HAL open science

Eau, agriculture, changement climatique : apports d'une modélisation intégrée agro-hydrologique pour l'adaptation

Myriam Soutif-Bellenger

▶ To cite this version:

Myriam Soutif-Bellenger. Eau, agriculture, changement climatique : apports d'une modélisation intégrée agro-hydrologique pour l'adaptation. Hydrologie. Sorbonne Université, 2023. Français. NNT : 2023SORUS469 . tel-04485778

HAL Id: tel-04485778

https://theses.hal.science/tel-04485778v1

Submitted on 1 Mar 2024

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.

Sorbonne Université

Ecole doctorale Géosciences, Ressources naturelles et Environnement

INRAE, UR HYCAR / Equipe Hydrologie des bassins versants

Eau, agriculture, changement climatique

Apports de la modélisation intégrée agro-hydrologique pour l'adaptation

Par Myriam Soutif-Bellenger

Thèse de doctorat en Hydrologie

Dirigée par Vazken Andréassian

Encadrée par Guillaume Thirel

Présentée et soutenue publiquement le 11 décembre 2023

Devant un jury composé de :

Olivier BARRETEAU	IGPEF, INRAE	Rapporteur
Valérie DEMAREZ	Professeure, Université Toulouse III	Rapportrice
Gilles BILLEN	Directeur de recherche émérite, CNRS	Examinateur
Flavie CERNESSON	Professeure, AgroParisTech	Examinatrice
Simon MUNIER	Chargé de recherche, Météo-France	Examinateur
Agnès DUCHARNE	Directrice de recherche, CNRS	Présidente du jury
Vazken ANDRÉASSIAN	ICPEF, INRAE	Directeur de thèse
Guillaume THIREL	Chargé de recherche, INRAE	Encadrant

Except where otherwise noted, this work is licensed under
http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/

Remerciements

Après trois années d'endurance qui m'ont menée jusqu'à l'ultime étape de la soutenance de thèse, le moment est venu d'exprimer ma gratitude.

Je tiens tout d'abord à remercier l'unité de recherche HYCAR au sein de laquelle j'ai pu m'essayer au travail de chercheuse. Je remercie tout particulièrement l'équipe HYDRO qui m'a accueillie au quotidien. Plus qu'un lieu de travail, c'est une communauté au sein de laquelle j'ai partagé des rires et appris mille choses sur l'hydrologie, et bien plus encore ! Je remercie ainsi les générations renouvelées de doctorants, stagiaires, post-docs, ainsi que les permanents. À tous, je souhaite de faire de belles découvertes et de progresser davantage que moi au frisbee ! Je remercie bien-sûr Vazken, mon directeur de thèse, pour ses conseils avisés et ses plaisanteries inépuisables. Espérons qu'il continuera à percer les mystères de la mémoire des bassins versants, des précipitations solides, de l'évapotranspiration. J'espère aussi que son humour ne s'essoufflera pas ! Je remercie évidemment Guillaume, mon encadrant, pour m'avoir écoutée et accompagnée avec régularité au cours de ces trois années. Je lui souhaite de trouver l'équilibre entre la douceur de la vie dans Sud et la passion pour les modèles conceptuels dont l'épicentre est à Antony. Qu'il conserve sa motivation et son esprit ouvert pour œuvrer sur l'adaptation au changement climatique, un sujet ambitieux mais vital. Je remercie Thaïs qui a accepté que je supervise son stage de M1 et qui a égayé l'équipe de sa personnalité lumineuse et sa soif d'apprendre ! Merci enfin à toi, Lila, d'avoir initié cette aventure en construisant le projet de thèse et en supervisant mon stage au sein de l'équipe.

Au-delà des membres de l'équipe HYDRO, mon quotidien sur le site d'INRAE a été rythmé par les personnels administratifs du site d'Antony. À eux aussi, j'adresse mes remerciements pour leur aide précieuse et leur bonne humeur.

Ma thèse s'est achevée au sein d'une nouvelle équipe : le Bureau de la Recherche et de l'Innovation au sein du Ministère chargé de l'Agriculture. Je les remercie d'avoir bien voulu d'une hydrologue non encore docteure au moment de son arrivée, pour leur accueil et leur soutien lors de la dernière ligne droite.

Cette thèse est une thèse un peu particulière puisqu'il s'agit d'une Formation Complémentaire par la Recherche, qu'on m'a gracieusement autorisée à réaliser alors que je suis fonctionnaire. Il me faut donc remercier le Ministère chargé de l'Agriculture qui a soutenu mon projet de thèse, en particulier la DGPE et le CEP. Je remercie de plus AgroParisTech, pour m'avoir hébergée administrativement, et plus particulièrement Alexandre Péry et Pierre Larraufie qui ont été mes référents à AgroParisTech. Je remercie l'école doctorale qui a validé le projet académique de la thèse.

Vous le voyez, de nombreuses personnes ont permis la réalisation de cette thèse. Mais ce n'est pas fini ! Je remercie en outre nos divers partenaires qui ont participé et soutenu mes travaux de thèse. Merci aux membres du Laboratoire d'Agronomie et d'Environnement d'INRAE Colmar pour leurs conseils en modélisation agronomique et leur travail sur MAELIA. Je remercie à son tour Sara Fernandez, géographe qui m'a épaulée pour les entretiens. Je remercie, de plus, l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse qui a soutenu financièrement le projet et qui nous a orientés vers des interlocuteurs précieux dans le bassin versant de la Seille. Je remercie d'ailleurs les personnes interrogées lors des entretiens, et en particulier le gestionnaire de l'étang de Lindre qui m'a accueillie sur ce site magnifique. Je remercie le métaprogramme CLIMAE d'INRAE qui a apporté un soutien financier essentiel à mes travaux.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du comité de thèse et du jury de thèse pour leur immersion dans mes travaux, leurs questions pertinentes et leurs conseils judicieux.

Il me semble avoir fait le tour des personnes qui ont été impliquées par leurs fonctions professionnelles dans mes travaux de thèse. Il est temps maintenant de passer de l'autre côté du miroir et de remercier mes proches qui m'ont soutenue pendant ces trois années.

Je commence par mes parents. Merci à ma maman et à son mari, David, d'avoir pris soin de moi lors de mes visites trop espacées. Merci à mon papa d'avoir suivi mes avancements malgré sa maladie. Mes remerciements s'étendent de même à mes beaux-parents, les parents de Camille, mon compagnon, pour leur amitié au fil des années.

Un immense merci à mes amis, parmi lesquels de nombreux doctorants ! Nous nous sommes bien serré les coudes entre thésards et jeunes diplômés découvrant la vie professionnelle. Mes excuses vont à mes amis à l'étranger que je n'ai pas pu visiter. Pour ceux au Canada, en Guyane, en Nouvelle Calédonie ou encore à Wallis et Futuna, mon bilan carbone ne l'excuserait pas ! Pour ceux qui sont partis moins loin, je n'ai d'autre excuse que le temps qui a filé à une vitesse folle. Parmi mes amis, je tiens à remercier tout particulièrement mes colocataires Yohann et Arthur, grâce à qui le quotidien s'est trouvé simplifié et agrémenté de moments joyeux ! Un grand merci à nos "semi-colocataires" Victor et Fanny, qui ont fréquemment investi notre demeure à Gréez-sur-Roc malgré l'absence de chauffage, les souris et les serpents, pour nous aider à planter des arbres et tant d'autres choses.

Je remercie également le merveilleux être que nous avons accueilli en novembre 2021 et qui ne me fait absolument pas perdre mon sens commun, Spartacus, le chat le plus beau et mignon du monde.

Enfin, un immense merci à mon compagnon, Camille, qui me supporte depuis huit ans. Merci à toi. Ensemble, nous avons accompli et expérimenté tant de choses au cours de ces trois années de thèse : une maison, de la cuisine, des travaux, des Secrets d'Histoire, des arbres plantés, des restaurants, un chat (incroyable), des voyages en train à travers l'Europe, des pièces de théâtre... En somme, trois années riches en expériences bien au-delà du cadre académique !

Merci encore à toutes ces personnes, sans qui mes travaux de thèse auraient été plus difficiles, voire impossibles. La thèse est un labeur qui propulse la science, permettant à notre espèce de mieux se comprendre et de décrypter son environnement. C'est également une aventure personnelle qui m'a permis d'en apprendre beaucoup sur un sujet, mais surtout sur moi-même. À qui dois-je donc exprimer ma reconnaissance pour cette étrange sensation d'accomplissement cognitif ? Peut-être simplement aux 3,8 milliards d'années d'évolution qui ont façonné la complexité des sociétés humaines et de notre cerveau.

Résumé

L'agriculture consomme de l'eau pour répondre aux besoins biologiques des cultures. Quand l'eau apportée au sol par les précipitations n'est pas suffisante, de l'eau supplémentaire peut être prélevée dans les masses d'eau et apportée aux cultures : c'est ce qu'on appelle l'irrigation. Avec l'intensification du risque de sécheresse, l'agriculture et les territoires agricoles sont particulièrement impactés par le changement climatique. On observe ainsi une aggravation des déséquilibres entre ressource en eau et demande en eau pour de nombreux territoires déjà en tension, et l'apparition de nouvelles tensions sur des territoires qui n'en souffraient pas jusqu'alors. Il est donc nécessaire de construire et évaluer des stratégies d'adaptation de l'agriculture au changement climatique au regard de la ressource en eau.

Pour cela, nous devons prendre en compte l'évolution de la demande en eau d'irrigation dans les projections hydrologiques futures. Face à la multiplicité des enjeux liés à l'adaptation au changement climatique et à l'agriculture, il faut utiliser des approches intégrées, c'est-à-dire prenant en compte les interactions entre compartiments physiques et anthropiques influencés par cette adaptation, et prenant en compte les incertitudes. Enfin, il est nécessaire de construire des stratégies concrètes, qui doivent donc être définies à une échelle suffisamment locale, pour être mises en œuvre à l'échelle des bassins versants.

Il existe déjà des modélisations explicites des agro-hydrosystèmes. Celles-ci sont cependant souvent complexes, car nécessitant une grande quantité de données et simulant de nombreux processus. A l'opposé, il existe de nombreux modèles hydrologiques, notamment les modèles conceptuels, qui sont parcimonieux, performants et opérationnels. Ceux-ci ne permettent cependant pas, en règle générale, de prendre en compte explicitement les usages, et donc de tester différents scénarios de gestion, ni de prendre en compte la non-stationnarité de l'agriculture en contexte de changement global. La thèse a donc porté sur le développement d'un cadre de modélisation de complexité intermédiaire permettant la construction et l'évaluation de scénarios d'adaptation de l'agriculture au changement climatique. Ces objectifs ont été abordés en deux temps.

Tout d'abord, nous avons développé une modélisation intégrant i) une modélisation hydrologique conceptuelle, via le modèle GR5J journalier semi-distribué, ii) la modélisation de la demande en eau d'irrigation, via le modèle agronomique CropWat journalier, et iii) la modélisation d'ouvrages de stockage et de leur gestion, tels que des retenues et des barrages. Cette modélisation a été mise en place dans un premier temps sur le bassin versant de l'Aveyron aval. Les simulations de l'irrigation obtenues ont été comparées aux simulations de la plateforme MAELIA, modèle intégré agro-hydrologique explicite ayant fait l'objet de nombreux développements et d'enquêtes sur ce terrain. Le modèle a également été implémenté sur le bassin versant de la Seille, affluent de la Moselle, sur lequel il n'y a pas actuellement d'irrigation mais qui connaît aujourd'hui de premières difficultés liées aux sécheresses, générant des questionnements sur l'adaptation au changement climatique.

Ensuite, un exercice prospectif interrogeant différents scénarios d'évolution locale de l'agriculture et de la gestion de l'eau a été déployé sur le bassin versant de la Seille, affluent de la Moselle. Des entretiens avec des acteurs locaux de l'eau et de l'agriculture ont ainsi permis de produire trois scénarios d'évolution plausibles sur le bassin versant de la Seille à échéance 2050. Des hypothèses contrastées d'évolution des assolements, des surfaces irriguées, et de la ressource en eau à mobiliser, ont ainsi été définies pour chacun de ces scénarios et implémentées dans la modélisation.

Les travaux conduits dans cette thèse ont permis de confirmer la possibilité, l'intérêt et même la nécessité d'intégrer les prélèvements en eau d'irrigation dans la modélisation hydrologique conceptuelle. De plus, nous

avons pu évaluer des scénarios agricoles locaux en contexte de changement climatique, obtenus grâce à la prospective, en les implémentant dans la modélisation intégrée. Ainsi, les travaux ont mis en évidence les impacts des influences humaines dans l'hydrologie des bassins versants, et la sensibilité de la modélisation à différents scénarios agricoles et de gestion de l'eau. Notre recherche a également mis en évidence la nécessité de recourir à différents indicateurs, hydrologiques mais aussi relatifs à la satisfaction de la demande en eau, pour évaluer les impacts du changement climatique au regard de différents scénarios. Néanmoins, cette étude a révélé, sur le secteur d'étude prenant en compte les scénarios futurs (la Seille), la prédominance de l'incertitude liée aux projections climatiques sur les étiages futurs, devant l'incertitude liée à l'évolution de la demande en eau d'irrigation. Certaines projections conduisent ainsi à des difficultés importantes pour les cultures de printemps non irriguées, en particulier le maïs. Enfin, nous avons produit un cadre de modélisation parcimonieux généralisable et facilement réutilisable, qui pourrait être mobilisé sur d'autres territoires.

Abstract

Agriculture requires water to meet the biological needs of crops. When the water supplied to the soil by precipitation is not sufficient, additional water can be taken out from bodies of water and supplied to crops : this is irrigation. With the intensification of the risk of drought, agricultural territories are particularly affected by climate change. There is thus an intensification of the imbalances between water resources and water demand for many territories already under tension, and the appearance of new tensions in territories that have not suffered from them until now. It is therefore necessary today to develop and evaluate adaptation strategies to climate change for agriculture regarding water amounts.

To do this, we must take into account the evolution of irrigation water demand in future hydrological projections. Given the multiplicity of challenges related to climate change adaptation and agriculture, it is also important to implement integrated approaches, i.e. taking into account the interactions between physical and anthropogenic compartments influenced by this adaptation, and taking into account uncertainties. Furthermore, it is necessary to formulate concrete strategies, which must be defined at a sufficiently local scale, to be implemented at watershed level.

Explicit modeling of agro-hydrosystems already exists. However, these models are often complex, and require a large amount of data and simulate numerous processes. In contrast, there are conceptual hydrological models that are parsimonious, efficient, and operational but usually do not explicitly account for uses, making it impossible to assess the relevance of different management scenarios or to consider the non-stationarity of agriculture in the context of global change. The objective of this thesis has therefore focused on developing a framework of intermediate complexity for building and evaluating adaptation strategies for agriculture in the context of climate change. These objectives were approached within two phases.

Firstly, a model was developed, integrating i) the modeling of hydrology using the conceptual hydrological semi-distributed daily GR5J model, ii) the modeling of irrigation water withdrawals using the daily agronomic model CropWat, and iii) modeling of storage structures and their management, such as reservoirs and dams. This modeling was first implemented on the downstream Aveyron watershed. The irrigation simulations obtained were compared with simulations from the MAELIA platform, an explicit agro-hydrological integrated model that has been the subject of numerous developments and surveys in this area. The model was also implemented in the Seille catchment, a tributary of the Moselle, on which there is no irrigation but which is currently experiencing new difficulties related to droughts, generating questions about adaptation to climate change.

In a second phase, the developed model was applied in a prospective exercise that examined different scenarios for local agricultural and water management evolution in the Seille watershed, a tributary of the Moselle River. Interviews with local water and agriculture stakeholders were carried out to produce three plausible evolution scenarios for the Seille watershed by 2050. Contrasting assumptions about land use changes, irrigated areas, and water resources to be mobilized were defined for each scenario and implemented in the model.

The work carried out in this thesis confirmed the possibility, interest, and even necessity of integrating irrigation water withdrawals into conceptual hydrological modeling to evaluate local agricultural scenarios in the context of climate change. Moreover, we were able to evaluate local agricultural scenarios in the context of climate change, built thanks to foresight, by implementing them in integrated modeling. Thus, our work highlighted the impacts of human influences on watershed hydrology, and the sensitivity of the model to different agricultural and water management scenarios. Our research also emphasized the need to use various indica-

tors, both hydrological and related to water demand satisfaction, to evaluate the impacts of climate change for different scenarios. Nevertheless, this study revealed that in the studied area (the Seille catchment), considering future scenarios, the predominance of uncertainty related to climate projections on future low-flow periods outweighed the uncertainty linked to changes in irrigation water demand. Some projections thus lead to significant difficulties for non-irrigated spring crops, in particular maize. Finally, a parsimonious and easily reusable modeling framework was developed, which can be applied in other regions.

Table des matières

Remerciements iii

Résumé v

Abstract vii

Table des matières xiii

Table des Figures xvii

Liste des Tableaux xviii

Introduction 1

I Eau, agriculture, changement climatique 3
1 Contexte . . . 3
1.1 Mise à l'agenda de l'adaptation au changement climatique . . . 3
1.2 L'eau et l'agriculture en première ligne des objectifs d'adaptation . . . 4
1.3 Nécessité d'un appui scientifique . . . 5
2 Bilan en eau des agro-hydrosystèmes . . . 8
2.1 Qu'est-ce que la ressource en eau ? . . . 8
2.2 Qu'est-ce que la demande en eau agricole ? . . . 12
2.3 Quelles influences humaines ? . . . 19
2.4 Quels impacts du changement global ? . . . 23
2.5 Conclusion sur les agro-hydrosystèmes . . . 25

II État de l'art sur les approches intégrées pour l'adaptation 27
1 Qu'attend-on des approches intégrées ? . . . 27
1.1 De l'utilité des approches intégrées . . . 27
1.2 Les méthodes à mobiliser dans une approche intégrée . . . 28
1.3 Une large diversité de modélisations intégrées . . . 29
1.4 Méthodologie de revue de littérature des approches intégrées . . . 30
2 Prospective et méthode des scénarios . . . 32
2.1 Pourquoi s'appuyer sur des scénarios ? . . . 32
2.2 Quelle méthode de construction de scénarios locaux ? . . . 33
2.3 Quels scénarios climatiques ? . . . 34
3 Les différents maillons à intégrer dans la modélisation . . . 35
3.1 Modélisation climatique . . . 35
3.2 Modélisation hydrologique . . . 37
3.3 Modélisation agronomique . . . 39
3.4 Stockage de la ressource en eau . . . 45
4 Couplage entre maillons de la chaîne de modélisation . . . 47
4.1 Implications de la prise en compte des influences humaines . . . 47
4.2 Spatialisation du couplage . . . 48

4.3 Nature des compartiments hydrologiques mobilisés 48
4.4 Limitation des prélèvements 49
5 Les incertitudes dans les approches intégrées 49
6 Objectifs de la thèse et organisation du manuscrit 50

Connaître les territoires pour anticiper leur avenir **55**

III Zones d'études et données **57**
1 Sources des données 58
1.1 Agriculture 58
1.2 Hydroclimatologie passée 58
1.3 Projections climatiques 59
1.4 Plans d'eau 60
1.5 Données de prélèvements 61
2 Le bassin versant de l'Aveyron : zone de développement de la modélisation 61
2.1 Géographie physique 61
2.2 Hydroclimatologie 62
2.3 Géographie anthropique 64
2.4 Bases de données 67
3 Le bassin versant de la Seille : zone d'application de la modélisation 69
3.1 Géographie physique 69
3.2 Hydroclimatologie 69
3.3 Géographie anthropique 71
3.4 Bases de données 72

IV Construction de scénarios sur le bassin versant de la Seille **75**
1 Méthode de construction des scénarios 75
2 Résultats de l'enquête 78
2.1 La Seille d'hier et d'aujourd'hui : état initial des trajectoires possibles et spécificités territoriales à prendre en compte 78
2.2 Un territoire soumis à des évolutions paradoxales 87
2.3 Description des variables identifiées lors de l'enquête 95
2.4 Hypothèses contrastées des variables explicatives pour la construction des scénarios . 101
2.5 Conséquences des scénarios sur les variables résultat modélisables 106
3 Discussion et conclusion du chapitre 109

Développement d'une modélisation intégrée **111**

V Développement d'une modélisation de la demande en eau agricole **113**
1 Résumé de l'article en français 113
2 Article : "As simple as possible but not simpler ? : the case of irrigation modeling at catchment scale in southwestern France" 114
3 Apport des résultats de l'article pour la suite des travaux de thèse 139

VI Développement d'une modélisation intégrée agro-hydrologique "GRcrop" **141**
1 Modèle de référence : La modélisation agro-socio-hydrologique multi-agents MAELIA 141
2 Les modèles du génie rural (GR) 142
2.1 La modélisation GR globale 142
2.2 La modélisation GR semi-distribuée 142
2.3 Le fonctionnement du package R airGRiwrm 143
3 Développement d'une modélisation intégrée parcimonieuse : "GRcrop" 145
3.1 La spatialisation du couplage 145
3.2 Les compartiments hydrologiques mobilisés 146

3.3 La modélisation du stockage de la ressource en eau . . . 146
3.4 Les règles de limitation des prélèvements d'irrigation . . . 153
3.5 Calage de GRcrop . . . 154
4 Implémentation du modèle GRcrop sur les zones d'étude . . . 155
4.1 Implémentation de GRcrop sur le bassin versant de l'Aveyron aval . . . 156
4.2 Implémentation de GRcrop sur le bassin versant de la Seille . . . 159

VII Évaluation multi-critère de la performance de la modélisation intégrée agro-hydrologique 163
1 Méthodologie d'évaluation des modèles . . . 163
1.1 Évaluation de GRcrop sur le bassin versant de l'Aveyron aval . . . 163
1.2 Evaluation de GRcrop sur le bassin versant de la Seille . . . 164
1.3 Sensibilité du modèle aux usages . . . 165
2 Résultats sur le bassin versant de l'Aveyron aval . . . 166
2.1 Performance de la modélisation hydrologique . . . 166
2.2 Performance de la modélisation de l'irrigation . . . 168
2.3 Performance de la modélisation des étiages . . . 169
2.4 Performance de la modélisation du remplissage des réservoirs . . . 173
2.5 Impacts du désinfluencement . . . 177
3 Résultats sur le bassin versant de la Seille . . . 178
3.1 Performance de la modélisation hydrologique . . . 178
3.2 Performance de modélisation des étiages . . . 180
3.3 Performance de la modélisation du remplissage des réservoirs . . . 183
3.4 Impacts du désinfluencement . . . 185
4 Conclusion sur l'évaluation du modèle intégré . . . 186

Evaluation des impacts des scénarios par la modélisation 189

VIII Méthodologie de modélisation des scénarios 191
1 Méthodologie d'évaluation des impacts des scénarios et du changement climatique . . . 191
1.1 Plan de simulation . . . 191
1.2 Indicateurs étudiés . . . 193
2 Traduction des scénarios locaux en données d'entrée de la modélisation intégrée . . . 194
2.1 Volumes mobilisables à des fins d'irrigation . . . 195
2.2 Assolements annuels . . . 196
2.3 Détermination des surfaces irrigables . . . 198
2.4 Gestion de l'étang de Lindre . . . 200
2.5 Paramétrisation des "nouvelles" cultures . . . 202
2.6 Modélisation de la demande en eau d'irrigation selon les scénarios . . . 202
3 Impacts du changement climatique à expliciter dans la modélisation intégrée . . . 203
3.1 Impacts du changement climatique sur la phénologie des cultures . . . 203
3.2 Impacts de la concentration en CO_2 sur l'évapotranspiration . . . 204
3.3 Impacts de la concentration en CO_2 sur les rendements agronomiques . . . 204

IX Résultats des projections 207
1 Projections climatiques annuelles . . . 207
2 Projections de l'irrigation . . . 209
2.1 Projections de l'irrigation pour les cycles "longs" . . . 209
2.2 Sensibilité au raccourcissement des cycles sur l'irrigation . . . 213
3 Évolutions des indicateurs d'étiages . . . 215
3.1 Impact spécifique du climat sur l'évolution des étiages . . . 215
3.2 Impact des scénarios sur les étiages . . . 216
3.3 Sensibilité au raccourcissement des cycles sur les étiages . . . 221
4 Évolutions des volumes stockés . . . 221

4.1 Impact spécifique du climat sur le stockage . . . 221
4.2 Impact des scénarios sur l'étang de Lindre . . . 223
4.3 Impact des scénarios sur les retenues simples . . . 227
5 Évolutions des rendements . . . 231
5.1 Rendements des Usages constants . . . 231
5.2 Rendements du scénario Agroécologie industrielle . . . 232
5.3 Rendements du scénario Intensification . . . 236
5.4 Rendements du scénario Repaysannisation . . . 238
5.5 Synthèse des trois scénarios . . . 239
6 Discussion sur les projections . . . 240
6.1 Évaluation multi-critère des scénarios . . . 240
6.2 Mise en évidence d'améliorations potentielles des scénarios . . . 241
6.3 Apports d'une modélisation intégrée en contexte de changement climatique . . . 241

Discussion et conclusion **245**

X Discussion générale **247**
1 Apports des travaux de thèse . . . 247
1.1 Rappel des objectifs de la thèse . . . 247
1.2 Une méthode d'enquête de prospective originale et efficiente . . . 247
1.3 Une modélisation intégrée agro-hydrologique simple, modulable et performante . . . 249
1.4 Une démarche complète mobilisable pour d'autres territoires . . . 250
2 Limite des méthodes mobilisées et développées dans cette thèse . . . 252
2.1 Limites de la démarche prospective . . . 252
2.2 Limites de la modélisation et potentiels développements . . . 253
3 De l'évaluation de l'efficacité des stratégies d'adaptation agro-écologiques ou "fondées sur la nature" . . . 257
3.1 Les solutions fondées sur la nature pour réduire la demande en eau . . . 258
3.2 Les solutions fondées sur la nature pour soutenir les débits d'étiage . . . 261
4 De la nécessité d'expérimentations en amont de la modélisation . . . 262
5 Circularité de la quantification des incertitudes . . . 262
6 Au-delà des incertitudes : amélioration des modèles par l'exploration d'approches de modélisation très différentes . . . 263

Conclusion **265**
1 Synthèse des travaux . . . 265
1.1 Questions de recherche . . . 265
1.2 Travaux menés pour y répondre . . . 265
2 Éléments de réponse aux questions de recherche . . . 266
2.1 Réponse à la première question de recherche . . . 266
2.2 Réponse à la deuxième question de recherche . . . 267
2.3 Réponse à la troisième question de recherche . . . 267
3 Apports de la thèse . . . 268
4 Principales limites . . . 268
5 Perspectives . . . 269

Liste des acronymes **271**

Bibliographie **277**

Annexes **291**

A Calcul de l'évapotranspiration potentielle Penman **293**

B Sélection et évaluation d'un ensemble de projections climatiques 295

C Grille d'entretien pour la construction de scénarios 301

D Conséquences des zones inondables et hydromorphes sur les assolements 305

E Exploitabilité de l'eau de la Seille pour l'irrigation au regard de la salinité 307

F Développement d'une modélisation des vidanges de l'étang de Lindre 319

G Détails des paramètres de modélisation des cultures 325

H Rendements avec cycles raccourcis 329

Table des figures

I.1 Cycle de l'eau naturel . . . 9
I.2 Représentation schématique du bilan énergétique moyen de la Terre . . . 9
I.3 Interrelations entre différents compartiments terrestres pour le cycle de l'eau . . . 10
I.4 Cycle de l'eau intégrant les influences humaines . . . 11
I.5 Colonne d'eau et déplacement de la sève brute liée à l'évapotranspiration foliaire par la création d'un potentiel hydrique . . . 13
I.6 Échanges gazeux entre la feuille et l'atmosphère . . . 14
I.7 Bilan en eau au niveau des sols cultivés . . . 14
I.8 Répartition spatiale et temporelle de l'eau via l'irrigation . . . 16
I.9 Part de la SAU irriguée par commune en 2010 . . . 17
I.10 Étapes du cheminement de l'eau d'irrigation et de pluie à la parcelle, nature des pertes, calcul des efficiences . . . 18
I.11 Distinction des retenues selon leur emplacement et leur type d'alimentation . . . 20
I.12 Acteurs et outils de la gouvernance de l'eau en France . . . 22
I.13 Les impacts du changement climatique sur les bilans en eau des agro-hydrosystèmes . . . 24
I.14 Evolutions relatives possibles du débit moyen annuel . . . 24
I.15 Compartiments à intégrer dans une étude des agro-hydrosystèmes en contexte de changement climatique . . . 26

II.1 Association de la prospective et de la modélisation pour l'adaptation au changement climatique 29
II.2 Les deux philosophies de modélisation en hydrologie . . . 30
II.3 Analyse morphologique pour construire des scénarios prospectifs . . . 34
II.4 Chaîne de modélisation d'impacts du changement climatique sur l'hydrologie . . . 36
II.5 Flux hydriques considérés pour la modélisation hydrologique . . . 37
II.6 Les différentes évapotranspiration calculées : potentielle (ETP), culturale (ETC), et réelle (ETR) . . . 41
II.7 Grandeurs caractéristiques du sol et du bilan en eau . . . 42
II.8 Chaîne de modélisation d'impact du changement climatique sur la ressource en eau et la demande en eau agricole . . . 52
II.9 Combinaison de la prospective et de la modélisation pour construire et évaluer des stratégies d'adaptation au changement climatique . . . 53

III.1 Localisation des bassins d'étude . . . 57
III.2 Réseau hydrographique du bassin versant de l'Aveyron . . . 61
III.3 Nappe d'accompagnement de l'Aveyron aval et de la Lère . . . 62
III.4 Hydrologie et climat du bassin versant de l'Aveyron . . . 63
III.5 Localisation des principaux barrages sur le bassin versant de l'Aveyron . . . 64
III.6 Les retenues sur le bassin versant aval de l'Aveyron . . . 65
III.7 Prélèvements sur le bassin versant de l'Aveyron . . . 66
III.8 Occupation du sol et îlots irrigables sur le bassin versant de l'Aveyron aval . . . 66
III.9 Disponibilité et qualité des données aux stations du bassin versant aval de l'Aveyron . . . 68
III.10 Réseau hydrographique du bassin versant de la Seille . . . 69
III.11 Hydrologie et climat du bassin versant de la Seille . . . 70
III.12 Prélèvements en eau sur le bassin versant de la Seille . . . 71

III.13 Les plans d'eau sur le bassin versant de la Seille. Les données sont issues de la base de données constituée pour MAELIA implémenté sur la Seille . . . 71
III.14 Occupation du sol sur le bassin versant de la Seille . . . 72
III.15 Qualité des données aux stations du bassin de la Seille . . . 73

IV.1 Grille d'entretien pour la construction de scénarios prospectifs . . . 77
IV.2 Altitude sur le bassin versant de la Seille . . . 79
IV.3 Perméabilité sur le bassin versant de la Seille . . . 80
IV.4 Périmètre inondable sur le bassin versant de la Seille . . . 81
IV.5 Espaces naturels remarquables labellisés sur le bassin versant de la Seille . . . 84
IV.6 Interrelations entre les variables explicatives . . . 100

VI.1 Structure du modèle GR5J . . . 143
VI.2 Représentation schématique de la modélisation GR semi-distribuée . . . 144
VI.3 Représentation schématique de la modélisation GR semi-distribuée . . . 144
VI.4 Spatialisation des entités hydrologiques et agronomiques dans GRcrop . . . 147
VI.5 Flux pris en compte pour la modélisation des retenues spécifiques . . . 148
VI.6 Catégorisation des retenues et calcul des impluvia . . . 150
VI.7 Flux pris en compte pour la modélisation des retenues simples . . . 151
VI.8 Remplissage des retenues simples par le ruissellemment . . . 152
VI.9 Fonctionnement de GRcrop . . . 155
VI.10 Volumes totaux des retenues simples modélisées sur le bassin versant de l'Aveyron . . . 156
VI.11 Volumes totaux des retenues simples modélisées sur le bassin versant de la Seille . . . 160

VII.1 Comparaison des régimes observés et simulés pour la période 2008-2014 . . . 167
VII.2 Comparaison du NSE calculé sur la transformation Box-Cox des débits entre la période de calage et celle d'évaluation pour deux périodes de calage du modèle : P1 : 2008-2011 ; P2 : 2012-2014. Les différents points correspondent aux différentes configurations de l'irrigation présentées dans le Tableau VI.3 . . . 167
VII.3 Résultats de la modélisation de l'irrigation sur l'Aveyron aval . . . 168
VII.4 Comparaison d'indicateurs d'étiage interannuels entre les observations et la modélisation sur l'Aveyron calculés sur 2008-2014 . . . 169
VII.5 Comparaison d'indicateurs d'étiage interannuels entre les observations et la modélisation sur l'Aveyron . . . 170
VII.5 Comparaison d'indicateurs d'étiage interannuels entre les observations et la modélisation sur l'Aveyron . . . 171
VII.6 Comparaison entre les seuils d'étiage atteints quotidiennement sur les stations de la Lère à Réalville (O5854010) et de l'Aveyron à Montauban (O5882510) et les seuils d'étiage modélisés avec et sans influence . . . 172
VII.7 Bilan hydrique des retenues simples sur le bassin versant de l'Aveyron . . . 173
VII.7 Bilan hydrique des retenues simples sur le bassin versant de l'Aveyron . . . 174
VII.8 Bilan hydrique des retenues spécifiques sur le bassin versant de l'Aveyron . . . 175
VII.8 Bilan hydrique des retenues spécifiques sur le bassin versant de l'Aveyron . . . 176
VII.9 Comparaison entre les taux de remplissage simulés et les taux de remplissage observés des barrages le Tordre et le Gouyre . . . 177
VII.10 Comparaison des expériences de désinfluencement partiel . . . 178
VII.11 Comparaison des régimes observés et simulés pour la période 1986-2019 (1986-2015 pour la Seille à Metz, A7881010) . . . 179
VII.12 Comparaison du KGE calculé sur la transformation Box-Cox des débits entre la période de calage et celle d'évaluation pour deux périodes de calage du modèle : P1 : 1986-2000 ; P2 : 2000-2015 . . . 180
VII.13 Comparaison d'indicateurs d'étiage interannuels entre les observations et la modélisation . . . 181
VII.14 Comparaison d'indicateurs d'étiage annuels entre les observations et la modélisation . . . 182
VII.14 Comparaison d'indicateurs d'étiage annuels entre les observations et la modélisation . . . 183

VII.15 Comparaison entre les seuils d'étiage atteints quotidiennement sur la station de la Seille à Metz et les seuils d'étiage modélisés avec et sans influence. DOE = 1,88 $m^3 s^{-1}$; DA = 1,5 $m^3 s^{-1}$; DAR = 1,09 $m^3 s^{-1}$; DCR = 0,67 $m^3 s^{-1}$. 183
VII.16 Bilan hydrique modélisé dans les retenues simples sur le bassin versant de la Seille 184
VII.17 Bilan hydrique modélisé dans l'étang de Lindre sur le bassin versant de la Seille 185
VII.18 Comparaison des régimes des débits avec toutes les influences, sans aucune influence, ou avec les plans d'eau mais sans vidange de l'étang de Lindre, sur la période 1986-2019 sur le bassin versant de la Seille 186

VIII.1 Simulations à effectuer selon l'horizon historique ou futur 192
VIII.2 Volumes d'eau stockée mobilisables et secteurs irrigués selon les scénarios 196
VIII.3 Transformation des assolements pour le scénario Intensification 197
VIII.4 Transformation des assolements pour le scénario Repaysannisation 198
VIII.5 Transformation des assolements pour le scénario Agroécologie industrielle 199
VIII.6 Projection de vidanges entre 1950 et 2100 générées aléatoirement 201

IX.1 Projections climatiques futures annuelles sur le bassin versant de la Seille 208
IX.2 Irrigation simulée pour les différents scénarios dans le cas des cycles "longs" 210
IX.3 Satisfaction volumique simulée pour les différents scénarios 212
IX.4 Comparaison de l'irrigation entre les simulations avec les cycles de durée standard et les cycles de durée raccourcie. Les disques d'une même couleur représentent les satisfactions obtenues via les différentes configurations de l'irrigation 214
IX.5 Comparaison de la satisfaction de l'irrigation entre les simulations avec les cycles de durée standard et les cycles de durée raccourcie. Les disques d'une même couleur représentent les satisfactions obtenues via les différentes configurations de l'irrigation 215
IX.6 Distribution des indicateurs d'étiage sur l'horizon historique et sur l'horizon futur classifiée selon l'occurrence des vidanges dans les projections 216
IX.7 Projections des nombres de jours sous les seuils d'étiage sur la Seille à Metz 217
IX.8 Projections du VCN3 moyen interannuel 219
IX.9 Projections du QMNA 220
IX.10 Comparaison entre les indicateurs d'étiage des simulations avec les cycles de durée standard et les cycles de durée raccourcie pour la Seille à Metz 222
IX.10 Comparaison entre les indicateurs d'étiage des simulations avec les cycles de durée standard et les cycles de durée raccourcie pour la Seille à Metz 223
IX.11 Comparaison entre le nombre annuel de jours avec un volume inférieur à 7.10^6 m^3 dans l'étang de Lindre pour l'horizon de référence et celui pour l'horizon futur classifiée selon l'occurrence des vidanges dans les projections pour le cas Usages constants. 223
IX.12 Nombre de jours avec le volume de l'étang de Lindre inférieur à 7.10^6 m^3 224
IX.13 Moyenne interannuelle du volume stocké journalier dans l'étand de Lindre 226
IX.14 Moyenne interannuelle glissante sur 30 jours des prélèvements de l'étang de Lindre et de la pression sur les débits de la Seille à Moyenvic en résultant 226
IX.15 Volume journalier stocké dans l'ensemble des retenues simples et volume des retenues mobilisables. Chaque courbe représente une projection 228
IX.16 Volume journalier moyen interannuel stocké dans l'ensemble des retenues simples. Chaque courbe représente une projection 229
IX.17 Moyenne interannuelle glissante des prélèvements dans les retenues simples et de la pression sur les débits aux stations modélisées sur le bassin versant de la Seille 230
IX.18 Évolution des rendements pour le scénario à Usages constants 231
IX.19 Projection des rendements pour les simulations avec les Usages constants 233
IX.20 Projection des rendements pour les simulations avec le scénario Agroécologie industrielle . 234
IX.21 Projection des rendements pour les simulations avec le scénario Intensification 236
IX.22 Projection des rendements pour les simulations avec le scénario Repaysannisation 238

IX.23 Évolution du nombre de jours sous les seuils d'étiage pour la Seille à Metz (A7881010) pour la simulation avec les Usages constants et la modélisation ne prenant pas en compte les influences . . . 242
IX.24 Évolution du VCN3 moyen pour la simulation avec les Usages constants et la modélisation ne prenant pas en compte les influences . . . 243
IX.25 Évolution du QMNA5 pour la simulation avec les Usages constants et la modélisation ne prenant pas en compte les influences . . . 243

X.1 Comparaison des simulations hydrologiques avec et sans prise en compte des précipitations d'irrigation . . . 255
X.2 Agroforesterie intraparcellaire . . . 259
X.3 Paillage des cultures . . . 261

Liste des tableaux

I.1 Répartition des prélèvements d'eau par usage en 2019 en milliards de m^3 . . . 19

II.1 Concentrations en eq-CO_2 pour les scénarios de forçage radiatif établis par le GIEC . . . 34
II.2 Les cinq principaux scénarios du GIEC résumés dans le rapport AR6 . . . 35
II.3 Comparaison des règles de déclenchement de dosage de l'irrigation . . . 43

III.1 Variables journalières produites par le projet Explore2 . . . 59
III.2 Projections climatiques disponibles via le projet Explore2 . . . 60
III.3 Caractéristiques des barrages sur le bassin versant de l'Aveyron . . . 64

IV.1 Résumé des hypothèses contrastées des variables explicatives pour chaque scénario . . . 106
IV.2 Valeurs prises par les variables résultat modélisables . . . 109

VI.1 Volume total par catégorie de retenue simple sur le bassin versant de l'Aveyron . . . 157
VI.2 Paramètres des retenues spécifiques sur le bassin versant de l'Aveyron aval . . . 157
VI.3 Jeux de paramètres conservés pour la modélisation de l'irrigation dans GRcrop sur l'Aveyron 158
VI.4 Débits et pourcentage de restriction sur le bassin versant de l'Aveyron . . . 158
VI.5 Volume total par catégorie de retenue simple sur le bassin versant de la Seille . . . 159

VII.1 Expériences de désinfluence partielle sur le bassin versant de l'Aveyron . . . 165
VII.2 Valeurs des paramètres hydrologiques sur l'Aveyron aval . . . 166
VII.3 Valeurs des paramètres hydrologiques pour la Seille . . . 179

VIII.1 Couples de GCM/RCM sélectionnés pour effectuer les projections climatiques sur le bassin versant de la Seille . . . 193
VIII.2 Surfaces irrigables et non irrigables par type de rotation pour le scénario Intensification . . . 199
VIII.3 Surfaces irrigables et non irrigables par type de rotation pour le scénario Agroécologie industrielle . . . 200
VIII.4 Surfaces irriguées et non irriguées pour chaque culture et chaque scénario . . . 200
VIII.5 Hypothèses de modélisation de la gestion de l'étang de Lindre contrastées pour les trois scénarios . . . 201
VIII.6 Typologie des années en fonction de l'occurence de vidanges . . . 201
VIII.7 Assolements irrigués à partir de l'étang de Lindre par rotation pour chaque scénario . . . 202
VIII.8 Surfaces irriguées à partir de l'étang de Lindre pour chaque culture et chaque scénario . . . 202

VIII.9 Paramétrisation de la modélisation de l'irrigation selon les scénarios 203
VIII.10 Raccourcissements des cycles modélisés dans le cadre du projet CLIMATOR 204
VIII.11 Calcul de l'évolution relative du rendement maximal en 2050 par rapport au rendement historique au regard de la concentration en CO_2 205

Introduction

Chapitre I

Eau, agriculture, changement climatique

Avant-propos :

La thématique "Eau, Agriculture, Changement climatique" nécessite des éclairages préalables, avant même de se questionner sur les méthodes pour guider nos actions :

- sur le contexte actuel, motivant les travaux de cette thèse ;
- sur le fonctionnement des compartiments physiques et anthropiques interagissant au sein de cette thématique.

Ce premier chapitre vise ainsi à fournir ces éclairages avant d'entrer dans le cœur des objectifs de la thèse.

1 Contexte

1.1 Mise à l'agenda de l'adaptation au changement climatique

Depuis plusieurs décennies, la réalité du changement climatique fait l'objet d'un consensus scientifique (GUILLEMOT, 2014). Il est aujourd'hui largement admis, notamment grâce aux travaux du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), que les activités humaines, émettrices de gaz à effet de serre, sont responsables de ce phénomène (IPCC, 2021). Ce changement climatique se caractérise par une élévation des températures de l'air moyennes et par l'intensification d'évènements météorologiques extrêmes (IPCC, 2007 ; IPCC, 2014 ; IPCC, 2021). En France métropolitaine, les projections climatique DRIAS 2020 (MÉTÉO-FRANCE, 2020) prévoient ainsi une hausse des températures au cours du XXIe siècle par rapport à la période de référence 1976-2005. Cette évolution se traduit notamment par une augmentation du risque de sécheresse et d'épisodes de fortes chaleurs estivales à travers tout le territoire, mais aussi par une modification potentielle des précipitations moyennes et de leur saisonnalité.

Face au changement climatique, deux familles d'actions sont généralement considérées :

- **l'atténuation du changement climatique :** ces actions visent à réduire la concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Cela peut être réalisé en réduisant les émissions brutes de gaz à effet de serre, ou par le captage et le stockage des gaz à effet de serre sous d'autres formes (carbone sous forme de bois plutôt que sous forme de dioxyde de carbone, etc.) ;
- **l'adaptation au changement climatique :** ces actions visent à réduire la vulnérabilité des systèmes humains et naturels au changement climatique. Par exemple, la végétalisation des villes peut être mise en place afin d'en réduire la température.

Longtemps, la question de l'adaptation au changement climatique a été volontairement écartée par rapport à l'atténuation (DANTEC et ROUX, 2019). En effet, s'adapter au changement climatique peut être assimilé

à renoncer à agir pour réduire nos émissions de gaz à effet de serre. Néanmoins, supposer que l'atténuation effective sera suffisante pour que les effets du changement climatique restent limités paraît aujourd'hui bien optimiste.

En effet, malgré les alertes précoces de scientifiques, exhortant les États, entreprises et citoyens du monde entier à atténuer le changement climatique, les actions menées n'ont pas permis de réduire les émissions mondiales de gaz à effet de serre, qui ne cessent au contraire de croître. Seul un évènement tel que l'épidémie de COVID est parvenu à les diminuer ponctuellement (IPCC, 2021). Un sondage réalisé par *Nature* auprès des scientifiques du GIEC révèle ainsi que 60 % des répondants pensent que le réchauffement dépassera les 3 °C en 2100 par rapport à l'ère pré-industrielle (TOLLEFSON, 2021).

En réalité, les conséquences du changement climatique, annoncées par des scientifiques, sont déjà largement palpables. On observe en effet une augmentation de la fréquence et de l'intensité d'évènements extrêmes (sécheresses, inondations, canicules) à échelle mondiale (IPCC, 2021). Le mois de juillet 2023 est ainsi le mois le plus chaud jamais enregistré à échelle mondiale (COPERNICUS, 2023). L'Europe de l'Ouest n'échappe pas aux conséquences du changement climatique. Les printemps et été 2022 ont été particulièrement chauds et secs en France métropolitaine : canicule dès le mois de juin (MÉTÉO-FRANCE, 2022b), mois de juillet le plus sec jamais enregistré (MÉTÉO-FRANCE, 2022a). Cette sécheresse estivale a été suivie d'un hiver particulièrement sec, avec un record de 32 jours sans précipitations significatives sur la France métropolitaine (MÉTÉO-FRANCE, 2023). Il est donc certain que le changement climatique a et aura des impacts conséquents sur le climat mondial et métropolitain, quels que soient les efforts d'atténuation mis en place. De plus, chaque effort d'atténuation d'un État ou d'un individu n'impacte que partiellement les émissions globales, et n'aura un effet concret que sur le long terme. L'adaptation, elle, permet de se prémunir immédiatement et individuellement, sans dépendre du volontarisme des autres. Des mesures d'adaptation doivent donc être mises en place en France métropolitaine en plus des efforts d'atténuation.

La matérialisation et l'anticipation du changement climatique suscite une prise de conscience et une préoccupation croissantes parmi les acteurs publics, les chercheurs et les citoyens. L'adaptation au changement climatique est donc aujourd'hui un réel objectif pour l'ensemble des secteurs économiques et sociétaux. Le gouvernement Français a ainsi d'abord produit une Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique en 2006 (ONERC, 2007), puis un plan d'adaptation au changement climatique en 2011 (PNACC, MEDDTL, 2011).

