'économie de moyenne montagne dans le Rhin Supérieur, élargi au massif des Vosges sur demande d'Alsace Destination Tourisme (ADT). La démarche se base sur des entretiens avec les acteurs du tourisme (Offices du tourisme, PNR des Ballons des Vosges, gérants privés et publics de domaines skiables, entreprises…) dans une approche comparative avec la Forêt Noire. Au sein du projet Clim'Ability, un Atelier de Développement « *Changement climatique : Quels futurs pour l'enneigement des Vosges* » a été organisé par Alsace Destination Tourisme avec la CCI en mars 2018. En octobre 2019, un atelier de concertation « *Tourisme dans le Massif des Vosges et changement climatique : relevons le défi ensemble* » s'est tenu à la CCI de Colmar.

L'un des enjeux de Clim'Ability, pour Alsace Destination Tourisme, est d'évaluer l'existence d'un intérêt pour un projet d'adaptation du massif des Vosges au changement climatique dans le domaine du tourisme, et notamment pour développer une offre touristique commune au sein du massif, qui ne serait pas seulement dédiée à la neige. Les enquêtes réalisées dans l'étude Clim'Ability ont servi à identifier un ensemble d'éléments partagés par les Offices de Tourisme et les stations de ski (Lévy et al., 2019) :

- au niveau des constats (conscience des aléas du secteur d'activité à travers l'expérience d'hivers sans neige, et conscience du fait que le contexte climatique et économique rend plus compliqué la mono-spécialisation dans le ski, la problématique centrale de la fermeture des petites stations de ski, des procédures administratives considérées comme des freins vis-à-vis de la prise d'initiatives et des investissements privés),

- des évolutions envisagées (le souhait de fédérer à l'échelle du massif pour porter les projets, maintenir un positionnement sur une fréquentation touristique familiale, créer des pôles multi-activités sur les grandes stations tout en conservant un maillage de petites stations),

- et des enjeux soulevés par ces évolutions (la question du mode de gouvernance, la volonté de diffuser le message qu'il y aura toujours de la neige mais avec plus de variabilité et sur une saison plus courte).

En outre, deux types de stratégie ont été identifiés parmi les acteurs enquêtés : protéger la ressource (adaptation technique visant à améliorer la robustesse des infrastructures et à optimiser les activités dépendantes des ressources) et créer de la valeur (développement du multi-activité en hiver à basse et moyenne altitude et du 4 saisons). Malgré une conscience du fait que l'enneigement artificiel ne résout pas tout, s'observe une volonté d'exploiter « *jusqu'au bout* ».

Lors des échanges de l'atelier de concertation, qui a rassemblé une trentaine d'acteurs du territoire, la question des enneigeurs n'a pas été abordée. Les résultats de l'enquête, présentés ce jour-là,

[35] Le Rhin supérieur correspond à l'espace rhénan depuis la Suisse jusqu'à Heidelberg.

mettent pourtant en évidence « *l'image controversée* » des canons à neige : jugés indispensables au sein des plus grandes stations, et « *impensables* » pour les petites stations. La discussion s'est orientée sur les modalités du développement du 4 saisons, sur différents enjeux et problèmes qui y sont liés (gouvernance multi-niveaux, importance des réseaux et de la structuration des acteurs), et sur la problématique des transports en commun.

Une suite est donnée au programme Clim'Ability, sous le nom « Clim'Ability Design », pour trois ans (à partir de l'automne 2019). Son objectif est davantage centré sur la conception des voies d'adaptation, en co-construction avec les acteurs du territoire (campagnes de mesures climatiques sur des zones industrielles, sensibilisation des entreprises, ateliers d'innovation). Les chercheurs de Clim'Ability ont lancé un appel à manifestation d'intérêt auprès des acteurs du territoire lors de l'atelier d'octobre 2019 pour une éventuelle suite. Alsace Destination Tourisme paraît fortement mobilisé à cet égard.

3. Études prospectives de l'AERM

L'Agence de l'eau Rhin-Meuse a été accompagnée par ACTeon et Véronique Lamblin Conseil durant la première moitié de l'année 2017 dans l'analyse prospective des activités socio-économiques implantées sur le territoire du bassin Rhin-Meuse (Agence de l'Eau Rhin-Meuse et al., 2017). C'est à partir des hypothèses collectées lors d'ateliers thématiques réalisés avec les acteurs publics et économiques (industrie, agriculture, etc.) que le bureau d'études a défini des scénarios prospectifs. Les participants ont ensuite été invités à s'exprimer sur les scénarios via un questionnaire en ligne et ont retenu le scénario tendanciel comme celui qui leur paraissait le plus probable.