1.2 L'eau et l'agriculture en première ligne des objectifs d'adaptation

L'agriculture utilise de l'eau pour répondre aux besoins biologiques des cultures. Quand l'eau apportée par les précipitations n'est pas suffisante, de l'eau supplémentaire peut être prélevée, en surface ou dans les nappes, et apportée aux cultures : c'est ce qu'on appelle l'irrigation. L'irrigation constitue déjà une part importante des prélèvements en eau. Au niveau mondial, elle représenterait 70 % des prélèvements (CONSEIL D'ETAT, 2010). De plus, les prélèvements en eau pour l'agriculture en France sont les plus importants sur les mois de l'année susceptibles d'être en période de sécheresse. De nombreux territoires agricoles connaissent ainsi des tensions autour du partage de l'eau, entraînant des restrictions des prélèvements, notamment ceux liés à l'irrigation (CGAAER et CGEDD, 2020).

Avec l'intensification du risque de sécheresse, l'agriculture et les territoires agricoles sont donc particulièrement impactés par le changement climatique. On observe ainsi une aggravation des déséquilibres entre ressource en eau et demande en eau pour de nombreux secteurs déjà en tension. De plus, des tensions apparaissent sur des secteurs qui n'en souffraient pas jusqu'à maintenant (FERNANDEZ et al., 2022). En 2022, la totalité des départements français ont ainsi été placés en vigilance [1] sécheresse. 78 départements ont été placés au moins pour partie en crise [2], conduisant à de fortes mesures de restriction (MTES, 2022). L'augmentation

1. Niveau réglementaire. Le classement d'une zone d'alerte dans un niveau de sécheresse est réalisé sur arrêté préfectoral. Voir Section I.2.3.3
2. idem 1.

potentielle de la demande d'irrigation, en conséquence de l'intensification des sécheresses, constitue ainsi un véritable défi dans un contexte déjà déséquilibré.

De nombreux travaux scientifiques ont proposé des clés pour adapter l'agriculture au changement climatique, notamment au regard de la ressource en eau. Ces études ont été produites à plusieurs échelles : mondiale pour le GIEC (IPCC, 2014 ; IPCC, 2021), européenne pour le scénario TYFA (POUX et AUBERT, 2018), nationale mais intégrée dans ses enjeux internationaux pour AFTERRES (SOLAGRO, 2016), nationale pour Explore 2070 (CHAUVEAU et al., 2013), régionale pour R^2D^2 (SAUQUET, 2014) ou Garonne 2050 (AEAG, 2014).

Des politiques publiques d'adaptation de l'agriculture, s'appuyant sur ces premiers résultats de recherche, sont ainsi en pleine construction (voir Encadré **Chronologie des politiques publiques françaises concernant l'eau, l'agriculture et le changement climatique**).

Chronologie des politiques publiques françaises concernant l'eau, l'agriculture et le changement climatique

- PNACC (Plan National d'Adaptation au Changement Climatique, MEDDTL, 2011), puis PNACC2 (MTES, 2018) : préconisation d'actions d'adaptation concernant l'eau et l'agriculture ;
- "Assises de l'eau" entre novembre 2018 et juin 2019 : la deuxième séquence a porté sur le changement climatique et la ressource en eau, et a conduit à des actions portant sur tous les secteurs, dont l'agriculture (MTE, 2019) ;
- Mission commune entre le CGEDD (Conseil général de l'environnement et du développement durable) et le CGAAER (Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux) : production d'un rapport recommandant des stratégies d'adaptation (2020) ;
- "Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation de l'agriculture au changement climatique" de mai 2021 à février 2022 : mise en relation des acteurs de l'eau et de l'agriculture au sein de groupes de travail, proposition d'un certain nombre d'actions (GOUVERNEMENT, 2022).

1.3 Nécessité d'un appui scientifique

Malgré les recherches déjà menées, et parce que chaque contexte local est spécifique, il n'existe pas de consensus politique ou scientifique sur les adaptations à mettre en place. En particulier, le stockage d'eau pour l'irrigation est sujet à d'importants conflits à travers la France (LEUSSIER, 2022). Le conflit autour de la mise en place de réserves de substitution à Sainte-Soline a notamment mené à des affrontements entre la police et des opposants aux réserves de substitution (MOULLOT et LEBOUCQ, 2023). Il est sujet à débat dans la communauté scientifique et politique (voir Encadré **Éléments de débat sur le stockage d'eau pour l'agriculture**).

Pour tenter de résoudre cette mésentente entre défenseurs de l'agriculture et défenseurs de l'eau, un rapport conjoint entre CGEDD et le CGAAER sur l'adaptation de l'agriculture au changement climatique au regard de la ressource en eau a été mandaté en 2019 par les ministères de la transition écologique et solidaire et de l'agriculture et de l'alimentation (CGAAER et CGEDD, 2020). Celui-ci a conseillé un compromis entre renforcement de la ressource par le stockage, et transition vers une agriculture plus sobre en eau. Le Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique a ensuite permis aux acteurs de l'agriculture et de l'eau d'exprimer leur vision sur ce sujet conflictuel. Ces discussions, si elles n'ont pas forcément conduit à un consensus sur toutes les mesures à mettre en place, ont toutefois mis en évidence un certain nombre de connaissances manquantes.

Plusieurs mesures mises en place dans le cadre du Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique consistent ainsi en la création de connaissances (GOUVERNEMENT, 2022), telles que le "lancement d'un inventaire exhaustif des retenues d'eau en France (supérieures à 0,1 ha) et un suivi des volumes stockés par méthodes satellitaires en lien avec le Centre National d'Études Spatiales [...]", l' "amélioration de la connaissance des eaux non-conventionnelles via la création d'un observatoire dédié à la réutilisation des eaux

usées traitées", ou encore le "lancement d'une expertise nationale (OFB, INRAE) pour la détermination d'ici fin 2022 d'une méthodologie pour la détermination des volumes prélevables en période de hautes eaux[...]". Les stratégies d'adaptation visant à réduire la consommation d'eau des systèmes agricoles nécessitent également une création de connaissances. On peut notamment citer la recherche génétique en séléction variétale, l'étude des impacts des pratiques agricoles innovantes, telles que l'agriculture de conservation, sur l'hydrologie agricole, ainsi que l'évaluation des impacts socio-économiques de la transition agro-écologique.

Les arbitrages sur l'adaptation de l'agriculture au changement climatique au regard de la ressource en eau nécessitent ainsi à ce stade des connaissances supplémentaires et de nouvelles méthodes pour pouvoir construire et évaluer rationnellement les stratégies d'adaptation de l'agriculture au changement climatique au regard de la ressource en eau. En effet, l'agriculture est à l'interface de nombreux processus naturels et anthropiques, ainsi qu'à l'interface de nombreux intérêts et objectifs humains. Proposer des adaptations pertinentes nécessite de maîtriser un système complexe aux interactions multiples. Il convient ainsi de veiller à ces différentes interactions pour s'assurer de la viabilité et de l'efficacité des stratégies d'adaptation.

De plus, le retour d'expérience d'Explore 2070 (CHATEL, 2019) et les Assises de l'eau ont mis en évidence un besoin exprimé de construire des stratégies d'adaptation à échelle locale, afin que ces dernières soient adaptées aux contraintes et opportunités spécifiques des territoires et suffisamment concrètes. Des outils ont ainsi été développés, tels que les PTGE (Projets de territoire pour la gestion de l'eau, LOUBIER et al., 2019), et les études HMUC (Hydrologie Milieux Usage Climat, AELB, 2022) pour définir des stratégies de gestion de l'eau à échelle plus locale. Les PTGE permettent de définir des règles de partage de l'eau, mais n'intègrent que peu les projections climatiques. Les études HMUC sont récentes, la plupart d'entre elles étant en cours de réalisation, et n'ont donc pas encore fait l'objet de suffisamment de retours d'expérience. Enfin, les outils de modélisation et de prospective développés n'ont souvent pas été conçus de façon générique ou adaptée à des objectifs opérationnels. Cela freine la généralisation de la modélisation d'impacts du changement climatique sur les agro-hydrosystèmes, notamment dans le cadre des dispositifs cités en amont.

De ce fait, le développement d'approches opérationnelles, i.e. permettant de construire et d'évaluer des stratégies d'adaptation locales au changement climatique, repose sur un besoin fort. Cependant, de tels travaux soulèvent de nombreux verrous scientifiques, notamment au regard de la complexité des enjeux traités. L'objectif de cette thèse est de construire et d'évaluer des stratégies d'adaptation locales de l'agriculture au changement climatique au regard de la ressource en eau. Pour réaliser cet objectif, nous souhaitons faire dialoguer plusieurs disciplines de recherche pour mettre en place une approche intégrée et opérationnelle. Dans la suite de cette introduction, nous décrirons dans un premier temps les différents compartiments et processus physiques et anthropiques qui doivent être pris en compte. Ensuite, nous décrirons les méthodes existantes pour modéliser ces compartiments et les faire interagir pour la construction et l'évaluation de stratégies d'adaptation au changement climatique.

Éléments de débat sur le stockage d'eau pour l'agriculture

Arguments des défenseurs du stockage

Les arguments des défenseurs du stockage reposent souvent sur le constat que le stockage permet de prélever de l'eau pour l'irrigation en dehors des périodes d'étiage, et donc de limiter les impacts environnementaux de l'irrigation. L'irrigation est alors présentée comme une mesure nécessaire, ou au moins pertinente, d'adaptation de l'agriculture au changement climatique (CGAAER, 2015). Une telle adaptation permettrait d'éviter des renoncements importants en matière de consommation alimentaire et de préserver l'économie agricole et les relations géopolitiques dépendantes de nos exportations. De plus, les impacts des retenues dépendent de leur localisation, mode de remplissage, etc. Des mesures pour atténuer leurs impacts sont donc possibles : privilégier les retenues déconnectées, mettre en place des passes à poissons, débits réservés, etc. Il est également possible de conditionner l'implantation de retenues à des engagements environnementaux de la part des irrigants.

Arguments des détracteurs du stockage

Les détracteurs de cette stratégie mettent en exergue les limites du stockage (CARLUER et al., 2016). D'une part, l'implantation d'une infrastructure de stockage peut ne pas être suffisamment intéressante économiquement. En effet, l'installation d'une retenue est coûteuse. Plus particulièrement, certains secteurs ne permettent pas une mise en place aisée d'infrastructures de stockage en raison du manque de relief. De plus, la ressource, même hivernale, peut-être trop faible ou difficile d'accès. L'évaporation peut aussi être trop importante dans les réservoirs, etc.

D'autre part, les infrastructures de stockage ont des impacts sur l'environnement. Elles peuvent constituer un obstacle à l'écoulement pour les retenues situées sur des cours d'eau et donc faire barrière pour de nombreuses espèces aquatiques. Elles peuvent entrer en compétition avec des zones humides à forte biodiversité, en retenant l'eau qui les approvisionnait en amont ou en étant établies directement sur ces dernières.

L'irrigation en elle-même est source de controverses, car elle rentre en compétition pour l'eau avec d'autres usages et avec les écosystèmes aquatiques que certains acteurs souhaitent protéger.

Les autorisations et subventions des retenues peuvent être conditionnés à des engagements environnementaux par les irrigants, mais ces derniers ne seraient pas forcément respectés. La mise en place de retenues encouragerait au contraire une fuite en avant vers l'intensification et la consommation d'eau par l'agriculture. La mise en place d'une retenue pour assurer les productions de cultures déjà en place en période de sécheresse pourrait en réalité conduire à la mise en place de cultures plus gourmandes en eau, qui valoriseront l'eau de la retenue même les années humides, et qui souffriront de la même façon les années sèches.

Enfin, des alternatives sont alors proposées par ces acteurs, afin de limiter le recours au stockage de l'eau. On peut citer la réutilisation des eaux usées traitées. Des stratégies mises en avant reposent sur la diminution des besoins en eau des cultures, en cultivant des espèces et variétés plus résistantes au stress hydrique. La création de nouvelles variétés par sélection pourrait ainsi permettre de créer des variétés plus résistantes au stress hydrique. De plus, certaines pratiques agricoles pourraient permettre de réduire la dépendance à l'eau des cultures, telles que l'agriculture de conservation ou l'agroforesterie (ASPAR, 2019).

De tels choix d'adaptation se conjugueraient avec une modification globale sociétale permettant une transition agro-écologique d'ampleur.

2 Bilan en eau des agro-hydrosystèmes

Un agro-hydrosystème désigne, sur une portion d'espace donnée, les compartiments physiques intervenant dans les processus hydrologiques et agricoles, ainsi que leurs interactions. Un tel concept est pertinent, car les interactions entre eau et agriculture sont très fortes, et doivent être raisonnées à l'échelle d'un territoire défini. Nous nous intéressons en particulier aux mécanismes à l'origine de la production de ressource en eau, à la consommation en eau des cultures, termes que nous définirons, et au bilan entre ces grandeurs.

2.1 Qu'est-ce que la ressource en eau ?

Dans cette section, nous allons en premier lieu décrire les flux naturels de l'eau entre différents compartiments physiques terrestres. Nous décrirons ensuite les flux et perturbations anthropiques. Enfin, nous expliciterons plus précisément ce que nous considérons comme de la "ressource en eau".

2.1.1 Le cycle de l'eau naturel

L'eau est présente sur Terre sous les trois états physiques de la matière (ABBOTT et al., 2019) :

- gazeuse dans l'atmosphère ($1{,}3.10^4$ km^3) ;
- solide ($2{,}6.10^7$ km^3), avec la neige (maximum annuel : $2{,}7.10^3$ km^3), la calotte glacière et les glaciers ($2{,}6.10^7$ km^3), ainsi que le permafrost ($2{,}1.10^5$ km^3) ;
- liquide ($1{,}4.10^9$ km^3), avec l'eau des océans et des lacs salés ($1{,}3.10^9$ km^3), l'eau douce souterraine ($2{,}3.10^7$ km^3), l'eau douce de surface ($1{,}4.10^5$ km^3).

Le cycle de l'eau naturel désigne les transferts entre ces différents compartiments (Figure I.1). Les changements d'état, mais aussi certains flux, sont déterminés par le climat et permettent d'équilibrer le bilan radiatif terrestre (Figure I.2). Nous définissons le climat par un certain nombre de variables atmosphériques (humidité de l'air, rayonnement, précipitations, vent, température...), dont les valeurs évoluent dans le temps et selon la localisation à la surface de la Terre. L'évolution de ces variables traduit l'état de l'atmosphère en répercussion notamment de l'hétérogénéité de l'exposition au rayonnement solaire à la surface de la Terre.

En effet, l'énergie solaire, en chauffant la surface de la Terre, peut provoquer l'évaporation de l'eau liquide. Cette évaporation sur un secteur donné va également dépendre de l'humidité de l'atmosphère et des vents. Cette évaporation passe éventuellement par les êtres vivants, et on parle alors de transpiration (Section I.2.2.1). Le cumul entre évaporation et transpiration est appelé évapotranspiration (ET).

L'eau évaporée, principalement à partir des océans, peut se déplacer jusque sur les continents par action du vent. Celle-ci résulte des gradients de température liés à l'inégale exposition de la surface terrestre à l'énergie solaire. L'eau gazeuse contenue dans l'atmosphère peut se liquéfier lorsque l'atmosphère devient saturée en eau et forme alors des nuages. Cette saturation est favorisée lorsque la température de l'atmosphère diminue. Lorsque les gouttes des nuages deviennent suffisamment grosses, l'eau liquide contenue dans l'atmosphère tombe par gravité jusqu'à la surface de la Terre : ce sont les précipitations. Si la température est suffisamment basse, l'eau atmosphérique peut devenir solide et retomber sous forme de neige.

Une fois précipitée, l'eau liquide peut se déplacer à travers les surfaces continentales. Tout d'abord, elle peut s'infiltrer dans les sols par gravité. Les sols en retiennent alors une partie, et cette eau sera elle-même en partie disponible pour la transpiration de la végétation notamment. Cette eau peut être drainée plus en profondeur, dans les nappes, toujours par gravité. L'eau des nappes rejoint en général les océans après avoir alimenté une rivière ou directement par écoulement souterrain. Par ailleurs, cette eau peut également être retenue en surface, au niveau de cuvettes, quand le sol est suffisamment imperméable ou l'apport en eau surabondant, par exemple dans des lacs. Enfin, cette eau peut ruisseler en surface par gravité, le long des pentes, dans des cours d'eau qui se jetteront *in fine* dans les océans. Les nappes peuvent alimenter les rivières, et les rivières peuvent alimenter les nappes.

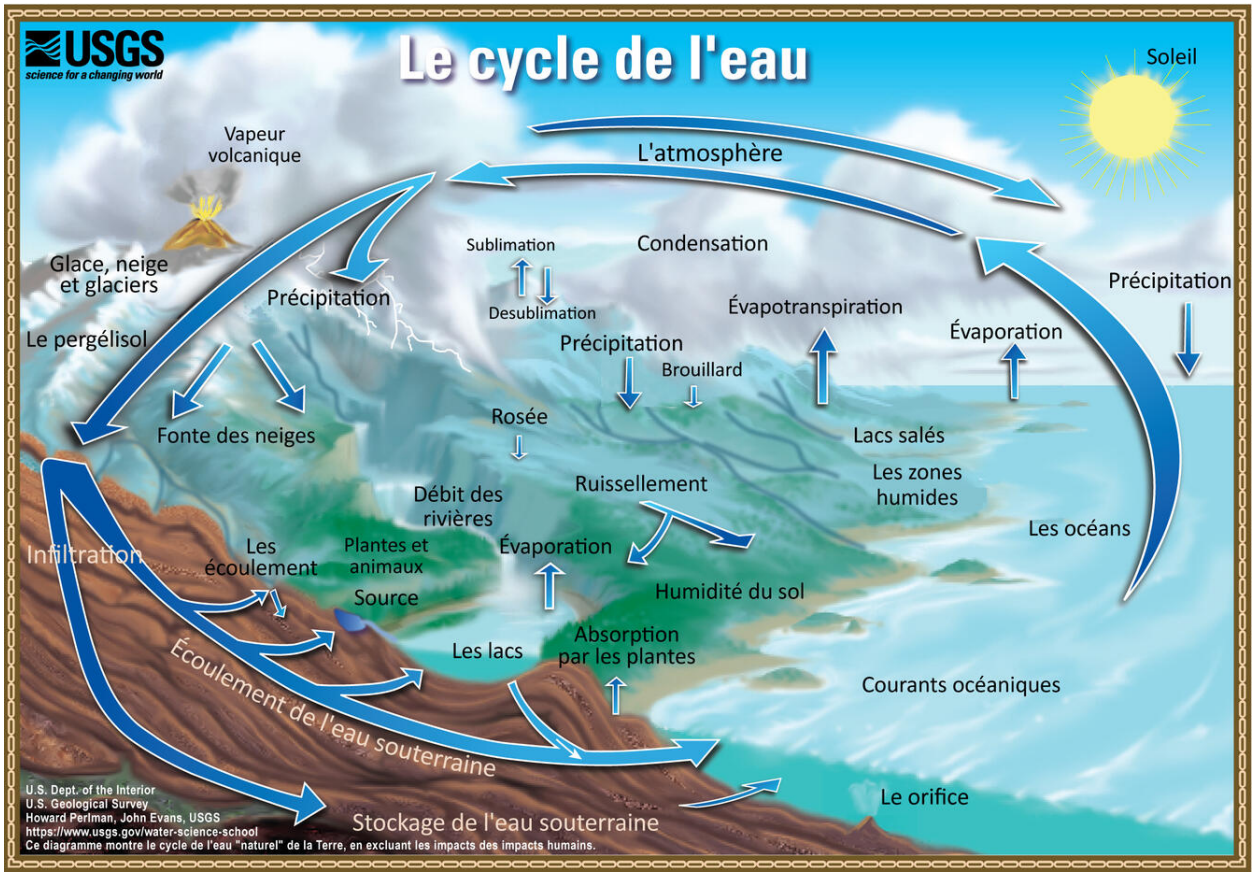


FIGURE I.1 – Cycle de l'eau naturel (PERLMAN et EVANS, 2019)

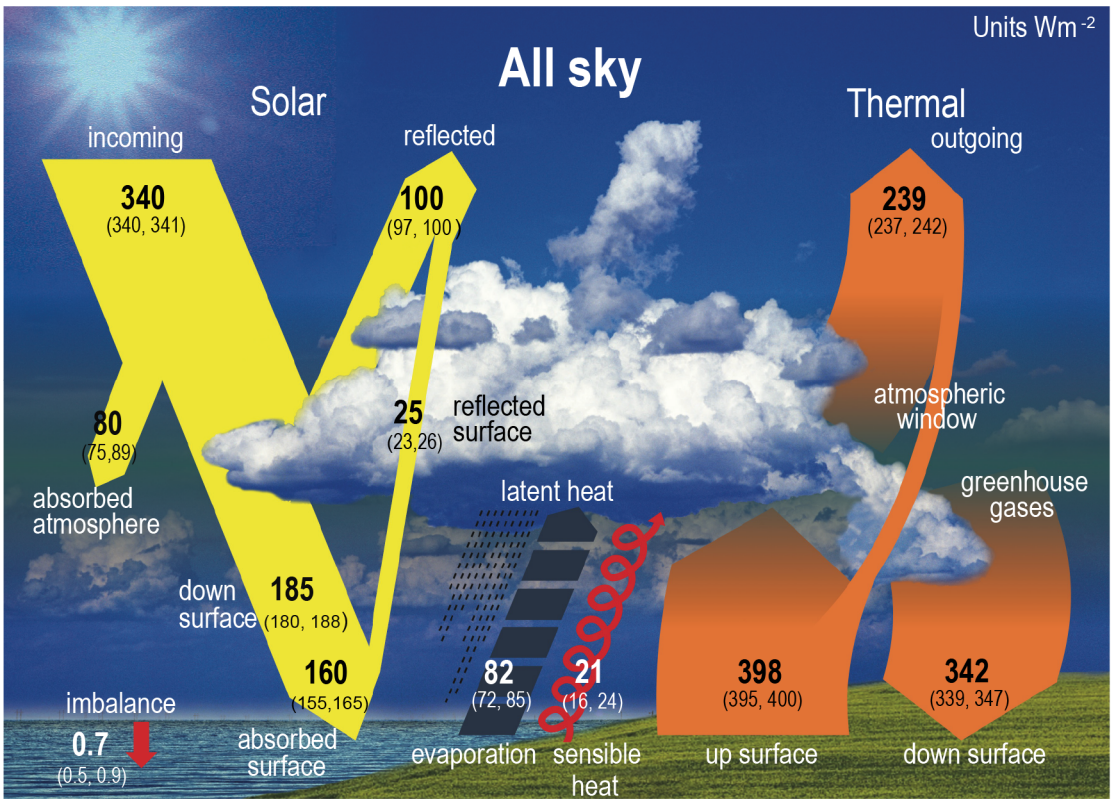


FIGURE I.2 – Représentation schématique du bilan énergétique moyen de la Terre (IPCC, 2021)

Si les processus s'exerçant à la surface de la Terre (transpiration, évaporation, etc.) dépendent du climat, ce dernier climat dépend ainsi également de ces processus, notamment biologiques (SMITH et al., 2023) et hydrologiques (HARTICK et al., 2022), et ce à une échelle relativement locale. Les travaux cités ci-dessus montrent que la déforestation peut entraîner une diminution des précipitations et que les sécheresses peuvent s'autoentretenir. Un schéma simplifié du cycle de l'eau entre différents compartiments terrestres permet notamment d'en illustrer la complexité (Figure I.3). Les précipitations apportent de l'eau à la lithosphère depuis l'atmosphère. Cependant, l'eau de l'atmosphère provient elle-même de la lithosphère, via l'évaporation et la transpiration de la biosphère. De cette façon, la nature de la végétation et des propriétés hydrologiques des sols, via notamment la redistribution spatio-temporelle de l'eau, a une influence *in fine* sur les précipitations et donc sur le climat. Ainsi, la déforestation et l'assèchement des sols peuvent diminuer les apports d'eau à l'atmosphère par transpiration et évaporation. Les processus de transpiration et d'évaporation sont également au cœur de bilans d'énergie complexes influençant des variables physiques telles que la température et le vent. Or, ces variables influencent à leur tour ces processus.

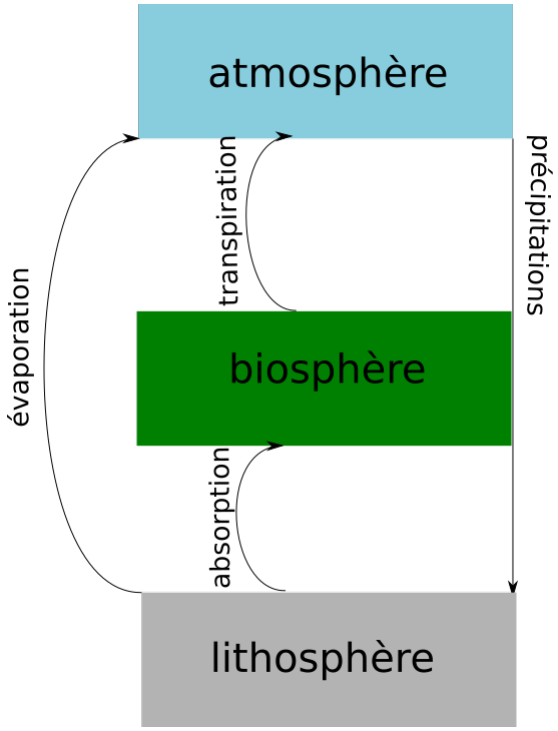


FIGURE I.3 – Interrelations entre différents compartiments terrestres pour le cycle de l'eau

2.1.2 Les influences anthropiques du cycle de l'eau

ABBOTT et al. (2019) encouragent à prendre en compte les influences humaines dans les représentations du cycle de l'eau. En effet, d'après eux, les humains utiliseraient de l'eau douce en quantité équivalente à la moitié des débits des rivières à échelle globale. Cette utilisation inclut les prélèvements dans les masses d'eau souterraines et de surface (eau bleue), mais aussi l'eau du sol évapotranspirée par les cultures (Section I.2.2) et les forêts gérées (eau verte), ou encore l'eau diluant les pollutions humaines (eau grise). Ces influences peuvent donc à la fois modifier le bilan en eau, en rivière, comme en lac ou en nappe et dans les sols, modifier la dynamique des écoulements, et modifier la qualité de l'eau. Ainsi, l'USGS propose une nouvelle représentation du cycle de l'eau (Figure I.4), intégrant les influences humaines dans ce dernier. Cette représentation se distingue donc de la représentation plus ancienne, présentée en Figure I.1.

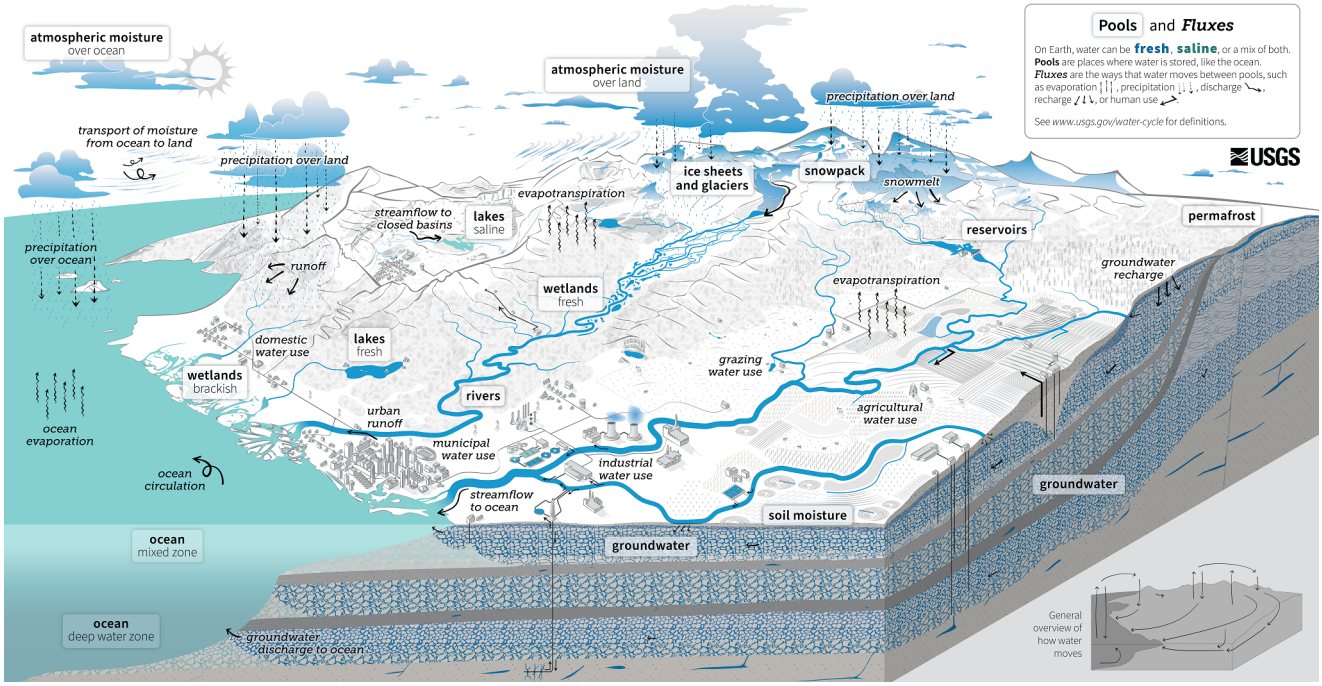


FIGURE I.4 – Cycle de l'eau intégrant les influences humaines (CORSON-DOSCH et al., 2022)

ABBOTT et al. (2019) incluent également dans les influences humaines les impacts du changement climatique sur le cycle de l'eau (nous revenons sur cet aspect dans la Section I.2.4.1). De plus, par la modification de l'occupation des sols (agriculture, artificalisation, gestion forestière), par la canalisation des cours d'eau et l'implantation d'ouvrages hydrauliques, les êtres humains modifient la dynamique spatio-temporelle des écoulements et l'évapotranspiration. Nous détaillons davantage les influences anthropiques sur l'hydrologie dans la Section I.2.3.

2.1.3 Toute eau n'est pas ressource !

Les stocks d'eau sur Terre sont considérables (Section I.2.1.1). Néanmoins, l'eau douce, liquide ou solide, n'en représente qu'une part minime, et la part qui peut être exploitée est encore réduite (ABBOTT et al., 2019). En effet, l'eau peut être trop profonde, ou de trop mauvaise qualité. Les eaux de surface ou en nappe superficielle sont les stocks d'eau les plus facilement accessibles pour les êtres humains.

A ce stade, il est important de distinguer le volume de ces stocks, des débits entrant et sortant, à l'origine de la variabilité de leur volume. La relation entre volume et flux est décrite dans l'Équation I.1, avec V_t et V_{t-1} les volumes stockés dans un compartiment hydrologique, par exemple un tronçon de rivière, t le temps, et $Q_{entrant}$ et $Q_{sortant}$ les débits respectivement entrant dans et sortant du compartiment hydrologique qu'il convient d'intégrer par rapport au temps :

$$V_t = V_{t-1} + \int_{k=t-1}^{t} (Q_{entrant}(k) - Q_{sortant}(k)) \tag{I.1}$$

Certains stocks ont notamment un volume élevé, voire très élevé, par rapport aux débits entrant et sortant. La variabilité de ces stocks est donc faible. C'est notamment le cas des nappes fossiles inexploitées. Une augmentation du débit sortant, pour la consommation humaine par exemple, peut entraîner une diminution, voire un épuisement de ce type de stock à long terme. D'autres stocks ont au contraire un volume faible par rapport aux débits entrant et sortant. C'est notamment le cas des cours d'eau, ou de certaines nappes superficielles à forte conductivité. Les cours d'eau sont ainsi rarement interprétés comme des volumes, mais plutôt directement comme des débits, qui correspondent au volume d'eau qui peut théoriquement être prélevé en une section

d'une rivière par unité de temps. On distingue ainsi les stocks d'eau renouvelable (volumes stockés dans les rivières, part de volume stocké dans les nappes ou les lacs qui est issu d'un débit entrant), des stocks d'eau non renouvelable (volumes "fossile").

On peut également distinguer les stocks d'eau par leur capacité à stocker et à maintenir un volume au-delà d'une période de remplissage. Pour qu'un stock d'eau puisse se constituer et se maintenir sur une certaine durée, un débit sortant inférieur au débit entrant est nécessaire pendant une période de remplissage, et le débit sortant doit être faible devant le volume stocké. Les cours d'eau et certaines nappes à forte conductivité ne voient leur volume augmenter que de façon très ponctuelle, en période de hautes eaux. Au contraire, les lacs et les nappes peuvent se remplir et maintenir un stock élevé au-delà de la période de remplissage.

Ainsi, les rivières et certaines nappes, par leur faible volume rapporté au débit et par leur faible capacité de stockage à long terme, vont présenter des volumes disponibles très faibles à certaines périodes de l'année comparativement aux débits totaux circulant par ces dernières. Les volumes et débits sont de plus inversement corrélés avec une grande partie des usages de l'eau (ANDRÉASSIAN et al., 2015). Il est donc important de préciser que le débit annuel circulant dans une rivière ou dans une nappe ne constitue pas nécessairement une ressource, au sens où cette eau ne pourra pas être exploitée pour la consommation humaine au moment où elle est nécessaire.

Ainsi, l'eau qui ne peut être exploitée, car inatteignable spatialement, ou bien en surabondance ponctuelle par rapport aux usages, ne peut être considérée comme de la ressource en eau. De plus, les êtres humains se doivent de réserver une partie de l'eau aux écosystèmes. On considère alors que cette part, qui résulte d'un objectif de gestion humain, représente une quantité inexploitable et inaccessible, qui ne peut être inclue dans la ressource en eau.

Les êtres humains, avec des aménagements (barrages, canaux, puits, etc.) et des innovations technologiques (dessalement des eaux de mer, traitement de l'eau, etc.) parviennent cependant, non pas à créer de l'eau, mais à créer de la ressource en eau. Ces méthodes rendent en effet de l'eau disponible pour les moments de nécessité (ANDRÉASSIAN et al., 2015). Ces méthodes ont été particulièrement mobilisées pour répondre à la demande en eau agricole (Sections I.2.2.2 et I.2.3.2).

2.2 Qu'est-ce que la demande en eau agricole ?

Dans cette section, nous décrivons dans un premier temps les fonctions de l'eau dans les organismes, et plus particulièrement dans les végétaux. Nous en déduisons ensuite l'importance de l'eau pour l'agriculture et les stratégies d'augmentation de la ressource mises en place par les êtres humains pour satisfaire les usages agricoles. Enfin, nous explicitons la différence entre différentes terminologies décrivant l'utilisation d'eau par l'agriculture et notre choix d'utiliser le mot "demande".

2.2.1 L'eau, molécule fondamentale du vivant

L'eau est essentielle au fonctionnement des êtres vivants. Elle est notamment cruciale pour les végétaux, pour lesquels elle constituerait entre 80 et 95 % de leur masse, quand elle constitue environ 65 % de la masse d'un corps humain (CNRS, 2022). Elle remplit diverses fonctions dans les organismes : solvant et transport de solutés, élimination des excrétions, réactif, thermorégulation, etc.

Un des mécanismes d'utilisation de l'eau par les être vivants est la **transpiration**. Ce processus désigne l'évacuation de l'eau d'un organisme pour l'évaporer, c'est-à-dire transformer de l'eau liquide en vapeur. Cette transpiration permet notamment la thermorégulation : le changement de phase de l'eau permet de consommer l'énergie thermique. Pour les végétaux, cette transpiration sert également à la circulation de la sève brute des racines aux autres organes, par la création d'une différence de potentiel hydrique (Figure I.5).

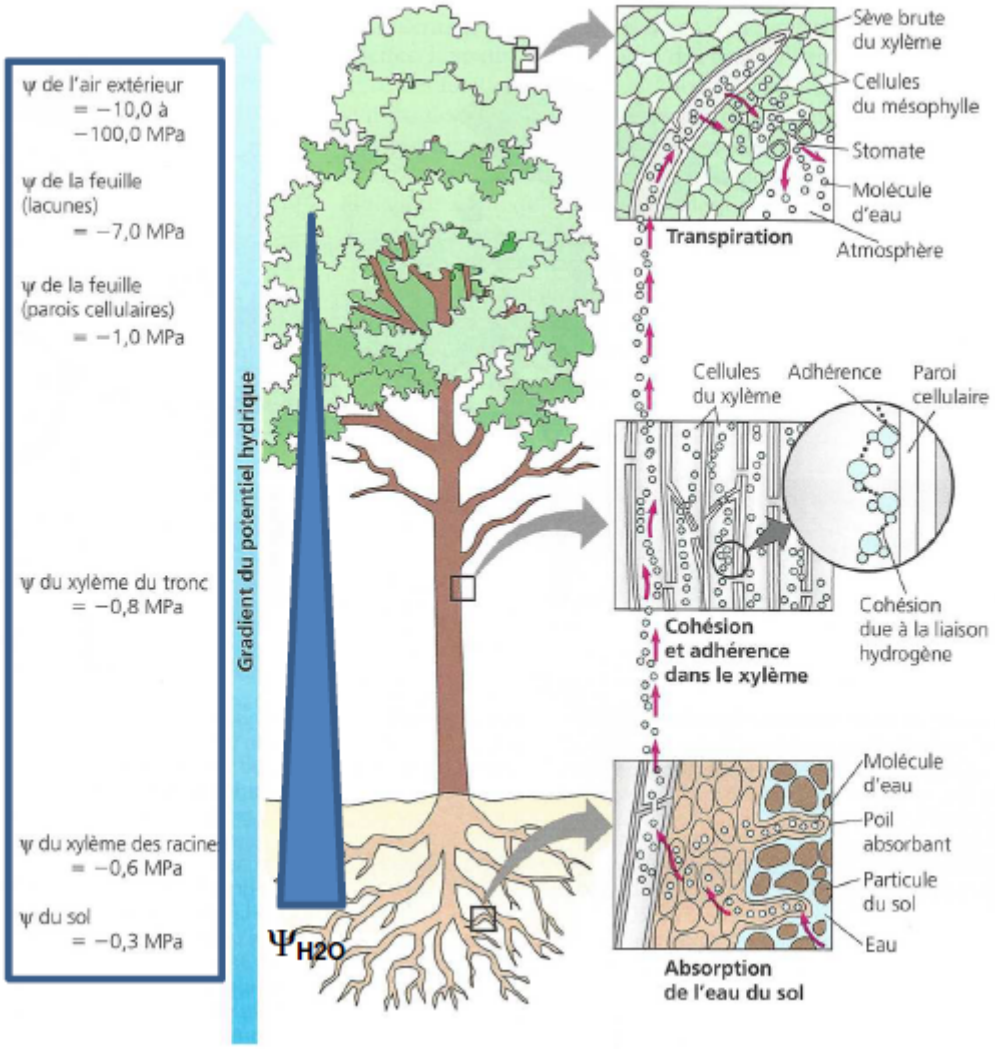


FIGURE I.5 – Colonne d'eau et déplacement de la sève brute liée à la transpiration foliaire par la création d'un potentiel hydrique (Ψ : potentiel hydrique). Source : JEAN (2020), modifié de : CAMPBELL et REECE (2004)

Les végétaux transpirent à travers les stomates, qui sont des pores entourés des cellules parenchymatiques spécialisées. Les stomates sont majoritairement situées sur les feuilles (Figure I.6). L'eau, disponible à l'interface entre la plante et l'atmosphère, peut ainsi être vaporisée.

L'eau transpirée par les végétaux est prélevée par les racines dans le sol. L'eau contenue dans le sol résulte des précipitations sur place et/ou de transferts par ruissellement de surface ou souterrain, et/ou d'apports par irrigation. Cette eau contenue dans le sol peut être perdue par transpiration de la végétation, évaporation, percolation (Figure I.7). Quand l'eau est en quantité insuffisante dans le sol pour satisfaire les besoins en eau des végétaux, ces derniers subissent un stress hydrique impactant leur croissance, voire un flétrissement.

L'évapotranspiration, qui désigne le cumul entre évaporation et transpiration, est ainsi conditionnée (ALLEN et al., 1998) par :

- des grandeurs physiques climatiques, telles que la température de l'air, l'ensoleillement, le vent, le rayonnement incident ou l'humidité relative de l'air. L'évapotranspiration augmente avec la température (OUDIN, 2004) ;
- les caractéristiques des cultures. La transpiration des plantes augmente dans les stades phénologiques de développement, notamment en lien avec l'augmentation de la surface foliaire, et donc du nombre de stomates. De plus, les plantes ont différentes capacités à évapotranspirer, par variabilité génétique ;
- l'humidité du sol, dépendant des apports en eau tels que les précipitations et l'irrigation. En effet, si la réserve en eau du sol n'est pas suffisante, la transpiration diminue, et la plante subit un stress hydrique.

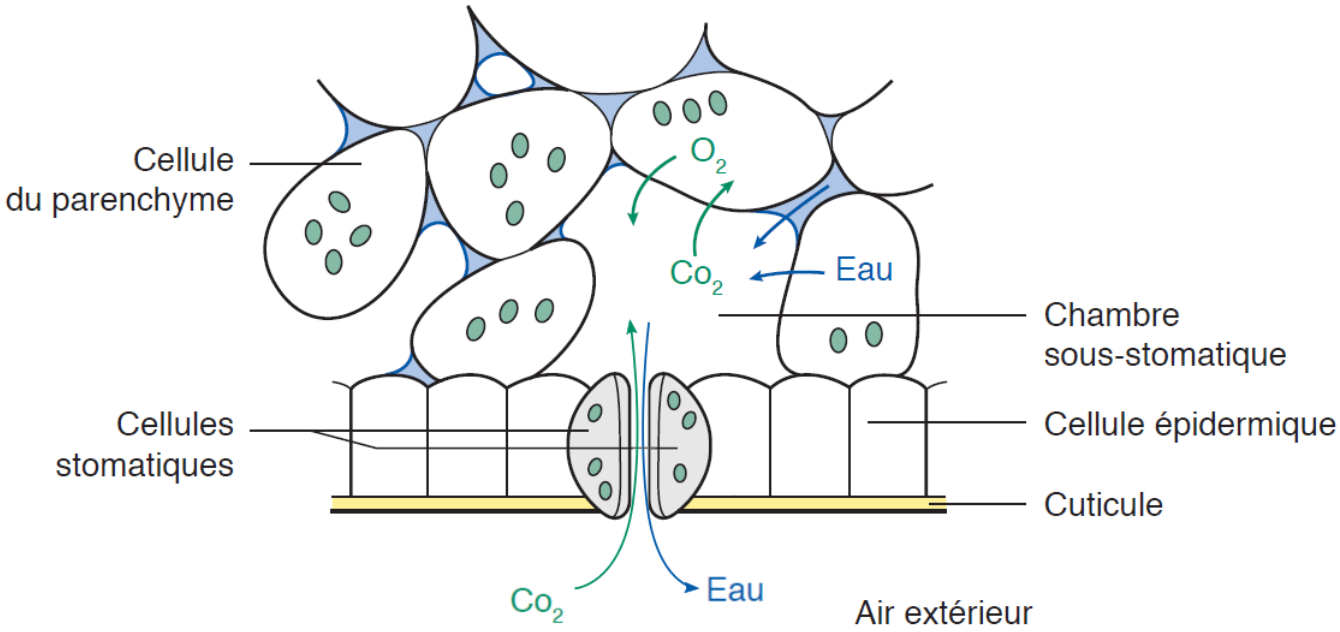


FIGURE I.6 – Échanges gazeux entre la feuille et l'atmosphère. Modifié de : JEAN (2018)

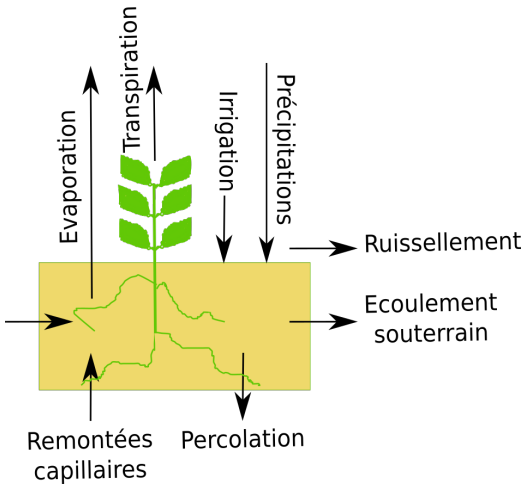


FIGURE I.7 – Bilan en eau au niveau des sols cultivés. Modifié de : ALLEN et al. (1998)

- d'autres grandeurs, qui viennent moduler les grandeurs précédentes. Par exemple :

  ○ la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone CO_2. ALLEN JR. (1990) indique dans une revue de littérature que la transpiration par unité de surface foliaire diminue avec l'augmentation de la concentration en CO_2, mais que par par unité de surface de territoire, l'évapotranspiration n'est que légèrement plus faible, car la surface foliaire totale est augmentée par effet fertilisant du CO_2. Il est donc difficile de prévoir si l'augmentation de la concentration en CO_2 entraîne une hausse ou une diminution de l'évapotranspiration (WADA et al., 2013 ; LEMAITRE-BASSET et al., 2022) ;

  ○ les amendements, qui vont permettre un développement foliaire plus ou moins élevé des cultures, et modifier les propriétés des sols ;

  ○ le cumul des températures. Un plante mature plus rapidement quand il fait chaud, et son cycle de développement est donc plus court. En effet, les plantes sont des organismes ectothermes, c'est-à-dire qui dépendent de sources de chaleur extérieures, contrairement aux organismes endothermes qui produisent leur propre chaleur. Le métabolisme des plantes, notamment les réactions chimiques permettant leur maturation, est donc fortement influencé par la température (SCRANTON et AMARASEKARE, 2017) ;

  ○ etc.

Chez les végétaux, les quantités d'eau stockées et utilisées par le métabolisme sont insignifiantes devant la quantité d'eau consommée par la transpiration. L'eau consommée par les végétaux rejoint donc le cycle de l'eau principalement sous forme de vapeur. Par comparaison, chez les animaux, les pertes en eau sont principalement représentées par les excrétions. L'eau consommée par les animaux rejoint donc principalement le cycle de l'eau sous forme liquide. De plus, chez les animaux, la consommation d'eau est principalement indirecte, à travers leur alimentation (DUMONT et al., 2016).

2.2.2 Eau et agriculture

L'agriculture consiste en la transformation des milieux naturels pour la production de végétaux et d'animaux utiles aux êtres humains. S'il est difficile de dater précisément les débuts d'une volonté de gestion ou d'exploitation de la nature par les êtres humains, l'émergence de sociétés organisées autour de l'agriculture, c'est-à-dire la domestication d'espèces animales et végétales permettant l'alimentation et la production de matériaux, se serait déroulée entre 9 000 et 4 000 avant J.C. dans plusieurs foyers distincts à travers le monde. Le foyer de l'agriculture pour la France métropolitaine se situerait dans le Proche Orient. L'agriculture permet ainsi à l'humanité de subvenir à la plupart de ses besoins alimentaires, ainsi qu'à de nombreux autres besoins (habillement, construction). D'après une étude du CIRAD (BÉLIÈRES et al., 2013), la population active mondiale est ainsi constituée de 40 % d'agriculteurs et la surface agricole représente 38 % des terres continentales (POUCH, 2015). En France métropolitaine, les agriculteurs ne représentent plus que 1,5 % de la population active (CHARDON et al., 2020), mais 80 à 90 % des hommes vivaient uniquement de la terre au XVIIIe siècle (BRAUDEL, 1979), avant la révolution énergétique, et 45 % de la surface actuelle est agricole (COULEAUD et al., 2021). Elle est ainsi de première importance pour les humains et leurs sociétés, mais aussi pour leur environnement.

Comme expliqué en Section I.2.2.1, les êtres vivants, végétaux et animaux, ont besoin d'eau pour leurs fonctions vitales. L'approvisionnement en eau en quantité suffisante pour l'agriculture est ainsi devenu crucial très tôt dans l'histoire de l'humanité. Les végétaux peuvent prélever directement l'eau du sol, et le sol peut être rechargé naturellement de différentes manières. Pour cette raison, l'agriculture s'est souvent implantée dans des secteurs suffisamment approvisionnés en eau. Les Égyptiens de l'Antiquité ont ainsi bénéficié de l'apport naturel d'eau et de fertilisants par les crues du Nil sur ses berges (POSTEL, 1999). En Mésopotamie, région aride alimentée en eau par les fleuves Tigre et Euphrate, l'agriculture se serait d'abord mise en place dans des secteurs naturellement marécageux (POURNELLE, 2013).

Néanmoins, l'agriculture s'est également développée sur des espaces sur lesquels l'humidité du sol au moment où les végétaux en ont besoin n'était pas suffisante pour satisfaire leurs besoins. Les humains ont en effet développé des techniques pour mieux répartir l'eau dans l'espace et dans le temps. L'irrigation s'est ainsi développée conjointement à l'agriculture dans les régions arides, et conjointement à l'avènement des premières civilisations complexes et prospères (JAUBERT DE PASSA, 1846). Il faut néanmoins qu'une eau soit disponible par ailleurs pour être prélevée et apportée au moment voulu sur les végétaux (Section I.2.1.3). L'irrigation résulte ainsi d'un décalage spatial ou temporel entre production d'eau et besoins d'eau pour les cultures (Figure I.8). En effet, prélever dans une rivière pour irriguer des cultures permet de profiter d'une eau tombée sur l'amont d'un bassin versant (BV), plus tôt dans la saison, et de l'apporter à des secteurs qui ne sont pas naturellement approvisionnés par cette rivière. Des canaux ont notamment été mis en place depuis le Nil en Égypte (POSTEL, 1999), depuis le Tigre et l'Euphrate en Mésopotamie (JAUBERT DE PASSA, 1846 ; POURNELLE, 2013), ou encore depuis l'Indus au Pakistan et en Inde (JAUBERT DE PASSA, 1846) pour apporter de l'eau le plus loin possible au-delà des berges dès l'Antiquité. En particulier, le Tigre, l'Euphrate et l'Indus doivent une grande partie de leur débit à la fonte des neiges en montagne, apportant une grande quantité d'eau en zone très aride en aval. Si aucune ressource "naturelle" n'est disponible lorsque les besoins d'irrigation se font sentir, mais que ces ressources sont par ailleurs disponibles à d'autres moments de l'année, il est possible de stocker l'eau dans des ouvrages pour la rendre disponible au moment propice. Des barrages ont ainsi déjà été réalisés plusieurs millénaires avant J.C. en Egypte ou en Syrie (COMITÉ FRANÇAIS DES BARRAGES ET RÉSERVOIRS, 2013). La Syrie, incluse dans la Mésopotamie, est en effet alimentée par l'Euphrate, qui produit de l'eau de façon très concentrée au printemps par fonte des neiges. La mise en place de barrages a ainsi à la fois

permis aux populations de se prémunir des inondations et de valoriser cette eau pour l'irrigation de façon plus homogène au cours de l'année. Enfin, prélever dans un puits permet de prélever une eau tombée éventuellement beaucoup plus loin, et très longtemps auparavant.

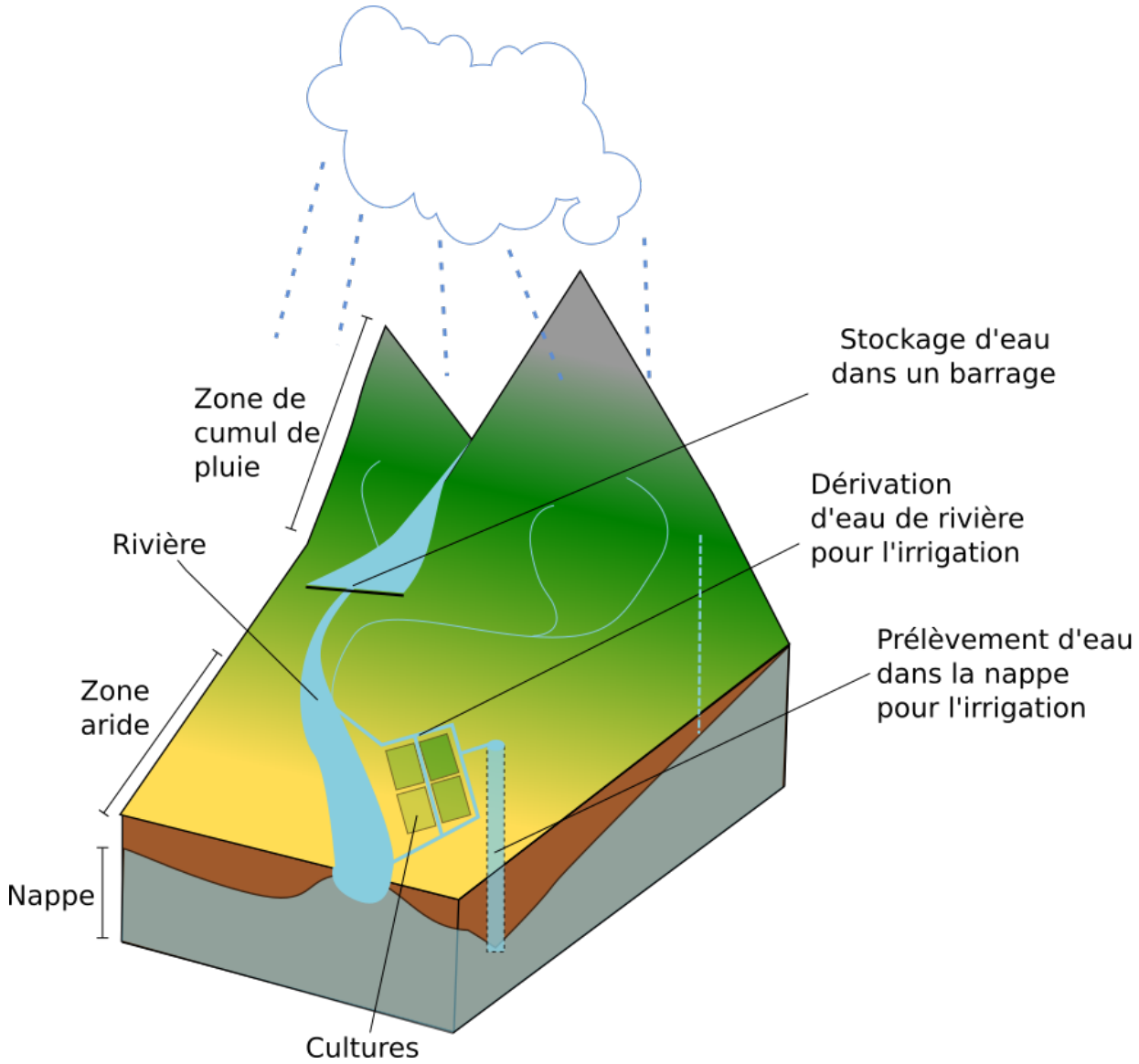


FIGURE I.8 – L'irrigation valorise l'eau produite par un bassin versant (rivière, nappe), mais non naturellement contributive à la réserve en eau des sols cultivés : les précipitations en dehors de la période d'irrigation ou trop concentrées dans le temps peuvent être stockées dans des réservoirs naturels ou artificiels (barrages), ou dans des nappes et consommées ultérieurement ; les précipitations hors zone d'irrigation peuvent être transférées spatialement de façon naturelle, dans les rivières ou les nappes, ou de façon artificielle, dans des canaux ou canalisations, et consommées sur un secteur demandeur.

En France, certaines cultures sont traditionnellement irriguées dans certains secteurs, telles que le riz en Provence. Les surfaces irriguées représentent aujourd'hui 5 % de la surface agricole utile (SAU), et elles sont plantées à 48 % en maïs (AGRESTE, 2010). La Figure I.9 permet d'identifier les principaux bassins de production irrigués : bassin aquitain, Beauce, bassin du Rhône, Plaine d'Alsace. L'irrigation a en effet connu un fort développement au XIXe siècle, lors de la révolution agricole, permettant une hausse de la productivité et une diversification vers des cultures plus rentables.

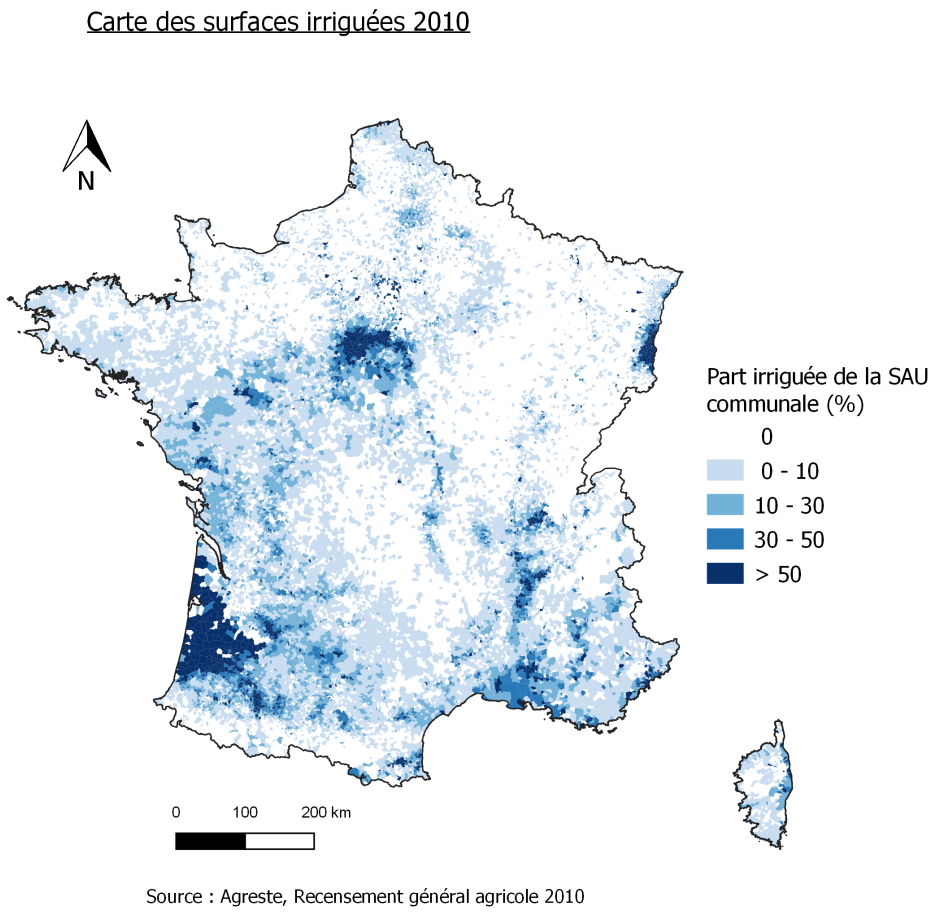


FIGURE I.9 – Part de la SAU irriguée par commune en 2010 (AGRESTE, 2010)

2.2.3 Besoin, demande, prélèvement en eau, etc : quelle différence ?

CALIANNO et al. (2017) ont mis en évidence la diversité de termes liés à l'usage de l'eau et la pluralité des sens de chaque terme selon les études qui les emploient, tout comme CASTANY et MARGAT (1977) avant eux. Nous n'avons pas pour objectif ici de répertorier les différentes définitions qui ont pu être utilisées, mais nous allons uniquement présenter les définitions retenues. Nous pouvons notamment distinguer :

- les besoins en eau des cultures, désignant une demande biologique ;
- la demande en eau, propre à des acteurs, et en dehors de toute contrainte sur la disponibilité de la ressource en eau. Pour l'irrigation, il pourrait par exemple s'agir de l'eau qu'un agriculteur voudrait appliquer sur ses parcelles, ou bien voudrait faire passer par un canal menant à ses parcelles, selon le point dans l'espace défini pour quantifier les prélèvements. Cette grandeur peut approcher la valeur des besoins en eau des cultures, mais peut aussi s'en éloigner si l'agriculteur sur-irrigue ou sous-irrigue ses parcelles. De plus, cette grandeur peut aussi inclure de l'eau qui sera "perdue" lors du transport et de l'application, selon le point de l'espace utilisé pour définir la demande ;
- les prélèvements. Il s'agit de l'eau réellement prélevée par les acteurs sur un point donné. Ceux-ci sont liés à une demande au niveau d'une ressource ou d'un point dans l'espace. Les prélèvements peuvent être inférieurs à la demande car contraints par la ressource en eau disponible et les règles de gestion. Ainsi, si l'on cherche à quantifier les prélèvements pour une ressource en eau donnée, il faut quantifier la demande des agriculteurs au niveau de leur exploitation et la moduler par une estimation des pertes et par l'eau disponible selon des règles de gestion. L'eau perdue lors de la phase de transport et lors de l'application peut ensuite être réintégrée à la ressource.

Le concept de prélèvement ne peut donc s'envisager qu'au regard de la ressource en eau disponible et des règles de gestion. Il nous semble ainsi nécessaire de recourir à un concept intermédiaire, résultant uniquement de l'agronomie, pour ensuite en déduire les prélèvements au regard des autres compartiments des agro-hydrosystèmes. Le concept de besoin en eau d'irrigation nous paraît quant à lui questionnable. D'une part, il traduit en lui-même une certaine subjectivité, puisque la quantité d'eau à apporter à une culture va dépendre des objectifs de production, rejoignant alors le concept de demande. D'autre part, dans un objectif de modélisation intégrée, c'est l'irrigation réellement appliquée qui doit être prise en compte, et celle-ci est le reflet de la demande des acteurs. Nous privilégierons ainsi dans la suite de ce travail le terme de **demande en eau**, qui sera la grandeur que l'on cherchera à représenter.

Comme indiqué plus haut, la demande en eau peut intégrer l'eau "perdue" lors du transport et de l'application. En effet, toute l'eau prélevée dans la ressource ne va pas être finalement transpirée par la culture. Le ratio entre l'eau transpirée par la culture et l'eau prélevée permet de calculer une efficience (Figure I.10). Sans plus de précision, quand nous nous référerons au terme "demande" dans la suite du manuscrit, nous nous référerons à la demande au niveau des parcelles, soit l'eau que les agriculteurs souhaitent appliquer.

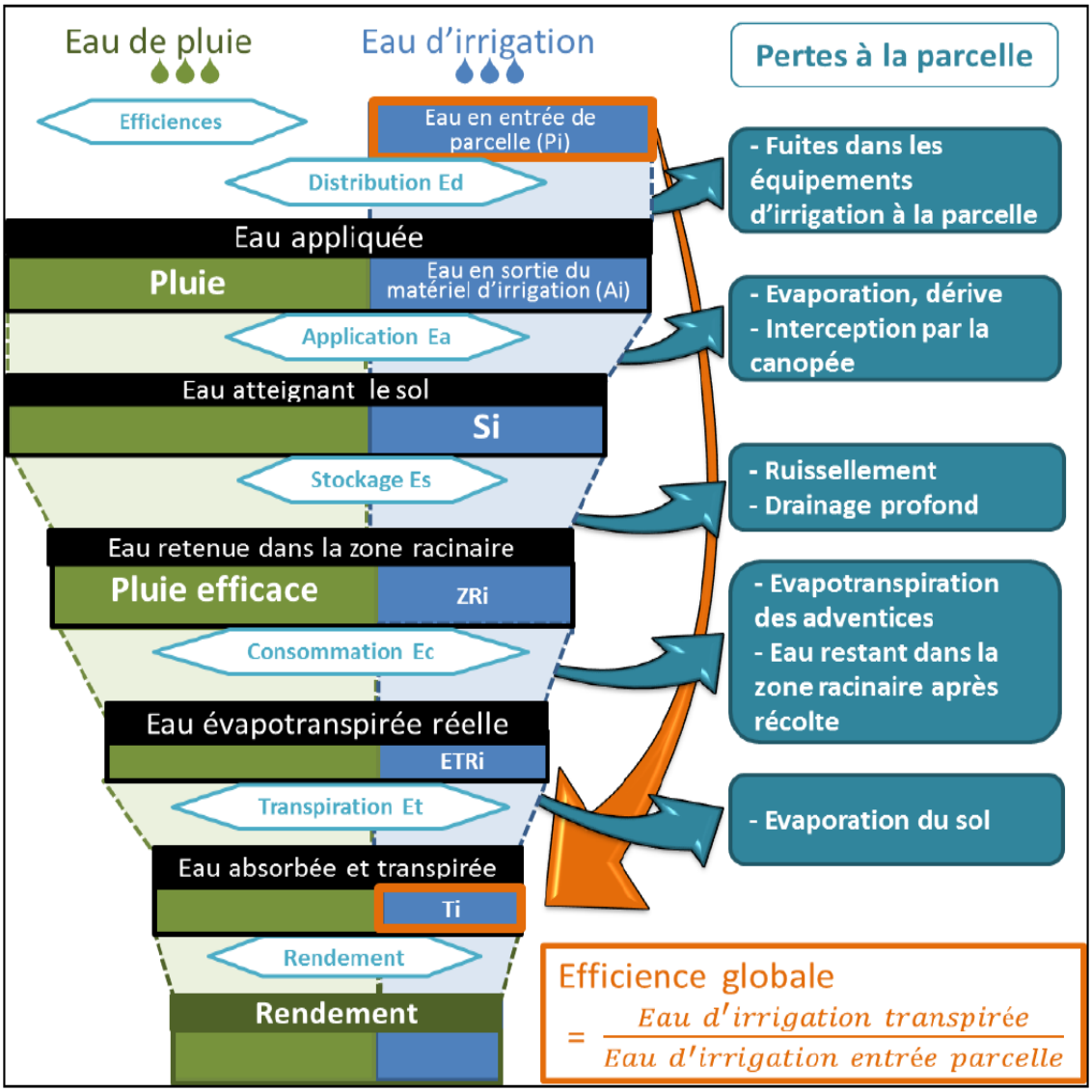


FIGURE I.10 – Etapes du cheminement de l'eau d'irrigation et de pluie à la parcelle, nature des pertes, calcul des efficiences. Source : SERRA-WITTLING et MOLLE (2017)

2.3 Quelles influences humaines ?

2.3.1 Autres demandes en eau et conflits d'usage

Outre la demande en eau pour l'irrigation, on compte d'autres demandes :

- alimentation en eau potable (AEP) : il s'agit de l'eau à apporter aux particuliers. Il s'agit d'eau rendue potable, et qui sera ensuite traitée (assainissement). Elle sert à la boisson, la cuisine, l'hygiène, les sanitaires, l'arrosage des jardins, etc. ;
- industrielle et économique : eau nécessaire à des réactions chimiques en tant que solvant ou réactif, ou pour du refroidissement ou du conditionnement, etc. ;
- navigation ;
- énergie : de l'eau peut être prélevée puis turbinée pour produire de l'électricité (hydroélectricité) ou bien utilisée pour refroidir des centrales thermiques ou nucléaires. La consommation nette peut alors être plus ou moins importante, selon que l'eau soit évaporée ou non ;
- loisirs ;
- abreuvement des cheptels pour l'élevage. On notera que cette demande est agricole, mais ne fera pas l'objet des travaux de cette thèse ;
- environnementale : des objectifs de maintien de débits minimaux sont mis en place pour assurer la pérennité des écosystèmes aquatiques, et les activités humaines qui en dépendent directement (pêche, tourisme) et indirectement (services écosystémiques).

Ces usages peuvent être de plusieurs natures : besoin d'eau in situ, nécessité de prélever et déplacer de l'eau, ou les deux. A l'échelle de la France, les prélèvements sont répartis de la façon présentée dans le Tableau I.1. On voit que les prélèvements pour l'irrigation ne sont pas majoritaires. Mais contrairement aux autres usages, l'eau d'irrigation est transformée en eau vapeur, et ne rejoint pas le milieu naturel sous forme liquide. Ainsi, l'agriculture représenterait en réalité 48 % de la consommation d'eau annuelle nette en France, et 79 % en période estivale (CONSEIL D'ETAT, 2010). Dans de nombreux secteurs, la ressource en eau n'est pas disponible en quantité suffisante pour répondre en toute saison à l'ensemble de ces demandes. Il y a ainsi conflit d'usage.

TABLEAU I.1 – Répartition des prélèvements d'eau par usage en 2019 en milliards de m^3. Source : BNPE

Usage	Volume (10^9 m^3)	Proportion (%)	Proportion hors énergie (%)
Eau turbinée (Hydroélectricité)	650	95,2	-
Autres énergies	16	2,3	-
Eau potable	5,6	0,8	33,1
Canaux	5,2	0,8	30,8
Irrigation	3,2	0,5	18,9
Industriel et économique	2,9	0,4	17,2

2.3.2 Les stratégies d'augmentation de la ressource

Pour faire face à une ressource trop faible pour répondre à toutes ses demandes, des stratégies d'augmentation de la ressource ont été mises en place, notamment pour l'agriculture (Sections I.2.1.3 et I.2.2.2). Nous détaillons ici plus en détail la nature des aménagements et méthodes qui peuvent être mis en place et ayant des impacts sur l'hydrologie.

Premièrement, des aménagements ont été créés pour déplacer de l'eau depuis des secteurs "surabondants" en eau vers des secteurs de demande, conduisant à des transferts interbassins (aqueducs, canaux, canalisations souterraines, etc.). De plus, des moyens ont été mobilisés pour exploiter de l'eau souterraine, remise de ce fait en surface. Enfin, des ouvrages de stockage ont été mis en place. Stocker de l'eau possède néanmoins inévitablement un coût en eau. En particulier, de l'eau est "perdue" par évaporation. La présence d'ouvrages de stockage réduit donc le débit moyen en rivière (HABETS et al., 2018). Ils constituent cependant une alternative

aux prélèvements directement dans les rivières et les nappes en période de basses eaux, et peuvent même servir à effectuer du soutien d'étiage. De ce fait, ils peuvent donc limiter l'impact des activités humaines sur les étiages. Ce stockage peut prendre plusieurs formes (Figure I.11, CARLUER et al., 2016) :

- selon la taille de l'ouvrage : les très grands ouvrages sont plutôt exploités à des fins collectives et parfois multi-usages, au contraire de petits plans d'eau disséminés spatialement, plutôt destinés à une valorisation individuelle ;
- selon le ou les usages ;
- selon le mode de remplissage et la source prélevée : pompage en nappe ou rivière (réserves), remplissage passif par une nappe de surface, par ruissellement de surface au niveau d'un cours d'eau (barrage) ou en dérivation d'un cours d'eau, ou non (retenue collinaire).

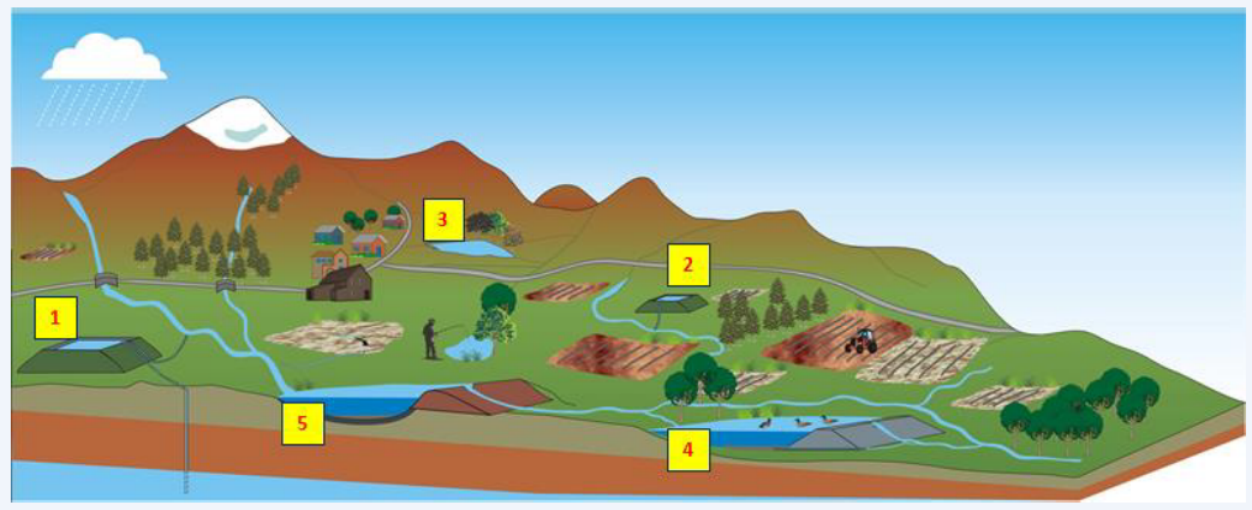


FIGURE I.11 – Distinction des retenues selon leur emplacement et leur type d'alimentation. 1. Réserve alimentée par pompage dans la nappe. 2. Réserve alimentée par pompage dans la rivière. 3. Retenue collinaire. Ces retenues sont alimentées par ruissellement et normalement déconnectées du réseau hydrographique. 4. Retenue en dérivation. Une telle retenue peut être alimentée gravitairement ou par pompage dans la rivière. 5. Retenue en barrage. Ce type de retenue est situé sur un cours d'eau. Source : CARLUER et al. (2016)

D'autres stratégies d'augmentation de la ressource peuvent encore être évoquées, telles que la réutilisation des eaux usées traitées (GOUVERNEMENT, 2023) et le dessalement d'eau de mer. Les eaux usées traitées rejoignent habituellement le milieu naturel sous forme liquide, et constituent de nouveau de la ressource disponible pour les usages humains et écosystémiques. Les mobiliser pour l'irrigation paraît constituer une stratégie permettant des économies de traitement de l'eau (car il n'est pas nécessaire de la rendre potable) et de valoriser les nutriments des eaux usées pour fertiliser les parcelles agricoles, mais est équivalent d'un point de vue hydrologique à un prélèvement en rivière dont le volume aurait inclus le retour d'eau usée traitée. Cette stratégie peut être pertinente en zone côtière d'un point de vue quantitatif, où l'eau traitée restituée au milieu rejoint directement (ou très rapidement) la mer et ne serait donc plus mobilisable. Le dessalement d'eau de mer n'est pertinent que pour les zones côtières et particulièrement arides, car il est coûteux.

2.3.3 Le partage de l'eau

Malgré les stratégies d'augmentation de la ressource, cette dernière peut ne pas toujours suffire. Dans ces conditions, des règles de partage de l'eau sont généralement mises en place. En France, de multiples outils ont ainsi été développés pour mieux maîtriser les usages de l'eau (Figure I.12). Ils résultent en partie de directives européennes s'appliquant à l'ensemble des pays membres de l'Union Européenne. La gouvernance de l'eau française, construite de façon itérative, fait aujourd'hui intervenir une multitude d'acteurs et de dispositifs intervenant à différentes échelles de gestion, la rendant particulièrement complexe (Figure I.12). Nous pouvons

retenir que trois types de stratégies peuvent être mises en place pour résoudre un déséquilibre entre ressource et demande :

- **planification :** il s'agit d'orienter les stratégies en termes d'augmentation de la ressource, de réduction de la demande, de recours à de nouvelles règles de partage. On peut notamment y inclure les plans d'adaptation au changement climatique produits par les Agences de l'eau des grands bassins hydrographiques de France, ou encore le SRADDET (Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires) produit à l'échelle de la région, le SDAGE (Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux) produit par le comité de bassin ;
- **allocation des prélèvements :** il s'agit de quantifier les volumes a priori prélevables pour chaque demande, d'autoriser ainsi des prélèvements, de définir des règles de répartition spatiale et temporelle entre les différents usagers, et de définir d'éventuels compromis. Les outils mobilisés sont alors les SAGE (Schémas d'aménagement et de gestion des eaux), élaborés par les commissions locales de l'eau, ou encore les PTGE (Projets de territoire pour la gestion de l'eau). Cette politique s'accompagne également de la mise en place d'une comptabilité de l'eau et de contrôles, afin de s'assurer que les prélèvements ne dépassent pas les autorisations et pour collecter les redevances sur l'eau auprès des préleveurs ;
- **réactions face aux sécheresses :** malgré l'allocation des prélèvements qui constitue déjà une restriction, il faut, en cas de crise, limiter les prélèvements. La gravité de la sécheresse dépend des débits atteints à des stations hydrométriques et piézométriques indicatrices. Selon les valeurs atteintes à ces stations, des restrictions progressives sont mises en place. Des ordres de priorité peuvent ainsi être définis selon les usages, et des restrictions voire des interdictions peuvent être appliquées par rapport aux prélèvements a priori autorisés. Ces restrictions sont effectuées par arrêtés des préfets départementaux. Généralement, de tels arrêtés sont réalisés hebdomadairement, en considérant le VCN3 de la semaine précédente et en le comparant à des débits seuils. Si le VCN3 passe en-deçà d'un débit seuil pouvant générer une restriction, le préfet, au regard de multiples contraintes et intérêts, peut ou non appliquer un niveau de restriction. Les seuils de restriction peuvent notamment conduire à interdire l'irrigation certains jours sur certains secteurs, ou à appliquer des pourcentages de restriction par rapport à des débits maximaux autorisés. En cas d'étiage très sévère, correspondant à un état de crise renforcée, l'irrigation peut être totalement interdite.

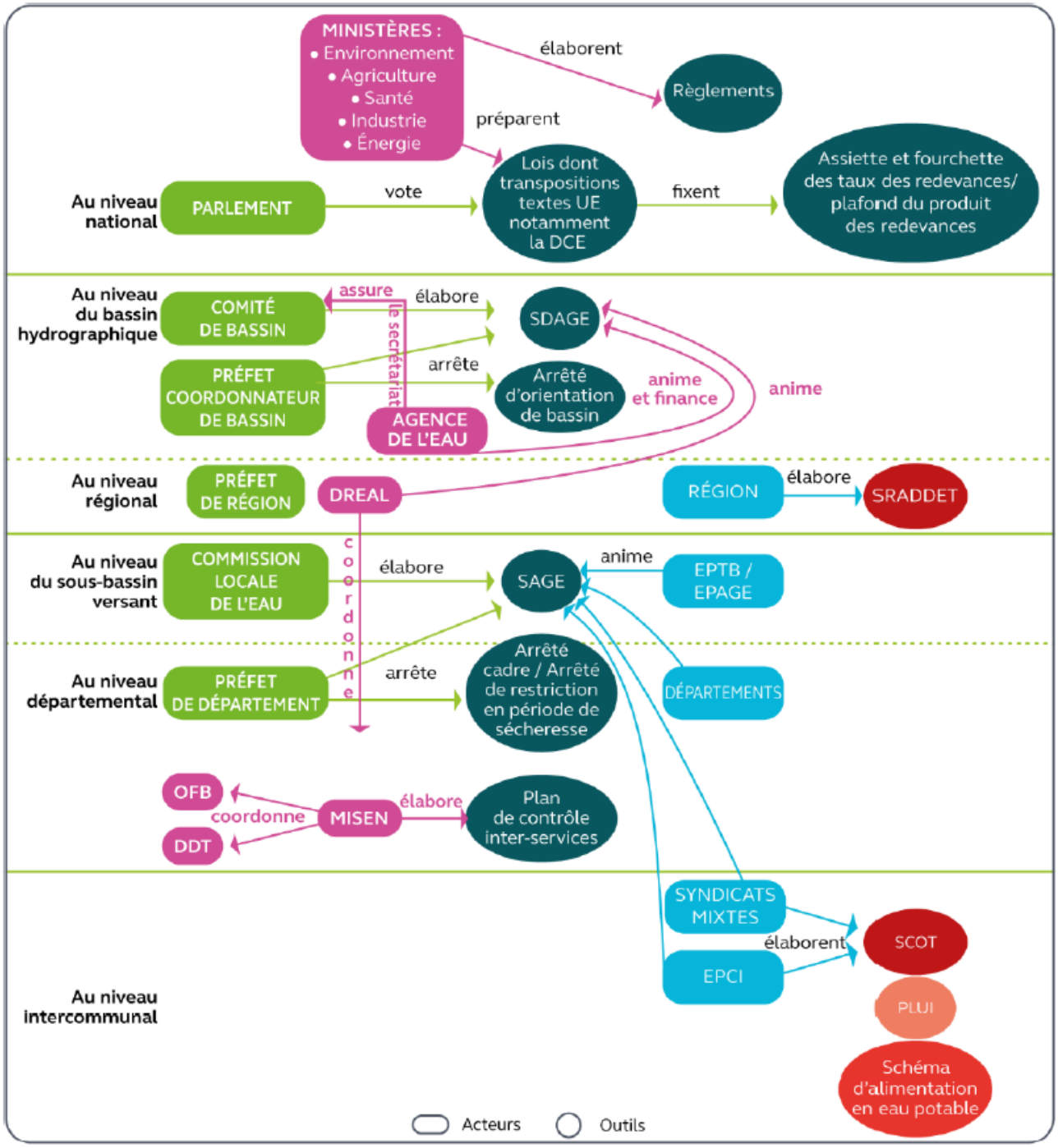


FIGURE I.12 – Acteurs et outils de la gouvernance de l'eau en France. Source : COUR DES COMPTES (2023)

2.4 Quels impacts du changement global ?

2.4.1 Les impacts du changement climatique sur les agro-hydrosystèmes

Nous récapitulons les impacts du changement climatique sur les agro-hydrosystèmes dans la Figure I.13. L'élévation de la concentration en gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère a pour conséquence une élévation de la température de l'air, menant à une hausse de l'évapotranspiration. Les conséquences sur les précipitations sont plus incertaines, et variables selon les régions du globe. En effet, une augmentation de la température décale l'équilibre liquide-vapeur, et l'eau liquide peut davantage être transformée en vapeur, asséchant la surface de la Terre. Néanmoins, une atmosphère plus humide peut entraîner davantage de précipitations. Ainsi, dans certaines régions du globe, une hausse des précipitations pourrait contrebalancer la plus forte évapotranspiration (KONZMANN et al., 2013).

En France, les projections climatiques (MÉTÉO-FRANCE, 2020 ; IPCC, 2021) indiquent une hausse nette des températures de l'air au cours du XXIe siècle pour les trois scénarios radiatifs modélisés (RCP 2.6, 4.5, 8.5) par rapport à la période de référence 1976-2005. La hausse des températures sera plus importante dans le Sud-Est que dans le Nord-Ouest de la France. Jusqu'en 2040, les projections sont assez semblables, elles divergent à plus long terme. Cette évolution s'accompagne d'une évapotranspiration plus importante. L'évolution des précipitations est plus incertaine, avec des projections montrant des évolutions principalement non significatives à échelle nationale. Le Sud de la France sera cependant confronté à une baisse des précipitations annuelles. Le Nord Est est une zone sur laquelle l'évolution des précipitations annuelles sera plus incertaine. Dans le détail, ces évolutions de précipitations s'accompagneront de précipitations estivales en diminution très probable, et de précipitations hivernales en hausse.

On peut donc s'attendre à une diminution de la ressource en eau en période estivale (Figure I.14), à moins de développer des stratégies permettant de la renforcer. On peut parallèlement s'attendre à une aridification des sols agricoles en période estivale. La demande en eau d'irrigation, consistant à apporter de l'eau pour compenser le déficit hydrique des sols agricoles, pourrait donc augmenter, à moins de mettre en place des cultures capables de supporter cette aridification.

D'autres effets du changement climatique sont à prévoir, venant potentiellement nuancer les éléments indiqués plus faut. Comme précisé en Section I.2.2.1, la concentration atmosphérique plus élevée en CO_2 pourrait mener à une diminution de l'évapotranspiration (LEMAITRE-BASSET et al., 2022), compensant au moins en partie les impacts du stress hydrique sur les rendements (KONZMANN et al., 2013 ; BOURAS et al., 2019). Au contraire, l'effet fertilisant du CO_2 pourrait favoriser le développement de la surface foliaire et donc mener à une augmentation de la demande évaporative.

L'élévation des températures pourrait par ailleurs accélérer les cycles de développement des cultures, et entraîner un décalage des périodes de demande en eau agricole. En effet, les études sur l'impact du changement climatique sur l'agriculture montrent une forte influence sur la temporalité des cultures au regard de la température (BRISSON et LEVRAULT, 2010 ; MIRA DE ORDUÑA, 2010 ; SCRANTON et AMARASEKARE, 2017 ; FUNES et al., 2021 ; VITASSE et al., 2022). Certains des travaux questionnant l'impact du réchauffement sur la végétation se sont appuyés sur des observations. L'avancement des dates de vendanges (MIRA DE ORDUÑA, 2010), ainsi que l'avancement de la floraison des cerisiers japonais (VITASSE et al., 2022), en sont des exemples emblématiques. D'autres travaux s'appuient sur des modèles et des projections en contexte de changement climatique (BRISSON et LEVRAULT, 2010 ; FUNES et al., 2021) afin d'estimer l'évolution de la phénologie des cultures dans le futur. Ces travaux montrent globalement un impact très fort du changement climatique sur la temporalité des cultures. Dans le livre vert du projet CLIMATOR (BRISSON et LEVRAULT, 2010), on lit ainsi que les dates de récolte du maïs pourraient être avancées de 26 jours en moyenne à Colmar dans le futur proche (FP, 2020-2049), et jusqu'à 39 jours dans un futur lointain (FL,2070-2099), par rapport à la période de référence (1970-1999).

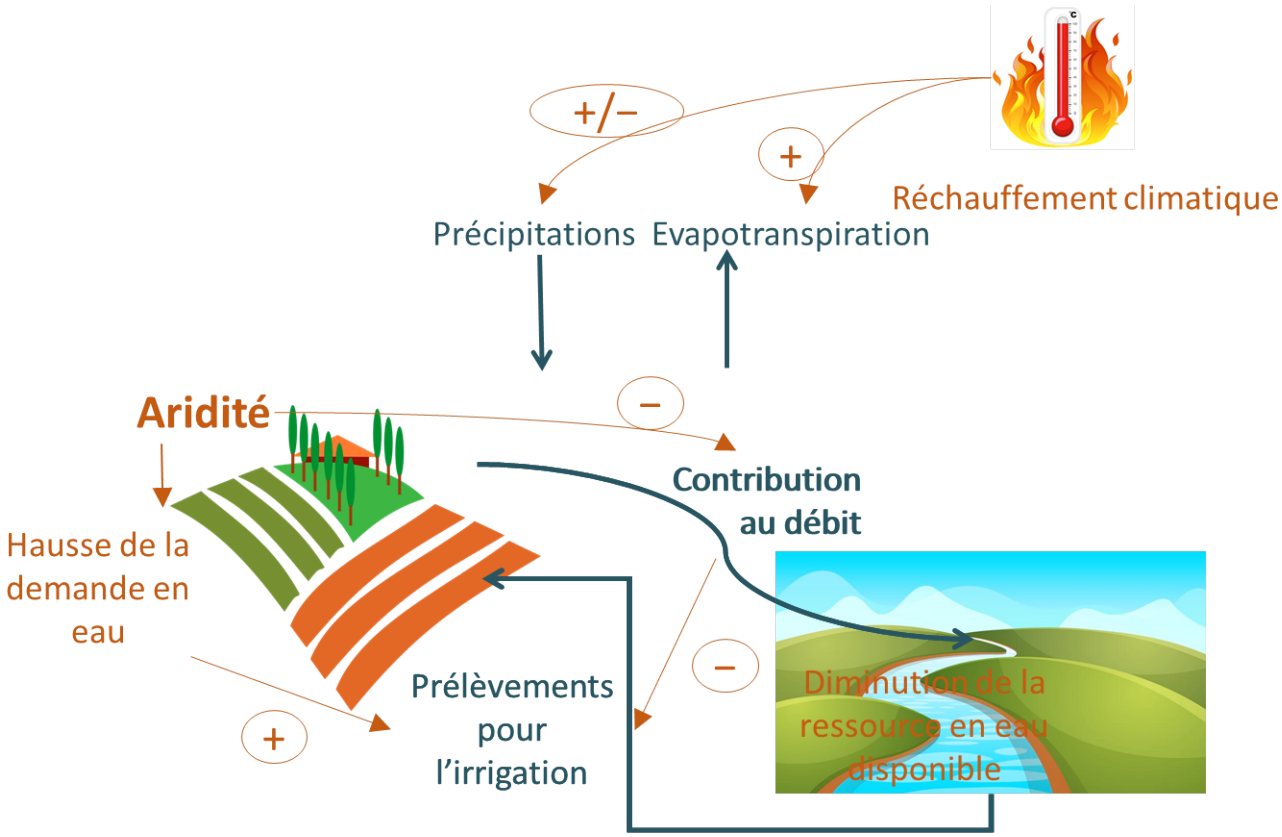


FIGURE I.13 – Les impacts du changement climatique sur les bilans en eau des agro-hydrosystèmes. Nous faisons apparaître en bleu les flux d'eau à l'équilibre dans les agro-hydrosystèmes entre production de la ressource et prélèvements. En orange, nous faisons apparaître les perturbations induites par le réchauffement climatique, avec pour conséquence la diminution de la ressource en eau parallèlement à une augmentation de la demande en eau

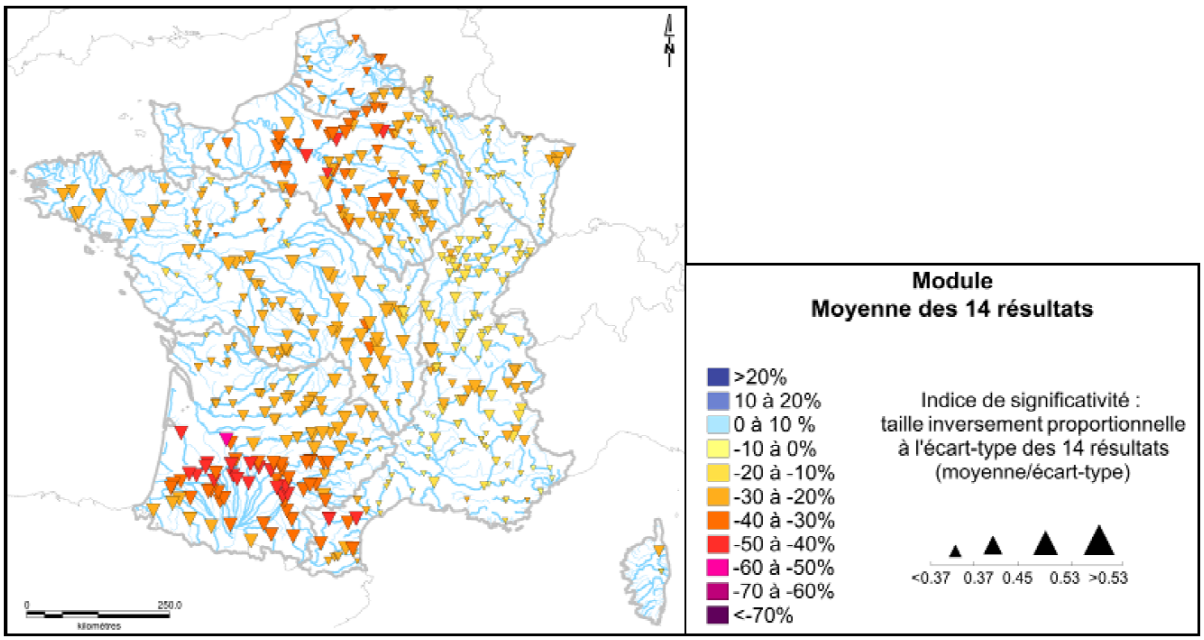


FIGURE I.14 – Evolutions relatives possibles (en %) du débit moyen annuel entre 1961-1990 et 2045-2065 pour 2 modèles hydrologiques x 7 modèles climatiques. La couleur des triangles est fonction de l'intensité du changement et la taille des triangles est liée à la convergence des 14 simulations (CHAUVEAU et al., 2013))

2.4.2 Les impacts des changements anthropiques

Outre le changement climatique, qui découle de changements anthropiques tels que la révolution industrielle, d'autres changements dans la société et dans les pratiques ont perturbé les bilans en eau des agro-hydrosystèmes et devraient les modifier dans le futur. Nous avons évoqué en Section I.2.2.2 l'importance de la révolution agricole dans le développement de l'irrigation et de la mise en place d'ouvrages de stockage et de transport d'eau associés. La plupart des usages évoqués précédemment s'est en réalité développée récemment à l'échelle de l'histoire des agro-hydrosystèmes. En répercussion de nouveaux usages (irrigation, refroidissement, nouvelles technologies nécessitant de l'eau, etc.), éventuellement non encore anticipés et éventuellement en répercussion du changement climatique, il est très vraisemblable que le cycle de l'eau soit de nouveau modifié dans le futur. Cette modification mènera vraisemblablement vers une pression sur l'eau accrue. Elle pourrait cependant être accompagnée par une plus grande sobriété des usages de l'eau.

2.5 Conclusion sur les agro-hydrosystèmes

A l'issue de cette description des agro-hydrosystèmes et des implications du changement global sur ces derniers, nous disposons d'un panorama assez exhaustif des différents compartiments physiques et anthropiques et des relations entre ces derniers intervenant dans la construction et l'évaluation de stratégies d'adaptation de l'agriculture au changement climatique au regard de la ressource en eau. On y inclut (Figure I.15) :

- le climat, qui va déterminer l'apport d'eau sous forme de précipitations et la demande évaporative de l'atmosphère, influençant les débits, nappes et diverses retenues, ainsi que la satisfaction hydrique des cultures ;
- l'hydrologie, qui permet les transferts spatio-temporels de l'eau jusqu'aux nappes et océans, disponible ou non pour être prélevée par les êtres humains et/ou évaporée vers l'atmosphère, et remplissant différentes fonctions écologiques ;
- l'agronomie, qui caractérise les sols agricoles qui vont évaporer en partie vers l'atmosphère l'eau du sol apportée par la pluie et l'irrigation, et laisser l'eau percoler et ruisseler vers d'autres milieux, et qui répond à des objectifs humains de production ;
- la société, qui influe directement sur l'hydrologie et l'agronomie via des objectifs et règles de gestion (objectifs de maintien de débits dans les cours d'eau, objectifs de rendements agricoles, etc.) ainsi que des aménagements (barrages, etc.). La société influe également à plus long terme, notamment sur le climat avec les émissions de gaz à effet de serre qui pourront différer selon les évolutions sociétales et les objectifs d'atténuation, mais aussi en réaction au changement climatique, via l'adaptation (nouveaux aménagements hydrauliques, modification des cultures, etc.).
- autres compartiments : d'autres compartiments peuvent en réalité interagir avec les compartiments cités (biodiversité, santé, etc.). Nous considérons dès maintenant que ces compartiments ne pourront pas être modélisés explicitement dans le cadre de cette thèse. Ils peuvent néanmoins être indirectement pris en compte dans le compartiment société, cette dernière pouvant mettre en place des actions en lien avec ces autres compartiments.

Dans le second chapitre de cette introduction, nous allons établir un état des lieux des méthodes permettant d'étudier chacun de ces compartiments, ainsi que les relations entre ces différents compartiments, afin de préciser nos questions de recherche.