Menée par Ecodécision et Eco Logique Conseil, l'analyse des vulnérabilités des activités socio-économiques face aux aléas climatiques à l'horizon 2050, s'est basée sur ce scénario tendanciel(Agence de l'Eau Rhin-Meuse et al., 2018). L'objectif était d'identifier les vulnérabilités au changement climatique des bassins élémentaires (quels territoires sont concernés par quels risques ?) à partir d'une méthodologie développée par le Commissariat Général du Développement Durable. Une démarche de co-construction a été mise en œuvre avec des acteurs du territoire afin d'identifier des mesures d'adaptation et d'atténuation au changement climatique, sous forme de fiches-actions.

4. Étude sur les fermes-auberges d'Alsace Destination Tourisme

L'étude sur l'approvisionnement en eau des fermes-auberges fait partie d'un ensemble de 3 études lancées par Alsace Destination Tourisme sur les fermes-auberges : les deux autres portent sur les énergies renouvelables et sur la clientèle. Alsace Destination Tourisme, en tant qu'agence de développement touristique, est en charge du développement et de la promotion touristique des territoires alsaciens. Pour les besoins des études sur les fermes-auberges, le périmètre des études a été étendu au versant vosgien du massif, en lien avec les différents réseaux départementaux de

fermes-auberges existants et mobilisés (Haut-Rhin, Bas-Rhin et Vosges). La demande de subvention a été faite fin 2017 auprès du commissariat du massif. Les études sont financées par des crédits FNADT (fonds national d'aménagement et de développement du territoire) à hauteur de 80 %, les 20 % restants étant financés sous forme d'ingénierie par ADT. L'étude sur l'approvisionnement en eau des fermes-auberges a été réalisée par une coopérative d'autoentrepreneurs au printemps 2018 et finalisée en 2019.

L'étude correspond à un état des lieux sur 12 fermes-auberges, dont 2 sont identifiées comme ayant des manques d'eau, accompagné d'un ensemble de mesures (Oxalis, 2019a). Les solutions proposées s'organisent en trois axes (Oxalis, 2019b) :

- le développement de l'information : suivi des consommations et débits, réalisation d'études, voyage d'étude avec les fermes-aubergistes, formation à des pratiques de permaculture, sensibilisation aux économies d'eau, etc.,

- la réduction du besoin en eau par une optimisation des pratiques et usages liés à la ferme (réemploi de l'eau blanche de la salle de traite, réduction des fuites d'eau, sanitaires hydro-économes, etc.)

- et la « *gestion* » de la ressource en eau qui consiste à déployer des actions visant à conserver l'eau dans le paysage (stockages d'eau intersaisonniers, aménagés en étangs d'abreuvement, aménagement du paysage pour ralentir l'eau).