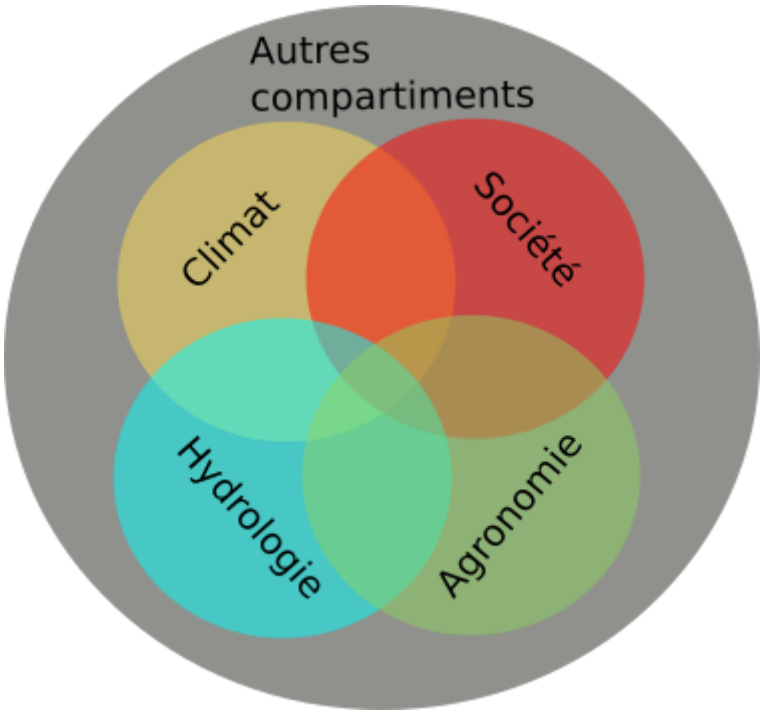


FIGURE I.15 – Compartiments à intégrer dans une étude des agro-hydrosystèmes en contexte de changement climatique

A retenir :

L'agriculture est dépendante à l'eau, apportée par les précipitations et/ou par l'irrigation. Les débits sont en retour influencés par les êtres humains, et notamment par l'agriculture, qui détermine l'évapotranspiration, et les prélèvements d'irrigation. Les êtres humains ont développé des stratégies d'augmentation de la ressource et de partage de l'eau.

Le climat influence à la fois les débits et la demande en eau d'irrigation. La matérialisation du changement climatique met ainsi en évidence la nécessité de mettre en place des stratégies d'adaptation et de production de méthodes et de connaissances pour y parvenir.

Chapitre II

État de l'art sur les approches intégrées pour l'adaptation

Avant-propos :

Dans le chapitre I, nous avons décrit le contexte expliquant l'intérêt pour la thématique de la thèse, portant sur l'eau, l'agriculture et le changement climatique. Nous avons également décrit les processus et compartiments naturels et anthropiques agissant sur le bilan en eau d'un agro-hydrosystème.

Dans ce chapitre, nous allons décrire les méthodes permettant de caractériser et de projeter l'évolution des différents compartiments intervenant dans les agro-hydrosystèmes, pour construire et évaluer des stratégies d'adaptation. Enfin, nous détaillerons les objectifs de cette thèse.

1 Qu'attend-on des approches intégrées ?

1.1 De l'utilité des approches intégrées

Selon le sujet étudié et les objectifs visés, une modélisation dite "intégrée" peut prendre bien des formes différentes. Il paraît dès lors vain de définir ce qu'est un modèle intégré en cherchant à lister exhaustivement les processus à prendre en compte dans celui-ci, et on préférera plutôt définir la modélisation intégrée par la nature des objectifs poursuivis lorsqu'on développe une telle approche. MENSINK (2007) indique ainsi que les objectifs de la modélisation intégrée sont de "connecter les modèles les uns aux autres dans un objectif commun" [1], pour "aider les décisionnaires" [2]. Il ajoute que pour que le développement d'une approche intégrée soit ainsi justifié, il faut que l'approche :

- "ait une plus-value par rapport à une approche mono-disciplinaire ;
- fournisse des informations utiles aux décisionnaires." [3]

En ce qui concerne la construction et l'évaluation des stratégies d'adaptation de l'agriculture au changement climatique au regard de la ressource en eau, une approche intégrée paraît extrêmement pertinente. En effet, les interactions sont très fortes entre société (émissions de gaz à effet de serre, alimentation, objectifs économiques, agriculture, usages de l'eau, aspirations et croyances...), hydrosystèmes et climat (Section I.2.4). SAVENIJE et HRACHOWITZ (2017) expliquent ainsi que "les modèles hydrologiques à l'échelle de bassins versants passent

1. traduit de :"Models connected to each other with a common objective"
2. traduit de : "support decision makers"
3. traduit de : "(i) it should have added value compared to single disciplinary assessment, and (ii) it should provide useful information to decision makers" "

généralement à côté des caractéristiques essentielles déterminant le fonctionnement des bassins versants" [4]. En effet, dans un contexte stationnaire, ou pour lequel nous disposerions d'observations, nous nous contentons souvent d'approches "mono-disciplinaires", ou "mono-modèles", celles-ci ayant pu être bien calibrées et évaluées. Certains modèles, en ajustant leurs paramètres par rapport à des observations, permettent de prendre en compte implicitement les processus complexes des bassins versants. Dans le cas d'une application pour un futur incertain, il semble important, voire indispensable, de bien identifier les facteurs explicatifs des modèles pour prendre en compte leurs potentielles évolutions. Les facteurs explicatifs vont en effet potentiellement évoluer, mettant en péril l'hypothèse de stationnarité des modèles.

SAVENIJE et HRACHOWITZ (2017) exhortent notamment à intégrer la modélisation de la biosphère dans la modélisation hydrologique. Le facteur humain, partie intégrante de la biosphère et moteur du changement global, paraît notamment extrêmement déterminant dans le fonctionnement actuel des hydrosystèmes (NAZEMI et WHEATER, 2015 ; ABBOTT et al., 2019). Les modèles calibrés prenant en compte implicitement les facteurs explicatifs tels que les influences humaines pourraient en effet manquer de robustesse dans un contexte de changement global. Par exemple, si l'irrigation se développe sur un bassin versant en réaction au changement climatique, on pourra se demander si le modèle hydrologique mis en place sur ce bassin versant et calibré sur la période passée sans irrigation fournira toujours des simulations réalistes. Pour de nombreux modélisateurs travaillant sur des compartiments influencés par les activités humaines, ou par le climat, la modélisation intégrée constitue donc un objectif prioritaire de recherche dans un contexte de changement global. Il s'agit d'ailleurs de l'objet de la décade de recherche de l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques (AISH) qui s'est terminée en 2022, Panta Rhei (KREIBICH et al., 2016). De plus, plusieurs des 23 UPH (Unsolved Problems in Hydrology) concernent ce sujet, comme les UPHs 19, 20 et 22, et dans une moindre mesure 4, 18 et 21 (BLÖSCHL et al., 2019). On parlera alors d' "hydrologie de l'Anthropocène", ou encore de la "modélisation du cycle de l'eau anthropisé" (Section I.2.1.2, VIDAL, 2019).

De plus, construire et évaluer des stratégies d'adaptation au regard de la ressource en eau nécessite de prendre en compte de multiples indicateurs, notamment hydrologiques, au regard des impacts écologiques, mais aussi agronomiques. Il paraît ainsi important de prendre en compte à la fois l'impact des prélèvements sur les débits et l'impact de la limitation de la ressource en eau disponible sur la viabilité des usages qui en dépendent, notamment l'irrigation (WINTER et al., 2017). Il est alors nécessaire d'effectuer un réel couplage de modèles (i.e. incluant des rétro-actions). Une approche intégrée doit ainsi permettre de rendre la modélisation plus robuste et informative en contexte de changement climatique, et de disposer de davantage d'indicateurs d'impact permettant une évaluation plus complète de stratégies d'adaptation.

1.2 Les méthodes à mobiliser dans une approche intégrée

Dans les approches intégrées, il est particulièrement utile de mettre en place des modèles pour :

- simuler les variables d'intérêt relatives aux différents compartiments étudiés, et en déduire des indicateurs d'impact pertinents ;
- faire interagir ces différents compartiments au regard de processus modélisables.

Ces modèles peuvent être de différente nature : économique, sociologique, numérique, etc. Dans le cas de l'évaluation des impacts du changement climatique sur l'agriculture au regard de la ressource en eau, il paraît notamment nécessaire de nous appuyer sur des modèles hydrologiques, permettant de quantifier la ressource en eau et les impacts hydrologiques, ainsi que sur des modèles agronomiques, permettant de quantifier la demande en eau d'irrigation et de calculer des indicateurs de satisfaction hydrique des cultures.

Certaines variables des compartiments intervenant dans cette approche intégrée sont néanmoins plus difficilement "modélisables" ou prédictibles via des méthodes quantitatives. C'est notamment le cas des évolutions sociétales de long terme. En effet, les énoncés sur le futur relèvent de plusieurs domaines : domaine de l'action et du projet, de la volonté et du pouvoir, de la liberté et de l'indétermination. Des incertitudes irréductibles, au-delà de la fourchette de variation des prédictions, s'appliquent à l'évolution de l'agriculture, de la gestion de

4. traduit de :"Catchment-scale hydrological models frequently miss essential characteristics of what determines the functioning of catchments."

l'eau et de l'intensité du changement climatique. Ces évolutions sociétales sont pourtant déterminantes, puisqu'elles influencent ensuite les concentrations de gaz à effet de serre, mais aussi les évolutions des usages et de la gestion sur un bassin versant. Certes, il existe des travaux de recherche pour modéliser ces évolutions, et leurs interactions avec divers compartiments, notamment l'hydrologie (TIAN et al., 2021 ; HEILEMANN et al., 2023 ; ERFURTH et al., 2023). Cependant, ils ne portent pas, à notre connaissance, sur le développement d'outils opérationnels de construction de stratégies d'adaptation, et sont par conséquent en dehors des objectifs de la thèse.

Une alternative à la modélisation quantitative consiste alors à imaginer des hypothèses pertinentes pour les processus concernés, de manière qualitative. C'est le cas avec les méthodes de construction de scénarios. Il est alors possible d'étudier la réaction de ces autres compartiments au regard du ou des différents scénarios envisagés. Les conséquences de ces évolutions sociétales au regard de règles de gestion opérationnelles et d'usages devront néanmoins être explicitement modélisées pour en étudier les impacts sur l'hydrologie et l'agronomie.

L'association de la construction de scénarios et de la modélisation, qui permet d'évaluer les impacts des scénarios, permet ainsi d'évaluer les impacts du changement climatique dans le futur et d'évaluer des stratégies d'adaptation (Figure II.1). Elle a déjà été utilisée dans de nombreux travaux (SAUQUET, 2014 ; AEAG, 2014 ; LABBOUZ et al., 2017 ; LEMAITRE-BASSET, 2023). Dans la suite de la thèse, on distinguera ainsi la **modélisation intégrée**, qui permet à chaque instant de représenter différents compartiments modélisés et leurs interactions, et les **scénarios**, qui permettent d'effectuer des hypothèses d'évolutions sociétales, à prendre en compte dans la modélisation intégrée. Modélisation intégrée et scénarios constituent ensemble l'approche intégrée.

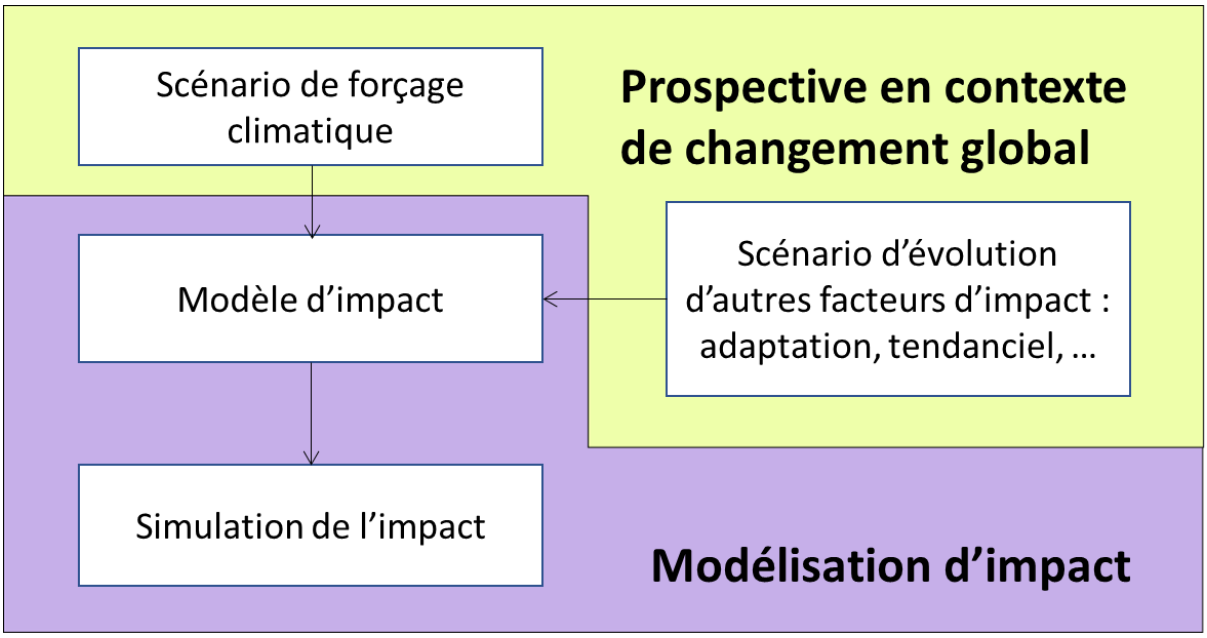


FIGURE II.1 – Association de la prospective et de la modélisation pour l'adaptation au changement climatique

1.3 Une large diversité de modélisations intégrées

Une modélisation intégrée peut ainsi faire intervenir différents compartiments (air, eau, sol, végétation, société, etc.) selon les question de recherche posées et/ou les décideurs à accompagner, avec des philosophies de modélisation (HRACHOWITZ et CLARK, 2017) et de couplage différentes pour chacun de ces compartiments. Par exemple, une dichotomie fréquemment réalisée entre les modèles (SHMUELI, 2010) est illustrée dans la Figure II.2 :

- **modèles explicatifs :** on souhaite via ces modèles représenter le plus fidèlement et exhaustivement possible les processus, le modèle constituant ainsi un véritable miroir de la réalité. La cohérence des processus simulés ainsi que leur interprétation peuvent alors être prioritaires devant la performance à reproduire

les observations. On trouve dans cette catégorie des modèles de forte complexité et haute résolution spatiale et temporelle. Ces approches nécessitent ainsi une importante collecte et utilisation de données ;

- **modèles prédictifs :** on souhaite via ces modèles représenter le plus exactement possible les valeurs observées, avec les modèles les plus simples possible afin d'éviter les écueils de la surparamétrisation. De simples modèles empiriques ou globaux avec une bonne élasticité et un faible nombre de paramètres facilitent alors le calage. Ces modèles "simples" permettent d'effectuer de multiples simulations et sont également davantage utilisés en modélisation d'ensemble (WOOD, 2015).

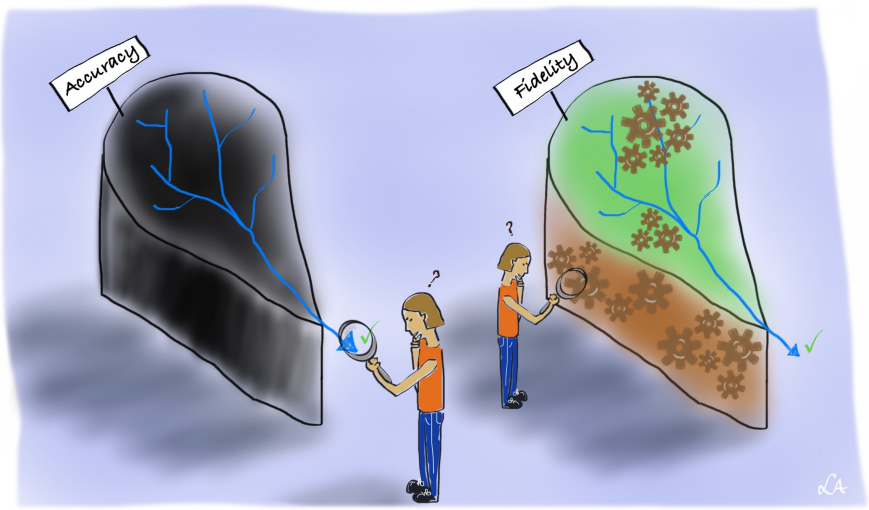


FIGURE II.2 – Les deux philosophies de modélisation, ici introduites pour l'hydrologie. Fidelity (Fidélité, modèles explicatifs) : qualité caractérisant un modèle capable de bien reproduire les processus physiques expliquant les observations ; Accuracy (Performance, modèles prédictifs) : qualité caractérisant un modèle capable de bien reproduire les observations. Source : (CLARK, 2020)

Cette diversité d'approches au sein de chaque discipline de modélisation (climatologie, agronomie, hydrologie, sociologie, etc.) se répercute sur les modélisations couplant ces modèles, qui peuvent ainsi être complexes ou plus simples pour l'ensemble des modèles qui les constituent, ou bien combiner des modèles complexes et des modèles simples. Selon les compartiments définis, la nature des relations représentées, et les choix réalisés pour la modélisation de chaque compartiment et de chaque relation, une modélisation intégrée peut ainsi devenir très complexe, ou demeurer relativement parcimonieuse. Nous avons évoqué l'utilité de prendre en compte de façon plus explicite des facteurs explicatifs dans les approches intégrées (Section II.1.1). **Faut-il alors choisir une modélisation cherchant l'exhaustivité des processus pour se prémunir face aux conditions changeantes, au risque de perdre en opérationnalité, voire en performance ? Ou bien faut-il viser la parcimonie, au risque de négliger des processus essentiels ?** Pour répondre à cette question, il paraît utile d'établir un panorama des modélisations possibles, pour identifier celles nous paraissant les plus prometteuses à utiliser dans la suite de la thèse. Chercher à décrire toutes les possibilités de modélisation intégrée paraît néanmoins être un chantier titanesque, tant la nature et le nombre des compartiments choisis, ainsi que les modes de représentation et les relations représentées, peuvent varier.

1.4 Méthodologie de revue de littérature des approches intégrées

Nous proposons ci-après une revue de littérature sur les approches intégrées agro-hydrologiques en contexte de changement climatique sur des bassins versants de méso-échelle. Cette revue de littérature nous permettra de définir les objectifs de recherche concernant le développement de notre approche intégrée. Dans un premier temps, nous évoquerons les méthodes prospectives, qui permettent de définir les évolutions sociétales à l'origine des évolutions des concentrations de gaz à effet de serre, et de l'évolution des usages de l'eau sur des territoires plus restreints. Ensuite, nous effectuerons une revue de littérature sur la modélisation avec les éléments de cadrage suivants :

- d'abord, notre objectif est de modéliser les impacts du changement climatique sur l'eau et les cultures à méso-échelle (Section I.1.3). Nous laisserons ainsi de côté les approches seulement valables pour une échelle mondiale, et les approches prévues pour ne fonctionner qu'à l'échelle de quelques kilomètres carrés ou de la parcelle ;
- ensuite, nous nous appuyons sur la description des agro-hydrosystèmes présentée en Section I.2 pour conceptualiser l'approche intégrée à développer comme l'association de compartiments modélisables suivants : climat, société, ressource en eau et demande en eau agricole (Section I.1.3). Les sections suivantes vont ainsi parcourir les différentes façons de modéliser ces compartiments et les interactions entre ces derniers ;
- enfin, nous avons identifié **neuf approches de modélisation intégrée** qui nous serviront de références pour cette revue de littérature :
  - SWAT (Soil and Water Assessment Tool, GASSMAN et al., 2007 ; UNIYAL et DIETRICH, 2019) ;
  - WEAP (Water Evaluation And Planning, SIEBER et PURKEY, 2015) ;
  - ORCHIDEE (Organizing Carbon and Hydrology In Dynamic EcosystEms, VARGAS DE OLIVEIRA et al., 2022) ;
  - MAELIA (Modelling of socio-Agro-Ecological system for Landscape Integrated Assessment, THEROND et al., 2014 ; CONSTANTIN et al., 2015 ; MURGUE, 2014) ;
  - MHYDAS-small-reservoirs (Modélisation HYdrologique Distribuée des AgroSytèmes, LEBON et al., 2022) ;
  - J2000-Rhône (BRANGER et al., 2016) ;
  - R^2D^2 (projet sur la Durance, SAUQUET, 2014 ; MORIN et PAQUET, 2007) ;
  - la thèse de Lila Collet (projet sur l'Hérault, 2013) ;
  - airGRiwrm (DORCHIES et al., 2021).

L'ensemble de ces approches intègre d'une certaine façon les influences humaines et climatiques, et les interactions entre hydrologie et agronomie, mais de manière éventuellement très différente pour chaque compartiment modélisé. Nous détaillerons ces différentes approches dans les sections suivantes. Néanmoins, ce recensement est en réalité loin d'être exhaustif. Il est simplement représentatif d'approches fréquemment mises en avant actuellement en recherche sur la modélisation intégrée hydrologique en France. Les approches J2000-Rhône, R^2D^2 et la thèse de Lila Collet, constituent davantage des projets sur un terrain donné que des modèles généralisables. Ils se sont appliqués respectivement au Rhône, à la Durance et à l'Hérault. Tous ces modèles peuvent fonctionner au pas de temps journalier, sauf l'approche développée par COLLET et al. (2013) qui fonctionne au pas de temps décadaire. WEAP peut fonctionner au pas de temps journalier, néanmoins cet outil n'est pas conçu pour fournir des simulations journalières performantes, mais plutôt pour calculer des indicateurs d'impacts et de satisfaction. ORCHIDEE a plutôt été conçu pour effectuer des simulations à échelle mondiale. Néanmoins, l'ensemble de ces approches, dont ORCHIDEE, peuvent fournir des simulations à des échelles plus restreintes. Enfin, airGRiwrm est un package de modélisation hydrologique permettant à la fois la semi-distribution des modèles GR et l'inclusion des usages de l'eau. Son utilisation pour l'étude de stratégies d'adaptation est très récente (cf LEMAITRE-BASSET, 2023) et ne considère pas encore les usages agricoles. Cette dernière option sera celle principalement retenue pour cette thèse et fera l'objet d'une description plus détaillée dans la suite du manuscrit.

La revue de littérature sur la modélisation va ainsi nous permettre de définir les objectifs de la thèse au regard de la modélisation :

- Quel(s) modèle(s) utiliser ?
- Quelles améliorations convient-il de réaliser en modélisation ?
- A quelles simplifications recourir ? En effet, si certains processus s'avèrent être de second ordre et très complexes à prendre en compte, il conviendra de faire des simplifications en priorité sur ces processus.

2 Prospective et méthode des scénarios

2.1 Pourquoi s'appuyer sur des scénarios ?

La prospective est une approche qui consiste à anticiper les évolutions futures possibles. Elle peut reposer sur des méthodes purement quantitatives, notamment via de la modélisation (économétrique, statistique, etc.), ou bien sur des méthodes plus qualitatives. Nous avons indiqué en Section II.1.2 que les méthodes de modélisation quantitative des évolutions sociétales n'étaient pas adaptées aux objectifs de thèse. Il paraît donc nécessaire d'explorer les méthodes qualitatives de construction de scénarios. Ces méthodes ont surtout été développées après la Seconde Guerre mondiale selon trois courants principaux (LABBOUZ et al., 2017) : "

- le développement méthodique de scénarios voit le jour aux États-Unis à la RAND Corporation sous l'influence d'Herman Khan ;
- la création de l'école française de la prospective par Gaston Berger et Bertrand de Jouvenel ;
- l'utilisation de scénarios par les entreprises, en commençant par la multinationale Shell, pour aider à la stratégie et à la planification[...]."

La prospective développé par la RAND Corporation s'est développée initialement pour évaluer l'évolution des technologies nucléaires et leurs potentielles conséquences. L'approche anglo-saxonne s'appuie ainsi fortement sur les méthodes quantitatives et sur l'expertise et s'intéresse beaucoup aux évolutions technologiques et à la défense. La prospective "à la française" se caractérise plutôt par la volonté de s'appuyer sur la pluralité des savoirs et des vécus humains afin d'intégrer la diversité des enjeux pour imaginer les scénarios du futur que l'on suppose très incertains. De plus, la prospective "à la française" s'appuie sur la description de l'évolution des organisations humaines dans la conceptualisation et la description des scénarios. Son utilisation dans le cadre d'études portant sur les impacts et sur l'adaptation au changement global s'est fortement développée dans les dernières décennies (SAUQUET, 2014 ; AEAG, 2014 ; LABBOUZ et al., 2017 ; LEMAITRE-BASSET, 2023).

Il est possible de construire des scénarios de façon qualitative selon :

- une **méthode exploratoire**, c'est-à-dire en imaginant les trajectoires de variables explicatives pour imaginer des futurs possibles ;
- une **méthode normative**, c'est-à-dire partant de la définition d'un futur à atteindre pour construire une trajectoire pour y parvenir.

Une méthode exploratoire permet notamment :

- d'identifier plusieurs futurs plausibles et pertinents au regard des objectifs et ainsi prendre en compte les incertitudes ;
- de quantifier les impacts du changement climatique selon ces différents futurs, afin de déterminer les futurs à éviter ou à préférer.

Face aux incertitudes, la définition de scénarios par une méthode exploratoire permet de définir les contours des futurs possibles. Il convient alors de construire des scénarios contrastés, plausibles et pertinents au regard des objectifs qui sous-tendent leur construction (GODET, 1991).

Pour la scénarisation locale, cette méthode permet de répondre aux difficultés liées aux incertitudes sur les évolutions sociétales. Ces incertitudes sont particulièrement fortes quand on s'intéresse à l'agriculture. En effet, l'agriculture est une activité socle de notre société, en première ligne d'un grand nombre d'enjeux très hétérogènes : nécessité de nourrir les humains en quantité et qualité suffisantes, existence de conflits d'usage sur certaines ressources dont l'eau, enjeux autour des émissions/stockages de carbone, de l'emploi agricole et exode rural, l'artificialisation, les pollutions, les objectifs économiques locaux et nationaux des entreprises, la biodiversité, la préservation du patrimoine paysager et gastronomique, les productions non alimentaires (énergie, matériaux), la diminution des ressources fossiles nécessaires aux activités agricoles actuelles (énergie fossile, phosphore, terres rares pour les technologies agricoles), les questionnements sociétaux sur le bien-être animal, les enjeux géopolitiques, etc. Le futur de l'agriculture en France paraît donc particulièrement incertain. De même, la gestion et les usages de l'eau sont influencés par de nombreux facteurs, notamment la protection des milieux aquatiques. Ainsi, la prospective exploratoire a été utilisée en France dans le cadre de travaux sur les impacts hydrologiques et/ou agronomiques du changement climatique (AEAG, 2014 ; SAUQUET, 2014).

Concernant la scénarisation climatique, une approche plutôt exploratoire peut également être adoptée, imaginant à partir du présent différentes évolutions possibles des émisions des gaz à effet de serre, permettant de prendre en compte les incertitudes. Les incertitudes liées à l'évolution du climat sont en effet très fortes. Le climat futur, même à échelle locale, est notamment déterminé par les émissions mondiales de gaz à effet de serre, et donc par les évolutions de l'ensemble des sociétés humaines sur la Terre. C'est une telle approche qui est utilisée dans les travaux abordés dans les rapports du GIEC, définissant des scénarios climatiques (IPCC, 2007 ; IPCC, 2014 ; IPCC, 2021), et qui sera reprise dans nos travaux.

Une méthode exploratoire permet donc de prendre en compte les incertitudes, à la fois pour la scénarisation locale, mais aussi pour les évolutions des émissions de gaz à effet de serre, contrairement à une approche normative. Cette approche sera donc adoptée dans cette thèse.

2.2 Quelle méthode de construction de scénarios locaux ?

L'évaluation des stratégies d'adaptation de l'agriculture au changement climatique au regard de la ressource en eau doit nécessairement prendre en compte l'incertitude des évolutions sociétales sur un territoire d'étude donné. Il est ainsi possible de s'appuyer sur une méthode exploratoire de construction de scénarios pour identifier et construire des scénarios avec adaptation, à comparer à un ou des scénarios de référence sans adaptation ou de maladaptation. Ces scénarios peuvent ensuite être traduits en **variables résultats** (assolements, volumes maximaux de réservoirs, etc.) qui serviront de données d'entrée pour la chaîne de modélisation d'impact du changement climatique (Section II.3). La modélisation intégrée permet alors d'évaluer les impacts hydrologiques et agronomiques des scénarios.

Plusieurs méthodes existent pour guider la construction de scénarios. L'analyse morphologique constitue généralement la base de la construction de scénarios de façon exploratoire (GODET, 1991). Elle s'appuie sur l'identification de variables explicatives de l'évolution du système étudié pour lesquelles différentes hypothèses sont réalisées. Le croisement des hypothèses permet ensuite de construire des scénarios (Figure II.3). Les scénarios produits peuvent ensuite être traduits en hypothèses de modélisation prises en compte dans la modélisation (paramètres, données d'entrée), et évalués au regard de sorties de modélisation (débits, rendements des cultures/stress hydrique), comme dans le projet R^2D^2 (SAUQUET, 2014).

Il est possible de définir les variables explicatives et de construire des scénarios "en chambre", sans consulter d'acteurs. Néanmoins, les méthodes participatives avec des parties prenantes locales, très développées dans la prospective "à la française", sont très utiles pour définir des scénarios et y intégrer des stratégies d'adaptation. Plusieurs méthodes existent pour faire participer les parties prenantes locales : méthodes collectives, à partir de réunions de réflexion, ou bien méthodes s'appuyant sur des entretiens. Les participants sont alors les garants de la plausibilité des stratégies envisagées face aux contraintes d'un territoire et de ses parties prenantes. De plus, de telles démarches permettent de ne pas négliger des stratégies opportunes sur un secteur donné (GODET, 1991 ; LOUBIER et al., 2019). Comme souligné, l'eau et l'agriculture sont à l'interface d'enjeux multiples, et ces derniers pourraient s'exprimer très différemment selon les territoires et l'échelle considérée. Aussi, si les propositions présentes dans des travaux précédents ou encore des documents stratégiques à plus grande échelle peuvent guider la construction de scénarios locaux, il semble nécessaire de mener des enquêtes plus localisées au niveau des bassins étudiés. Ces enquêtes locales peuvent notamment permettre d'imaginer quelles seraient les conséquences concrètes de la mise en œuvre de scénarios plus globaux au niveau de nos territoires, d'identifier d'éventuels signaux, contraintes, opportunités propres aux territoires étudiés.

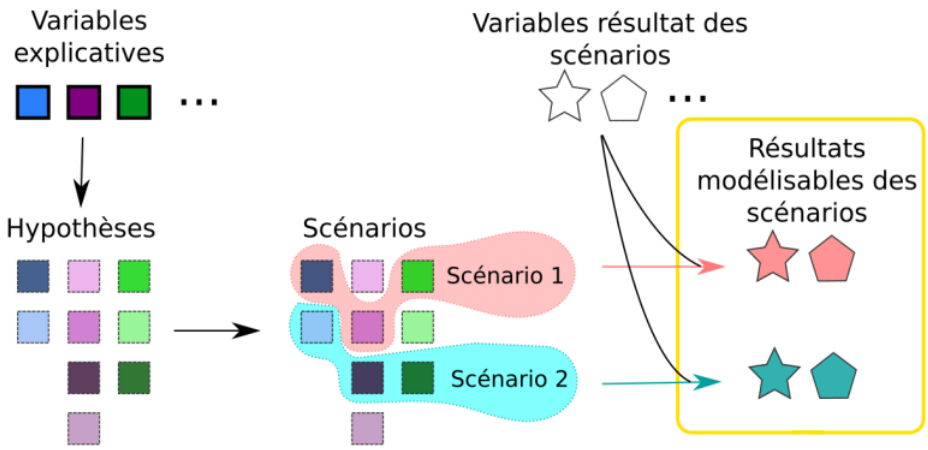


FIGURE II.3 – Analyse morphologique pour construire des scénarios prospectifs

2.3 Quels scénarios climatiques ?

Les évolutions tendancielles du climat, même à échelle locale, sont dues aux émissions mondiales de gaz à effet de serre. Ainsi, la scénarisation climatique doit sortir du cadre de réflexion à échelle locale. La référence en la matière repose sur l'utilisation des scénarios du GIEC (IPCC, 2007 ; IPCC, 2014 ; IPCC, 2021). Les scénarios de référence encore utilisés dans les études d'impact du changement climatique en France sont encore généralement ceux décrits en 2014 par le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, 2014). Ce sont notamment ces scénarios qui sont utilisés pour le projet Explore2 visant à mettre à jour les projections hydrologiques à l'échelle de la France [5]. En effet, au moment où ont été réalisés les présents travaux, les projections climatiques globales les plus récentes n'avaient pas encore été régionalisées en nombre sur la France.

Quatre trajectoires d'évolution du forçage radiatif à horizon 2300, dits Representative Concentration Pathways (RCP), ont été construites à partir de différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre relatives à quatre évolutions contrastées de la société (Tableau II.1). Les différences entre ces trajectoires permettent de décrire les incertitudes quant à l'évolution des émissions de gaz à effet de serre, conséquence des incertitudes sur l'évolution des sociétés. Le RCP 2.6, qui prévoit une augmentation du forçage radiatif de +2,6 W m^{-2} en 2100 est un scénario optimiste, supposant que les émissions n'augmentent plus et deviennent négatives avant la fin du XXIe siècle. Le RCP 8.5, prévoyant une augmentation du forçage radiatif de +8,5 W m^{-2}, est un scénario considéré comme pessimiste, supposant que les émissions seront trois fois plus élevées à la fin du siècle qu'actuellement.

TABLEAU II.1 – Concentrations en eq-CO_2 pour les scénarios de forçage radiatif résumés par le GIEC dans le rapport AR5 (IPCC, 2014) sur la base de l'exercice de modélisation CMPI5. Le forçage radiatif est fonction de la concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Eq-CO_2 : quantité équivalente de CO_2 émise pour atteindre le même forçage radiatif qu'un gaz à effet de serre, ou que l'ensemble des gaz à effet de serre émis ici.

RCP 2.6	**RCP 4.5**	**RCP 6.0**	**RCP 8.5**
Pic à 490 eq-CO_2 puis déclin	Stabilisation à 660 eq-CO_2 après 2100	Stabilisation à 850 eq-CO_2 après 2100	Plus de 1370 eq-CO_2 en 2100 et maintien de la croissance

Le dernier rapport du GIEC (IPCC, 2021) est venu confirmer les scénarios faisant intervenir des forçages radiatifs à 2.6, 4.5 et 8.5 W m^{-2} en 2100, en y ajoutant deux autres scénarios : un plus optimiste, d'augmentation du forçage radiatif de 1,9 W m^{-2} en 2100, et un scénario d'augmentation du forçage radiatif de 7 W m^{-2}. Les

5. https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1244

scénarios de forçage y ont fait l'objet d'une mise en lien avec des trajectoires socio-économiques plus détaillées, et on ainsi été renommés Shared Socioeconomic Pathways (SSP). Il existe donc des liens forts entre RCP et SSP, même si les projections climatiques en résultant peuvent différer en terme de signal.

TABLEAU II.2 – Les cinq principaux scénarios du GIEC résumés dans le rapport AR6 (IPCC, 2021)

SSP1-1.9	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
Développement durable et social permettant de respecter les accords de Paris (+1,5 °C)	Développement durable et social mais ne permettant pas de respecter les accords de Paris	Poursuite de tendances et de politiques climatiques modérées	Développement économique non durable et peu social, favorisant sécurité nationale	Forte croissance et développement socioéconomique sans sobriété énergétique

Les modèles d'impact du changement climatique peuvent ensuite être forcés par ces scénarios de forçage radiatif, permettant de quantifier l'impact de chacun de ces scénarios. Il est entendu que, ces scénarios étant établis à échelle mondiale, nous ne pouvons que sélectionner certains d'entre eux pour les travaux d'adaptation locaux ; il n'est pas envisageable d'infléchir ces scénarios dans ce genre de travaux.

3 Les différents maillons à intégrer dans la modélisation

Une fois que les hypothèses à modéliser ont été établies par la prospective, il convient de les modéliser pour en quantifier les impacts. La modélisation à développer doit alors prendre en compte les scénarios d'émission de gaz à effet de serre et les répercuter globalement et localement via des modèles climatiques. La modélisation hydrologique et agronomique doit permettre de répercuter les impacts de l'évolution de la concentration des gaz à effet de serre, tout en prenant en compte les évolutions locales de l'agriculture et de la gestion de l'eau établies via les scénarios. Ces évolutions locales doivent donc être retranscrites à travers les paramètres, les données d'entrée, voire l'implémentation de nouveaux modèles.

3.1 Modélisation climatique

Nous avons évoqué en Section I.2.1.1 la complexité des rétroactions entre climat, hydrologie et végétation, et donc agronomie. Face à ce constat, certaines approches représentent explicitement les rétroactions de la biosphère et de la pédosphère/lithosphère sur l'atmosphère, et notamment les effets locaux, dans l'objectif de mieux les comprendre. C'est notamment le cas du modèle ORCHIDEE, qui couple un modèle de surface terrestre, modélisant biosphère et lithosphère, et un modèle atmosphérique. Néanmoins, la modélisation de ces rétroactions est très lourde et soulève de nombreuses incertitudes.

Ainsi, l'ensemble des approches de référence (Section II.1.3), sauf ORCHIDEE, ne peuvent utiliser le climat que comme **donnée de forçage**, non influencée en retour par la modélisation de la surface terrestre. Il est notamment possible d'utiliser des données de climat passé, telles que celles partagées dans la base de données SAFRAN (VIDAL et al., 2010), des simulations de climat futur, des prévisions météorologiques, etc. Pour l'ensemble des approches évoquées, l'utilisation de données climatiques de forçage permet d'obtenir des simulations satisfaisantes, montrant que nous pouvons considérer les rétroactions des processus hydrologiques et agronomiques comme des phénomènes de second ordre.

Nous notons par ailleurs une certaine hétérogénéité parmi les modèles intégrés de référence (Section II.1.3). Certaines approches prennent en données d'entrée des produits déjà élaborés, notamment une évapotranspiration potentielle [6], quand d'autres prennent des données climatique brutes (rayonnement, humidité atmosphé-

6. L'évapotranspiration potentielle désigne une évapotranspiration pour un sol de référence sans contrainte hydrique, permettant de ne considérer que la part de l'évapotranspiration expliquée par le bilan énergétique

rique...), leur permettant ensuite d'estimer eux-mêmes une évapotranspiration réelle en effectuant des bilans d'énergie plus complexes, comme ORCHIDEE.

Pour étudier les impacts du changement climatique sur les agro-hydrosystèmes, il est ainsi possible de forcer les modèles par des données d'entrée climatiques reflétant le changement climatique considéré, comme présenté dans la **chaîne de modélisation d'impact du changement climatique sur l'hydrologie** en Figure II.4.

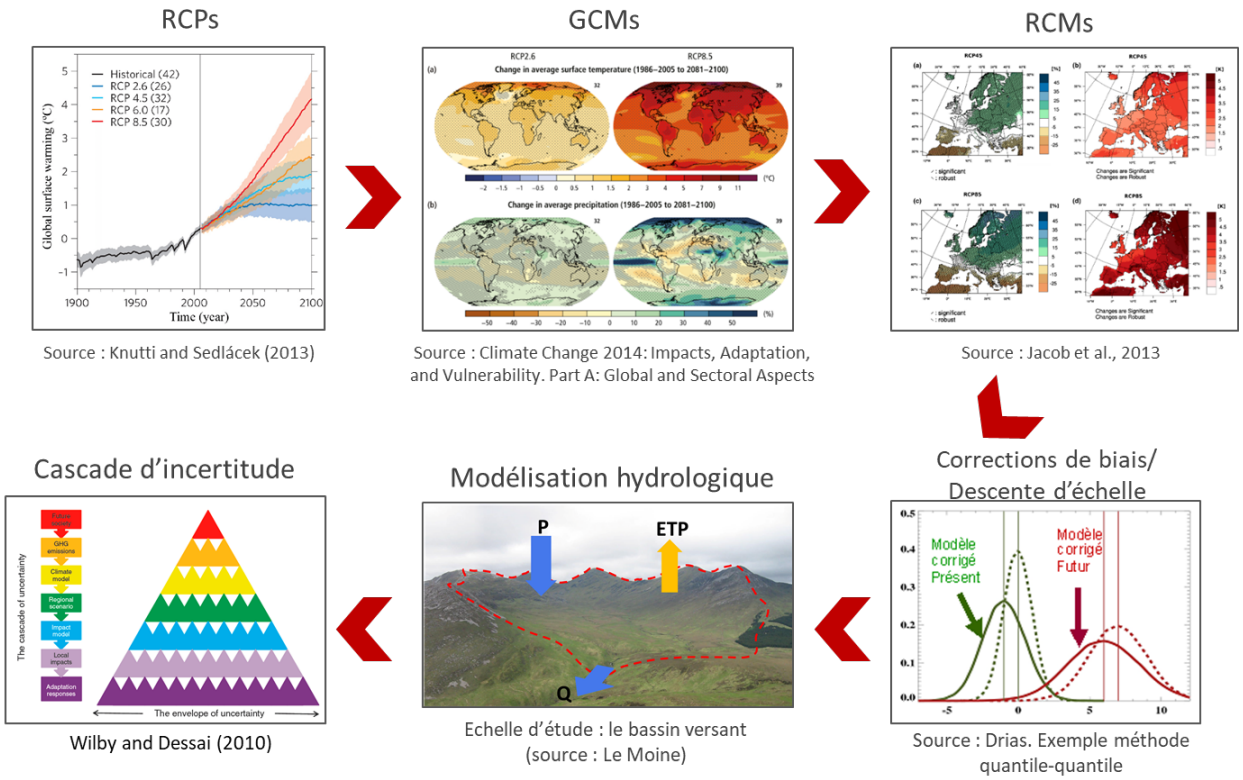


FIGURE II.4 – Chaîne de modélisation d'impacts du changement climatique sur l'hydrologie. Source : LEMAITRE-BASSET (2020)

Les scénarios généralement utilisés sont ceux du cinquième rapport du GIEC (2014). A partir de ces scénarios, des projections climatiques sont réalisées par les instituts climatiques sur l'ensemble du globe via des modèles de circulation générale (GCM), de résolution spatiale d'environ 100 km. Les sorties de ces modèles servent ensuite à contraindre des modèles climatiques régionaux (RCM), permettant d'obtenir des projections de résolution de quelques dizaines de kilomètres (JACOB et al., 2014). Une résolution encore plus fine est néanmoins nécessaire pour simuler certains phénomènes météorologiques, tels que les précipitations convectives (RAUSCHER et al., 2010) et pour mener des études d'impact et construire des stratégies d'adaptation à échelle locale. Des méthodes de descente d'échelle ont pour cela été développées pour obtenir des projections climatiques à une meilleure résolution, de l'ordre de quelques kilomètres carrés.

Les données de référence pour les travaux en contexte de changement climatique actuellement utilisées en France métropolitaines (e.g. Explore2) sont des projections climatiques mobilisant plusieurs scénarios radiatifs et plusieurs modèles climatiques globaux et régionaux (MÉTÉO-FRANCE, 2020). Ces données mobilisent notamment la méthode de débiaisage ADAMONT (VERFAILLIE et al., 2017) et les projections régionalisées Euro-CORDEX (Section III.1.3). Il est là aussi entendu que ces données représentent généralement, pour les études d'adaptation au changement climatique, des données qui sont récupérées par les personnes mettant en œuvre ces travaux, et non directement produites par elles.

3.2 Modélisation hydrologique

Les modèles hydrologiques permettent de simuler à un pas de temps donné les flux d'eau d'un bassin versant (Figure II.5) et donc la ressource en eau disponible à chaque pas de temps. Ils prennent notamment pour données d'entrée les données climatiques, et leur paramétrisation reflète le fonctionnement spécifique d'un bassin versant.

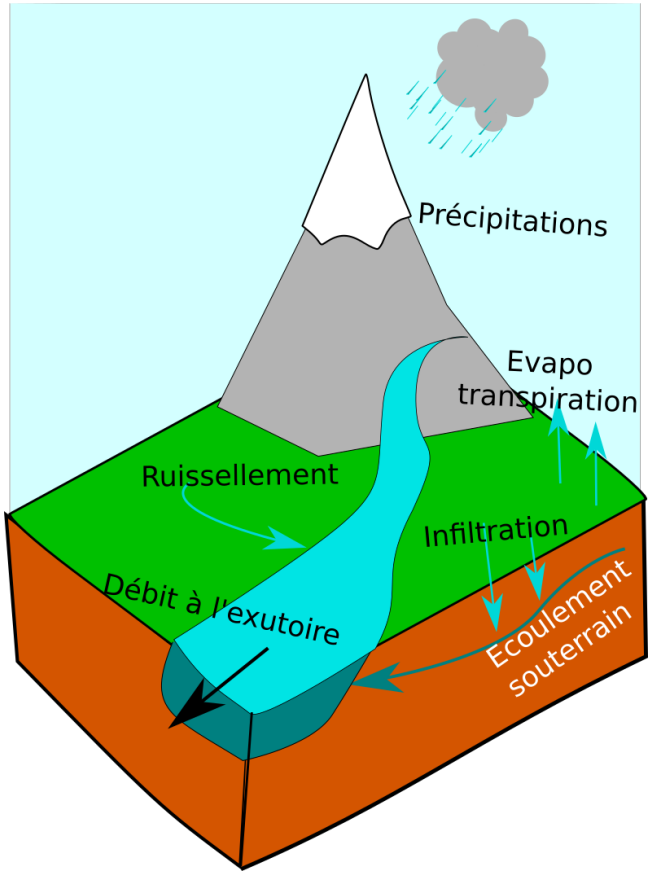


FIGURE II.5 – Flux hydriques considérés pour la modélisation hydrologique

Trois principales familles de modèles hydrologiques sont souvent utilisées pour catégoriser ces modèles, même s'il convient de préciser que ces catégories sont poreuses (HRACHOWITZ et CLARK, 2017), et que la notion de "base physique" est extrêmement mal définie (très souvent la "base physique" est synonyme de "lois (empiriques) définies à petite échelle, et la notion de propriété émergeant avec l'échelle considérée est ignorée) :

- les modèles à base processus ou à base physique : ces derniers représentent le bassin versant selon des processus réels (physiques, humains, biologiques...). Ils s'appuient généralement sur des équations décrivant des processus, et informent donc sur l'ensemble des variables qui interviennent dans ces équations (e.g. SIM, HABETS et al., 2008). Ils ne font pas nécessairement l'objet d'un calage automatique des paramètres. Ces derniers sont plutôt fixés pour correspondre aux caractéristiques connues du bassin versant ;
- les modèles conceptuels, ou à réservoirs : ceux-ci représentent un bassin comme une succession de réservoirs conceptuels liés entre eux par des fonctions de transfert. Les dimensions des réservoirs et les coefficients de transfert font l'objet de calage. Les modèles hydrologiques pluie-débit du génie rural (GR) modélisent par exemple le débit à l'exutoire des bassins versants de façon très performante pour des bassins contrastés sur en France et dans le monde (e.g. GR5J, LE MOINE, 2008) ;
- les modèles empiriques : non abordés dans HRACHOWITZ et CLARK (2017), ils lient selon des lois définies empiriquement les flux entrants et sortants d'un bassin versant. On peut notamment classer dans cette catégorie les modèles "boîte noire" tels que les modèles de régression linéaire et les modèles à réseau de neurones (HU et al., 2018).