Table des figures

Figure 1 : Démarche du projet SOCLIM 9
Figure 2 : Liste des organisations enquêtées 10
Figure 3 : L'eau dans les deux SNBC 16
Figure 4 : Quelques chiffres sur les prélèvements et consommations d'eau par les centrales nucléaires et thermiques 17
Figure 5 : L'eau dans le PNACC-1 (2011-2015) 19
Figure 6 : L'eau dans le PNACC-2 (2016-2022) 21
Figure 7 : Les futurs de l'hydrologie en Rhin-Meuse liés au changement climatique dans le SDAGE 2016-2021 . 23
Figure 8 : Les mesures du 10e programme contribuant à l'adaptation au changement climatique 24
Figure 9 : Répartition des recettes du 11e programme de mesures de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse (2019-2024) 26
Figure 10 : Répartition des autorisations du 11e programme de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse (2019-2024) 27
Figure 11 : Ce que disent les analyses des séries chronologiques sur l'enneigement 30
Figure 12 : Schéma des relations entre modélisations climatiques, hydrologiques et données 35
Figure 13 : Schématisation des relations entre climat et ressources en eau 40
Figure 14: Distribution des communes enquêtées au sein des EPCI 46
Figure 15 : Cartographie des précipitations moyennes annuelles sur la période 1971-2005. Source des données : Météo-France. 48
Figure 16 : Bilan hydrologique annuel et temps de résidence de l'eau dans un bassin des Hautes-Vosges granitiques (secteur de Cornimont, granite du Ventron) 54
Figure 17 : Distribution des communes enquêtées en fonction du prix de l'eau 56
Figure 18 : Caractéristiques des études analysées 75
Figure 19 : Démarches des études analysées 78
Figure 20 : Stratégies d'adaptation des stations de ski du massif des Vosges (d'après les résultats de l'enquête Clim'Ability présentés en octobre 2019 à Colmar : Lévy, Amat, et Martin 2019) 83
Figure 21 : Typologie des modèles hydrologiques (Fossey 2016) 100
Figure 22 : Évolution du nombre de publications relevant (i) de l'hydraulique, (ii) de l'hydraulique et de la modélisation, et (iii) de l'hydraulique, de la modélisation et des incertitudes (période 1970-2018) 104
Figure 23 : Évolution du nombre de publications relevant (i) de l'hydrologie, (ii) de l'hydrologie et de la modélisation, et (iii) de l'hydrologie, de la modélisation et des incertitudes (période 1960-2018) 105
Figure 24 : Évolution de la part des publications sur les incertitudes dans les publications concernant (i) l'hydraulique et la modélisation et (ii) l'hydraulique (Source des données : Scopus) 105
Figure 25 : Évolution de la part des publications sur les incertitudes dans les publications concernant (i) l'hydrologie et la modélisation et (ii) l'hydrologie (Source des données : Scopus, recherche réalisée sur le titre, le résumé et les mots-clés des articles 105
Figure 26 : Évolution de la part des publications associant les mots-clés « hydrologie » et « changement climatique » (Source des données : Scopus, recherche réalisée sur le titre, le résumé et les mots-clés des articles référencés) 106

Figure 27 : Évolution de la part des publications incluant les mots-clés « multimodel » ou « multi-model » (Source des données : Scopus, recherche réalisée sur le titre, le résumé et les mots-clés des articles référencés) *107*
Figure 28 : Répartition par champs disciplinaires des publications incluant les mots-clés « multimodel » ou « multi-model » (Source des données : Scopus, recherche réalisée sur le titre, le résumé et les mots-clés des articles référencés) *107*
Figure 29 : Approche multi-modèles dans Explore 2070 ..... *112*
Figure 30 : Les sources d'incertitudes et leur prise en compte dans Explore 2070 ..... *114*
Figure 31 : Représentation schématique du modèle LARSIM (Ludwig et Bremicker 2006). *116*
Figure 32 : Le travail de modélisation hydrologique des impacts du changement climatique dans le projet FLOW-MS *116*
Figure 33 : Sources d'incertitudes et prise en compte dans FLOW-MS *118*
Figure 34 : Sources d'incertitudes et prise en compte dans MOSARH21 ..... *119*
Figure 35 : Coupe pluviométrique à travers la Lorraine, de Bar-le-Duc (250 m) au Hohneck (1362 m). D'après Gille (1985) *120*
Figure 36 : L'abondance des cours d'eau en France (Vivian 1992) *123*
Figure 37 : Cartographie des formations aquifères à l'affleurement (Grès du Trias Inférieur et Vosges cristallines) d'après la BD Lisa du BRGM. Les limites des Vosges cristallines peuvent être interprétées comme celles de la "nappe du socle vosgien" bien que les terrains cristallins ne soient que localement aquifère dans les alluvions, les moraines, les arènes granitiques, etc. *124*

Sommaire détaillé

Table des sigles et acronymes 5

Introduction 7

1 Questions de recherche, démarche et terrains d'étude 8

1.1 Une approche exploratoire 8

1.2 Une analyse des discours et des supports matériels de l'action publique 8

1.3 De la modélisation climatique et hydrologique régionale à la gestion de l'eau potable et de l'enneigement au sein du massif des Vosges 11

2 Eau, changement climatique et action publique aux échelles internationales, nationale et du bassin Rhin-Meuse 12

2.1 Brève histoire politique et scientifique de la construction des relations entre changement climatique et eau 12

2.2 La construction d'un cadre national de lutte contre le changement climatique 14

2.2.1 L'atténuation et l'eau 14

2.2.2 L'adaptation et l'eau 17

2.3 Les traductions des politiques d'adaptation par le Comité de bassin Rhin-Meuse 22

3 Mesurer, modéliser l'eau et le climat : savoirs et pratiques 28

3.1 Métrologie 28

3.1.1 Des enjeux entre représentativité spatiale et ajustement au terrain 30

3.1.2 Des enjeux entre homogénéité et épaisseur temporelle des données 32

3.2 Modélisations et simulations numériques 33

3.2.1 Modélisations et gestion des incertitudes 34

3.2.2 Des modélisations à la croisée entre enjeux scientifiques et action publique 40

3.3 Conclusion 43

4 Savoirs et actions locales en matière d'adaptation au changement climatique 45

4.1 Que nous dit la géographie physique de la circulation de l'eau dans les Hautes Vosges ? .. 47

4.1.1 Les précipitations liquides et solides 47

4.1.2 Les pertes par évapotranspiration 48

4.1.3 L'écoulement superficiel 49

4.1.4 Les eaux souterraines 49

4.1.5 Origines et temps de transit de l'eau 50

4.1.6 Essai de synthèse : bilan hydrologique et temps de résidence de l'eau dans un bassin versant des Hautes-Vosges granitiques (secteur de Cornimont) 51
4.1.7 Utilisation de l'eau *in situ*, voies d'eau artificielles et retenues d'eau 52
4.1.8 Points saillants à l'échelle de la zone d'intérêt 55
4.2 Résultats de l'enquête concernant l'approvisionnement en eau potable 55
4.2.1 Caractéristiques principales de la gestion de l'eau potable dans les communes enquêtées 55
4.2.2 Quelles représentations du cycle de l'eau localement ? 57
4.2.3 L'expérience des crises et le sens que leur donnent les maires 58
4.2.4 Des solutions techniques de gestion de l'offre « classiques » 63
4.2.5 De l'enseignement des crises ? 67
4.3 Résultats de l'enquête concernant l'enneigement 69
4.4 Conclusion 71
5 Quels sont les instruments de l'action publique aujourd'hui mobilisés pour adapter la gestion de l'eau au changement climatique ? 73
5.1 Les études, entre production de savoirs et instrument de concertation 73
5.1.1 Une production de savoirs en appui à la planification 74
5.1.2 Quelle mobilisation des acteurs locaux et avec quels effets ? 77
5.1.3 Le contenu des débats dans et autour des études 80
5.2 Articuler infrastructures matérielles et échelles de gestion 86
5.2.1 Instruments contractuels 86
5.2.2 L'opportunité des réformes territoriales des services d'eau ? 89
5.3 Conclusion 92
Conclusion générale 94
Annexes 97
Annexe 1 : Météorologie/climatologie, hydrologie/hydraulique et modélisation 98
Annexe 2 : Éléments de cadrage (GIEC, modèles de circulation générale et descente d'échelle) . 108
Annexe 3 : Exemples de projets d'évaluation des effets du changement climatique sur l'hydrologie 111
Annexe 4 : Synthèse des savoirs issus de la géographie physique sur la circulation de l'eau dans le massif des Vosges 120
Annexe 5 : Présentation des études analysées en section 5 126
Table des figures 131

Sommaire détaillé 133

Bibliographie..... 136

Bibliographie

Agence de l'Eau Rhin-Meuse, Acteon, Lamblin, V., 2017. Etude prospective nécessaire à la réalisation d'une analyse de vulnérabilité au changement climatique des activités socio-économiques du bassin Rhin-Meuse. Synthèse.

Agence de l'Eau Rhin-Meuse, Ecodecision, Eco Logique Conseil, 2018. Etude de vulnérabilité au changement climatique des activités socio-économiques du bassin Rhin-Meuse. Plaquette de synthèse.

Ambroise, B., Auzet, A.-V., Humbert, J., Najjar, G., Mercier, J., Paul, P., Viville, D., 1995. Le cycle de l'eau en moyenne montagne tempérée : apport des bassins versants de recherche vosgiens (Ringelbach, Strengbach, Fecht). Annales de géographie 104, 64–87. https://doi.org/10.3406/geo.1995.13868

Angeli, N., 2006. Evolution de la composition chimique des ruisseaux vosgiens : Analyse rétrospective et effet d'un amendement calco-magnésien. Nancy 1.

Arribas, A., Robertson, K.B., Mylne, K.R., 2005. Test of a Poor Man's Ensemble Prediction System for Short-Range Probability Forecasting. Mon. Wea. Rev. 133, 1825–1839. https://doi.org/10.1175/MWR2911.1

Aykut, S., 2015. Comment se construit la confiance dans les sciences et les politiques du climat ? Retour sur un colloque international. Natures Sciences Sociétés Supplément, 102–110.