Les modèles hydrologiques peuvent aussi se distinguer par leur degré de distribution spatiale (HRACHOWITZ et CLARK, 2017) :

- les modèles globaux « moyennent » le fonctionnement hydrologique du bassin versant considéré, sans considérer une spatialisation des données météorologiques et sans représenter la variabilité des paramètres et des écoulements au sein du bassin versant (e.g. GR5J, LE MOINE, 2008) ;
- les modèles distribués découpent les bassins versants en mailles régulières. Ils calculent des bilans en eau entre chaque maille et prennent ainsi en compte la variabilité des paramètres du bassin versant et les données météorologiques spatialement (e.g. SIM, HABETS et al., 2008). Ces modèles, généralement à base physique, demandent un grand nombre de paramètres, caractéristiques des propriétés physiques du bassin pour chaque unité spatiale considérée. Cela se répercute sur le temps de paramétrisation du modèle et le temps de calcul ;
- les modèles semi-distribués proposent une approche intermédiaire. Ils découpent le bassin versant selon des sous-bassins versants ou des HRU (Hydrological Response Unit), à une résolution plus grossière qu'un maillage distribué, mais permettent tout de même un niveau de détail qui semble pertinent pour l'application visée (e.g. GRSD, LOBLIGEOIS et al., 2014). Ils semblent particulièrement pertinents dans les travaux prospectifs, puisqu'ils permettent d'évaluer l'impact de modifications localisées tout en limitant la complexité de l'approche. Une modélisation semi-distribuée permet de plus de mieux localiser la ressource par rapport à une approche globale. En effet, de l'eau peut être disponible sur un sous-secteur où la demande est faible, mais non disponible sur un sous-secteur où la demande est forte (ALLAIN et PLUMECOCQ, 2019).

Les modèles globaux sont souvent des modèles conceptuels, tandis que les modèles distribués sont souvent des modèles à base processus. Certains modèles à base processus se décrivent tout de même comme des modèles conceptuels, car la spatialisation n'y est pas totalement explicite, ou bien ils utilisent des réservoirs et des fonctions de transfert plutôt que des équations héritées d'une physique à petite échelle. ROLLO et al. (2008) décrivent ainsi SWAT comme un modèle "conceptuel à base physique", même si le principe des "Curve Numbers" qui régit SWAT est une relation mathématique empirique simple qui n'existe qu'à l'échelle du bassin versant.

Par la souplesse de leur calage, les modèles purement conceptuels permettent d'obtenir de très bonnes performances (MENDOZA et al., 2015). Néanmoins, ces derniers sont déterminés par les données qui leur ont été fournies sur la période de calage. Leur robustesse en contexte de changement global peut donc être questionnée (STEPHENS et al., 2019). Cependant, les modèles conceptuels, plus "simples", permettent facilement d'effectuer de multiples simulations et sont également davantage utilisés en modélisation d'ensembles (WOOD, 2015), ce qui constitue une réponse face au risque du manque de robustesse en contexte de changement climatique. De plus, les modèles plus explicites ne sont pas forcément plus robustes, souffrant notamment potentiellement de surparamétrisation.

Malgré de très grandes différences entre ces approches, on note certaines constantes dans la modélisation hydrologique : un modèle hydrologique doit à chaque pas de temps estimer la recharge en eau du bassin versant, et la quantité d'eau qui part vers l'atmosphère sous forme d'évapotranspiration : c'est la fonction de production. Les précipitations qui ont rechargé le modèle pourront ensuite être déplacées, plus ou moins rapidement selon l'état du modèle, vers l'aval des cours d'eau (c'est ce qu'on appelle la fonction de transfert), vers les nappes, ou bien être évapotranspirées aux pas de temps suivants. Ces estimations se font dans tous les cas grâce à des données climatiques, en particulier la précipitation, et les variables physiques atmosphériques explicatives de l'évapotranspiration et selon un état du modèle, représentatif de l'humidité du sol.

Parmi les approches de référence sélectionnées pour la revue de littérature, certaines ne dissocient pas totalement leurs compartiments hydrologique et agronomique, car la fonction de production, permettant la partition entre précipitations et évapotranspiration, est fusionnée avec la modélisation des sols agricoles. Dans ce cas, l'évapotranspiration réelle, variable de première importance pour la modélisation hydrologique, est calculée via la modélisation agronomique sur les sols agricoles. C'est notamment le cas d'ORCHIDEE, SWAT, MAELIA (qui utilise SWAT), J2000, WEAP, MHYDAS-small-reservoirs. Pour d'autres, le module hydrologique est séparé des autres compartiments modélisés. La démarche intégrée R^2D^2 mobilise quant à elle le modèle hydrologique CEQUEAU indépendamment de la modélisation agronomique, de même que la thèse de Lila Collet qui mobilise le modèle hydrologique GR4J.

L'ensemble des approches de référence évoquées disposent d'une modélisation hydrologique qui peut adopter une résolution spatialement explicite, mais à des degrés divers, et de différentes natures. ORCHIDEE et CEQUEAU adoptent un maillage régulier défini par l'utilisateur. SWAT, MAELIA (qui utilise SWAT), J2000, MHYDAS-small-reservoirs et même WEAP distribuent les bilans en eau du sol sur des entités spatialement homogènes au regard de processus modélisés, soit des HRUs [7]. Pour ces approches (ORCHIDEE, CEQUEAU, SWAT, MAELIA, J2000, WEAP), l'eau peut ensuite être transférée dans les nappes et rivières. Les flux dans les rivières sont ensuite modélisés de façon spatialement explicite.

D'autres approches agrègent les processus sur des sous-bassins versants de plus grande taille. C'est le cas des modèles GR disponibles dans airGRiwrm et utilisés dans la thèse de Lila Collet. Les modèles GR ont d'ailleurs été d'abord plutôt conçus pour fonctionner à échelle globale, mais les approches développées pour en faire des outils de modélisation intégrée s'appuient sur des approches semi-distribuées, permettant d'affiner les calculs d'indicateurs d'impacts et la définition de règles de gestion.

Certaines des approches de référence mobilisent des modèles hydrologiques très complexes, car modélisant de multiples processus intervenant dans le cycle hydrologique, s'appuyant sur des équations mécanistes complexes, ou nécessitant de nombreuses données d'entrée. Nous considérons ainsi que les modèles ORCHIDEE, J2000, ainsi que CEQUEAU et MAELIA/SWAT dans une moindre mesure sont des modélisations hydrologiques complexes. Au contraire, WEAP se veut plus parcimonieux, visant plus simplement à quantifier assez grossièrement la ressource pour la faire dialoguer avec les usages. Les modèles GR sont particulièrement parcimonieux, ne nécessitant que peu de paramètres. Ils ne prennent pas en compte explicitement les hétérogénéités spatiales (occupation des sols, reliefs, propriétés des sols, etc.).

3.3 Modélisation agronomique

La modélisation agronomique désigne la modélisation de variables culturales. Ces variables culturales peuvent être différentes selon les objectifs de modélisation : concentration en protéines, en molécules aromatiques, rendement en masse par unité de surface, quantité d'intrants, notamment d'eau etc. Certaines de ces variables peuvent même devenir des données d'entrée, selon les objectifs de modélisation et les données dont on dispose. Dans le cas de notre objectif d'intégrer climat, hydrologie, agronomie et société pour l'adaptation au changement climatique, il nous semble important de pouvoir modéliser :

- les prélèvements en eau ;
- la satisfaction des besoins en eau des cultures.

En effet, si diminuer les prélèvements se répercute par une insatisfaction des besoins en eau des cultures, il faut pouvoir le détecter et le quantifier.

Il est délicat de construire des relations purement empiriques entre prélèvements et climat, car les valeurs de prélèvements présentent de très fortes incertitudes (WRIEDT et al., 2009). En effet, les prélèvements sont sujets, en France, à déclaration à partir d'un certain seuil, et certains prélèvements font l'objet d'estimations plutôt que de réelles mesures. Si la création des Organismes Uniques de Gestion Collective (OUGC) doit permettre un recensement plus exhaustif et un meilleur contrôle des prélèvements sur les Zones de Répartition des Eaux (LÉGIFRANCE, 2007), les données de ces structures ne remonteraient encore que difficilement aux Agences de l'eau, chargées de leur publication sous format anonymisé sur la Banque Nationale des Prélèvements quantitatifs en Eau (BNPE), d'après un récent rapport sur les OUGC (CGEDD et CGAAER, 2020). Les difficultés à partager ces informations viendraient justement de réticences à révéler aux Agences de l'eau l'existence et l'identité d'irrigants non déclarés, mettant en évidence un écart probable entre données déclarées et réalité des prélèvements. De plus, les données de prélèvement ne sont partagées généralement qu'à un pas de temps annuel. Il semble pourtant important de connaître la saisonnalité des prélèvements, car la ressource en eau est inégale dans le temps (Section I.2.1.3). La saisonnalité de la demande doit permettre d'identifier précisément les périodes de tension et de quantifier les débits futurs durant ces périodes de tension.

7. le terme de HRU n'est pas évoqué dans la documentation WEAP et MHYDAS, mais il nous a paru pertinent de les associer à ce concept

Face à cette difficulté, il convient d'utiliser des modèles calculant une demande en eau agricole (NAZEMI et WHEATER, 2015). Cette demande, croisée avec la ressource en eau disponible et les règles de gestion, peut ensuite permettre de calculer des prélèvements. Une diversité de modèles existe pour estimer la demande en eau d'irrigation à l'échelle d'un bassin versant.

Dans la suite de cette section, nous allons décrire les différents modèles existants, selon les formalismes adoptés pour représenter les cultures, puis l'irrigation apportée à l'échelle d'une unité de simulation, et enfin l'irrigation à échelle territoriale. Nous aborderons ensuite la question des incertitudes de modélisation de la demande en eau, puis les méthodes de quantification de la satisfaction de la demande en eau.

3.3.1 Typologie de représentation des processus physiologiques des cultures et de leur environnement

Comme expliqué en Section I.2.2.1, l'agriculture consomme de l'eau par évapotranspiration, c'est-à-dire via la vaporisation de la réserve en eau du sol par le cumul entre évaporation du sol et transpiration des cultures. En Section I.2.2.1, nous avons expliqué que l'évapotranspiration est conditionnée par plusieurs processus, notamment climatiques, l'état de la culture et l'humidité du sol. De nombreux processus influencent le calcul de cette évapotranspiration. C'est pourquoi un modèle agronomique est en réalité un ensemble de modèles de processus, interdépendants ou non, pris en compte dans la plante : modèle de croissance racinaire, modèle de développement foliaire, modèle de stress hydrique, modèle d'évapotranspiration, modèle de prise de biomasse, etc.

Les modèles agronomiques diffèrent ainsi par le nombre de processus pris en compte, mais aussi le formalisme adopté pour chaque processus. Certains modèles complexes s'appuient ainsi sur des calculs de bilan d'énergie couplés au bilan en eau. C'est notamment le cas pour la modélisation des cultures dans ORCHIDEE via le module SECHIBA, ou encore dans le modèle SiSPAT (BRAUD et al., 1995). Une façon de simplifier et de formaliser la modélisation de l'évapotranspiration est de distinguer trois types d'évapotranspiration (Figure II.6) :

- **L'évapotranspiration potentielle ()** : les variables climatiques permettent de calculer l'ETP d'un couvert végétal de référence sélectionné au regard de la zone d'étude. Le calcul de cette évapotranspiration peut ainsi être externalisé du modèle agronomique, via des formules de référence telles que la formule de l'ETP de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), représentant l'évapotranspiration sans contrainte hydrique d'un gazon uniforme ;
- **L'évapotranspiration culturale (ETC)** : l'état de la culture permet de calculer une évapotranspiration maximale potentielle au regard des paramètres de cette culture. Il existe deux manières de le faire :
  - à partir de l'évapotranspiration potentielle et d'un coefficient multiplicateur représentatif de la capacité évaporative de la culture : un coefficient cultural (K_c). Les cultures vont donc se voir attribuer une "courbe de K_c" représentative de son cycle de développement.
  - en utilisant directement une formulation d'ETP, et en ajustant les coefficients pour que cette dernière soit représentative de la culture à représenter plutôt que d'un couvert standard.

  Certains modèles distinguent le calcul de l'évaporation de celui de la transpiration (ORCHIDEE, SWAT, AqYield utilisé par MAELIA et MHYDAS-small-reservoirs, méthodes MABIA et PGM de WEAP, MODIC utilisé dans R^2D^2, AquaCrop, STICS, etc.), quand d'autres agrègent les deux (CROPWAT, utilisé dans la thèse de COLLET, 2013). De plus, certains modèles utilisent des courbes de coefficient cultural préfixées (MODIC_CF, méthodes "rainfall runoff" et MABIA dans WEAP), quand d'autres les mettent à jour dynamiquement, notamment pour tenir compte de la variabilité annuelle des températures et de son impact sur la vitesse de maturation des cultures (ORCHIDEE, SWAT, AqYield, méthode PGM dans WEAP, MODIC_DJ, AquaCrop, STICS, etc.) ;
- **L'évapotranspiration réelle (ETR)** : l'humidité du sol permet de calculer une ETR, prenant en compte le stress hydrique. De même, il est possible de la calculer à partir de l'**ETC**, via un coefficient multiplicateur informant sur le stress hydrique. CropWat et WEAP, avec les méthodes "simplified coefficients", peuvent calculer une irrigation sans modéliser l'humidité du sol. L'irrigation calculée correspond ainsi simplement à un écart entre ETC et précipitations. Le modèle n'est alors pas capable de simuler d'ETR. Les autres approches

adoptent différentes modélisations de l'évolution de l'humidité du sol, de l'évolution de la profondeur racinaire, et des conséquences du stress hydrique sur l'ETR.

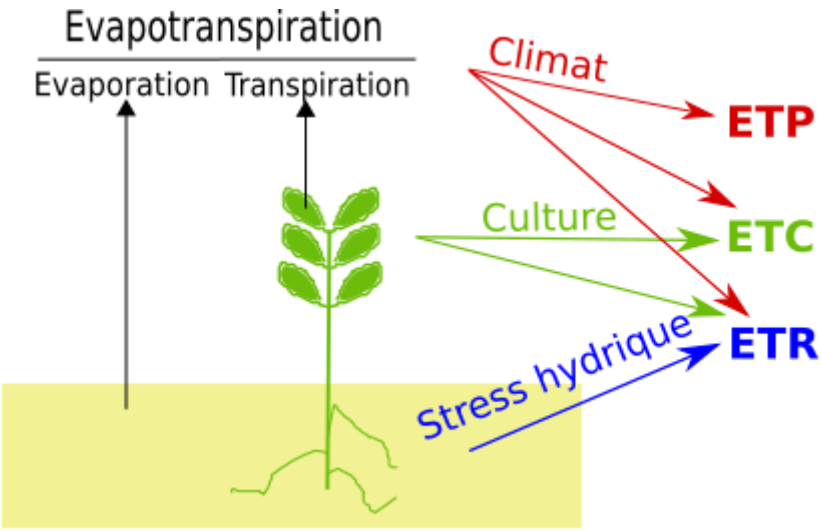


FIGURE II.6 – Les différentes évapotranspiration calculées : potentielle (ETP), culturale (ETC), et réelle (ETR)

L'ETR, qui est généralement calculée par ces différents modèles, est ensuite utilisée pour établir le bilan en eau au niveau des sols cultivés, et en déduire la demande en eau d'irrigation (Figure I.7). Pour permettre aux cultures de se développer de façon optimale, il faut permettre à leur ETR d'atteindre dans la mesure du possible l'ETC, ce qui est possible avec un apport en eau suffisant.

Il existe ainsi un gradient de complexification entre modèles agronomiques, ainsi qu'une diversité de modèles possibles. Face à ce constat, DI PAOLA et al. (2016) ont comparé 70 modèles de culture, afin de guider les candidats à leur utilisation dans leur choix. Tandis que certains modèles tendent à se complexifier, au fur et à mesure de la sortie de nouvelles versions (BRISSON et al., 2003), de nombreuses études continuent d'utiliser des modèles "simples", généralement empiriques, de bilan en eau du sol pour quantifier les besoins en eau des cultures. Néanmoins, de même que pour les modèles hydrologiques, il paraît judicieux de s'interroger sur la robustesse de modèles reposant fortement sur des paramètres empiriques en contexte de changement global.

De plus, nous avons vu en Section I.2.4 que l'évolution de la concentration en CO_2, ainsi que la hausse des températures pouvaient modifier l'évapotranspiration et la phénologie des cultures. Ainsi, selon l'inclusion ou non de ces deux processus dans les modèles choisis, les conclusions en contexte de changement climatique pourraient être très différentes.

3.3.2 Du bilan en eau des sols au calcul de la demande en eau agricole

Dans de nombreux travaux, les volumes d'irrigation ne sont pas considérés comme une inconnue ou une variable de sortie d'intérêt, mais comme une donnée d'entrée. Par exemple, l'irrigation peut être renseignée via un calendrier d'irrigation préfixé selon une approche date-dose ou une paramétrisation connue ou contrôlée par les modélisateurs. On relève de ce fait que de nombreuses études de sensibilité sur des modèles agronomiques sont en réalité des études de sensibilité de la modélisation du **rendement** ou du **stress hydrique** des cultures aux paramètres des modèles, dont éventuellement l'irrigation (SILVESTRO et al., 2017 ; GUO et al., 2020 ; MONDACA-DUARTE et al., 2020). Pour d'autres, et notamment pour cette thèse, le calcul automatique de la demande en eau d'irrigation constitue au contraire une sortie d'intérêt, en vue du couplage avec la modélisation hydrologique et de l'évaluation de la satisfaction de cette demande.

La simulation automatique de l'irrigation plutôt que la définition d'un calendrier préfixé est nécessaire pour étudier l'impact du climat sur cette dernière. Les modèles agronomiques, s'ils ont été conçus comme des outils génériques utilisables dans différents contextes et objectifs de modélisation, permettent souvent de définir différentes stratégies d'irrigation. Certaines approches cherchent à modéliser explicitement le comportement

des agriculteurs selon des règles de décision dépendant d'ordres de priorité entre opérations techniques, météorologie, humidité du sol, maturation des cultures, etc. C'est notamment le cas de MAELIA et de MHYDAS-small-reservoirs. Ces méthodes sont considérées comme plus réalistes et fiables par les personnes les ayant développées (LEENHARDT et al., 2004). D'autres approches proposent le calcul de l'irrigation de façon simplifiée. L'irrigation est alors généralement déduite de l'humidité du sol simulée, selon deux principaux paramètres : un seuil de déclenchement de l'irrigation, correspondant au déficit d'humidité à atteindre pour que l'humidité soit déclenchée, et la dose d'irrigation à appliquer quand le seuil de déclenchement est atteint (Figure II.7). Les approches génériques existantes, autres que celles s'appuyant sur la modélisation explicite du comportement des agriculteurs, (ORCHIDEE, WEAP, etc.) laissent la liberté d'ajuster ces paramètres (ou des paramètres équivalents) selon le site et/ou l'objectif de l'étude. Selon les études, les valeurs fixées pour ces deux paramètres peuvent fortement varier (Tableau II.3).

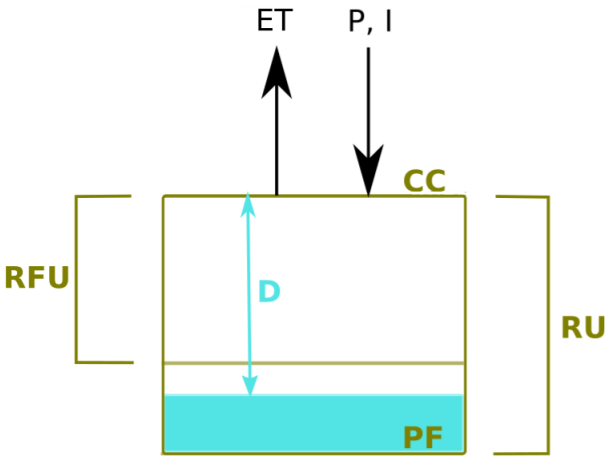


FIGURE II.7 – Grandeurs caractéristiques du sol et de son humidité : ET l'évapotranspiration, P les précipitations, I l'irrigation, RU la réserve utile, égale à la lame d'eau accessible pour la plante à capacité au champ et dépendant de la profondeur racinaire, RFU la réserve facilement utilisable (une fois que toute la réserve facilement utilisable est consommée, la plante subit un stress hydrique), CC l'humidité à capacité au champ, soit la capacité de rétention d'eau maximale du sol, PF l'humidité au point de flétrissement, soit l'humidité minimale à partir de laquelle la plante ne peut plus du tout prélever d'eau du sol, provoquant à terme la mort de la plante, et enfin D le déficit hydrique correspondant à la différence entre la réserve utile, atteinte pour la capacité au champ, et la lame d'eau accessible pour la plante effectivement dans le sol au pas de temps t.

Pour LEENHARDT et al. (2004), le modèle présenté dans la première partie de leur article admet un paramètre supplémentaire modulant les prélèvements de façon à les caler sur les prélèvements déclarés annuels, afin de prendre en compte le "comportement" des agriculteurs. De façon analogue, un calage de MODIC a été opéré dans le cadre du projet R^2D^2, pour rapprocher les données simulées des prélèvements déclarés annuels. Cela illustre le décalage possible entre l'irrigation modélisée, et la réalité des prélèvements. Néanmoins, cette méthode interroge, car les prélèvements déclarés peuvent présenter un écart non négligeable par rapport à la réalité (WWF, 2003).

Dans l'hypothèse d'une certaine inertie dans le comportement des agriculteurs, les modèles décrivant explicitement leur comportement doivent effectivement simuler plus efficacement les prélèvements lors d'années particulièrement exceptionnelles. Cependant, il semble plus difficile de les utiliser pour simuler l'évolution des prélèvements, qui doit être le reflet de l'évolution des comportements des agriculteurs, en contexte de changement climatique. MAELIA (MURGUE, 2014 ; ALLAIN et PLUMECOCQ, 2019) constitue une plateforme de modélisation intégrant à la fois une modélisation explicite du comportement des agriculteurs et les impacts agronomiques de ces comportements, du climat, etc. Une telle modélisation nécessite un effort très lourd de collecte de données afin de décrire explicitement le comportement des agriculteurs. Si de tels modèles semblent très pertinents en science participative (MURGUE, 2014), il paraît intéressant de s'interroger par ailleurs sur la capacité de modèles plus simples et réagissant au climat à reproduire les prélèvements "aussi bien" que des modèles plus explicites, dans un objectif de projections parcimonieuses en contexte de changement climatique.

TABLEAU II.3 – Comparaison des règles de déclenchement de dosage de l'irrigation. Il s'agit de travaux s'appliquant sur des secteurs donnés. Les approches génériques précédemment citées (ORCHIDEE, WEAP, etc.) laissent la liberté d'ajuster ces paramètres (ou des paramètres équivalents) selon le site et/ou l'objectif de l'étude. UM : unité de modélisation ; Sd : seuil de déclenchement de l'irrigation ; Di : dose d'irrigation ; RU : réserve utile ; RFU : réserve facilement utilisable (Voir Figure II.7)

Etude	**Etendue spatiale modélisée**	**Pas de temps de simulation**	**Intervalle de temps minimal entre deux irrigations sur la même UM**	**Sd**	**Di**
*(*BOURAS *et al., 2019)*	Bassin versant du Tensift	1 jour	-	50 % de la RU	60 mm
*(*COLLET *et al., 2013)*	Bassin versant de l'Hérault (France)	10 jours	-	Irrigation dès lors que l'humidité est sous la capacité au champ	Remplissage jusqu'à capacité au champ
*(*FUNES *et al., 2021)*	Trois bassins méditerranéens	1 mois	-	Déficit hydrique égal à la RFU	ETM - ETR
*(*HORI *et al., 2008)*	Station Kurinoki, sur le bassin versant de Simanto (Japon)	1 heure	-	50 % de la RU	Remplissage jusqu'à capacité au champ
*(*NEILSEN *et al., 2018)*	Régions de Colombie Britannique (Canada)	1 jour	-	Déficit hydrique égal à la RFU	ETM - ETR
*(*ROUHI RAD *et al., 2020)*	Finney County in Kansas	1 jour	Plusieurs fréquences d'irrigation : 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 jours	Plusieurs seuils de déclenchement de l'irrigation : humidité à 25, 35, 45, 55, 65 ou 75 % de la RU	25,4 mm
*(*SAUQUET, *2014)*	Durance	1 jour	-	Calage par culture	Calage d'un taux de remplissage objectif par culture
*(*SMITH *et al., 2012)*	5 sites d'étude dans le Canton du Valais (Suisse)	1 jour	-	Déficit hydrique à $0,2 \times RU + 0.8 \times RFU$	Dose nécessaire pour réatteindre la RFU
*(*WRIEDT *et al., 2009)*	Europe	1 jour	3 jours	Déficit hydrique de 0, 50, 100 ou 150 mm selon les régions d'Europe	Remplissage jusqu'à capacité au champ, dans la limite d'une quantité d'irrigation maximale de respectivement 60, 110, 150, 160 mm

Les travaux de MINACAPILLI et al. (2008) ont de cette manière interrogé la capacité d'un modèle distribué de bilan en eau du sol à reproduire l'irrigation journalière réellement mesurée selon différents seuils et doses d'irrigation sur 136 parcelles de vignes en Sicile. Il paraît pertinent d'extrapoler cette réflexion sur des terrains d'étude plus grands et présentant une diversité de cultures.

3.3.3 L'efficience de l'irrigation

De plus, la modélisation de la demande en eau peut intégrer l'efficience d'irrigation (Section I.2.2.3, Figure I.10). Si elle est prise en compte, la partition entre l'eau apportée à une parcelle et l'eau effectivement transpirée est gérée au sein du modèle agronomique, qui peut prendre en compte l'eau non valorisée par in-

terception, la percolation, l'évaporation explicitement ou implicitement. Les fuites lors du transport peuvent s'appuyer sur des données connues, ou bien sur l'application de ratios empiriques généralisables par type de transport comme dans la thèse de Lila Collet et J2000 sur le Rhône. Nous aborderons la question des fuites lors du transport dans la Section II.4.

3.3.4 De la parcelle au territoire

Pour calculer à échelle territoriale la demande en eau d'irrigation à partir d'un modèle de bilan en eau du sol, il est nécessaire de connaître les assolements irrigués, c'est-à-dire les surfaces des cultures, mais aussi les paramètres du modèle de bilan en eau. Les approches peuvent diverger selon la discrétisation du calcul de l'irrigation : soit la paramétrisation des règles de déclenchement et de dosage de l'irrigation est définie globalement, soit elle l'est par unité géographique distincte ou par culture ou même par agriculteur. A cette même échelle territoriale, une autre distinction s'opère (cf Tableau II.3) :

- certaines modélisations proposent une simulation plutôt "conceptuelle" de l'irrigation, où dès lors que le seuil de déclenchement est atteint, une irrigation journalière visant à combler l'écart entre les conditions limites correspondant au seuil de déclenchement, et les conditions atteintes au pas de temps t (LEENHARDT et al., 2004 ; RINAUDO et al., 2013), est calculée. De même, on peut utiliser l'écart entre l'ETC et l'ETR (FUNES et al., 2021 ; NEILSEN et al., 2018 ; SAUQUET, 2014). La modélisation de l'irrigation adoptée dans ORCHIDEE, les projets R^2D^2 et J2000-Rhône correspondent à une telle modélisation, l'irrigation calculée permettant de combler un déficit par rapport à un seuil de déclenchement de l'irrigation, exprimé en fraction de réserve utile. Ces formulations ne sont pas réalistes à l'échelle d'une parcelle au pas de temps journalier, car elles impliquent une connaissance très fine de l'état d'humidité du sol, et une forte disponibilité de l'agriculteur, qui irriguerait en continu ! En réalité, dans cette configuration, il n'est pas nécessaire de représenter chaque parcelle indépendamment, et l'irrigation calculée correspond à une irrigation globale, éventuellement distincte par culture, sur l'unité spatiale de simulation. Pour favoriser un étalement temporel, il est également possible de définir une dose maximale apportée par unité de temps et unité spatiale.
- d'autres approches cherchent à simuler l'irrigation de façon plus conforme à ce qui est exercé à la parcelle, pour ensuite en effectuer une agrégation à l'échelle du territoire étudié. Il est alors courant que, lorsque le seuil de déclenchement de l'irrigation est atteint, les doses d'irrigation correspondent soit à des doses préfixées, soit à l'écart entre l'humidité au seuil de déclenchement et l'humidité à capacité au champ (Tableau II.3). Dans cette configuration, il paraît nécessaire de s'interroger sur l'étalement temporel des prélèvements à l'échelle territoriale. En effet, si l'irrigation entraîne un remplissage du réservoir sol bien supérieur aux conditions de déclenchement de l'irrigation, alors l'irrigation suivante aura lieu vraisemblablement plusieurs pas de temps plus tard si le modèle est journalier. En conséquence, l'irrigation est modélisée par un pic ponctuel. Cette difficulté peut être contournée en adoptant un pas de temps de simulation plus grand, permettant de lisser la courbe de l'irrigation. Travailler à résolution spatiale suffisamment fine peut également permettre de répartir les prélèvements.

Enfin, d'autres travaux forcent la répartition spatiale des prélèvements, par exemple par répartition aléatoire du déclenchement de l'irrigation sur les parcelles sur une fenêtre temporelle donnée (ZACCARIA et al., 2013 ; MCINERNEY et al., 2018). D'autres stratégies de modélisation, cherchant à modéliser explicitement le comportement des agriculteurs, permettent enfin de prendre en compte l'ensemble des facteurs influençant les opérations techniques menées par les agriculteurs. Ainsi, la plateforme MAELIA prend en compte la durée nécessaire à chaque opération technique (semis, irrigation, fertilisation, récolte) et les tours d'eau, forçant une répartition dans le temps des prélèvements (MURGUE, 2014 ; ALLAIN et PLUMECOCQ, 2019). La majorité des études ne se préoccupent finalement pas de l'analyse de la répartition temporelle des prélèvements à échelle territoriale et analysent simplement des sommes d'irrigation agrégées annuellement ou mensuellement, permettant de lisser les hydrogrammes d'irrigation.

3.3.5 Sources d'incertitudes sur la quantification de la demande en eau

Malgré cette diversité de méthodes de modélisation de la demande en eau d'irrigation, la sensibilité de la quantification de cette dernière à ces différents choix est rarement présentée, ou bien seulement à un pas de temps annuel. On souligne toutefois le travail de WRIEDT et al. (2009), présentant l'impact de la valeur du seuil de déclenchement de l'irrigation sur l'irrigation annuelle à échelle européenne, ou encore la revue de littérature de NAZEMI et WHEATER (2015) qui ont relevé ce point de divergence entre différentes études et l'ont critiqué. Enfin, ROUHI RAD et al. (2020) ont défini plusieurs seuils de déclenchement de l'irrigation pour prendre en compte l'incertitude liée à ce paramètre dans leur travail, mettant en évidence le fait que ce paramètre peut être source de préoccupation pour la modélisation. De plus, la formule d'évapotranspiration potentielle (ETP) utilisée peut varier selon les modèles ou les travaux (MULTSCH et al., 2015).

Face aux incertitudes, les projections de la demande en eau future répondent de plus en plus souvent à une logique ensembliste (i.e. mettant en place un ensemble de simulations), pour mieux prendre en compte les incertitudes liées au modèle (WADA et al., 2013), mais l'impact de la définition des règles de l'irrigation n'est généralement pas quantifié.

3.3.6 Quantification des impacts de la satisfaction de la demande en eau

Dans le cadre d'une étude d'impact du changement climatique, nous devons envisager que la demande en eau puisse ne pas être satisfaite, en particulier en raison d'une insuffisance de la ressource. Plusieurs options permettent de quantifier l'insatisfaction :

- comparaison entre demande en eau et eau réellement apportée ;
- calcul de perte de rendement liée à l'insatisfaction de la demande en eau.

La comparaison entre demande en eau et eau réellement apportée peut notamment se faire grâce à un calcul d'un ratio de volumes, ou encore en comptabilisant le nombre de jours d'insatisfaction (COLLET, 2013). Néanmoins, une telle comparaison ne paraît pas suffisante pour évaluer les impacts agronomiques de l'insatisfaction de la demande en eau, et un calcul de perte de rendement, de perte en masse ou de perte économique paraît être une sortie plus opérationnelle. Il est en effet possible de lier l'insatisfaction de la demande en eau au rendement. Une méthode simple est notamment proposée par DOORENBOS et al. (1979), qui lie le rendement au rapport entre l'ETR et l'ETC, et un paramètre caractérisant la réponse de chaque culture selon ce rapport. Des méthodes équivalentes existent, plus précises, s'appuyant sur le ratio des transpirations, mobilisables pour des modèles distinguant la modélisation de l'évaporation et de la modélisation de la transpiration.

Pour les modèles plus mécanistes, la production de biomasse peut y être explicitement modélisée, en réaction du stress hydrique. La production de biomasse permet ensuite de calculer directement la production par unité de surface.

3.4 Stockage de la ressource en eau

Beaucoup de modèles intégrés prennent aussi en compte les réservoirs artificiels, très fréquemment mis en place pour assurer les approvisionnements en eau pour l'irrigation et d'autres usages. En effet, négliger le stockage dans des modèles prenant en compte par ailleurs les prélèvements pour l'irrigation paraît être une hypothèse forte, car elle exagère nécessairement les impacts des prélèvements en période d'étiage. Selon les modèles, le type de réservoir et le niveau de connaissance des pratiques de remplissage des réservoirs, la modélisation de ces derniers peut varier. HABETS et al. (2018) et LEBON (2021) ont réalisé une revue de littérature de la prise en compte des retenues dans les modèles hydrologiques. Les choix de modélisation des retenues sont ainsi de deux principales natures : le choix et la modélisation des flux intervenant dans le bilan en eau des retenues d'une part, et leur représentation spatiale d'autre part.

Les **flux** intervenant dans les bilans en eau des retenues sont nombreux. Ils se répartissent entre les entrées d'eau et les sorties d'eau, qui diffèrent selon les types de retenues (Section I.2.3.2).

Les **entrées** incluent généralement au moins un mode de remplissage parmi un remplissage par ruissellement passif, par une nappe de soutien passive, ou bien par pompage actif dans une ressource en surface ou souterraine. De plus, les précipitations directes contribuent également au remplissage, mais sont parfois négligées par les modèles (HABETS et al., 2018). La modélisation du remplissage par interception passive du ruissellement dépend de la représentation spatiale des retenues, abordée ci-après. Une modélisation de remplissage actif peut mobiliser des chroniques de prélèvements à préfixer ou à modéliser au regard de règles de gestion.

Les **sorties** sont constituées en partie de pertes par évaporation et percolation (HABETS et al., 2018). La modélisation de l'évaporation des réservoirs est très hétérogène selon les approches, et constitue un phénomène souvent mal connu et représenté (FINCH et HALL, 2001). Celle-ci dépend des variables climatiques atmosphériques, mais aussi de la géométrie de la retenue, notamment de la variation de la surface en fonction de la profondeur, de la profondeur totale, et de l'exposition au rayonnement et au vent de chaque retenue. Notamment, les retenues ont la particularité de pouvoir stocker en profondeur l'énergie lumineuse captée sous forme de chaleur, et leur évaporation dépend donc de la chronique de climat passé. De nombreuses approches utilisent toutefois des simplifications, telles que l'utilisation d'une formule d'évaporation classique, notamment Penman (1956). Les pertes par percolation dépendent de la perméabilité de la retenue, et sont souvent négligées. Si les retours d'eau à l'atmosphère par évaporation, ainsi que les conséquences sur les variables atmosphériques (diminution des températures par changement de phase) sont assez systématiquement négligés dans les modèles, ces derniers ne modélisant pas dynamiquement l'atmosphère (Section II.3.1), la percolation peut éventuellement être prise en compte dans les modèles hydrologiques, notamment comme une alimentation des nappes.

Les autres sorties d'eau des retenues sont des sorties contrôlées et souhaitées : AEP, usages industriels, débit réservé, soutien d'étiage, irrigation, etc. Elles dépendent de règles de gestion en fonction de besoins estimés par les êtres humains et d'estimation des besoins.

LEBON (2021) distingue quatre spatialisations possibles des retenues :

- *représentation globale* : les retenues sont agrégées sur la zone étudiée. Les impluvia [8] des retenues sont ainsi rassemblés en un seul impluvium alimentant globalement les retenues. Le remplissage des retenues peut notamment être calculé via un modèle hydrologique unique de bassin versant. Il est également possible de calculer le remplissage comme une fraction du débit total du bassin versant à hauteur du ratio entre la surface d'impluvium et la surface totale du bassin versant. Les volumes et les surfaces d'eau libre sont également agrégés. Les autres flux intervenant dans le bilan des retenues (évaporation, percolation, etc.) sont alors globalisés. Ce choix de modélisation ne permet cependant pas de représenter les impacts spatialisés des retenues sur l'hydrologie. De la même façon, il n'est pas possible de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale de la disponibilité de la ressource stockée pour les besoin humains (ALLAIN et PLUMECOCQ, 2019) en deça de la résolution de la modélisation hydrologique. A fortiori, une telle modélisation ne permet pas de prendre en compte les impacts des retenues amont sur les retenues aval ;
- *représentation statistique* : cette représentation repose sur la définition de classes de retenues, généralement en fonction de leur taille, et de règles de remplissage empiriques associées à chaque classe de retenue. De telles règles s'appuient notamment sur une redistribution de l'eau des retenues entre elles. Cette méthode nécessite de collecter de nombreuses informations sur les retenues et/ou de formuler de nombreuses hypothèses ;
- *représentation semi-distribuée* : LEBON inclut dans cette catégorie une modélisation distinguant les retenues connectées au cours d'eau principal d'un bassin versant élémentaire (BVe), qui sont alors spatialement distribuées le long de ce cours d'eau et influencées par les prélèvements amont et donc par les retenues amont, des autres retenues, qui sont alors non spatialisées. C'est notamment cette approche qui est utilisée dans MAELIA. Les retenues non spatialisées sont alors individuellement remplies en fonction de l'écoulement modélisé sur leur bassin versant d'appartenance, et au prorata de leur surface d'impluvium exclusif (exclusion de la surface d'impluvium des retenues plus en amont) ;
- *représentation distribuée* : chaque retenue est spatialisée et est donc influencée par les propriétés hydrologiques et les retenues en amont. Les flux sortants peuvent également être spécifiés pour chaque retenue. Cette

8. *impluvium* : pluriel : impluvia. Synonyme de bassin versant. Terme utilisé dans le manuscrit pour décrire le bassin versant alimentant une retenue

modélisation nécessite de nombreuses données, et une compilation lourde. Cependant, elle permet de modéliser exhaustivement les effets locaux et la propagation spatiale des effets des retenues sur l'hydrologie, sur les retenues plus en aval, et sur la satisfaction des usages. C'est cette approche qui a été choisie dans le modèle MHYDAS-small-reservoirs.

La modélisation de la gestion des grands réservoirs/barrages est souvent assez explicite, et donc distribuée, car leur gestion a un impact fort, défini dans le temps et assez connu sur les débits. MAELIA prévoit notamment la modélisation d'un soutien d'étiage par les réservoirs en fonction de débits modélisés à des stations indicatrices. J2000 permet de faire varier les volumes des réservoirs au regard de fonctions objectif décrivant différents natures d'usage pour chaque barrage (hydroélectricité, soutien d'étiage, loisirs, réserve d'irrigation, etc.). Des travaux portent sur la modélisation de barrages hydroélectriques dans ORCHIDEE (BARATGIN et al., 2023). Des travaux ont été menés pour intégrer des réservoirs pour l'irrigation dans ORCHIDEE sur le Fleuve Jaune (ZHOU et al., 2021).

Concernant les petites retenues, il est plus délicat de connaître leur gestion précise. Le modèle MHYDAS-small-reservoirs a justement été développé pour mieux comprendre les impacts cumulés des petites retenues sur l'hydrologie, en écho au rapport sur l'impact cumulé des retenues (CARLUER et al., 2016) déjà évoqué en Section I.2.3.2. MHYDAS-small-reservoirs modélise explicitement l'hydrologie de chaque petite retenue, au regard de son remplissage par ruissellement, l'évaporation, et les prélèvements pour l'irrigation de parcelles clairement identifiées comme reliées à chaque retenue.

De plus, nous pouvons distinguer les outils existants selon leur représentation préfixée ou non des retenues. Le package airGRiwrm est en réalité une approche laissant une grande liberté sur la façon de définir les influences, qui peuvent être de simples chroniques d'influence préfixées, ou bien être des chroniques modélisées au regard de règles de gestion dépendant des débits observés. D'autres approches prévoient des fonctions prédéfinies de remplissage, de gestion, et de répercussions hydrologiques de la gestion des réservoirs.

4 Couplage entre maillons de la chaîne de modélisation

4.1 Implications de la prise en compte des influences humaines

Les influences humaines interviennent directement sur l'ensemble des compartiments cités :

- l'agriculture est une activité humaine ;
- l'hydrologie est influencée par les activités humaines : prélèvements pour différents usages, notamment irrigation, rejets, modifications hydrauliques ;
- le climat est directement influencé par les émissions et captations de gaz à effet de serre par les humains.

Les influences humaines sont également indirectes (du point de vue de notre modélisation). Par exemple, en influençant le climat, les humains influencent l'agriculture et l'hydrologie. Nous avons précisé dans la Section II.1.2 que les émissions de CO_2 doivent être externalisées d'une modélisation intégrée agro-hydrologique locale, en mobilisant par exemple les scénarios décrits par le GIEC.

Les approches intégrées doivent néanmoins simuler les influences humaines directes, notamment les prélèvements, rejets et règles de gestion. De même que pour les évolutions de concentrations en gaz à effet de serre, les évolutions des influences humaines locales sont plus pragmatiquement traitées via une scénarisation qualitative que par la modélisation (Section II.1.2).

La prise en compte des usages a des implications différentes selon les modèles hydrologiques. Les modèles à base physique modélisent plutôt des débits naturels, et prendre en compte les influences humaines doit permettre de rendre les simulations plus réalistes. Les modèles conceptuels, qui font l'objet d'un calage sur des débits observés, prennent déjà en compte les usages de façon implicite, à travers leurs paramètres calés. La prise en compte des usages doit ainsi permettre de séparer la modélisation des débits naturels de la modélisation des usages, et d'obtenir des paramètres de modélisation plus représentatifs du comportement naturel des bassins versants (TERRIER et al., 2020 ; SANTOS et al., 2022).

L'irrigation constitue en elle-même une influence humaine. La façon ensuite de la répercuter sur la modélisation hydrologique varie selon les modèles intégrés, selon plusieurs facteurs :

- la spatialisation du couplage ;
- la nature des compartiments hydrologiques prélevés et arrosés ;
- les règles de limitation des prélèvements.

4.2 Spatialisation du couplage

La spatialisation est contrainte par la distribution et la résolution spatiale des modèles utilisés, ainsi que par les objectifs de la modélisation. Les entités de simulation doivent en effet permettre un dialogue cohérent entre les modèles. Ainsi, pour que le modèle intégré prenne en compte les flux de la modélisation agronomique dans la fonction de production hydrologique, il paraît difficile de se dispenser de représenter des unités de modélisation hydrologique spécifiques par entité de simulation agronomique, ce qui impose une certaine distribution à la modélisation hydrologique au niveau de la fonction de production. Les modèles MAELIA, J2000, ORCHIDEE, MHYDAS-small-reservoirs, WEAP permettent ainsi cette distribution. De plus, pour étudier les effets cumulés de l'amont vers l'aval des influences, il paraît nécessaire d'adopter une distribution spatialement explicite. Cette distribution peut-être totale, ou bien seulement semi-distribuée. Le package airGRiwrm ou les travaux de COLLET et al., 2013 adoptent notamment un couplage semi-distribué entre ressource et demande, avec une estimation de la ressource et une répercussion des influences à l'échelle de sous-bassins versants. Cependant, la ressource et la demande ne sont pas homogènes sur l'ensemble d'une zone simulée. Une agrégation spatiale trop grossière de la ressource en eau peut conduire à une surestimation de la satisfaction de la demande (ALLAIN et PLUMECOCQ, 2019).

Si la modélisation intégrée fait intervenir des modèles de différentes résolutions, il est ainsi nécessaire, lors du dialogue entre les deux modèles :

- d'agréger les sorties des modèles les plus fins pour correspondre à la résolution de la modélisation la plus grossière ;
- ou de distribuer les sorties des modèles les plus grossiers pour correspondre à la résolution des modèles les plus fins.

4.3 Nature des compartiments hydrologiques mobilisés

Pour les modèles hydrologiques dont la fonction de production représente explicitement les bilans en eau du sol, et est donc confondue avec la modélisation agronomique, l'apport en eau par l'irrigation est généralement pris en compte dans la modélisation hydrologique. C'est notamment le cas dans ORCHIDEE, J2000, SWAT, MAELIA, MHYDAS-small-reservoirs, WEAP. J2000 prévoit notamment une répercussion distincte de l'irrigation sur le modèle hydrologique selon le système d'irrigation. L'irrigation gravitaire est appliquée sur le sol, sans interception par le feuillage, l'irrigation par aspersion est appliquée comme de la pluie et peut donc être interceptée, et la micro-irrigation réapprovisionne directement la réserve utile. Pour ORCHIDEE, l'irrigation, qui permet une plus forte évapotranspiration, peut même éventuellement avoir une rétroaction sur l'atmosphère (ARBOLEDA-OBANDO, 2023). D'autres modèles se contentent de modéliser un dialogue entre ressource et demande, en répercutant les prélèvements sur les compartiments hydrologiques prélevés (airGRiwrm, thèse de Lila Collet). En effet, il paraît plus délicat, dans des modèles conceptuels, donc non physiquement et non spatialement explicites, de coupler les bilans en eau du sol de la modélisation hydrologique et de la modélisation agronomique.

Les modèles représentent explicitement différents compartiments hydrologiques et peuvent représenter distinctement les prélèvements selon le compartiment prélevé : nappe ou rivière. C'est notamment le cas d'ORCHIDEE, J2000, SWAT, MAELIA. Les modèles GR, disponibles dans airGRiwrm et utilisés dans la thèse de Lila Collet (2013), ne représentent pas explicitement les nappes. Les prélèvements ne peuvent alors être

répercutés que sur les débits de surface. Les prélèvements, en nappe ou en rivière, sont généralement effectués dans l'entité simulée la plus proche. Pour ORCHIDEE, ils seront ainsi répercutés par maille. Pour J2000, SWAT, MAELIA, MHYDAS-small-reservoirs, WEAP, les prélèvements sont directement répercutés sur les biefs ou éventuellement les nappes correspondant aux points de prélèvements. Pour airGRiwrm, pour lequel les sous-bassins simulés sont éventuellement de très grande taille, l'impact des prélèvements est propagé selon la distance du point de prélèvement à l'exutoire et la vitesse calée du débit.