Aykut, S., Dahan, A., 2014. La Gouvernance du Changement Climatique : Anatomie d'un schisme de réalité, in: Gouverner Le Progrès et Ses Dégâts. Éditions La Découverte, pp. 97–132.

Aykut, S., Dahan, A., 2011. Dossier « Adaptation aux changements climatiques » - Le régime climatique avant et après Copenhague : sciences, politiques et l'objectif des deux degrés. Nat. Sci. Soc. 19, 144–157. https://doi.org/10.1051/nss/2011144

Aykut, S., Evrard, A., 2017. Une transition pour que rien ne change ? Changement institutionnel et dépendance au sentier dans les « transitions énergétiques » en Allemagne et en France. Revue internationale de politique comparée Vol. 24, 17–49.

Barbier, R., Daniel, F.-J., Fernandez, S., Raulet-Croset, N., Leroy, M., Guérin-Schneider, L., à paraître. L'environnement en mal de gestion, Les apports d'une perspective situationnelle, Environnement et société. Presses Universitaires du Septentrion.

Beck, U., 2001. La société du risque: Sur la voie d'une autre modernité. Paris.

Bellier, M., Taisne, R., 2016. La loi NOTRe : enjeux en termes de patrimoine pour les services publics d'eau et d'assainissement. Sciences Eaux Territoires Numéro 20, 46–49.

Biron, P., 1994. Le cycle de l'eau en forêt de moyenne montagne : flux de sêve et bilans hydriques stationnels : bassin versant du Strengbach à Aubure, Hautes Vosges. Université Louis Pasteur (Strasbourg).

Boé, J., Terray, L., Habets, F., Martin, E., 2007. Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. International Journal of Climatology 27, 1643–1655. https://doi.org/10.1002/joc.1602

Boyd, E., Grist, N., Juhola, S., Nelson, V., 2009. Exploring Development Futures in a Changing Climate: Frontiers for Development Policy and Practice. Development Policy Review 27, 659–674. https://doi.org/10.1111/j.1467-7679.2009.00464.x

Brenot, A., 2006. Origine de l'eau et des éléments dissous par traçage isotopique (H, O, S, Mg, Sr) sur le bassin amont de la Moselle (Thèse de doctorat). Vandoeuvre-les-Nancy, INPL.

BRGM, 2017. Ressources en eau souterraine dans les Vosges cristallines et vulnérabilité au changement climatique. Proposition technique.

Brooks, N., Grist, N., Brown, K., 2009. Development Futures in the Context of Climate Change: Challenging the Present and Learning from the Past. Development Policy Review 27, 741–765. https://doi.org/10.1111/j.1467-7679.2009.00468.x

CERC Grand-Est, 2018. Les performances des réseaux d'étude potable sur le bassin Rhin-Meuse. Synthèse. Février.

Cicéri, M.-F., Rimbert, B.M. et S., 2012. Introduction à l'analyse de l'espace. Armand Colin. https://doi.org/10.3917/arco.cicer.2012.01

Corbonnois, J., Humbert, J., 2000. Ressources et gestion de l'eau dans le Nord-Est de la France, in: L'eau Dans Les Régions Françaises, d'un Extrême à l'autre. SEDES, pp. 219–249.

Coron, L., Andréassian, V., Perrin, C., Bourqui, M., Hendrickx, F., 2014. On the lack of robustness of hydrologic models regarding water balance simulation: a diagnostic approach applied to