La prise en compte hydrologique de l'efficience de l'irrigation dans le cadre d'une approche intégrée soulève des questions. On peut déduire l'eau effectivement prélevée en anticipant les pertes liées au transport et les éventuels gains d'efficacité liés à l'utilisation de matériels d'irrigation plus efficients. Néanmoins, l'eau "perdue" est parfois supprimée du modèle, exagérant les impacts des prélèvements. En effet, l'eau perdue par fuite, ruissellement, percolation, rejoint en réalité le milieu sous forme liquide. L'eau perdue par évaporation sur la parcelle contribue tout de même à refroidir la parcelle et donc diminue la demande en eau. Parfois, au contraire, cette eau est simplement restituée à la ressource prélevée. C'est notamment le cas de l'eau déplacée ponctuellement dans un canal d'irrigation qui se verse ensuite en aval dans la rivière d'origine, n'induisant pas de pertes. Pourtant, le retour d'eau vers une ressource prend en réalité un certain temps. Les gains d'efficience à la parcelle ont par ailleurs sans doute des impacts sur les bilans d'énergie, qui sont complexes à prendre en compte.

4.4 Limitation des prélèvements

Différentes façons de contraindre les prélèvements en fonction de la disponibilité de la ressource sont considérées. Certaines approches adoptent une représentation plutôt conceptuelle, en autorisant les prélèvements à hauteur d'un pourcentage du débit modélisé dans la ressource prélevée (ORCHIDEE, J2000). D'autres approches, comme MAELIA ou aiGRiwrm, permettent d'appliquer des règles de gestion au regard des débits simulés passés, ce qui permet d'imiter les arrêtés sécheresse (Section I.2.3.3).

Les modèles intégrés ne peuvent pas reproduire exactement la décision menant à des arrêtés sécheresse, ces derniers relevant d'interactions humaines complexes, ni leur respect par les irrigants, mais cherchent généralement à en approcher le fonctionnement. Des prélèvements et règles de gestion à destination d'autres usages peuvent également être pris en compte dans les approches intégrées. Cela est particulièrement pertinent pour les bassins avec des zones urbanisées ou industrielles. Dans ce cas, la limitation des prélèvements fait généralement intervenir des règles de priorité entre les usages (COLLET, 2013 ; LEMAITRE-BASSET, 2023).

5 Les incertitudes dans les approches intégrées

Si, traditionnellement, les études d'impact ne s'appuyaient que sur une approche déterministe, c'est-à-dire fondée sur le développement d'un modèle le plus performant possible et l'utilisation d'un scénario le plus probable pour répondre à un objectif (KAY et al., 2009), une telle approche ne permet pas de quantifier les incertitudes liées à la modélisation en contexte de changement global. De plus, l'utilisation de plusieurs modèles, ce qui est le cas dans une modélisation intégrée, entraîne une "cascade d'incertitudes" (MITCHELL et HULME, 1999 ; BOÉ, 2007 ; LEMAITRE-BASSET et al., 2021), interrogeant l'interprétation des sorties de cette chaîne de modélisation. En effet, le parcours des différents compartiments à modéliser dans un modèle intégré agro-hydrologique en contexte de changement climatique a mis en évidence la multiplicité des possibles, et les incertitudes qui résultent des choix de modélisation pour chaque compartiment.

Les incertitudes de modélisation sont de trois types :

1. incertitude liée aux données d'entrée et à leur résolution spatio-temporelle ;
2. incertitude liée à la structure du modèle, c'est-à-dire aux équations sur lesquelles il s'appuie et aux processus représentés ;
3. incertitude liée aux valeurs attribuées aux paramètres du modèle (EEA, 2017).

De nombreuses méthodes existent pour prendre en compte les incertitudes dans les modèles (BOURGIN, 2014).

Pour les modèles appliqués à des cas d'étude pour lesquels on dispose d'observations, il est possible de comparer les simulations aux observations pour en déduire des lois décrivant les erreurs. Il est alors possible d'appliquer ces lois dans les simulations pour obtenir un intervalle d'erreur, par post-traitement. Néanmoins, en contexte de changement climatique, l'hypothèse de stationnarité des erreurs est difficile à maintenir, et il paraît délicat de recourir à de telles méthodes.

D'autres approches consistent à travailler en multi-paramètre et/ou en multi-modèle, ce qui parait plus adapté aux projections futures (IPCC, 2007 ; HAWKINS et SUTTON, 2009 ; CHAUVEAU et al., 2013 ; KONZMANN et al., 2013 ; WADA et al., 2013 ; IPCC, 2014 ; SAUQUET, 2014 ; CHALLINOR et al., 2018 ; LEMAITRE-BASSET et al., 2021 ; THIREL et al., 2021). De telles approches permettent de plus de décomposer, dans les approches intégrées, les sources d'incertitude (LEMAITRE-BASSET, 2019 ; THIREL et al., 2021).

Si le recours à des approches multi-modèle dans les études d'impact du changement climatique sur l'hydrologie nous paraît aujourd'hui déjà beaucoup abordée dans la littérature, le recours à plusieurs modèles intégrés agro-hydrologiques, de philosophies très distinctes, mériterait d'être étudié. De plus, nous avons mis en évidence dans l'état de l'art sur la modélisation agronomique la variabilité des hypothèses possibles pour le déclenchement de l'irrigation, et un travail de quantification des incertitudes de modélisation de la demande en eau et de mise au point d'une stratégie de modélisation capable de représenter les incertitudes nous paraît nécessaire. En particulier, il paraît intéressant d'explorer les incertitudes liées aux règles de déclenchement de l'irrigation et à la résolution spatiale et temporelle des prélèvements et d'application de l'irrigation.

6 Objectifs de la thèse et organisation du manuscrit

Notre revue systématique d'approches intégrées de référence a mis en évidence que les approches intégrées agro-hydrologiques déjà développées sont souvent :

- soit très complexes, au moins concernant un des maillons de la chaîne de modélisation. Cela est un frein à la généralisation de leur utilisation dans les PTGE ou les plans d'adaptation au changement climatique, ces derniers nécessitant une lourde collecte de données, ainsi qu'un temps de compilation et de calage longs. Une forte complexité n'est de plus pas forcément synonyme de meilleure performance et robustesse ;
- soit très simplifiées sur des maillons de la chaîne de modélisation, limitant les scénarios d'adaptation concrets pouvant être testés (représentation trop schématique des bilans en eau, résolution spatiale ou temporelle trop grossière...) ;
- soit les deux : modélisation très complexe de certains maillons quand d'autres maillons font l'objet de simplifications majeures.

Les modèles hydrologiques développés dans l'équipe d'accueil de la thèse sont les modèles GR. Outre l'importance de bénéficier d'un encadrement expert sur les modèles à mobiliser, nous pensons que la mobilisation de tels modèles soulève des questions de recherche intéressantes et pourrait permettre le développement d'outils opérationnels pour évaluer des stratégies d'adaptation de l'agriculture au regard de la ressource en eau. Nous observons en particulier que, bien que des études aient mobilisé les modèles de la famille GR dans des approches intégrées agro-hydrologiques, leur utilisation est restée relativement marginale dans ce champ de recherche par rapport à d'autres modèles hydrologiques tels que SWAT (THEROND et al., 2014). Le dialogue entre des modèles GR et des modèles agronomiques paraît en effet moins intuitif, notamment parce qu'ils sont souvent définis de façon globale donc spatialement non explicite, et parce que les flux calculés dans ces modèles intègrent de façon simplifiée les processus physiques hydrologiques complexes dans un bassin versant. L'interaction du modèle hydrologique avec les flux mobilisés pour la modélisation agronomique est ainsi rendue difficile. De plus, les exemples de travaux ayant couplé les modèles GR à des modèles agronomiques dans l'objectif d'intégrer ressource et demande (MILANO, 2012 ; COLLET et al., 2013) l'ont fait à un pas de temps décadaire ou mensuel, ne permettant pas de calculer les indicateurs habituellement utilisés par les gestionnaires

français. Pourtant, les modèles GR journaliers, par leur parcimonie, robustesse et performance, semblent être des candidats très intéressants pour les études d'impact du changement climatique. Ces derniers sont ainsi très populaires en France et à l'international pour de nombreux travaux, notamment en ce qui concerne l'effet du changement climatique sur les débits (LEMAITRE-BASSET, 2023). De plus, le récent développement de modèles GR semi-distribués (LOBLIGEOIS et al., 2014), ainsi que le développement du package R airGRiwrm facilitant la prise en compte des influences dans les modèles GR semi-distribués (DORCHIES et al., 2021), ouvrent la porte à une modélisation intégrée agro-hydrologique avec les modèles GR. La simplicité de ces approches permet également d'effectuer de nombreuses simulations, permettant des modélisations d'ensemble et donc de quantifier les incertitudes. Il paraît ainsi intéressant d'étudier la possibilité et la pertinence de l'utilisation des modèles GR dans une approche intégrée pour construire et évaluer des stratégies d'adaptation de l'agriculture au changement climatique. **Cette thèse vise donc à développer et évaluer une approche de modélisation intégrée agro-hydrologique mobilisant les modèles GR journaliers via le package airGRiwrm.**

De plus, nous avons identifié la diversité des approches possibles de modélisation de la demande en eau d'irrigation. De même que les modèles hydrologiques, les modèles de culture correspondent également à différents degrés de complexité. Dans un objectif d'opérationnalité, il nous paraît interroger de **questionner la pertinence de l'utilisation de modèles de demande en eau simples par rapport à des modèles plus complexes**. Nous avons également noté l'incertitude potentiellement importante des règles de déclenchement de l'irrigation, qu'il nous paraît important de quantifier.

Ainsi, nous souhaitons mettre en place une chaîne de modélisation d'impact parcimonieuse du changement climatique sur l'hydrologie et l'agronomie, faisant interagir ces deux derniers compartiments (Figure II.8). Les scénarios d'émission de gaz à effet de serre forceront des modèles climatiques globaux et régionaux (CHAUVEAU et al., 2013 ; SAUQUET, 2014). Les sorties de ces modèles climatiques serviront ensuite de données d'entrée aux modèles hydrologiques pour produire des projections hydrologiques, c'est-à-dire une information sur la ressource en eau future d'un bassin versant. Elles serviront également de données d'entrée aux modèles agronomiques qui calculent la demande en eau d'irrigation et le stress hydrique des cultures. Nous ne représenterons pas les rétroactions de l'hydrologie et de la végétation sur le climat. La modélisation hydrologique informera sur la ressource en eau disponible et la modélisation agronomique informera sur la demande en eau agricole (COLLET et al., 2013 ; SAUQUET, 2014 ; WAN et al., 2018 ; GORGUNER et KAVVAS, 2020) par l'intermédiaire d'un modèle de couplage journalier intégrant des règles de gestion et le comportement des acteurs. La fonction de production de la modélisation hydrologique sera indépendante de la modélisation du bilan en eau des sols de la modélisation des cultures. Le couplage consistera plus modestement, dans cette approche parcimonieuse, à contraindre la demande en eau par la ressource en eau disponible et les règles de gestion, et à répercuter les prélèvements sur les débits. La modélisation agronomique, hydrologique, et le couplage devront pouvoir être paramétrés de façon à représenter les scénarios locaux (Section II.2).

Il conviendra ainsi de discuter de l'impact de la simplification des modèles par rapport à des approches plus complexes. Notamment, la traduction des scénarios en données d'entrée et paramètres de modélisation est moins intuitive dans des simulations non explicites. La plateforme MAELIA (Modelling of socio-Agro-Ecological system for Landscape Integrated Assessment, THEROND et al., 2014), couple le modèle hydrologique SWAT, le modèle agronomique AqYield et la modélisation explicite du comportement des agriculteurs et des gestionnaires de l'eau, selon une résolution spatiale très fine et au pas de temps journalier. Ce modèle est donc utile pour travailler directement avec les agriculteurs. Cette plateforme est ainsi mobilisée, comme point de référence de nos travaux. Utiliser deux modèles de complexité distincte permet ainsi, dans un contexte où les données observées d'usage sont encore disponibles de manière trop parcellaire, d'évaluer l'approche simplifiée dans le cadre d'une étude d'impact du changement climatique sur un bassin versant agricole. Elle doit permettre également d'interroger la complémentarité de telles approches : évaluation des incertitudes liées à la modélisation, complexification progressive des scénarios et de leur évaluation par la modélisation.

De plus, la temporalité d'une thèse étant rapide, nous devrons nécessairement **développer une méthode efficace de construction de scénarios locaux d'évolution des usages traduisible dans les modèles utilisés**. Pour pouvoir quantifier les incertitudes liées à l'évolution locale de l'agriculture et des usages, nous souhaitons nous appuyer sur une prospective exploratoire. De plus, nous souhaitons travailler sur un bassin versant de méso-échelle, permettant de construire des scénarios concrets. Des partenaires de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse (AERM) nous ont proposé de faire ce travail sur le secteur du bassin versant de la Seille (Section III.3.4).

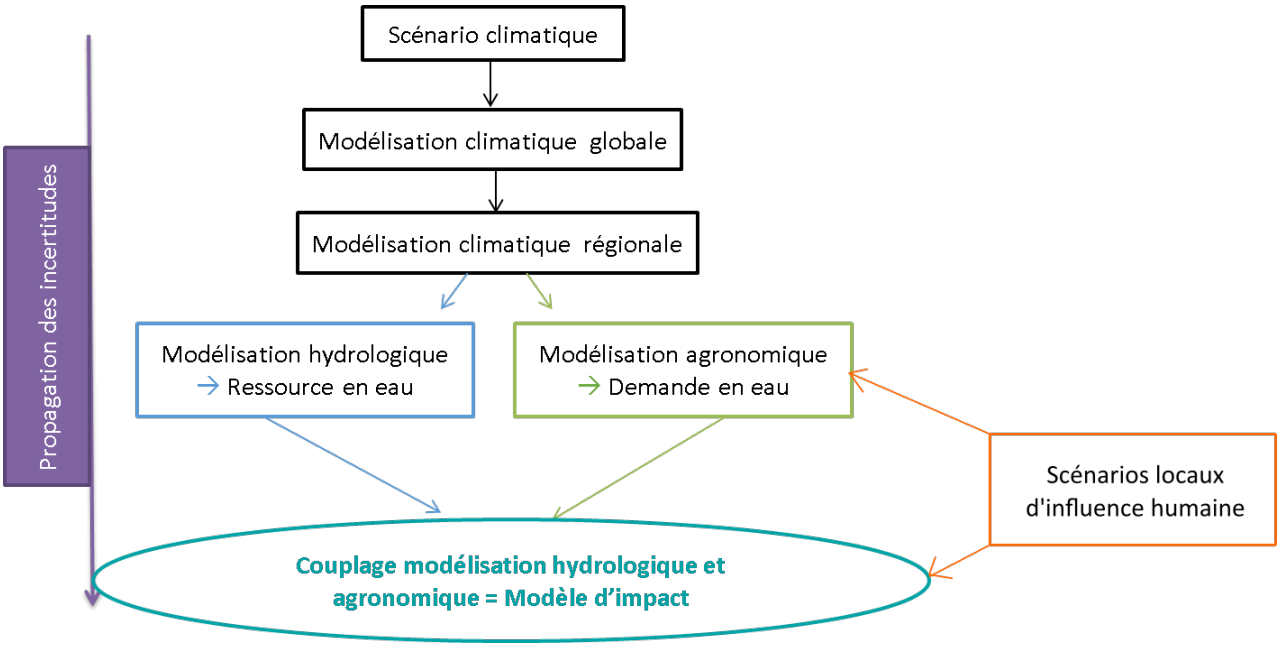


FIGURE II.8 – Chaîne de modélisation d'impact du changement climatique sur la ressource en eau et la demande en eau agricole. Modifié de : BOÉ, 2007

Nous souhaitons nous appuyer sur des entretiens avec des parties prenantes pour nous assurer du réalisme et de l'intérêt des scénarios à construire. Nous récapitulons ainsi la démarche complète à développer sur le bassin versant de la Seille, associant prospective et modélisation, dans la Figure II.9.

Les scénarios seront ainsi construits, modélisés et évalués grâce à une approche multi-critères sur le bassin versant de la Seille. Néanmoins, ce bassin ne fait actuellement pas l'objet d'irrigation, et il est donc nécessaire de développer et d'évaluer la modélisation sur un autre secteur. **Ce développement de la modélisation de la demande en eau agronomique sera réalisé sur le bassin versant de l'Aveyron aval**. Les travaux de thèse porteront ainsi sur deux zones d'étude :

- le bassin de l'Aveyron aval, pour le développement et l'évaluation de la modélisation intégrée agro-hydrologique ;
- le bassin versant de la Seille, pour la construction et l'évaluation de stratégies d'adaptation via l'utilisation de la modélisation intégrée agro-hydrologique.

Mes travaux de thèse s'organisent ainsi en **10** chapitres :

- **Chapitre I :** Description du bilan en eau des agro-hydrosystèmes et de leur perturbation par le changement global ;
- **Chapitre II :** le Chapitre que nous sommes en train de terminer, qui consiste en un état de l'art ;
- **Chapitre III :** Présentation des zones d'étude, bassin versant de l'Aveyron aval et de la Seille, et des bases de données ;
- **Chapitre IV :** Construction de scénarios sur le bassin versant de la Seille ;
- **Chapitre V :** Développement et évaluation d'une modélisation de la demande en eau des cultures sur le bassin versant de l'Aveyron aval ;
- **Chapitre VI :** Développement de la modélisation intégrée agro-hydrologique ;
- **Chapitre VII :** Evaluation du modèle sur les deux zones d'étude ;
- **Chapitre VIII :** Méthodologie de modélisation des scénarios ;
- **Chapitre IX :** Résultats de modélisation des scénarios ;
- **Chapitre X :** Discussions.

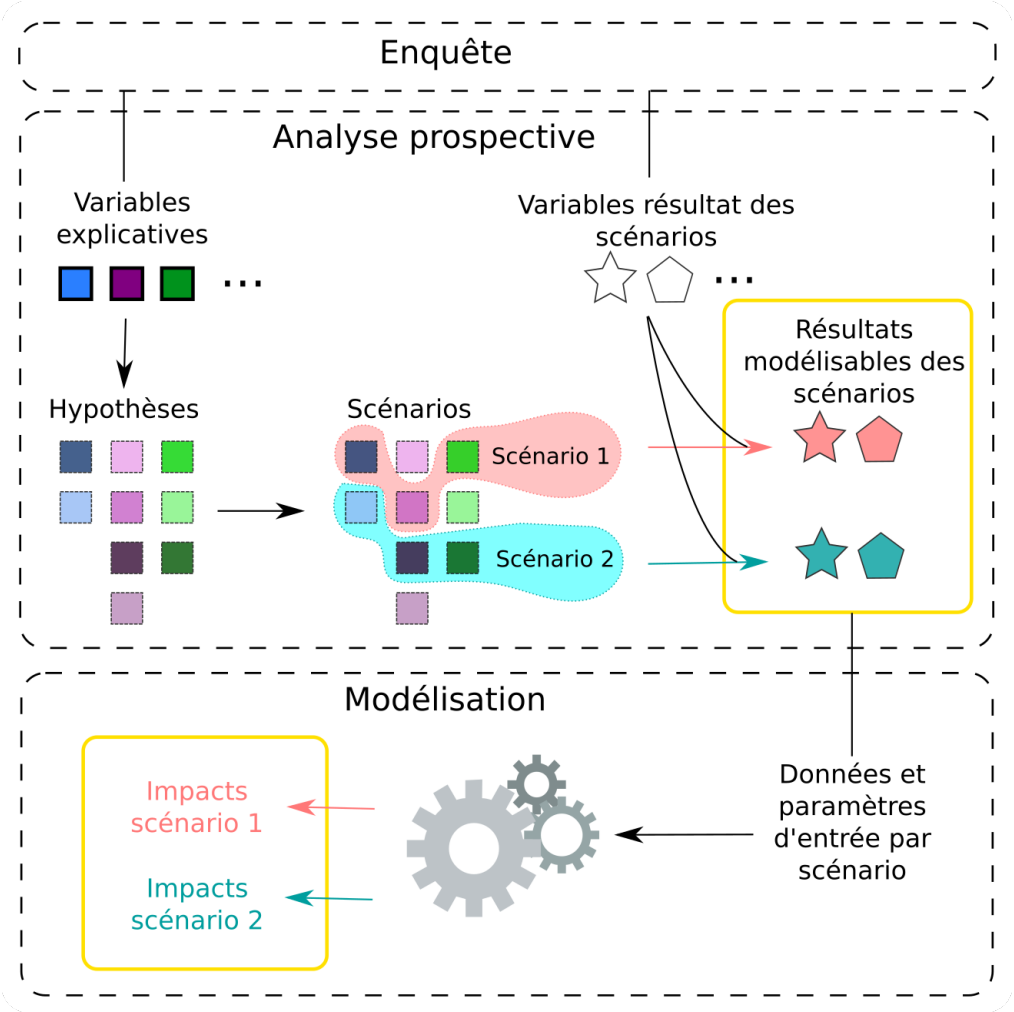


FIGURE II.9 – Combinaison de la prospective et de la modélisation pour construire et évaluer des stratégies d'adaptation au changement climatique

A retenir :

Construire et évaluer des stratégies d'adaptation au changement climatique nécessite de comprendre et de quantifier les interactions entre eau, cultures, climat, société. Cela est possible par la combinaison de :

- scénarios, pour imaginer les émissions de gaz à effet de serre et imaginer les évolutions humaines à échelle plus locale ;
- et de modèles intégrés pour quantifier les répercussions des émissions de gaz à effet de serre sur le climat, l'hydrologie, l'agronomie à échelle locale, ainsi que leurs interactions.

De multiples choix de modélisation sont possibles. Il paraît cependant opportun de développer des modèles simples pour quantifier l'impact de stratégies d'adaptation sur de nombreux territoires. Néanmoins, il est nécessaire de questionner l'impact de l'utilisation d'approches simplifiées, et la complémentarité entre différentes approches de modélisation.

Connaître les territoires pour anticiper leur avenir

Chapitre III

Zones d'études et données

Avant-propos :

Nous avons défini les objectifs de la thèse à la fin du Chapitre II. Nous souhaitons ainsi nous appuyer sur la méthode des scénarios et sur le développement d'un modèle intégré pour mettre au point une démarche complète de construction et d'évaluation de stratégies d'adaptation de l'agriculture au changement climatique. Pour ce faire, nous nous sommes intéressés à deux zones d'étude (Figure III.1) :

- le bassin de l'Aveyron aval, pour le développement et l'évaluation de la modélisation intégrée agro-hydrologique ;
- le bassin versant de la Seille, pour la construction et l'évaluation de stratégies d'adaptation via l'utilisation de la modélisation intégrée agro-hydrologique.

Dans ce chapitre, nous présentons dans un premier temps les sources de données utilisées de façon générale. Puis, pour chaque zone d'étude, nous présentons leurs caractéristiques naturelles et anthropiques, ainsi que les bases de données construites pour les étudier.

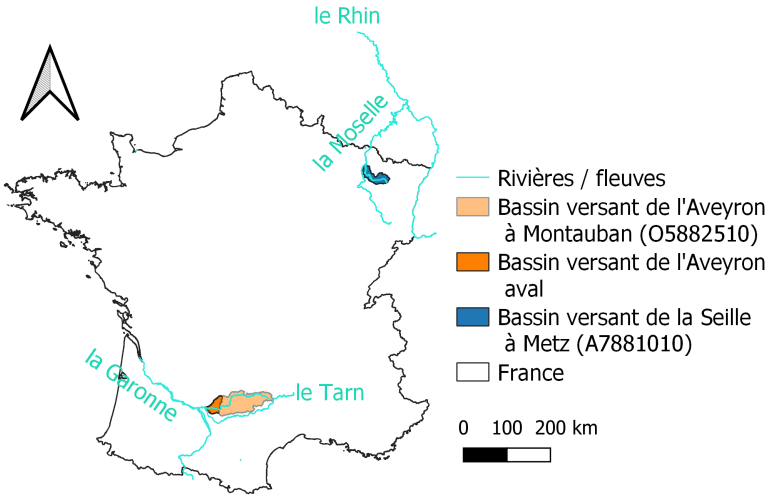


FIGURE III.1 – Localisation des bassins d'étude. Sources : cours d'eau en France : BD CARTHAGE, cours d'eau hors France : EU-HYDRO, contours des bassins versants : DELAIGUE (2020)

1 Sources des données

1.1 Agriculture

Nous regroupons dans les sources de données du volet agriculture, les données permettant de connaître la localisation et les surfaces semées pour chaque culture, ainsi que leur caractère irrigué ou non, ainsi que les caractéristiques agronomiques des cultures et des itinéraires techniques (phénologie, temporalité des opérations techniques, etc.). Pour ce travail de thèse, nous nous sommes appuyés sur les données et l'expertise du Laboratoire Agronomie et Environnement (LAE) d'INRAE dans le cadre du développement de la plateforme MAELIA. Ce laboratoire dispose de méthodologies d'extraction de données d'assolement et de surfaces irriguées à partir de bases de données INRAE. Ces données s'appuient elles-mêmes sur les données du Registre Parcellaire Graphique (RPG) et sont complétées avec le Corine Land Cover. En effet, les données RPG résultent de déclarations PAC, et ne sont donc pas totalement exhaustives. Les données issues de MAELIA permettent ainsi de connaître précisément les assolements à la parcelle entre 2008 et 2014 (année de changement de format des données du RPG), et le caractère irrigable ou non des îlots à partir de déclarations PAC effectuées entre 2007 et 2009.

De plus, le LAE dispose de paramètres techniques associés à chaque type de culture permettant de caractériser la temporalité des cultures et les opérations techniques sur un territoire donné. Ces données sont issues d'enquêtes avec les agriculteurs et de partenaires techniques. MAELIA permet donc de connaître l'itinéraire technique et les caractéristiques agronomiques à l'échelle des parcelles agricoles.

1.2 Hydroclimatologie passée

La base de données hydroclimatiques de l'équipe Hydrologie des Bassins Versants d'INRAE Antony (DELAIGUE, 2020) permet de disposer des chroniques de débit et de variables climatiques journalières. Les données de débits sont issues de l'HydroPortail (LELEU et al., 2014), et les données climatiques passées sont issues de la réanalyse SAFRAN (VIDAL et al., 2010). Les données SAFRAN permettent notamment de disposer de données de précipitations, de température de l'air à 2 m, de vent, de rayonnements et d'humidité de l'air. Si les données climatiques passées étaient disponibles sur l'entièreté de la période 1958-2019, les données hydrologiques peuvent souffrir de lacunes ; nous détaillerons cela lors de la présentation spécifique des deux zones d'étude.

La base de données hydroclimatiques comprend de plus des chroniques d'évapotranspiration potentielle (ETP) calculées à partir des données SAFRAN, selon plusieurs formulations. Nous choisissons d'utiliser la formulation de Penman-Monteith, qui permet d'obtenir généralement de bonnes performances de modélisation hydrologique, et est utilisée comme évapotranspiration de référence dans le modèle CropWat (ALLEN et al., 1998), que nous utilisons (Chapitre V). Elle représente l'évapotranspiration maximale d'un gazon uniforme de 12 cm. Elle est donnée dans l'Équation III.1 (ALLEN et al., 1998) :

$$ETP_{PM} = \frac{0,408\ \Delta\ (R_n - G) + \gamma\ \frac{900}{T+273}\ u_2\ (e_s - e_a)}{Delta + \gamma\ (l + 0,34\ u_2)} \tag{III.1}$$

Avec :

- ETP_{PM} l'évapotranspiration potentielle Penman-Monteith en mm j^{-1} ;
- R_n le rayonnement net en MJ m^{-2} j^{-1} ;
- G le flux de chaleur du sol en MJ m^{-2} j^{-1} ;
- T la température moyenne journalière à 2 m de hauteur en °C ;
- u_2 la vitesse du vent à 2 m de hauteur en m s^{-1} ;
- e_s la pression de vapeur à saturation moyenne à la température de l'air en kPa ;
- e_a la pression de vapeur effective de l'air, atteinte à la température du point de rosée, en kPa ;

- $Delta$ la pente de la courbe de pression de vapeur saturante en fonction de la température en kPa °C^{-1} ;
- γ la constante psychrométrique en kPa °C^{-1}.

La formulation de Penman est donnée dans l'Annexe A, (PENMAN, 1956). Elle est utilisée pour simuler l'évaporation des plans d'eau.

De plus, Météo-France a mis à disposition dans le cadre du projet Explore2 une formulation d'ETP issue de Penman-Monteith utilisant un proxy du rayonnement à courtes longueurs d'onde R_s issu de la température de l'air. Cela la distingue du calcul habituel s'appuyant sur un R_s extrapolé par l'analyse SAFRAN et utilisé pour les ETP disponibles dans la base de données de l'équipe. R_s est ensuite utilisé pour calculer R_n intervenant dans l'Equation III.1. En effet, les projections climatiques que l'on présentera plus tard sont issues de modèles climatiques régionaux ayant fait des hypothèses hétérogènes d'évolution des concentrations d'aérosols dans l'atmosphère. Un proxy du rayonnement a donc été utilisé, pour que les projections soient homogènes sur l'évolution des aérosols. Afin d'être cohérent sur la période passée (notamment en raison du calage du modèle agro-hydrologique), le même proxy a été utilisé sur les données SAFRAN. Le rayonnement à courtes longueurs d'onde R_s parvenant à la surface de la Terre a ainsi été calculé via la formulation d'Hargreaves (Equation III.2), avec K_{rs} un coefficient fixé à 0,175 °C$^{-0.5}$, R_a le rayonnement extraterrestre en MJ m^{-2} d^{-1} (lié à l'altitude, la latitude et au jour de l'année), et T_{min} et T_{max} respectivement les températures journalières minimales et maximales en °C.

$$R_s = K_{rs} \times R_a \times \sqrt{T_{max} - T_{min}} \tag{III.2}$$

L'ensemble des données climatiques est disponible sur la grille SAFRAN (8 par 8 km) et a été agrégé à l'échelle des sous-bassins versants d'étude.

1.3 Projections climatiques

Afin d'étudier le futur en contexte de changement climatique sur le bassin versant de la Seille, nous utilisons la base de données de projections climatiques produite dans le cadre du projet Explore2. Ces données sont disponibles sur le portail DRIAS (https ://www.drias-climat.fr/). Ce portail met notamment à disposition les variables journalières présentées dans le Tableau III.1 selon la résolution des mailles SAFRAN (VIDAL et al., 2010), soit 8 par 8 km. Les projections climatiques utilisées dans cette thèse sont corrigées via la méthode ADAMONT à l'échelle saisonnière (ROBIN et al., 2023). Cette méthode combine une approche quantile-quantile et un conditionnement par type de temps. On notera enfin que la correction ADAMONT a été appliquée sur la période 1974-2005 par rapport à SAFRAN sur la période 1980-2011. Ces différents éléments méthodologiques, sur lesquels nous n'avons pas la main et que nous ne détaillerons donc pas plus, permettront d'expliquer certains résultats plus loin dans le manuscrit. Notons qu'une seconde méthode de correction a été ajoutée récemment, mais les données n'étaient pas disponibles lors de la récupération des projections.

Variable	**Définition**	**Unité**
huss	Humidité spécifique de l'air près de la surface	kg kg^{-1}
prtot	Précipitations totales	kg m^{-2} s^{-1}
sfcWind	Vitesse horizontale du vent en surface	m s^{-1}
tas	Température de l'air	K
tasmin	Température de l'air minimale journalière	K
tasmax	Température de l'air maximale journalière	K

TABLEAU III.1 – Variables journalières produites par le projet Explore2

Ces variables ont été modélisées pour de nombreux couples de modèles climatiques globaux (GCM) et de modèles climatiques régionaux (RCM), comme indiqué dans le Tableau III.2. Nous n'utilisons pas l'ensemble de ces projections, et effectuons une sélection éclairée (Annexe B1, 2). Cette sélection a été effectuée dans le but de représenter un échantillonnage des évolutions climatiques entrevues dans l'ensemble Explore2 complet, tout en restant cohérent avec l'état de connaissance du changement climatique. Les évolutions climatiques attendues seront présentées plus tard.

GCM	RCM	Scénarios			Sélection
		RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CNRM-ALADIN63	X	X	X	X
	KNMI-RACMO22E	X	X	X	X
	MOHC-HadREM3-GA7-05			X	
ICHEC-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E	X	X	X	
	SMHI-RCA4	X	X	X	
	MOHC-HadREM3-GA7-05	X		X	
IPSL-IPSL-CM5A-MR	IPSL-WRF381P		X	X	
	SMHI-RCA4		X	X	X
	DMI-HIRHAM5			X	
MOHC-HadGEM2-ES	CLMcom-CCLM4-8-17		X	X	X
	CNRM-ALADIN63			X	
	ICTP-RegCM4-6	X		X	
	MOHC-HadREM3-GA7-05	X		X	
MPI-M-MPI-ESM-LR	CLMcom-CCLM4-8-17	X	X	X	
	ICTP-RegCM4-6	X		X	
	MPI-CSC-REMO2009	X	X	X	X
NCC-NorESM1-M	DMI-HIRHAM5		X	X	X
	GERICS-REMO2015	X	X	X	
	IPSL-WRF381P			X	

TABLEAU III.2 – Projections climatiques disponibles via le projet Explore2 (ROBIN et al., 2023) et sélection effectuée pour cette thèse

Comme expliqué dans la Section III.1.2, Météo-France a de plus calculé une ETP Penman-Monteith s'appuyant sur le calcul d'un proxy du rayonnement. En effet, les modèles climatiques utilisés dans l'exercice DRIAS ont effectué des hypothèses différentes sur l'évolution de concentration d'aérosols dans l'atmosphère, qui constituent une barrière atténuant le rayonnement du Soleil parvenant à la surface de la Terre. Pour que les simulations soient homogènes du point de vue de la conceptualisation du rayonnement, celui-ci a ainsi dû être recalculé indépendamment de la concentration en aérosols de l'atmosphère.

1.4 Plans d'eau

Les données d'entrée relatives aux plans d'eau consistent à connaître la localisation, la surface, le volume, la nature des plans d'eau (plan d'eau connecté, déconnecté, sur nappe, voir Section I.2.3.2), l'impluvium intercepté par chaque retenue, et le chevauchement entre chaque impluvium. De plus, pour les barrages, les règles de lâcher pour effectuer du soutien d'étiage doivent également être connues.

De nouveau, nous nous sommes appuyés sur les données et l'expertise du LAE, qui a mis en place une méthodologie d'extraction des données de la BD TOPO, de classement automatique des retenues extraites selon leur nature, d'estimation automatique de leur impluvium et de leur volume par croisement de leur position et surface par un modèle numérique de terrain. Cette méthodologie leur permet de construire leur base de données d'entrée des retenues et barrages pour les simulations effectuées via la plateforme MAELIA [1].

De plus, les simulations de MAELIA permettent de disposer de niveaux simulés des plans d'eau et des barrages au pas de temps journalier, constituant une base de données d'évaluation. Néanmoins, des dysfonctionnements de MAELIA sur le bassin versant aval de l'Aveyron n'ont pas pu être résolus pendant la thèse. Sur la Seille, MAELIA, dans sa version avec les plans d'eau, n'a de plus pas pu être finalisée dans la durée de la thèse. Il n'a donc finalement pas été possible d'utiliser les sorties des plans d'eau de MAELIA comme

1. Voir la documentation de la plateforme sur http://maelia-platform.inra.fr/

données d'évaluation, comme initialement prévu. Des données de niveaux ou de gestion des plans d'eau sont éventuellement disponibles auprès de leurs gestionnaires, comme nous le verrons plus tard.

1.5 Données de prélèvements

Les données de prélèvements disponibles sont les données issues des déclarations faites aux agences de l'eau dans le cadre du paiement des redevances. Celles-ci sont désormais rassemblées sur la banque nationale des prélèvements quantitatifs en eau (BNPE). Elles permettent de connaître les prélèvements effectués à des points de prélèvements connus, par grande catégorie d'usage (industrielle, irrigation, alimentation en eau potable, turbinée...). Elles sont néanmoins anonymes, au pas de temps annuel, et incomplètes ou de qualité questionnable. En effet, les déclarations ne sont souvent obligatoires qu'à partir d'un certain seuil de prélèvement, les prélèvements illégaux ne sont pas pris en compte, et il s'agit de données déclarées mais non vérifiées.

Une fois de plus, MAELIA peut également fournir des chroniques de prélèvements à l'issue des simulations, cette fois au pas de temps infra-annuel. Néanmoins, les dysfonctionnements préalablement évoqués, ainsi que les contraintes temporelles, n'ont finalement pas permis de disposer de sorties de prélèvements, c'est-à-dire d'irrigation contrainte par la ressource disponible et les règles de gestion sur les zones d'étude. On a néanmoins pu utiliser des simulations de la demande en eau d'irrigation sur le secteur de l'Aveyron aval (Chapitre V).

2 Le bassin versant de l'Aveyron : zone de développement de la modélisation

2.1 Géographie physique

L'Aveyron est une rivière de 291 km située dans le Sud Ouest de la France (Figure III.1) et drainant une surface de 5300 km². Son bassin versant est à cheval sur quatre départements : l'Aveyron, le Lot, le Tarn et le Tarn-et-Garonne. Elle prend sa source aux alentours de Séverac-le-Château, dans le Massif central, pour se jeter dans le Tarn à Montauban (Figure III.1). Le Tarn est lui-même un affluent de la Garonne, qui se jette dans l'Océan Atlantique. Dans le travail de thèse, nous ne modélisons que la portion aval de l'Aveyron, d'une surface de 840 km², à partir de l'exutoire de la Vère, affluent de l'Aveyron à Bruniquel (Figure III.2).

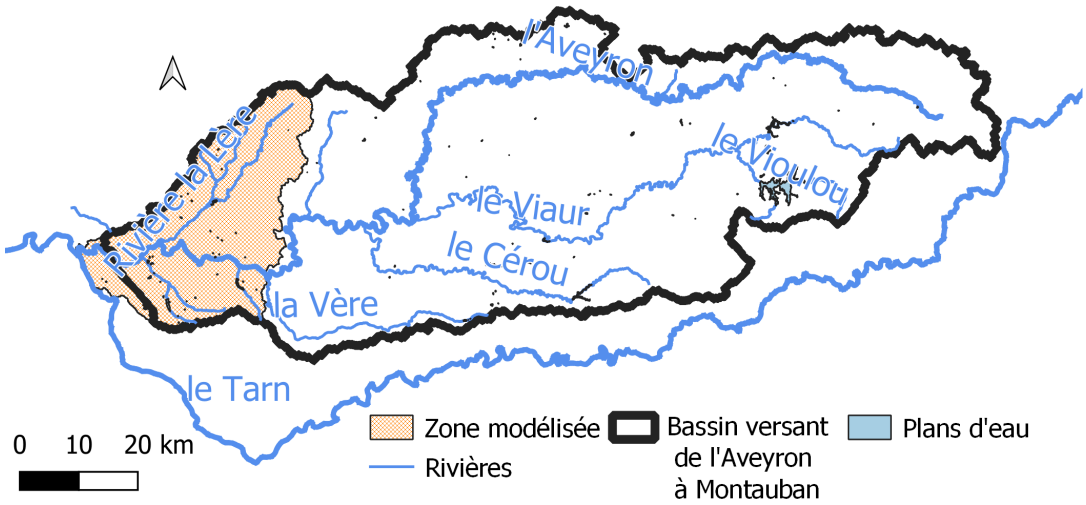


FIGURE III.2 – Réseau hydrographique du bassin versant de l'Aveyron. Sources : rivières et plans d'eau : BD CARTHAGE ; contour de bassin versant : DELAIGUE (2020)

La géologie du bassin versant de l'Aveyron se divise en deux zones (ARTELIA, 2015) : une première, cristalline, située en amont et donc à l'est du bassin ; une seconde, constituée de dépôts sédimentaires, en

aval du bassin et donc à l'ouest. Le secteur modélisé correspond donc à une zone constituée de sédiments. Le substratum se compose d'argiles et molasses, sur lesquels sont présentes d'importantes alluvions sableuses dans les lits majeurs de la Lère et de l'Aveyron aval. Ces alluvions sont organisées en terrasses, marqueurs des successions de période d'érosion et de dépôt au cours du Quaternaire. Ces alluvions constituent en partie une nappe d'accompagnement [2], très étudiée par le BRGM (BRGM, 2016 ; Figure III.3).

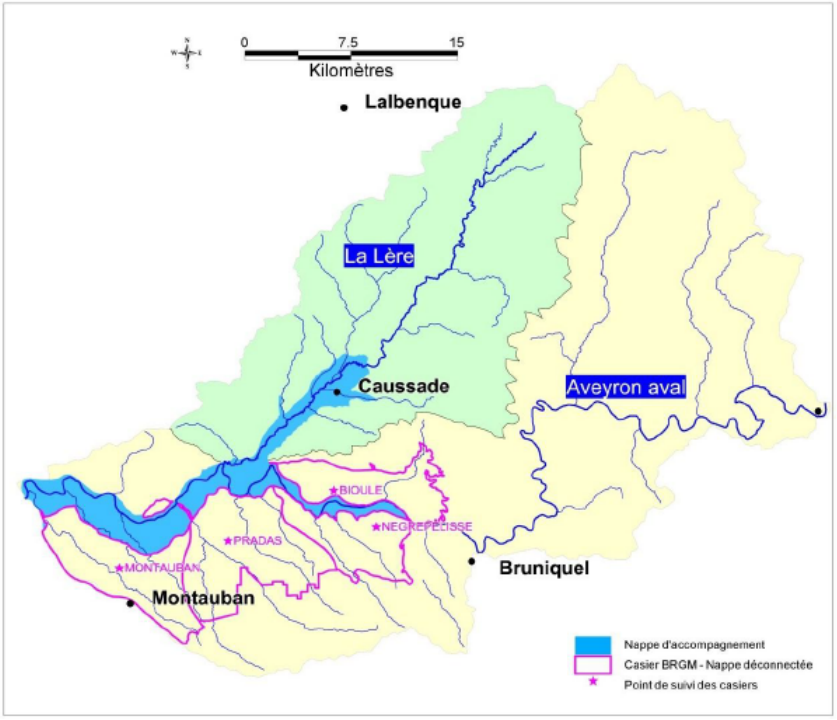
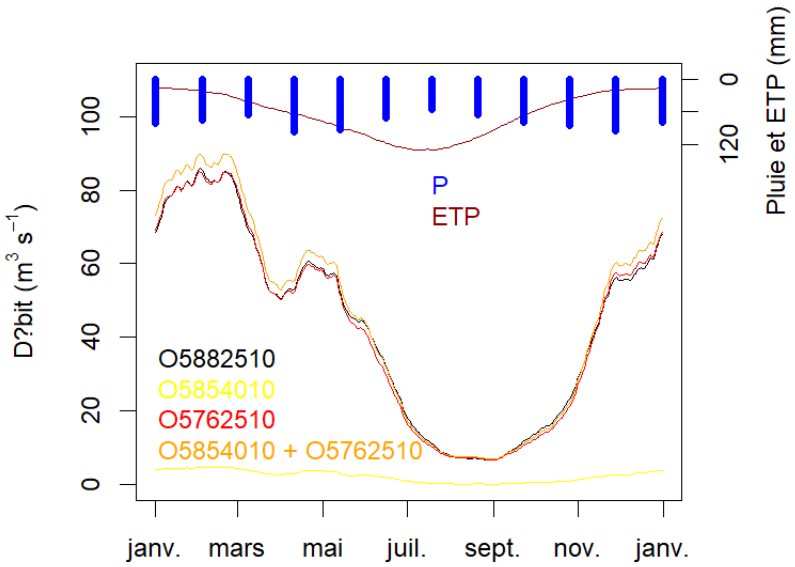


FIGURE III.3 – Nappe d'accompagnement de l'Aveyron aval et de la Lère. Source : ARTELIA (2015)

2.2 Hydroclimatologie

La zone modélisée, soit le bassin versant aval de l'Aveyron, se divise entre l'aval de la rivière Aveyron, dont l'hydrologie est fortement influencée par les débits entrants amont, et la Lère, affluent de l'Aveyron à Réalville. Trois stations hydrométriques sont présentes sur le périmètre étudié : l'Aveyron à Bruniquel (O5762510), en amont, la Lère à Réalville (O5854010), et enfin l'Aveyron à Montauban, en aval (O5882510). On peut ainsi visualiser les régimes hydroclimatiques et la localisation des stations en Figure III.4. Les débits moyens glissants sur 30 jours les plus élevés, autour de 80 m^3 s^{-1} pour l'Aveyron à Montauban (O5882510), sont atteints sur les mois d'hiver. On note par ailleurs un rebond printanier des débits, autour de 60 m^3 s^{-1} pour l'Aveyron à Montauban (O5882510), lié à d'importantes précipitations sur les mois d'avril et mai (Figure III.4a). Les débits les plus faibles sont atteints en fin d'été, en août et septembre, avec des débits moyens glissants autour de 10 m^3 s^{-1} pour l'Aveyron à Montauban (O5882510). Par ailleurs, on y observe que la somme des débits observés aux stations amont (O5854010 et O5762510) est supérieure aux débits observés à la station la plus en aval (O5882510) sur une grande partie de l'année, en particulier en hiver et au printemps. Cela semble indiquer que les prélèvements ou les pertes par infiltration sont plus importants que les débits produits sur cette portion de bassin à ces périodes. Ces deux hypothèses sont plausibles, au regard des importants prélèvements réalisés sur ce secteur, également en période hivernale, notamment pour remplir des retenues, mais aussi considérant les importants échanges nappe-rivière. Les précipitations moyennes annuelles sont de 906 mm sur le bassin versant de l'Aveyron et de 802 mm sur le bassin de la Lère, pour une évapotranspiration potentielle annuelle respectivement de 790 et 806 mm (Figure III.4 (b)). On observe un gradient, avec des précipitations qui augmentent et parallèlement une évapotranspiration qui diminue vers le Nord-Ouest du secteur modélisé (Figure III.4 (c)).

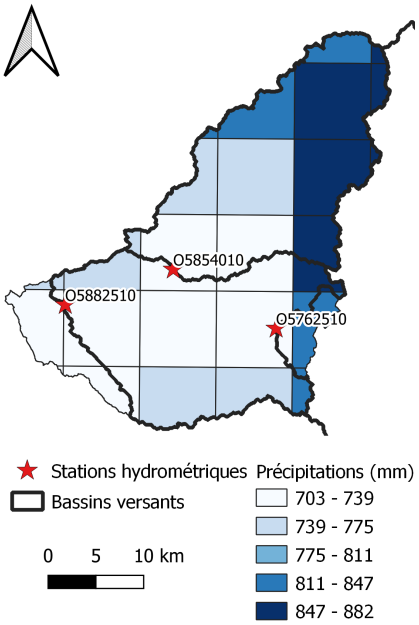
2. Nappe souterraine en connexion hydraulique avec le cours d'eau et dans laquelle un prélèvement est susceptible d'avoir un impact (direct ou indirect) sur le débit de celui-ci, avant la fin de l'étiage (BRGM, 2016).