three models of increasing complexity on 20 mountainous catchments. Hydrology and Earth System Sciences 18, 727–746. https://doi.org/10.5194/hess-18-727-2014
Dahan, A., Guillemot, H., 2006. Changement climatique : Dynamiques scientifiques, expertise, enjeux géopolitiques. Sociologie du travail 48, 412–432. https://doi.org/10.4000/sdt.24798
DDT des Vosges, 2017a. Rapport d'étape Temps 1, Diagnostic partagé, Atelier des territoires 2016-2017 «Vivre et travailler autrement en montagne à l'heure du changement climatique».
DDT des Vosges, 2017b. Rapport d'étape Temps 3, Stratégie et feuille de route pour un projet de territoire de lutte et d'adaptation au changement climatique.
Diaz, I., 2018. Une vision prospective au bénéfice d'une plus grande cohésion territoriale, in: Diaz, I. (Ed.), Massifs En Transition : Vosges, Jura, Alpes Du Nord, Territoires En Projets. Parenthèses, Marseille, pp. 9–12.
Ebert, E.E., 2001. Ability of a Poor Man's Ensemble to Predict the Probability and Distribution of Precipitation. Mon. Wea. Rev. 129, 2461–2480. https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<2461:AOAPMS>2.0.CO;2
Edwards, P., 1999. Global Climate Science, Uncertainty And Politics: Data-Laden Models, Model-Filtered Data. Science as Culture 8, 437–472.
Faessel-Virole, C., 2018. La démarche atelier des territoires en montagne, quels enseignements ?, in: Diaz, I. (Ed.), Massifs En Transition : Vosges, Jura, Alpes Du Nord, Territoires En Projets. Parenthèses, Marseille, pp. 129–142.
Folléa, B., 2018a. Changement climatique, changement culturel, in: Massifs En Transition : Vosges, Jura, Alpes Du Nord, Territoires En Projets. Parenthèses, Marseille, pp. 17–27.
Folléa, B., 2018b. Dans les Hautes-Vosges, une dynamique intercommunale enclenchée, in: Diaz, I. (Ed.), Massifs En Transition : Vosges, Jura, Alpes Du Nord, Territoires En Projets. Parenthèses, Marseille, pp. 120–121.
Fossey, M., 2016. Contribution à un cadre de modélisation hydrologique des milieux humides des Basses-terres du Saint-Laurent : fonctionnement, dynamique et impacts en contexte de changement climatique. (Thèse de doctorat). Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Québec.
Frécaut, R., 1972. La Moselle et son bassin. Contribution à l'hydrologie et à la dynamique fluviale en milieu tempéré océanique. (Thèse de doctorat d'Etat). de Bretagne Occidentale, Brest.
George, E., Achin, C., 2018. Les conditions de réussite de la transition touristique en moyenne montagne, in: Diaz, I. (Ed.), Massifs En Transition : Vosges, Jura, Alpes Du Nord, Territoires En Projets. Parenthèses, Marseille, pp. 75–83.
Giacona, F., Eckert, N., Lafaysse, M., 2019. L'enneigement du massif vosgien à l'épreuve du réchauffement. DNA, Les saisons d'Alsace 48–53.
Goklany, I., 2007. Integrated strategies to reduce vulnerability and advance adaptation, mitigation, and sustainable development. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 12, 755–786.
Greuez, A., 2018. Compte-rendu de l'atelier sur l'enneigement du massif des Vosges • Clim Ability (29/03/2018). Actualités de Clim'Ability. URL http://www.clim-ability.eu/actualites/compte-rendu-de-latelier-sur-lenneigement-du-massif-des-vosges (accessed 2.4.20).
Guillemot, H., 2009. Comment évaluer un modèle numérique de climat ? Revue d'anthropologie des connaissances Vol. 3, n° 2, 273–293.
Guillemot, H., 2007. 4. Les modèles numériques de climat. La Découverte.
Huq, S., Reid, H., Konate, M., Rahman, A., Sokona, Y., Crick, F., 2004. Mainstreaming adaptation to climate change in Least Developed Countries (LDCs). Climate Policy 4, 25–43. https://doi.org/10.1080/14693062.2004.9685508
Klein, R., Smith, J., 2003. Enhancing the capacity of developing countries to adapt to climate change: A policy relevant research agenda, in: Smith, J., Klein, R., Huq, S. (Eds.), Climate Change, Adaptive Capacity and Development. Imperial College Press, London, pp. 317–334. https://doi.org/10.1142/9781860945816_0014
Klein, R.J.T., Schipper, E.L.F., Dessai, S., 2005. Integrating mitigation and adaptation into climate and development policy: three research questions. Environmental Science & Policy, Mitigation and Adaptation Strategies for Climate Change 8, 579–588. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2005.06.010
Labbouz, B., Salles, D., Valette, P., 2017. Les territoires garonnais face aux changements globaux : quatre adaptations possibles en 2050. Sud-Ouest européen. Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest 71–82. https://doi.org/10.4000/soe.3342

Lang, C., 2007. Étiages et tarissements : vers quelles modélisations ? L'approche conceptuelle et l'analyse statistique en réponse à la diversité spatiale des écoulements en étiage des cours d'eau de l'Est français. (Thèse de doctorat). Université Paul Verlaine, Metz.
Lebecherel, L., Andréassian, V., Augeard, B., Sauquet, E., Catalogne, C., 2015. Connaître les débits des rivières : quelles méthodes d'extrapolation lorsqu'il n'existe pas de station de mesures permanentes ?, Comprendre pour agir. Onema, Irstea.
Lemos, M.C., Boyd, E., Tompkins, E., Osbahr, H., Liverman, D., 2007. Developing Adaptation and Adapting Development. Ecology and Society 12. https://doi.org/10.5751/ES-02133-120226
Les Echos, 2019. Les stations de montagne veulent préserver les massifs du changement climatique. Les Echos.
Lévy, M., Amat, A., Martin, B., 2019. Quels défis pour le tourisme de moyenne montagne face au changement climatique dans le Massif des Vosges et en Forêt Noire ?
Ludwig, K., Bremicker, M. (Eds.), 2006. The Water Balance Model LARSIM - Design, Content and Applications. Freiburger Schriften zur Hydrologie.
Marçais, J., 2018. Variabilités des temps de résidence de l'eau et du débit dans les rivières et les nappes phréatiques: implications sur la qualité de l'eau : inférence, modélisation et prédiction des temps de transit de l'eau dans les bassins versants (Thèse de doctorat). Université de Rennes 1, France.
Marquet, V., 2014. Les voies émergentes de l'adaptation au changement climatique dans la gestion de l'eau en France et au Québec : Mise en visibilité et espaces de définition (Thèse de doctorat). Université de Bordeaux.
Marquet, V., Salles, D., 2014. L'adaptation au changement climatique en France et au Québec. Constructions institutionnelles convergentes et diffusions contrastées. Critique internationale N° 62, 73–91.
McGray, H., Hammill, A., Bradley, R., 2007. Weathering the Storm: Options for Framing Adaptation and Development. World Ressource Institute, Washington DC.
Milano, M., 2012. Changements globaux en Méditerranée : impacts sur le stress hydrique et la capacité à satisfaire les demandes en eau. Montpellier (FRA), UM2.
Milano, M., Ruelland, D., Fernandez, S., Dezetter, A., Fabre, J., Servat, E., Fritsch, J.-M., Ardoin-Bardin, S., Thivet, G., 2013. Current state of Mediterranean water resources and future trends under climatic and anthropogenic changes. Hydrological Sciences Journal 58, 498–518. https://doi.org/10.1080/02626667.2013.774458
Ministère du Logement et de l'Habitat Durable, 2017. l'Atelier des territoires. Vivre et travailler en montagne à l'heure du changement climatique, Les sites en projet 2016-2017.
MISEN 88, 2019. Préservation de la ressource en eau en période d'étiage, Guide à destination des collectivités, Présent pour l'avenir. Préfet des Vosges.
Narcy, J.-B., 2003. La politique de l'eau face à la gestion des espaces: les Agences de l'Eau aux limites de la modernité. Espaces et sociétes no 115, 179–196.
Narcy, J.-B., Mermet, L., 2003. Nouvelles justifications pour une gestion spatiale de l'eau. Natures Sciences Sociétés 11, 135–145. https://doi.org/10.1016/S1240-1307(03)00043-8
Oreskes, N., Conway, E.M., Treiner, J., 2012. Les marchands de doute: ou comment une poignée de scientifiques ont masqué la vérité sur des enjeux de société tels que le tabagisme et le réchauffement climatique. Éd. le Pommier, Paris.
Oxalis, 2019a. Etude d'approvisionnement en eau des fermes-auberges. Etat des lieux.
Oxalis, 2019b. Etude d'approvisionnement en eau des fermes-auberges. Plan d'action.
Paul, P., 1998. Les données climatiques, in: Sell, Y., Berchtold, J.-P., Callot, H., Hoff, M., Gall, J.-C., Walter, M. (Eds.), L'Alsace et Les Vosges : Géologie, Milieux Naturels, Flore et Faune, La Bibliothèque Du Naturaliste. Delachaux et Niestle, p. 352.
Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of Hydrology 279, 275–289. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7
Perrin, C., Oudin, L., Andreassian, V., Rojas-Serna, C., Michel, C., Mathevet, T., 2007. Impact of limited streamflow data on the efficiency and the parameters of rainfall—runoff models. Hydrological Sciences Journal 52, 131–151. https://doi.org/10.1623/hysj.52.1.131
Persson, A., Klein, R.J.T., 2009. Mainstreaming adaptation to climate change into official development assistance: challenges to foreign policy integration, in: Harris, P. (Ed.), Climate Change and Foreign Policy: Case Studies from East to West. Routledge, London, pp. 162–177.