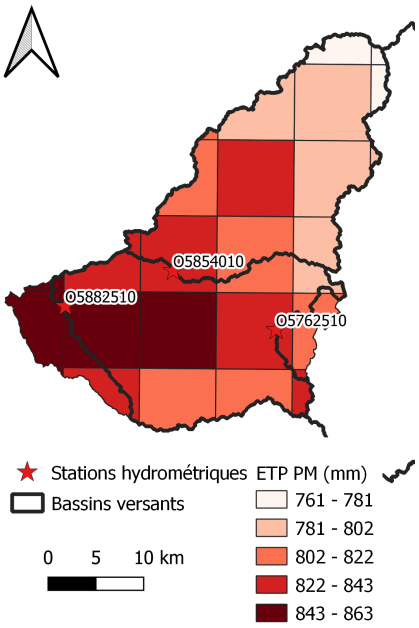
(a) Régimes hydroclimatiques des bassins versants aux trois stations hydrométriques disponibles sur l'Aveyron aval. Les données utilisées pour les régimes des débits correspondent à l'intersection des données disponibles pour les trois stations, et couvrent donc uniquement les périodes 1989-2004 et 2013-2018. Les données utilisées pour l'ETP PM et les précipitations mensuelles couvrent la totalité des années 1989-2004 et 2013-2018. Les données de précipitation et d'ETP correspondent aux données moyennes sur l'ensemble du bassin versant ayant pour exutoire l'Aveyron à Montauban. Les précipitations sont sommées au pas de temps mensuel, les débits sont moyennés sur 30 jours et l'ETP est sommée sur 30 jours. Les débits de l'Aveyron à Bruniquel, en amont, et de la Lère à Realville, sont sommés à titre de comparaison à ceux de l'Aveyron à Montauban, en aval.

Bassin	Surface (km^2)	Débit moyen (m^3 s^{-1})	Précipitations annuelles (mm)	ETP PM annuelle (mm)
O5762510	4499	42,7	929	785
O5854010	385	2,41	802	806
O5882510	5249	43,2	906	790

(b) Moyennes hydroclimatiques des sous-bassins versants de l'Aveyron (intersection des périodes disponibles pour les débits, couvrant les périodes 1989-2004 et 2013-2018 ; période 1989-2018 pour les précipitations et l'ETP PM)



(c) Précipitations annuelles moyennes calculées à partir des données SAFRAN (1989-2018)



(d) Évapotranspiration potentielle PM annuelle moyenne calculée à partir des données SAFRAN (1989-2018)

FIGURE III.4 – Hydrologie et climat du bassin versant de l'Aveyron. Sources : SAFRAN (VIDAL et al., 2010), équipe Hydrologie des Bassins Versants d'INRAE Antony (DELAIGUE, 2020)

2.3 Géographie anthropique

L'hydrologie du bassin versant de l'Aveyron est fortement influencée par la présence d'ouvrages de stockage et leur gestion (Figure III.5). L'amont du bassin est notamment marqué par deux barrages hydroélectriques situés sur le Viaur (donc en dehors de la zone d'étude) : le complexe du Lévézou et le barrage de Thuriès. Ces barrages influencent l'hydrologie à la fois par leur remplissage hivernal, et par les lâchers d'eau pour la production hydroélectrique, principalement en hiver, et le soutien d'étiage, en été, qui coïncide avec la période de prélèvement pour l'irrigation. De plus, une partie de l'eau produite par le bassin versant est détournée au niveau du complexe du Lévézou vers le bassin versant du Tarn, pour approvisionner la centrale hydroélectrique d'Alrance. Trois barrages de taille plus réduite se trouvent sur le territoire d'étude : les Falquettes, le Tordre et le Gouyre (Tableau III.3). On note également l'abondance de retenues individuelles de petite dimension (Figure III.6). Le remplissage des barrages et retenues serait principalement effectué de façon passive, mis à part le remplissage des barrages constituant le complexe du Lévézou (ARTELIA, 2015).

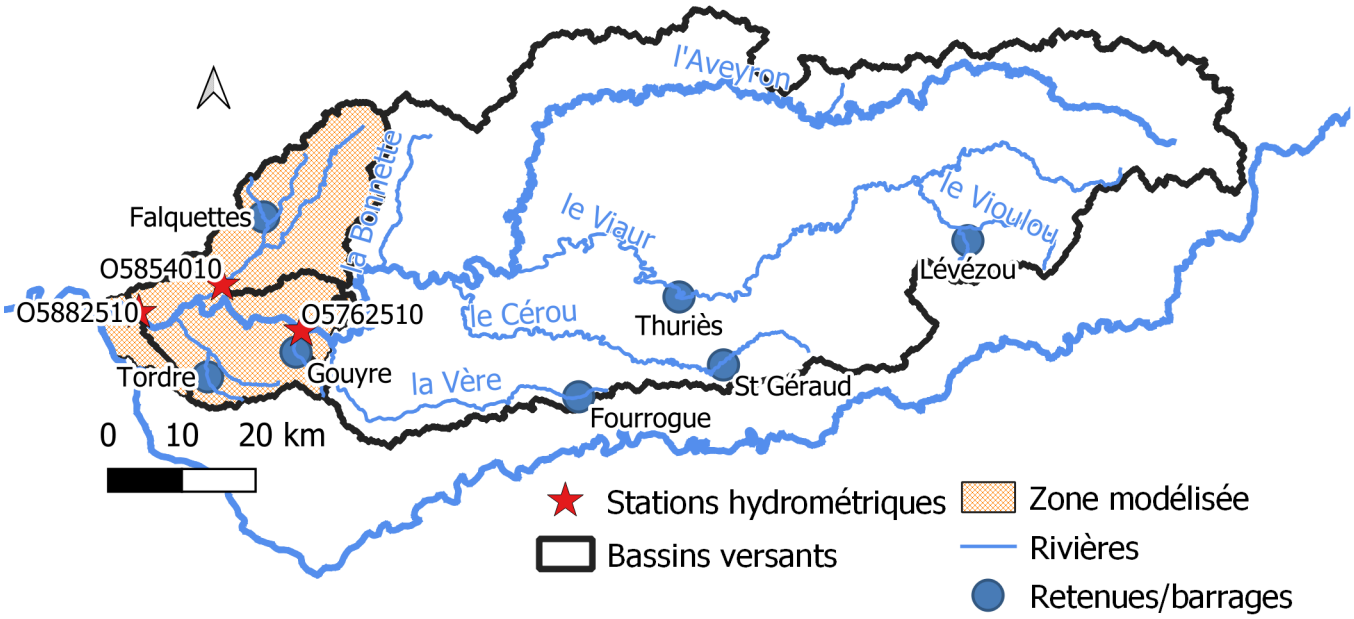
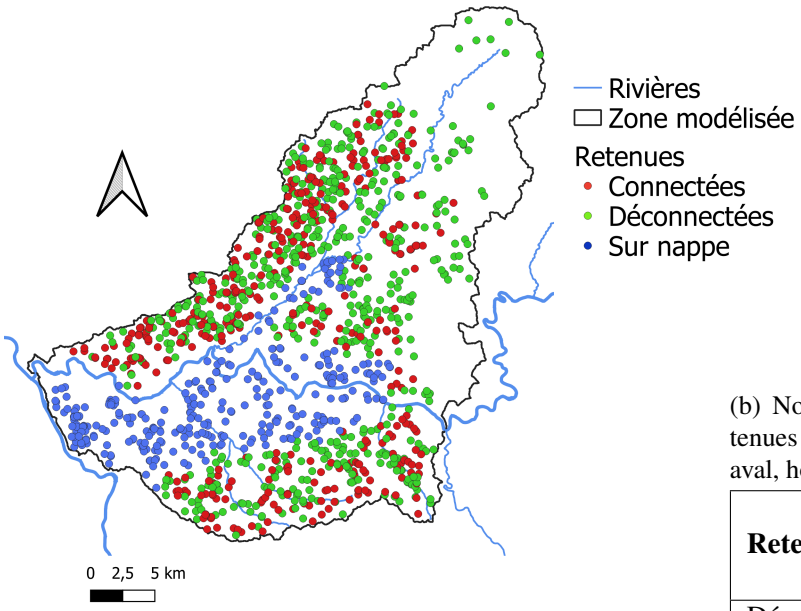


FIGURE III.5 – Localisation des principaux barrages sur le bassin versant de l'Aveyron

Nom	Volume total (Mm³)	Volume de soutien d'étiage (Mm³)	Usage principal
Lévézou	187	5	Hydroélectricité
Thuriès	6,5	1,1	Hydroélectricité
Saint-Géraud	15	12	Soutien d'étiage
Fourrogue	1,3	1,3	Soutien d'étiage/irrigation
Le Gouyre*	3,4	0,5	Irrigation
Le Tordre*	3,2	0,5	Irrigation
Falquettes*	0,82	0,8	Soutien d'étiage

TABLEAU III.3 – Caractéristiques des barrages sur le bassin versant de l'Aveyron. Avec une étoile sont figurés les barrages situés sur la zone d'étude (ARTELIA, 2015)



(a) Localisation et nature des retenues sur le bassin versant Aveyron aval

(b) Nombre et volumes cumulés des retenues sur le bassin versant de l'Aveyron aval, hors Falquettes, Gouyre et Tordre

Retenues	**Nombre**	**Volume cumulé** (Mm^3)
Déconnectées	589	3.3
Connectées	405	5.1
Sur nappe	311	2.2

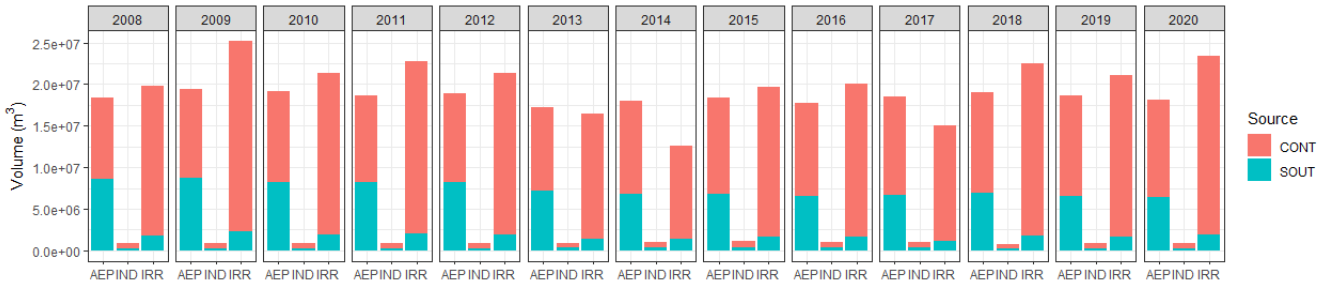
FIGURE III.6 – Les retenues sur le bassin versant aval de l'Aveyron. Source : base de données constituée pour MAELIA implémenté sur l'Aveyron aval

L'Aveyron fait également l'objet de prélèvements directs pour l'irrigation ou d'autres usages. Les données de prélèvements déclarés aux Agences de l'Eau pour les redevances sur l'eau sont disponibles dans la BNPE, et sont présentées à l'échelle annuelle dans la Figure III.7. Cette figure montre l'importance des prélèvements d'irrigation, en particulier sur notre secteur de travail. Elle permet également d'observer que les prélèvements d'irrigation se font principalement en eau de surface sur le bassin versant de l'Aveyron aval. De plus, alors que les prélèvements pour l'eau potable et les usages industriels sont relativement stables interannuellement, nous observons une forte variabilité interannuelle des prélèvements d'irrigation. On note enfin que les prélèvements pour l'hydroélectricité n'ont vraisemblablement pas été renseignés dans la BNPE. Plus généralement, il paraît important de considérer les données de prélèvements avec une grande prudence, celles-ci pouvant être partielles ou peu précises.

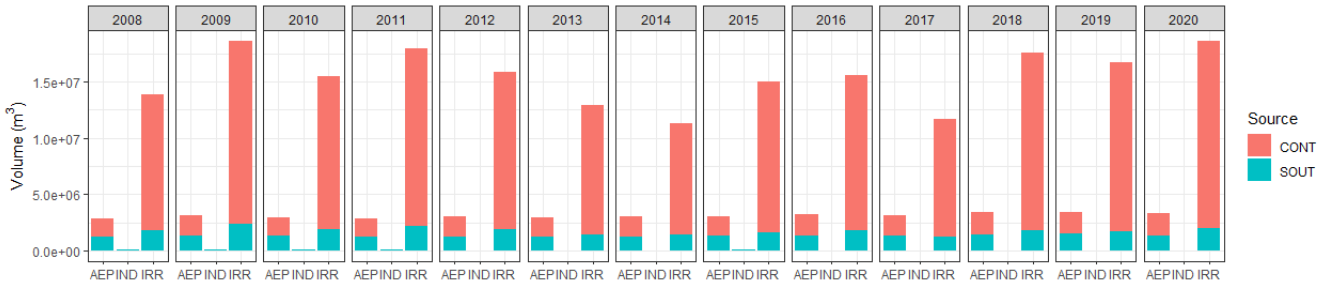
La zone modélisée (840 km^2) est couverte (CLC, 2012, Figure III.8) :

- à 70 % de surfaces agricoles. Néanmoins, la surface agricole utile déclarée au recensement général agricole de 2010 ne couvre qu'environ 49 % de la surface de la zone modélisée, chiffre proche de la surface agricole prise en compte dans les données d'entrée et simulations de MAELIA établies à partir de registre parcellaire graphique. La surface agricole utile se répartit ainsi (MURGUE, 2014) :
    - en prairies et jachères pour 43 % ;
    - en céréales à paille pour 23 % ;
    - en maïs pour 16 % ;
    - en oléagineux et protéagineux pour 12 % ;
    - en cultures permanentes (vergers et vignes) pour 6 % ;
- à 26 % de surfaces forestières ;
- à 4 % de zones artificialisées.

La surface irriguée annuelle représente quant à elle environ 8000 ha d'après le recensement général agricole de 2010, ce qui correspond aux sorties de MAELIA pour l'année 2010, qui estime la surface irriguée à partir des cultures présentes sur les parcelles définies comme irrigables. L'assolement irrigué obtenu est ainsi constitué à 60 % de maïs, 15 % de céréales à paille, 13 % de vergers, 5 % de soja, 4 % de prairies, 2 % de tournesol, 1 %



(a) Prélèvements en eau sur le bassin versant total de l'Aveyron à Montauban



(b) Prélèvements sur la zone d'étude, le bassin versant de l'Aveyron aval

FIGURE III.7 – Prélèvements sur le bassin versant de l'Aveyron total (a) et aval (b). SOUT : prélèvements souterrains, CONT : prélèvements continentaux (en surface), AEP : alimentation en eau potable, IND : industrie, IRR : irrigation. Source : BNPE

de pois. Ces données paraissent cohérentes avec les données de recensement général agricole de 2010. Nous ne disposons pas de données croisées de surfaces irriguées et par culture à un grain infra-départemental.

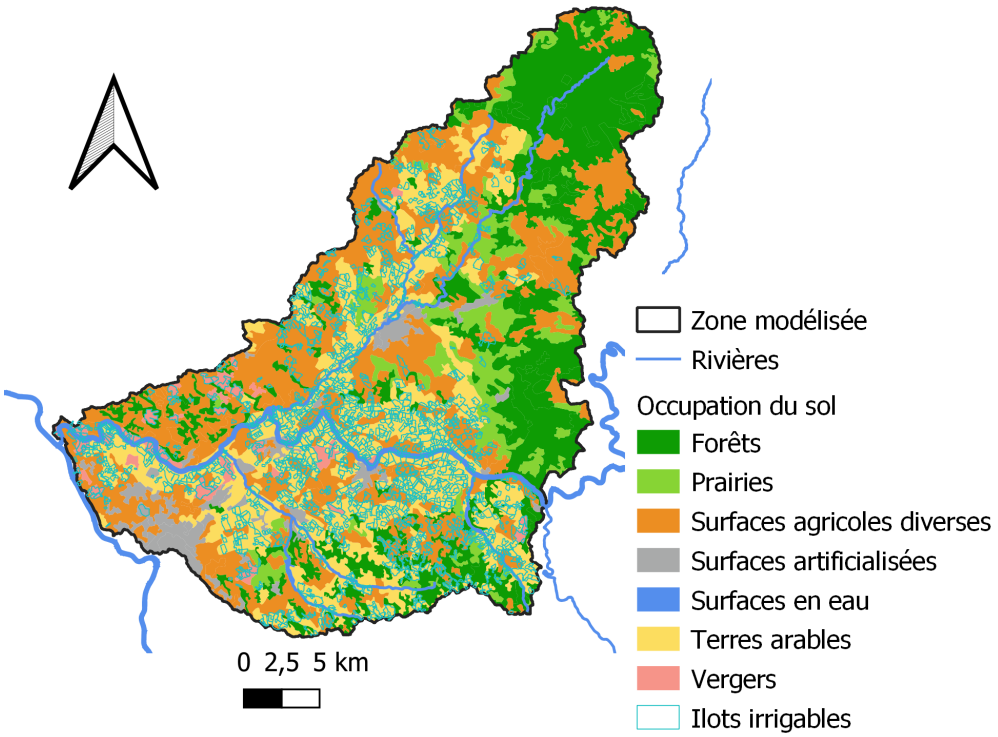


FIGURE III.8 – Occupation du sol et îlots irrigables sur le bassin versant de l'Aveyron aval. Sources : occupation du sol : CLC 2012 ; rivières : BD CARTHAGE ; îlots irrigués : données d'entrée de MAELIA (MURGUE, 2014)

Le bassin versant de l'Aveyron, et en particulier le secteur aval, est ainsi une zone de forte pression sur la ressource par les prélèvements en eau pour l'irrigation. Ce secteur témoigne, de plus, d'une

gestion de l'eau emblématique des bassins irrigués à tension, avec la présence d'ouvrages de stockage pour l'irrigation et le soutien d'étiage. Il paraît ainsi pertinent de développer une modélisation intégrée agro-hydrologique sur ce secteur.

2.4 Bases de données

2.4.1 Données d'entrée de la modélisation agronomique

Nous constituons une base de données d'entrée agronomiques s'appuyant sur les données d'entrée de MAELIA (Sections III.1.1 et III.2.3, Figure III.8) sur le secteur Aveyron aval. Nous construisons ainsi :

- une base de données indiquant les assolements entre 2008 et 2014 par association de caractéristiques homogènes de sol, climat, culture, caractère irrigué ou non irrigué ;
- une base de données associant à chaque type de culture les paramètres agronomiques et techniques, utilisés dans la modélisation CropWat (Chapitre V).

La méthodologie de constitution de cette base de données et ses caractéristiques, associées au modèle de demande en eau développé, sont détaillées dans le Chapitre V, car elle dépend de choix de modélisation qui seront justifiés plus tard.

2.4.2 Données hydroclimatiques passées

Les débits, précipitations, et l'ETP PM ont été extraits sur les trois bassins versants correspondant aux trois stations suivantes : l'Aveyron à Bruniquel (O5762510), la Lère à Réalville, affluent de l'Aveyron (O5854010), et enfin l'Aveyron à Montauban, la plus en aval du bassin versant de l'Aveyron (O5882510) (Figure III.9).

De plus, nous avons souligné, lors de la description du bassin versant de l'Aveyron en Section III.2.1 de ce chapitre, l'importance de l'influence des débits amont, eux-mêmes fortement influencés par la présence de barrages hydroélectriques, pour lesquels nous ne disposons pas de données de gestion précises. Un calage des paramètres du modèle hydrologique à la station de l'Aveyron à Bruniquel (O5762510) sans prise en compte explicite des influences amont sera ainsi difficile et aura peu de sens hydrologique. Une solution aurait ainsi été d'utiliser directement les données de débits observés à la station O5762510 comme données d'entrée de la modélisation hydrologique sur notre zone d'étude. Or, cette station présente une importante lacune de 2004 à 2013 (Figure III.9), alors que les données agronomiques dont on dispose sont disponibles de 2008 à 2014. Pour cette raison, nous avons choisi d'inclure en entrée du modèle agro-hydrologique les chroniques observées de stations plus en amont, qui ne présentent pas ou peu de lacunes (Figure III.9), et qui permettent de prendre en compte explicitement l'influence des barrages amont. Les débits à la station O5762510 seront ainsi modélisés en prenant en compte ces observations. Comme on ne simulera pas de période future, il ne sera pas nécessaire de disposer de modèle représentant le comportement des bassins amonts.

Ainsi, nous prenons en donnée d'entrée les chroniques d'observation sur les stations :

- de l'Aveyron à Lagueypie (O5292510) ;
- du Viaur à Laguépie (O5572910), qui est influencé par le complexe du Lévézou et le barrage de Thuriès ;
- du Cérou à Milhars (O5664010), influencé par le barrage de Saint-Géraud ;
- de la Bonnette à Saint-Antonin-Noble-Val (O5685010 et O5685030) ;
- de la Vère à Bruniquel (O5754020), influencée par la retenue de Fourrogue.

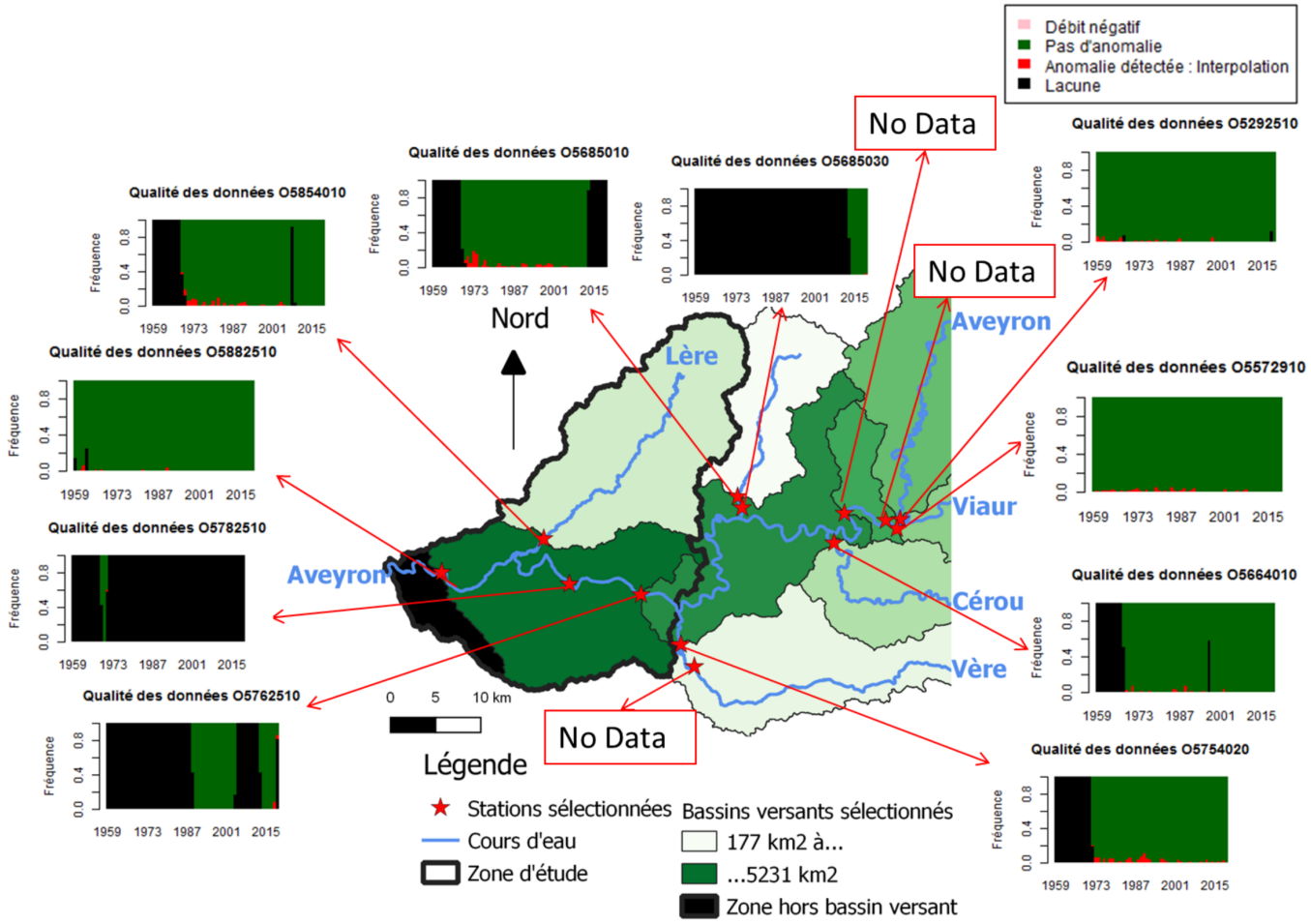


FIGURE III.9 – Disponibilité et qualité des données aux stations du bassin versant aval de l'Aveyron. Source : Base de données hydrologique (DELAIGUE, 2020)

2.4.3 Retenues et barrages

De même que pour les données d'entrée agronomiques, nous avons utilisé les données d'entrée de la modélisation de MAELIA sur le secteur de l'Aveyron aval concernant les plans d'eau, retenues et barrages (Sections III.1.4 et III.2.3, Figure III.6). Une classification et une agrégation de ces derniers a ensuite été réalisée dans le cadre du développement de la modélisation intégrée parcimonieuse. Ces travaux sont présentés dans le Chapitre VI, car ils dépendent de choix de modélisation qui seront présentés plus tard.

Nous avons pu recueillir des données de taux de remplissage des barrages le Gouyre et le Tordre dans les bulletins de suivi hydrologique du bassin Adour-Garonne sur la période 2008-2014.

2.4.4 Données de prélèvements d'irrigation

Les données de prélèvements d'irrigation sont extraites entre 2008 et 2014 de la base de données BNPE sur le bassin versant de l'Aveyron aval. Elles permettent de connaître les prélèvements déclarés au pas de temps annuel au niveau de points de prélèvements (Sections III.1.5 et III.2.3, Figure III.7). Elles permettront une comparaison avec les sorties de simulation, que nous ne pouvons produire que jusqu'en 2014, pour laquelle nous disposons de données d'assolement précises (Section III.1.1). De plus, nous disposons des sorties de simulation de MAELIA sur l'Aveyron aval, qui constituent un benchmark de la demande en eau d'irrigation sur ce secteur.

Nous nous situons dans un cadre de simulation des prélèvements. Ces données de prélèvements ne constituent donc pas des données d'entrée de la modélisation à développer, mais des données d'évaluation de la simulation.

3 Le bassin versant de la Seille : zone d'application de la modélisation

3.1 Géographie physique

La Seille est une rivière de 138 km située dans le Nord Est de la France, drainant un bassin versant de 1274 km^2 (Figure III.1). Son bassin versant est à cheval sur deux départements : la Moselle et la Meurthe-et-Moselle. La Seille trouve sa source au niveau de l'étang de Lindre, lui-même alimenté par plusieurs affluents dont le ruisseau de Boule. Ce dernier est utilisé pour définir administrativement la source de la Seille à Maizières-lès-Vic. Ses principaux affluents sont la Petite Seille et la Loutre noire (Figure III.10). La Seille se jette dans la Moselle à Metz. La Moselle est elle-même un affluent du Rhin, qui se jette dans la Mer du Nord (Figure III.1).

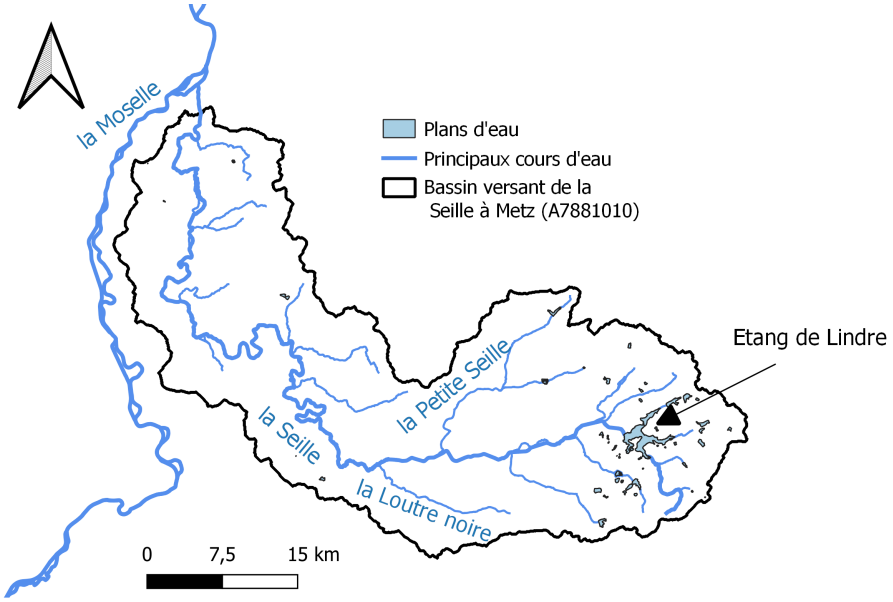
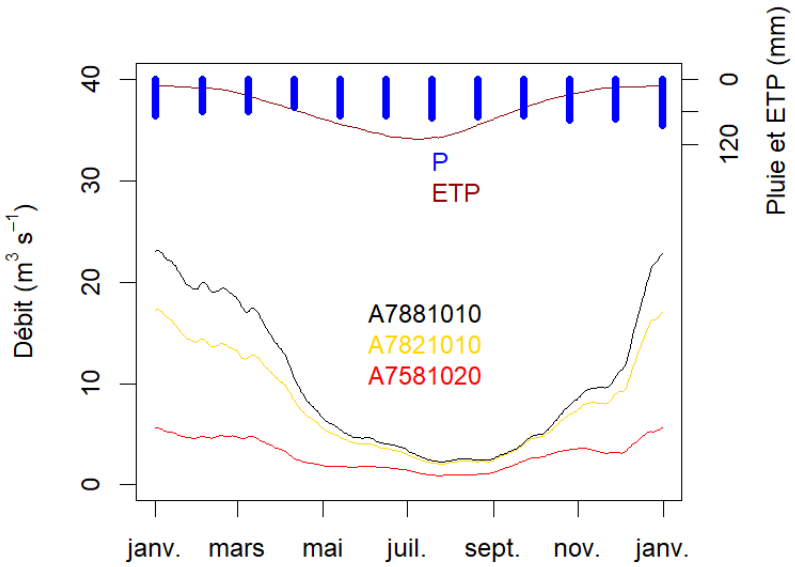


FIGURE III.10 – Réseau hydrographique du bassin versant de la Seille. Source : BD CARTHAGE, limite du bassin versant : DELAIGUE (2020)

La géologie du bassin versant de la Seille est sédimentaire (marnes, calcaire, limons, argile ; EL GHACHI, 2007). La zone modélisée s'interrompt à la station de la Seille à Metz (A7881010, DELAIGUE, 2020). Les stations présentes sur le bassin versant sont détaillées dans la Section III.3.4.2.

3.2 Hydroclimatologie

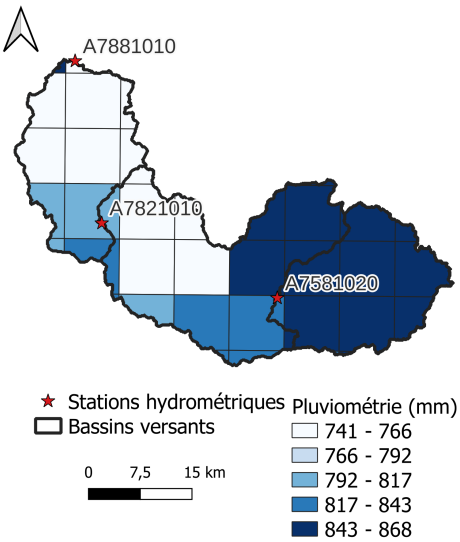
Nous présentons dans la Figure III.11 les caractéristiques hydroclimatiques de la Seille à trois stations. Le maximum des débits moyens glissants sur 30 jours est de 23,1 m^3 s^{-1} pour la Seille à Metz et est atteint début janvier. Le minimum est atteint fin juillet pour une valeur de 2,2 m^3 s^{-1} (Figure III.11 (a)). Les précipitations moyennes sont relativement homogènes, avec des précipitations mensuelles moyennes minimales atteintes en avril (51 mm) et maximales atteintes en décembre (85 mm) (Figure III.11 (b)). Les précipitations et l'ETP PM sont légèrement plus importantes en amont du bassin qu'en aval (Figure III.11 (c)).



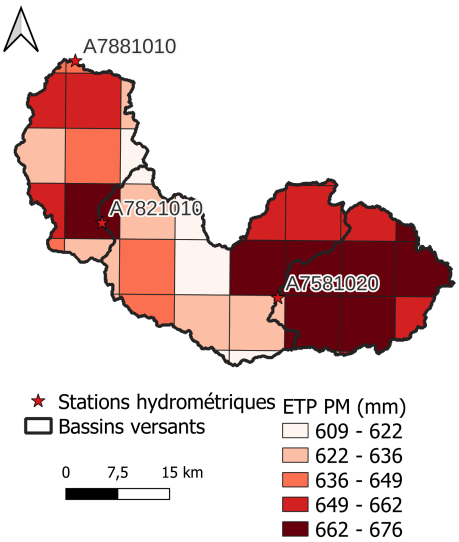
(a) Régimes hydroclimatiques des bassins versants sur trois stations hydrométriques du bassin versant de la Seille. Les données utilisées pour les régimes des débits correspondent à l'intersection des données disponibles pour les trois stations, couvrant les périodes 1985-2015. Les données utilisées pour l'ETP PM et les précipitations mensuelles couvrent la totalité des années 1985-2015. Les données de précipitation et d'ETP correspondent aux données moyennes sur l'ensemble du bassin versant ayant pour exutoire la Seille à Metz. Les précipitations sont sommées au pas de temps mensuel, les débits et l'ETP sont moyennés sur 30 jours.

Bassin	Surface (km^2)	Débit moyen (m^3 s^{-1})	Précipitations annuelles (mm)	ETP PM annuelle (mm)
A7581020	353	2,9	857	667
A7821010	928	7,8	827	649
A7881010	1274	9,9	810	647

(b) Moyennes hydroclimatiques des sous-bassins versants de la Seille (1986-2014)



(c) Précipitations annuelles moyennes calculées à partir des données SAFRAN (1985-2015)



(d) ETP annuelle moyenne calculée à partir des données SAFRAN (1985-2015)

FIGURE III.11 – Hydrologie et climat du bassin versant de la Seille. Sources : SAFRAN (VIDAL et al., 2010), équipe Hydrologie des Bassins Versants d'INRAE Antony (DELAIGUE, 2020)

3.3 Géographie anthropique

Les influences humaines paraissent plus limitées sur le bassin versant de la Seille par rapport au bassin versant de l'Aveyron (Figure III.12). Les prélèvements déclarés y sont notamment plus faibles. Les données de prélèvement n'indiquent aucun prélèvement pour l'irrigation. Les prélèvements sont principalement destinés à l'alimentation en eau potable. De plus, les prélèvements y sont presque exclusivement souterrains. Le nombre et le volume total des plans d'eau sont néanmoins conséquents (Figure III.13). De plus, le bassin versant est influencé par l'étang de Lindre en amont (Figure III.10), qui est un ouvrage de très grande dimension (13 millions de m^3) et fait l'objet de vidanges automnales régulières (tous les un à trois ans) à des fins de pisciculture. L'enquête menée dans le cadre de la prospective a permis de détailler le fonctionnement et les débats autour de la gestion de l'étang de Lindre (Section IV.2.1.5). Celui-ci devra être pris en compte explicitement dans la modélisation agro-hydrologique implémentée sur le bassin versant de la Seille.

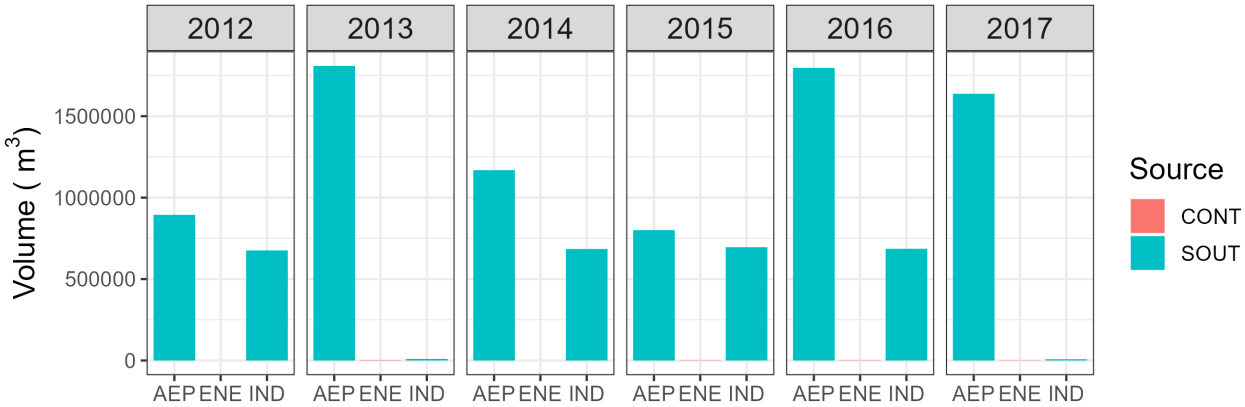
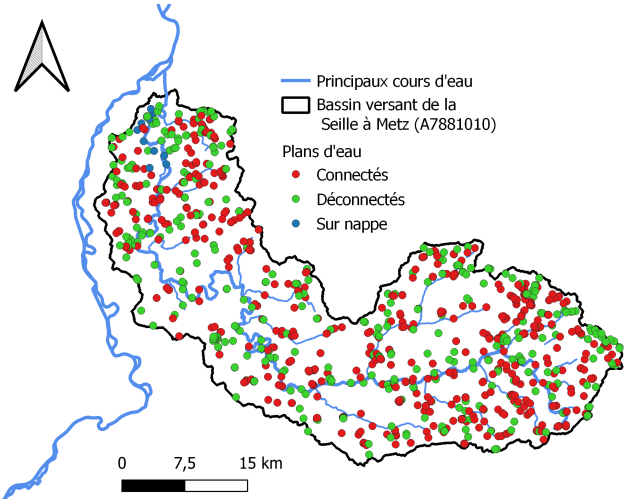


FIGURE III.12 – Prélèvements en eau sur le bassin versant de la Seille. SOUT : prélèvements souterrains, CONT : prélèvements continentaux (en surface) ; AEP : alimentation en eau potable ; : énergie (hydroélectricité) ; IND : industrie. Source : AERM



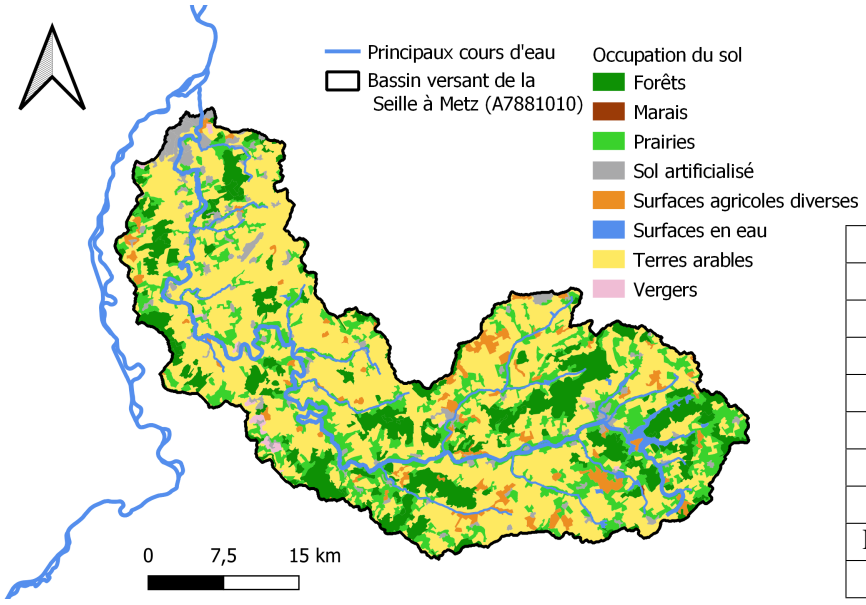
(a) Localisation et nature des plans d'eau sur le bassin versant de la Seille.

(b) Nombre et volumes cumulés des retenues sur le bassin versant de la Seille (hors étang de Lindre)

Retenues	**Nombre**	**Volume cumulé (Mm^3)**
Déconnectées	437	1.3
Connectées	567	19.9
Sur nappe	12	0.1

FIGURE III.13 – Les plans d'eau sur le bassin versant de la Seille. Les données sont issues de la base de données constituée pour MAELIA implémenté sur la Seille

Tout comme le bassin versant de l'Aveyron aval, le bassin versant de la Seille est très agricole (77 % de la surface du bassin versant, Figure III.14 (a)). Les cultures sont principalement céréalières, avec une prédominance de blé, de colza et d'orge. On note également l'importance des prairies qui représentent 29 % de la SAU (Figure III.14 (b)).



(a) Occupation du sol. Sources : cours d'eau et plans d'eau : BD CARTHAGE ; occupation du sol : CLC 2018 ; contour de bassin versant : DELAIGUE (2020)

Culture	% de la SAU
Prairie	29,1
Blé	24,8
Colza	16,0
Orge	12,9
Maïs	8,2
Fourrages	2,7
Tournesol	2,6
Protéagineux	1,1
Divers	2,7

(b) Répartition des cultures sur le bassin versant de la Seille. Source : RPG 2018

FIGURE III.14 – Occupation du sol sur le bassin versant de la Seille

Ainsi, le bassin versant de la Seille est un bassin versant qui connaît moins de pressions sur l'eau d'un point de vue quantitatif que le bassin versant de l'Aveyron aval : précipitations historiquement abondantes, moindres prélèvements. Néanmoins, les opérateurs de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse s'interrogent sur l'évolution des pressions sur la quantité d'eau dans le futur, d'autant que des sécheresses historiques ont impacté leur secteur ces dernières années (2017, 2018, 2019, 2020 et 2022). Ces opérateurs ont identifié le bassin versant de la Seille comme secteur pouvant bénéficier d'une étude portant spécifiquement sur les usages agricoles.

3.4 Bases de données

3.4.1 Données d'entrée de la modélisation agronomique

Nous constituons une base de données d'entrée agronomiques s'appuyant sur la base de données constituée pour implémenter MAELIA sur le bassin versant de la Seille (Section III.1.1). Nous construisons ainsi :

- une base de données indiquant les assolements entre 2008 et 2014 par association de caractéristiques homogènes de sol, zone météorologique, culture ;
- une base de données associant à chaque type de culture les paramètres agronomiques et techniques, utilisés dans la modélisation CropWat (Section V).

3.4.2 Données hydroclimatiques passées

De même que pour le bassin versant de l'Aveyron aval, on extrait les données hydroclimatiques de l'équipe Hydrologie des Bassins Versants d'INRAE Antony aux stations présentes sur le bassin versant de la Seille (Section III.1.2). Au regard de la qualité des données de débit et des périodes disponibles aux stations sur le bassin versant de la Seille (Figure III.15, DELAIGUE, 2020), nous choisissons d'utiliser les données aux stations de la Seille... :

- ... à Moyenvic (A7581020) ;
- ... à Nomeny (A7821010) ;

- ... à Metz (A7881010).

Nous utilisons cependant une ETP Penman Monteith (ETP PM) fournie par Météo-France et utilisant le même proxy du rayonnement que celui utilisé dans les projections climatiques (Section III.1.3, Équation III.2), afin d'assurer une cohérence entre les données historiques, utilisées pour le calage (Section VI.3.5), et les projections. Nous calculons par ailleurs notre propre ETP Penman (ETP PE, PENMAN, 1956) utilisant le proxy du rayonnement (Section III.1.3, Équation III.2). Nous la calculons à partir des données de la réanalyse SAFRAN. Cette ETP PE sera utilisée dans l'unique but d'estimer l'évaporation des plans d'eau. Les étapes de calcul de l'ETP-PE sont données dans l'Annexe A.

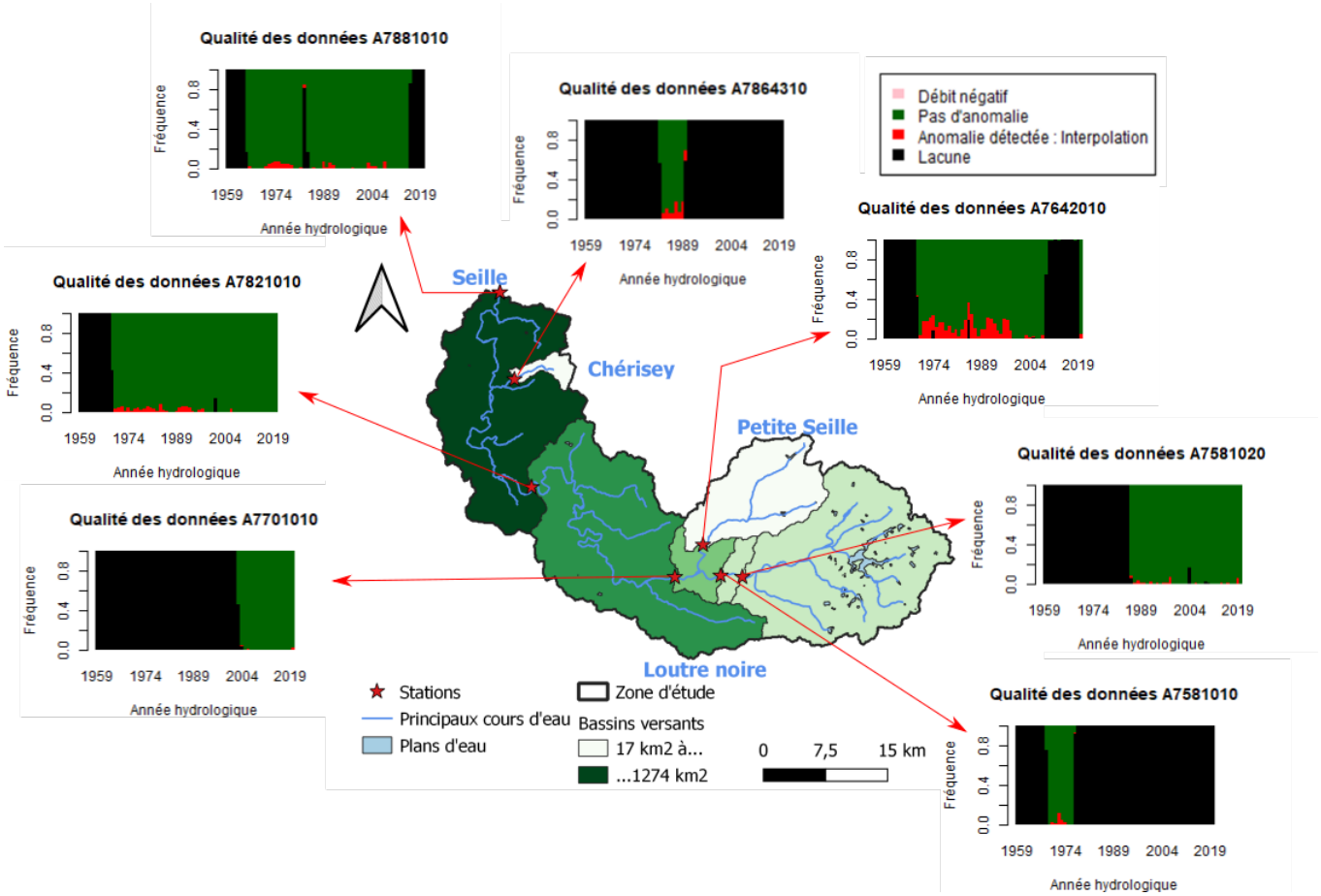


FIGURE III.15 – Qualité des données aux stations du bassin de la Seille. Source : Base de données hydrologique (DELAIGUE, 2020)

3.4.3 Projections climatiques

Nous extrayons les données climatiques de la base de données Explore2 sur le bassin versant de la Seille. Nous calculons notre propre ETP-PE à partir des projections Explore2, qui fournissent toutes les variables nécessaires, afin de prendre en compte l'évaporation des plans d'eau. Les étapes de calcul de l'ETP-PE sont fournies dans l'Annexe A. Une sous-sélection des projections climatiques disponibles sera effectuée, afin de limiter les simulations à effectuer. Elle est détaillée et justifiée dans l'Annexe B et les changements climatiques attendus seront analysés dans cette même Annexe et le Chapitre IX.