Pierret, M.C., Cotel, S., Ackerer, P., Beaulieu, E., Benarioumlil, S., Boucher, M., Boutin, R., Chabaux, F., Delay, F., Fourtet, C., Friedmann, P., Fritz, B., Gangloff, S., Girard, J.F., Legchenko, A., Viville, D., Weill, S., Probst, A., 2018. The Strengbach catchment : a multidisciplinary environmental sentry for 30 years. Vadose Zone Journal 17. https://doi.org/10.2136/vzj2018.04.0090

Quintana Seguí, P., Ribes, A., Martin, E., Habets, F., Boé, J., 2010. Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins. Journal of Hydrology, Water Quality and Assessment under Scarcity. Prospects and challenges in Mediterranean watersheds 383, 111–124. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.09.050

Reghezza, M., 2015. De l'avènement du Monde à celui de la planète : le basculement de la société du risque à la société de l'incertitude. Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, volume inédit (Thèse de doctorat). Université Paris 1- Panthéon Sorbonne.

Rey, P., 2019. Montagne / Alexandre Maulin : « nous devons coconstruire un futur décarboné ».

Reynaud, L., 2010. Croissance sans conscience n'est que ruine de l'âme, Contribution aux réflexions sur le développement durable en stations de montagne, in: François, H., Bensahel-Perrin, L., Marcelpoil, E. (Eds.), Les Stations de Sports d'hiver Face Au Développement Durable : État Des Lieux et Perspectives. L'Harmattan.

Richards, L.A., 1931. Capillary Conduction of Liquids Through Porous Mediums. Physics 1, 318–333. https://doi.org/10.1063/1.1745010

Singh, R., Wagener, T., Werkhoven, K. van, Mann, M.E., Crane, R., 2011. A trading-space-for-time approach to probabilistic continuous streamflow predictions in a changing climate – accounting for changing watershed behavior. Hydrology and Earth System Sciences 15, 3591–3603. https://doi.org/10.5194/hess-15-3591-2011

Terrier, M., Perrin, C., Thirel, G., 2018. CHIMERE21. Vers une estimation des débits naturels sur le bassin versant de la Meuse. Rapport intermédiaire de projet.

Thirel, G., 2018. Rapport final du projet MOSARH21. Évolutions des débits futurs sur le bassin du Rhin en contexte de changement climatique. Une évaluation actualisée avec les simulations climatiques du 5e rapport du GIEC.

Thirel, G., 2009. Amélioration des prévisions d'ensemble des débits sur la France de SAFRAN-ISBA-MODCOU (Thèse de doctorat). Université Paul Sabatier - Toulouse III.

Thirel, G., Perrin, C., Drogue, G., Gerlinger, K., Krumm, J., Wagner, J.-P., 2015. Evolution future des débits des cours d'eau dans le bassin du Rhin en contexte de changement climatique - Une évaluation actualisée avec les simulations climatiques issues du 5ème rapport du GIEC, in: Les Tensions Sur l'eau En Europe et Dans Le Bassin Méditerranéen : Des Crises de l'eau d'ici 2050 ? Marne-la-Vallée, France, p. 9.

Treyer, S., 2006. A quelle raréfaction de l'eau faut-il se préparer ? Construire une intervention prospective au service de la planification pour les ressources en eau en Tunisie (Thèse de doctorat). ENGREF (AgroParisTech).

Vivian, H., 1992. Les écoulements fluviaux. Mappemonde 2, 36–37.

Viville, D., Biron, P., Granier, A., Dambrine, E., Probst, A., 1993. Interception in a mountainous declining spruce stand in the Strengbach catchment (Vosges, France). Journal of Hydrology 144, 273–282. https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90175-9

Viville, D., Ladouche, B., Bariac, T., 2006. Isotope hydrological study of mean transit time in the granitic Strengbach catchment (Vosges massif, France): application of the FlowPC model with modified input function. Hydrological Processes 20, 1737–1751. https://doi.org/10.1002/hyp.5950

Wahl, L., Planchon, O., David, P.-M., 2007. Névés, corniches et risque d'avalanche dans les Hautes-Vosges. En hommage à Laurent Wahl, décédé le 18 décembre 2008. Revue Géographique de l'Est 47.

Wilcke, N., 2020. Une station de ski a-t-elle réellement transporté de la neige par camion ? [WWW Document]. 20minutes. URL https://www.20minutes.fr/planete/2711847-20200205-vosges-association-indigne-transport-neige-camion-station-ski (accessed 2.7.20).

Woehl, A., 2018. Réchauffement : y a-t-il le feu ? L'Alsace.