3.4.4 Plans d'eau

De même que pour l'Aveyron, nous avons utilisé les données d'entrée de la modélisation de MAELIA implémenté sur la Seille concernant les localisations et volumes des plans d'eau, retenues et barrages (Sec-

tions III.1.4 et III.3.3, Figure III.13). Une classification et une agrégation des retenues a été effectuée, conformément aux besoins du modèle développé (Chapitre VI).

De plus, nous avons pu obtenir auprès du gestionnaire de l'étang de Lindre des données décrivant les manoeuvres de vannes quotidiennes de l'étang de Lindre qui nous ont permis d'évaluer le modèle de vidange de l'étang de Lindre mis en place (Section VI). Ces données couvrent les années 1998 à 2000, 2002 à 2004, et enfin 2007 à la période actuelle.

A retenir :

Nous souhaitons mettre en place une démarche complète de construction de scénarios locaux et de modélisation de ces scénarios sur le bassin versant de la Seille. Cependant, on ne relève pas d'irrigation sur le bassin versant de la Seille, ne permettant pas d'évaluer la modélisation de cette dernière sur ce bassin. Nous décidons ainsi de développer le modèle intégré sur le bassin versant aval de l'Aveyron. La modélisation de l'irrigation pourra être comparée aux données d'irrigation déclarée ainsi qu'aux sorties de modélisation MAELIA pour la demande en eau d'irrigation.

Le modèle sera évalué pour sa capacité à reproduire les débits observés à plusieurs stations.

De plus, le modèle développé intégrera les ouvrages de stockage. On relève la présence d'ouvrages de stockage sur le bassin versant de l'Aveyron comme pour le bassin versant de la Seille, dont la modélisation pourra faire l'objet d'une évaluation au regard des données disponibles.

Chapitre IV

Construction de scénarios sur le bassin versant de la Seille

Avant-propos :

Nous devons nous appuyer sur des méthodes prospectives qualitatives pour évaluer les impacts du changement climatique dans un monde en changement. En effet, le futur ne peut être connu avec certitude, en particulier lorsque l'on s'intéresse à l'agriculture. Ainsi, ce chapitre vise à définir des hypothèses pertinentes caractérisant l'évolution du système étudié en considérant les évolutions sociétales plausibles.

Nous présenterons d'abord la méthodologie mise au point pour concevoir les scénarios locaux, d'évolution du territoire, qui s'appuie sur une enquête auprès d'acteurs locaux. Nous présenterons ensuite les résultats, caractérisant l'état initial du territoire, les tendances, les variables explicatives identifiées et leurs hypothèses, et enfin les scénarios. La méthodologie d'enquête ainsi que la construction des scénarios a été réalisée avec l'appui de Sara Fernandez, géographe de l'UMR GESTE.

1 Méthode de construction des scénarios

Nous appelons ici "système" le territoire du bassin versant de la Seille et ses différentes caractéristiques et variables qui nous permettent d'imaginer son évolution. Nous choisissons de ne pas définir trop a priori le système étudié et souhaitons au contraire nous appuyer sur les éléments recueillis auprès des acteurs pour définir ce système et construire des scénarios pertinents.

Différentes méthodes permettent de caractériser les évolutions futures possibles du système étudié (voir Introduction Section II.2). Nous choisissons de nous appuyer sur la méthode des scénarios (GODET, 1991). Cette méthode repose sur la construction et l'utilisation de plusieurs scénarios contrastés. Elle permet de prendre en compte les incertitudes, dans la limite de l'imagination ou des choix des scénaristes. Pour cette thèse, il s'agira notamment d'imaginer permettant de décrire des évolutions de l'agriculture et de la gestion de l'eau à modéliser sur le bassin versant de la Seille. Plusieurs exercices emblématiques de prospective ont déjà été menés dans le cadre d'études d'impacts du changement climatique sur l'hydrologie de bassins versants agricoles (SAUQUET, 2014 ; AEAG, 2014). Nous avons cependant développé notre propre méthodologie d'enquête et de construction de scénarios pour répondre aux objectifs et contraintes spécifiques de la thèse, mais en nous appuyant des méthodes préexistantes : une construction exploratoire des scénarios, et un enquête locale via des entretiens.

Les scénarios sont construits selon une **méthode exploratoire**, c'est-à-dire en imaginant les trajectoires de variables explicatives pour imaginer des futurs possibles. Celle-ci se distingue d'une méthode normative,

c'est-à-dire partant de la définition d'un futur à atteindre pour construire une trajectoire pour y parvenir. La méthode exploratoire a été choisie afin :

- d'identifier des futurs plausibles au regard de la multiplicité des objectifs et problématiques concernant l'eau et l'agriculture, et ainsi prendre en compte les incertitudes ;
- de quantifier les impacts du changement climatique selon ces différents futurs, afin de déterminer les futurs à éviter ou à préférer.

Les scénarios établis doivent représenter le futur de l'agriculture sur le territoire d'étude. Or, l'agriculture est une activité socle de notre société, en première ligne d'un grand nombre d'enjeux très hétérogènes : *nourrir les humains en quantité et qualité suffisante, conflits d'usage sur certaines ressources dont l'eau, émissions/stockage de carbone, emploi agricole et exode rural, artificialisation, pollutions, objectifs économiques locaux, nationaux, des entreprises, biodiversité, préservation du patrimoine paysager et gastronomique, productions non alimentaires (énergie, matériaux), diminution des ressources fossiles nécessaires aux activités agricoles actuelles (énergie fossile, phosphore, terres rares pour les technologies agricoles), questionnements sociétaux sur le bien-être animal, enjeux géopolitiques*, pour ne citer qu'eux ! Le futur de l'agriculture en France paraît donc particulièrement incertain.

De même, la gestion et les usages de l'eau sont influencés par de nombreux facteurs : *protection des milieux aquatiques, exploitation pour différents secteurs économiques, climat*, etc.

De plus, le choix a été fait de travailler à une échelle spatiale restreinte, le bassin versant de la Seille, afin de pouvoir évaluer des scénarios concrets prenant en compte les spécificités du territoire étudié. Ainsi, construire des scénarios concrets, cohérents, réalistes et pertinents au niveau de territoires contrastés et spécifiques semble nécessiter l'appui d'acteurs connaissant les enjeux, contraintes et opportunités pour l'eau et l'agriculture du territoire. Comme largement souligné, l'eau et l'agriculture sont à l'interface d'enjeux multiples, et ces enjeux pourraient s'exprimer très différemment selon les territoires et l'échelle considérés.

Aussi, si les propositions présentes dans des travaux précédents ou encore des documents stratégiques à plus grande échelle peuvent nous inspirer et servir de guide pour construire des scénarios locaux sur des territoires d'étude, il semble nécessaire de mener des enquêtes plus localisées au niveau du bassin étudié. Pour cela, nous avons mis au point une **méthode d'enquête** s'appuyant sur des **entretiens avec des experts**. Nous considérons que les experts sont des personnes exerçant des activités d'analyse et/ou de conseil en lien avec l'eau et l'agriculture sur notre territoire d'étude. L'objectif de ces entretiens est, dans un premier temps, de caractériser l'état actuel du bassin versant de la Seille, puis les tendances, structurelles ou conjoncturelles. Dans un second temps, les liens entre variables explicatives et variables résultat relevées par les acteurs peuvent être analysés, permettant d'identifier les variables explicatives et résultats clés. **Les variables explicatives clés ont ensuite été utilisées pour construire les scénarios**. Selon les hypothèses définies pour les différentes variables explicatives relevées, on peut déduire les valeurs prises par des variables résultat, influencées par ces variables explicatives, et qui permettront ensuite d'informer la modélisation (Section IV.2.3.1). Pour mener à bien cette enquête, une **grille d'entretien semi-directif** a été définie et est présentée en Annexe C. La grille d'entretien construite est ainsi organisée en cinq temps (Figure IV.1) :

- Étape 1 : description des caractéristiques du bassin et des missions de l'interlocuteur ;
- Étape 2 : description des tendances, structurelles ou conjoncturelles ;
- Étape 3 : définition des variables à prendre en compte pour scénariser les futurs agricoles et de gestion de l'eau du bassin hors prise en compte de l'adaptation au changement climatique ;
- Étape 4 : identification des variables à prendre en compte pour scénariser les scénarios avec adaptation ;
- Étape 5 : élaboration avec l'interlocuteur de premiers éléments de scénarios, c'est-à-dire définition des hypothèses de variables et à les associer entre elles. Cependant, cette étape a été difficile à aborder faute de temps et était facultative.

Nous avons ainsi mené, durant l'**hiver et le printemps 2022**, 20 entretiens permettant d'interroger **28 personnes**. Les missions des personnes et/ou institutions interrogées sont résumées ci-dessous :

- les "experts" de la protection de la ressource en eau et de l'environnement :

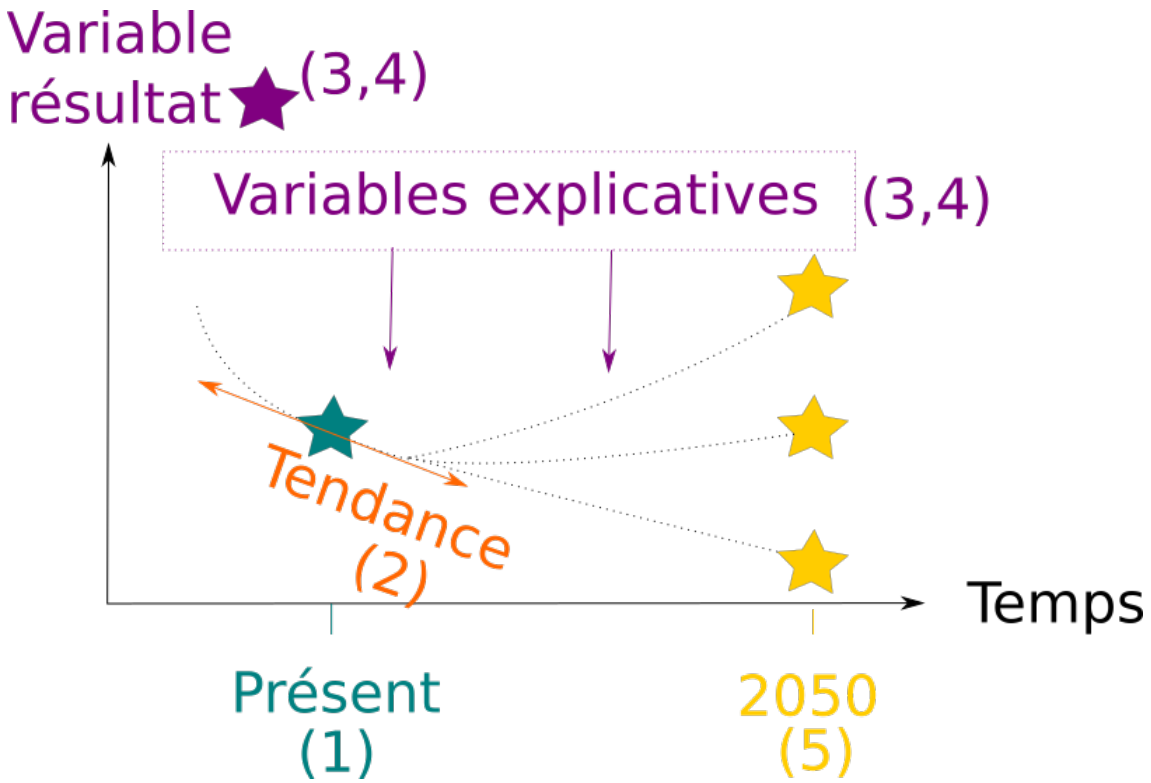


FIGURE IV.1 – Informations recherchées dans la grille d'entretien pour construire des scénarios d'adaptation : la première étape (1) consiste à décrire les caractéristiques du bassin et des missions de l'interlocuteur ; la deuxième étape (2) consiste à décrire les tendances, structurelles ou conjoncturelles ; la troisième étape (3) consiste à définir les variables à prendre en compte pour scénariser les futurs agricoles et de gestion de l'eau du bassin hors prise en compte de l'adaptation au changement climatique ; la quatrième étape (4) consiste à identifier les variables à prendre en compte pour scénariser les scénarios avec adaptation, la cinquième étape (5), facultative, et difficile à aborder faute de temps durant les entretiens, consiste à élaborer avec l'interlocuteur de premiers éléments de scénarios, c'est-à-dire à définir des hypothèses de variables et à les associer entre elles

  - Gestion quantitative de l'eau à la DREAL (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) Grand Est ;
  - Solutions fondées sur la nature à l'OFB (Office Français de la Biodiversité) ;
  - Milieux aquatiques, risque inondation, climat et ressource en eau au conseil régional Grand Est ;
  - Police de l'eau à la DDT (direction départementale des Territoires) de la Moselle ;
  - Parc Naturel Régional de Lorraine ;
  - Antenne locale de l'AERM, Agence de l'eau Rhin-Meuse ;
  - Gestion de l'étang de Lindre par le Conseil départemental de Moselle ;
  - Syndicat mixte de la Seille ;
- les "experts" de l'agriculture :
  - Agroécologie, recherche, développement et innovation à la DRAAF Grand Est (Direction Régionale de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Forêt) ;
  - Productions spécialisées, mutations agricoles au conseil régional Grand Est ;
  - Chambre d'Agriculture de Moselle ;
  - LORCA, coopérative agricole lorraine ;
  - Dispositifs de crise agricole et protection de la qualité de l'eau à la DDT de Moselle ;
  - Exploitation du lycée agricole de Château-Salins ;
  - Trois agriculteurs, dont un maire et gérant d'un méthaniseur ;
- SCoTAM (Schéma de Cohérence Territoriale de l'Agglomération Messine) ;
- Bioéconomie à l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) Grand Est ;

- Communauté de Communes du Saulnois.

Les entretiens ont également permis de collecter de nombreuses ressources documentaires additionnelles, telles que :

- la thèse de EL GHACHI (2007) s'intitulant : "La Seille : Un système fluvial anthropisé", s'intéressant aux modifications morphologiques et à leurs impacts sur la Seille ;
- la thèse de BANAS (2001) s'intitulant : "Flux de matière en étangs piscicoles extensifs : Rétention, Sédimentation, Exportation" s'étant intéressée aux flux de sédiments de l'étang de Lindre ;
- le rapport de PARRILLA et BARATAUD (2020) s'intitulant : "Une Seille, des Seilles", portant sur la conceptualisation des habitants du bassin de la Seille de leur territoire et de leur ressource en eau ;
- le SRADDET (Schéma régional d'aménagement et de développement durable et d'égalité des territoires) de la région Grand Est [1] ;
- ou encore une importante étude prospective menée par la région Grand Est ;
- etc.

Nous nous appuyons ainsi sur les informations collectées lors des entretiens pour construire les scénarios. Ces derniers reflètent ainsi l'imagination et les choix des personnes interrogées. Cela permet de contraindre l'ensemble des possibles à un domaine pertinent pour les personnes interrogées, qui sont dans notre cas principalement des experts. Les scénarios, parce qu'ils sont contrastés, permettent de prendre en compte l'incertitude, mais ne permettent ainsi pas de garantir que le futur agro-hydrologique du bassin sera inclus dans l'ensemble des scénarios imaginés.

De plus, les scénarios devront être traduits en hypothèses de modélisation prises en compte dans nos modèles agro-hydrologiques (paramètres, données d'entrée), et évalués au regard de sorties de modélisation (débits, rendements des cultures/stress hydrique). Si le travail de scénarisation est essentiel pour identifier des jeux d'hypothèses de modélisation pertinents et s'assurer de la plausibilité et cohérence des scénarios envisagés, nous considérerons qu'il n'est pas prioritaire de s'attarder sur des aspects de scénarisation qui ne pourront de tout façon pas être évalués par la modélisation. Par exemple, nous ne pourrons pas évaluer l'impact des scénarios sur la qualité de l'eau.

2 Résultats de l'enquête

Les résultats de l'enquête sont indiqués ci-dessous. Les phrases entre guillemets sont des citations issues des personnes interrogées. Les résultats reflètent les informations et opinions collectées auprès des personnes interrogées, et peuvent donc comporter une certaine part de subjectivité.

Nous présentons les résultats de cette enquête selon l'organisation suivante : d'abord nous présentons l'état des lieux du territoire, et ses évolutions. Nous présentons ensuite les variables clés identifiées sur le territoire pour la construction de scénarios. Nous présentons enfin les hypothèses construites pour chaque variable et les scénarios qui en découlent.

2.1 La Seille d'hier et d'aujourd'hui : état initial des trajectoires possibles et spécificités territoriales à prendre en compte

2.1.1 Sols et reliefs forment la toile des masses d'eau, de l'agriculture et des populations du bassin versant de la Seille

La nature des sols et des reliefs est déterminante pour l'agriculture et l'hydrologie d'un territoire, ainsi que pour les activités humaines. Le bassin versant de la Seille correspond à un paysage de cuesta, avec un faible dénivelé amont-aval, mais présente tout de même un relief entre la vallée et les plateaux (altitude max : 409 m,

1. https://www.grandest.fr/politiques-publiques/sraddet/

altitude min : 166 m, Figure IV.2). De plus, ce bassin est majoritairement composé de sols imperméables (Figure IV.3), pouvant entraîner des problématiques d'hydromorphie et d'inondation (Section IV.2.1.2). Le sous-sol de la partie amont du bassin versant comprend des marnes du Keuper à l'origine d'une forte concentration en sel de la rivière (nous reviendrons dessus dans les Sections IV.2.1.2). Les activités économiques historiques, ainsi que les sols et les végétaux sur certains secteurs, sont ainsi très marqués par cette salinité exceptionnelle (PARRILLA et BARATAUD, 2020).

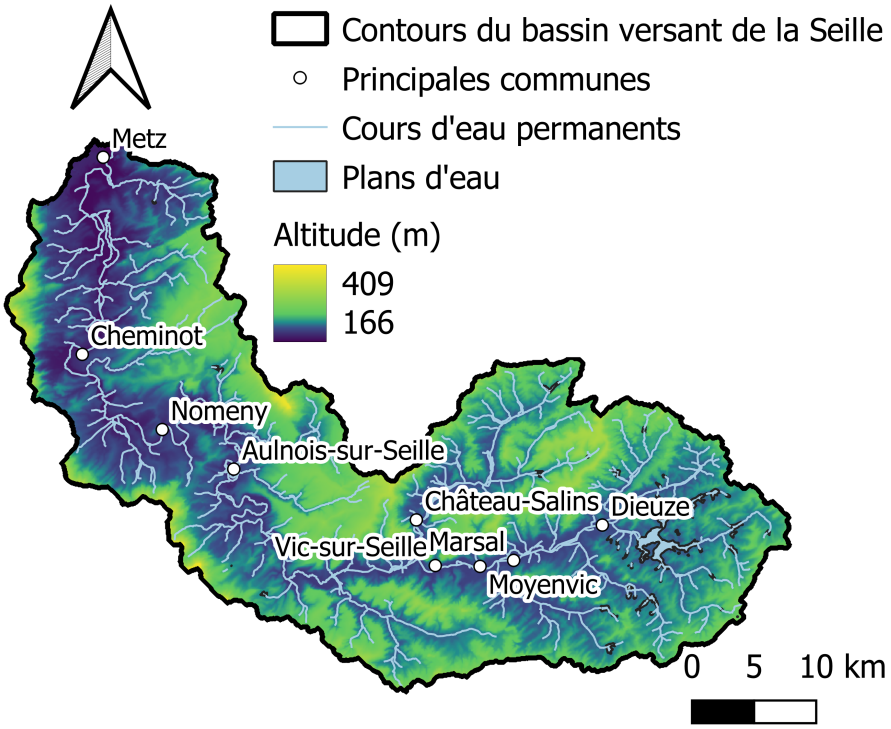


FIGURE IV.2 – Relief du bassin versant de la Seille

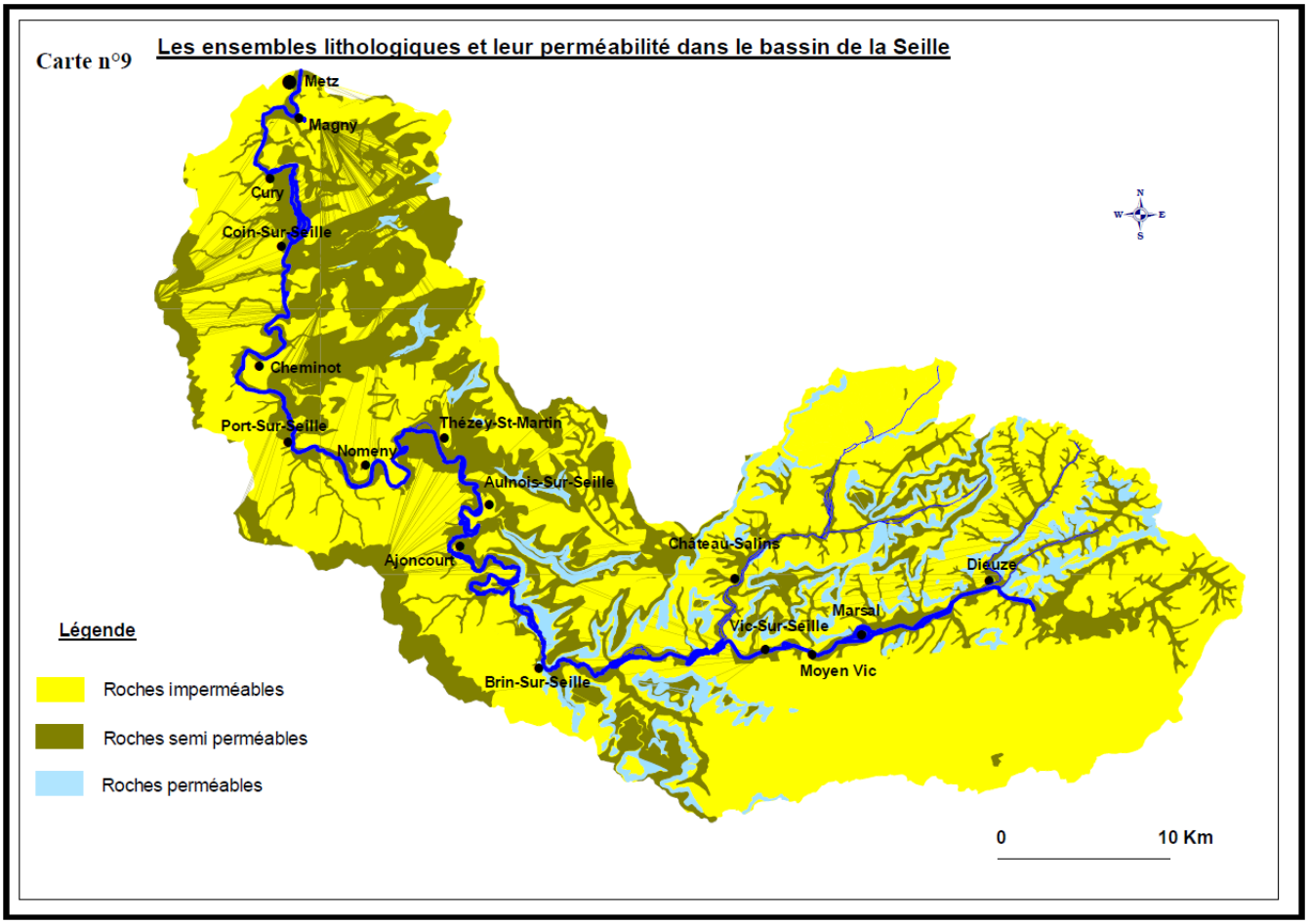


FIGURE IV.3 – Perméabilité sur le bassin versant de la Seille (Source : EL GHACHI, 2007)

2.1.2 L'eau, une ressource abondante mais menacée et menaçante

Les précipitations importantes (800 mm par an à Metz entre 1990 et 2019, DELAIGUE, 2020) couplées au substrat imperméable, sont à l'origine de nombreux cours d'eau. On note par ailleurs une abondance de mares et d'étangs et la présence de sols gorgés d'eau une grande partie de l'année constituant des zones humides. Cette eau est valorisée par différents acteurs et secteurs économiques. Au niveau du bassin versant de la Seille, la pisciculture est un usage important de la ressource en eau, par exemple dans l'étang de Lindre (Section IV.2.1.5). L'irrigation est quasi inexistante sur le bassin versant de la Seille, les conditions climatiques ne la nécessitant pas pour l'instant. Néanmoins, l'agriculture consomme de l'eau à travers l'abreuvement des animaux. En aval du bassin versant de la Seille, les usages importants sont notamment la navigation, pour le transport de marchandises, ou le refroidissement de la centrale nucléaire de Cattenom (LEMAITRE-BASSET, 2023).

La vallée de la Seille, plate et imperméable, est sujette à un important ruissellement et aux débordements de cours d'eau. Nous identifions le périmètre inondable sur le bassin versant de la Seille à l'aide de l'atlas des zones inondables [2]. Nous additionnons les périmètres des crues historiques (basé sur la crue 1947 et la crue de 1981), et le périmètre inondable déterminé par analyse géomorphologique. Nous obtenons la zone inondable précédemment présentée dans la Figure IV.4. Les débordements menacent principalement des terres agricoles perçues comme à faible enjeu par les autorités, mais aussi la métropole de Metz.

2. https://www.datagrandest.fr/data4citizen/visualisation/information/?id=fr-120066022-ldd-cc63f05e-238c-4b2e-b185-fbdeb130d7d2

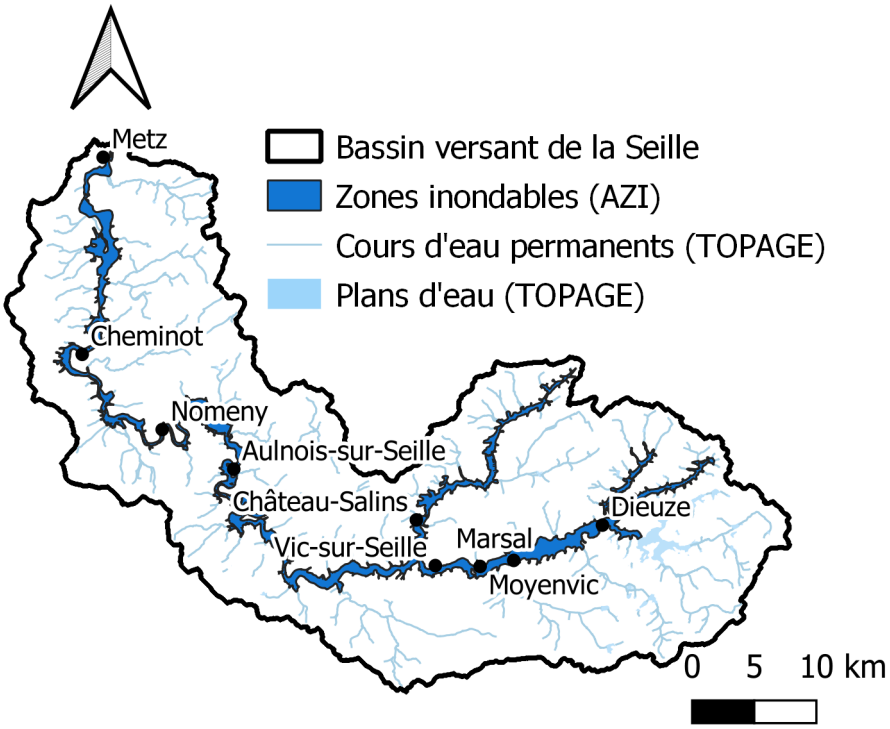


FIGURE IV.4 – Périmètre inondable sur le bassin versant de la Seille

Au-delà des risques saisonniers réguliers d'inondation, l'étang de Lindre constitue un volume d'eau d'environ 13 millions de m^3, dont le déversement brusque et incontrôlé génèrerait une inondation catastrophique.

Par ailleurs, le secteur connaît une problématique très importante de qualité chimique et écologique de l'eau et des milieux (MISEN-57, 2020a ; MISEN-57, 2020b ; MISEN-57, 2020c ; MISEN-57, 2020d). La Seille est ainsi classée en mauvais état chimique dès l'étang de Lindre et jusqu'à sa confluence avec la Moselle à Metz, principalement à cause de sa teneur importante en nitrates. Des masses d'eau souterraines connaissent également un état dégradé, avec un risque nitrates et pesticides fort notamment sur le domaine du Lias et du Keuper du plateau lorrain versant Rhin. Les pressions sont majoritairement agricoles, même si des pressions liées à l'altération de la morphologie sont également majeures, notamment en lien avec les aménagements de protection contre les inondations, ainsi que des pressions d'origine urbaine notamment dues à des défauts des systèmes d'assainissement, provoquant des pollutions au phosphore. Les vidanges des étangs, chargés en solutés et en sédiments en période de sécheresse (BANAS, 2001), ont également probablement un impact. On note de plus une concentration en sel (Na^+, Cl^-) naturellement élevée dans la rivière Seille. Ces fortes concentrations en sel dans les eaux de surface renderaient difficile l'implantation d'arbres en bord de cours d'eau et limiteraient les débouchés agricoles des parcelles proches de la rivière. Elles rendent de plus difficilement exploitable la ressource en eau dans les zones les plus salées. Par ailleurs, les zones humides ont été très dégradées par la modernisation agricole, les pollutions agricoles et la généralisation du drainage sur le bassin versant. La qualité de l'eau et des milieux aquatiques engendre des conflits sur le bassin versant pour en définir les responsabilités. Les agriculteurs remettent en question la responsabilité de l'agriculture intensive sur la qualité de l'eau, certains accusant l'azote organique d'être plus néfaste que l'azote minéral, accusant les forêts de produire la majorité de l'azote, ou enfin accusant l'étang de Lindre de rejeter de nombreuses matières polluantes lors de sa vidange.

Les entretiens auprès des experts et acteurs du territoire ont ainsi permis d'identifier des spécificités au regard des problématiques de l'eau à prendre en compte dans la construction des scénarios pour que ceux-ci soient pertinents et réalistes. **Les contraintes majeures sur le secteur sont la qualité, et plus spécifiquement la salinité, de l'eau, ainsi que l'aléa inondation.** Les contraintes de salinité et d'inondation ont donc dû être plus précisément caractérisées et traduites dans les hypothèses des scénarios afin de rendre ces derniers suffisamment réalistes.

2.1.3 Une agriculture représentative du contexte lorrain

Le bassin versant de la Seille est majoritairement agricole (surface agricole à 77 %). De plus, l'agriculture du bassin versant de la Seille est issue d'un contexte traditionnel de polyculture-élevage. Le bassin est situé sur le plateau lorrain qui constitue une zone intermédiaire. La définition des zones intermédiaires est cependant assez floue. Un rapport du CGAAER (Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux, 2019) tente d'en identifier les principales caractéristiques. Les zones intermédiaires s'étendent classiquement de la Lorraine à la Charente et constituent un secteur qui se caractériserait notamment par :

- Des rendements et revenus faibles, en lien avec des sols de potentiel agronomique médiocre (argileux et hydromorphes sur le bassin versant de la Seille) ;
- Des exploitations de grande taille, avec un modèle économique fondé sur l'agrandissement ;
- Une démographie vieillissante et peu dense ;
- Peu d'identité, de cultures ou personnalités emblématiques, peu de cohésion sociale ;
- Peu de transformation locale, centres de décision extérieurs et bassins de consommation limités, peu de recherche de progrès ;
- Difficulté d'application des politiques publiques.

Un travail de constitution d'une typologie des exploitations a été réalisé par la DRAAF Grand Est et permet d'identifier plus précisément la sectorisation des types d'agriculture sur la région. Sur le bassin versant de la Seille, les exploitations sont donc réparties entre de grandes exploitations d'élevage bovin avec cultures présentes sur l'ensemble du bassin excepté en aval, des moyennes exploitations de cultures et élevage intensif sur la partie médiane-amont, correspondant au Saulnois, des petites exploitations herbagères sur l'extrême amont (pays des étangs), et sur la partie plus aval. On note de plus la présence de petites exploitations à dominante Grandes Cultures sur la partie aval du bassin. Ces données correspondent aux indications données par les acteurs interrogés. L'élevage ovin est par ailleurs également présent et emblématique du bassin versant de la Seille. Les données d'occupation du sol indiquent un maintien de prairies en bordure de Seille, ce qui s'explique par le caractère inondable de ces zones et les actions de préservation des prairies remarquables, et la médiocrité des sols salins. Le territoire dispose ainsi de prés salés pâturés en bordure de Seille. La rotation classique menée sur le secteur est constituée de colza-blé-orge, avec une présence de maïs plus ponctuelle. Les cultures sont ainsi peu diversifiées. D'après les acteurs interrogés, cette forte présence historique de l'élevage et la faible diversification s'expliqueraient en réalité par la faible potentialité des sols, en raison d'une faible épaisseur et de l'hydromorphie, comme précédemment évoqué. Cette explication est cohérente avec la caractérisation générale des zones intermédiaires.

L'agriculture du bassin versant de la Seille est ainsi une agriculture qui connaît des difficultés par rapport aux territoires voisins. Les agriculteurs aspirent ainsi à un accroissement de leurs revenus et de leur qualité de vie. Cette recherche d'amélioration entraîne des modifications de l'agriculture sur le bassin versant de la Seille, décrites plus en détail en Section IV.2.2. Enfin, les agriculteurs sont décrits par plusieurs acteurs intervenant à différentes échelles comme plutôt indépendants, peu tournés vers le collectif. Là aussi, cette description des acteurs est cohérente avec la caractérisation des zones intermédiaires. Néanmoins, de grandes coopératives peuvent être lanceuses d'initiatives à grande échelle. On note également, dans les tendances récentes (Section IV.2.2), des projets collectifs autour de la méthanisation.

L'irrigation est négligeable, voire absente sur le bassin versant de la Seille. Un acteur expert de l'agriculture a néanmoins affirmé que deux agriculteurs pratiquaient l'irrigation de maïs sur une commune du territoire, mais ces derniers n'apparaissent comme irrigants ni dans les données d'irrigation du recensement général agricole de 2010 ni dans les données de redevances déclarées à l'Agence de l'eau. Pour être déclarée à l'Agence de l'eau, l'irrigation doit cependant dépasser 10 000 m^3 pour une année. De plus, un agriculteur interrogé a effectué de l'irrigation goutte-à-goutte et à l'arrosoir de façon occasionnelle lors des années de sécheresse sur des cultures maraîchères, mais sans déclarer ce prélèvement. Des agriculteurs auraient de plus prélevé illégalement de l'eau dans l'étang de Lindre pour irriguer.

Cette faible irrigation s'explique par l'abondance d'eau sur le secteur, les cultures ne nécessitant généralement pas d'apport d'eau en plus de l'eau de pluie. Les animaux sont souvent abreuvés directement à la rivière ou au niveau de sources ou de mares sans quantification précise de l'apport.

Les productions agricoles sont majoritairement destinées à l'exportation de produits bruts, notamment depuis le port de Metz vers l'étranger, par le biais de grandes coopératives et de négociants. Les productions animales connaissent quelques étapes de transformation sur le territoire, avec notamment la présence d'une laiterie à Château-Salins et d'abattoirs à proximité. Les effets d'une telle organisation des flux de production semblent paradoxaux et difficiles à percevoir par les personnes interrogées. En effet, certains acteurs pensent qu'une telle organisation, avec de grandes coopératives, de grands volumes, de grands silos en faible nombre, a pour effet une uniformisation des assolements et des pratiques pour répondre à une nécessité de simplicité logistique et d'uniformité des productions à destination industrielle. Il serait alors difficile pour les agriculteurs de mettre en place des cultures ou des pratiques innovantes ou de niche. Des territoires possédant au contraire de petites coopératives agricoles seraient plus capables d'innover. Mais paradoxalement, d'autres acteurs pensent que l'organisation par gros volumes permet d'envisager tout type de production, même a priori marginale, les volumes atteints pouvant tout de même devenir suffisamment importants pour constituer un volume valorisable sur les marchés internationaux. LORCA a ainsi créé une filière BIO. De plus, la coopérative a été créée et est dirigée par les agriculteurs adhérents, et celle-ci peut donc être perçue comme un dispositif au service des agriculteurs plus que comme une pression sur ces derniers. Ainsi, si les adhérents à la coopérative ont un intérêt pour une nouvelle production ou un nouveau label, la coopérative pourra mettre en place une nouvelle filière pour répondre à ce désir. La PAC peut ainsi jouer sur les désirs de production des agriculteurs, attirés par de nouvelles subventions, et la coopérative devra ainsi s'adapter à ce changement. Les coopératives ne préfixent généralement pas de volumes en amont des récoltes, sauf pour les productions non conventionnelles, par exemple en BIO, pour lesquelles peuvent être définis des volumes contractualisés. Les coopératives peuvent également conseiller les agriculteurs sur les semences pour orienter vers les variétés les plus productives, les fertilisants, les itinéraires techniques, présentant alors une certaine redondance avec les missions de la chambre d'agriculture. Parrilla et Barataud (2020) font référence à une étude du bureau d'études Ecozept. Celle-ci déplorait une « faible valorisation locale des productions car prévalence des exploitations agricoles orientées vers la polyculture-élevage (grandes cultures, élevage bovin lait et viande). D'un point de vue de sa capacité productive, le Saulnois peut couvrir le besoin des ménages et des restaurants collectifs pour : viande de bœuf, produits laitiers, blé, huile de colza, viande d'agneau. Mais en revanche, il manque un apport en fruits et légumes, viande de porc, volailles et vigne. »

2.1.4 Des zones d'intérêt écologique et patrimonial

Le bassin versant de la Seille dispose de milieux halophiles remarquables issus de résurgences d'eau salée d'après le Parc Naturel Régional de Lorraine (PNRL) et les acteurs chargés de la protection de l'eau. Ces mares et prés salés continentaux abritent un nombre limité d'espèces néanmoins exceptionnelles. De plus, ce secteur revêt un intérêt patrimonial comptant de nombreux vestiges de l'exploitation ancestrale du sel, notamment les salines royales à Château-Salins.

Le territoire est marqué par la présence de nombreux étangs et mares, et notamment des étangs piscicoles de très grandes dimensions comme l'étang de Lindre, dont le domaine est une réserve de biodiversité aviaire. Le bassin revêt également un intérêt patrimonial important, celui-ci étant daté du XIIIe siècle. On relève ainsi la présence de nombreux espaces labellisés sur le bassin versant (Figure IV.5).

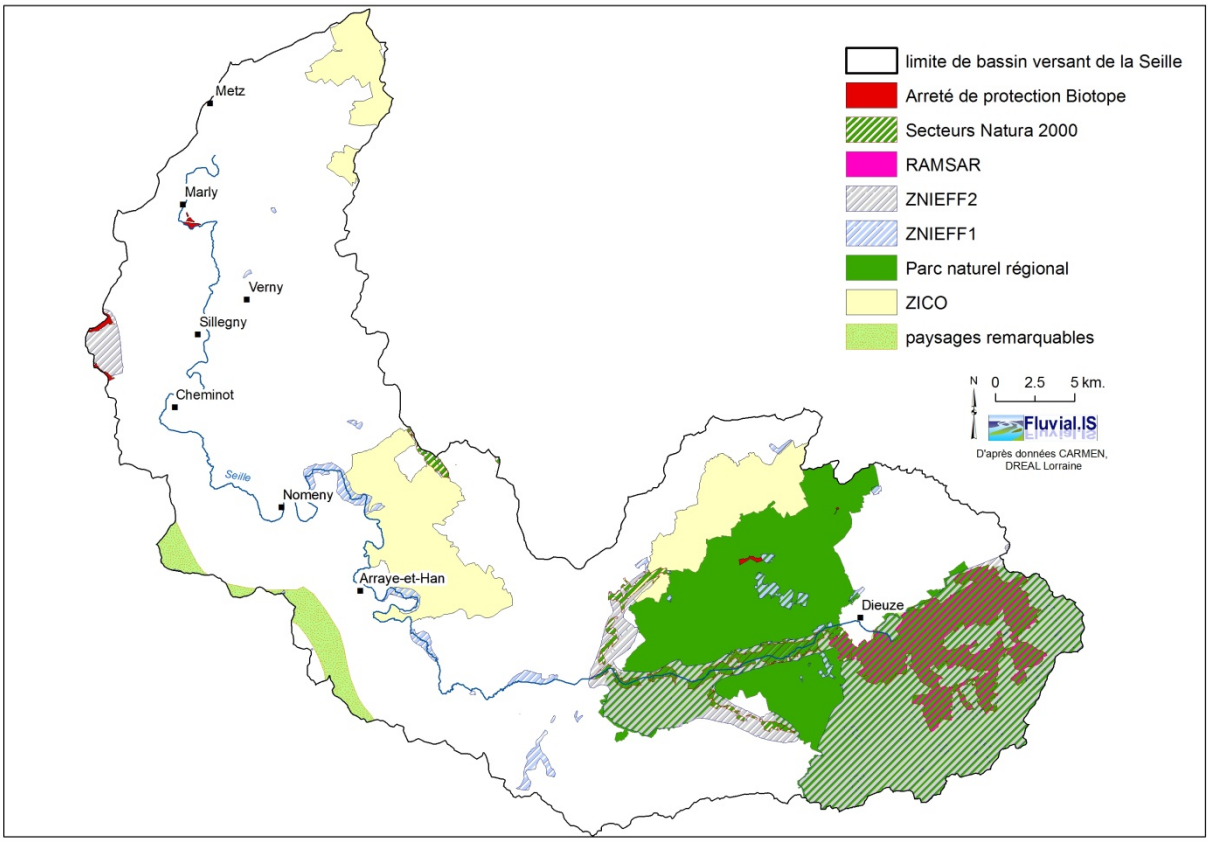


FIGURE IV.5 – Espaces naturels remarquables labellisés sur le bassin versant de la Seille (ZNIEFF : Zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique, ZICO : Zones importantes pour la conservation des oiseaux, RAMSAR : du nom de la ville dans laquelle la convention a été signée, visant à protéger les zones humides. Source : SIAHS et al., 2012)

Le PNRL est un dispositif reposant sur le volontariat des collectivités souhaitant en être membres. Sur le bassin versant de la Seille, le PNRL couvre le secteur de l'étang de Lindre et un secteur correspondant à la vallée de la Seille en amont du bassin. Le PNRL accompagne par ailleurs des MAE (mesures agroenvironnementales) sur les zones de prés salés. Celles-ci constituent des contrats avec les agriculteurs : les agriculteurs acceptent de maintenir ou de mettre en place des pratiques vertueuses, en échange desquelles ils perçoivent des subventions. Les pratiques aidées par les MAE dans la vallée de la Seille sont notamment les fauches tardives des prairies, assurant la reproduction d'espèces végétales emblématiques. Environ 600 ha de prairies sont ainsi contractualisés, sur 1400 éligibles.

Parrilla et Barataud (2020) évoquent cependant une faible identification des habitants du territoire à ces éléments naturels remarquables. Ces éléments sont au contraire plutôt perçus par les agriculteurs comme une propriété commune au service des êtres humains, ou encore comme un frein au développement pour les zones humides, et un danger en raison des inondations par débordement. Ainsi, un acteur déplore les pêches et prélèvements illégaux dans l'étang de Lindre, les terres sont en majorité drainées sur le territoire, des rectifications du cours d'eau mettant en péril la qualité écologique du cours d'eau sont généralisées, etc. La protection de ces milieux repose donc souvent sur des décisions extérieures au bassin, notamment la mise en place de réglementations de protection par l'État et ses organes territoriaux.

2.1.5 La gestion de l'étang de Lindre, point névralgique du bassin versant de la Seille

L'étang de Lindre, géré par le conseil départemental de Moselle depuis 1976, est le plus grand et le plus emblématique des étangs piscicoles de la région. Étudié dans la thèse de BANAS (2001), il draine un bassin

versant de 103 km^2 et a une surface libre de 620 ha. Le domaine de l'étang de Lindre comprend en réalité 12 étangs, dont le Grand Étang qui représente la majorité des surfaces en eau, et constitue la plus grande pisciculture d'eau douce de France. L'étang de Lindre et son barrage datés du XIIIe siècle possédaient autrefois un rôle défensif, le volume d'eau contenu dans le bassin pouvant être libéré par l'ouverture des vannes pour déclencher une inondation face à l'avancée de l'ennemi. Sa gestion est marquée aujourd'hui par une activité de pisciculture extensive et des objectifs de biodiversité concertés avec le Conservatoire d'Espaces Naturels de Lorraine et le PRNL. La gestion par un acteur public d'un tel équipement se justifie par la mauvaise rentabilité d'un tel ouvrage couplée à des objectifs particuliers que sont la préservation de la biodiversité et la mission de sécurité publique en lien avec le barrage. Au regard de l'enjeu et de l'aléa si le barrage venait à être défectueux, celui-ci est classé au titre de la sécurité publique. Le maintien du bon état du barrage est donc un objectif prioritaire. Cela entraîne des manœuvres d'ouverture des vannes en cas de risque de rupture par sur-remplissage. Ces manœuvres entraînent des inondations de parcelles en aval, modérées par rapport à l'aléa en cas de rupture du barrage, mais controversées. De plus, les vidanges de l'étang de Lindre lors des pêches influencent fortement les débits dans la rivière.

La gestion du barrage répond ainsi aux différents objectifs suivants :

- Maintenir un volume d'eau suffisant en période de croissance des poissons, et effectuer des vidanges environ tous les deux ans pour pêcher en général en fin d'été et début d'automne. Il est important d'avoir terminé la pêche en début d'hiver au plus tard pour assurer le remplissage de l'étang. Les poissons ainsi produits sont principalement destinés à réalimenter des étangs alentours pour la pêche de loisir ;
- Maintenir un volume d'eau suffisant pour maintenir la biodiversité du site ;
- Evacuer l'eau en excès quand il est nécessaire de protéger le barrage.

La gestion de l'étang de Lindre est à l'origine de nombreux conflits avec les agriculteurs :

- La gestion des niveaux d'eau, avec notamment l'inondation de parcelles en aval ou en amont lors de la vidange de l'étang ou lors d'évènements de crues ;
- Une perception de l'étang comme un bien commun dans lequel il est normal de pouvoir pêcher sans autorisation ;
- La dégradation des cultures à cause de la présence d'oiseaux comme les oies ou les cygnes.

2.1.6 L'agriculteur du bassin de la Seille, point de bascule entre deux formes d'agriculture

Notre enquête a permis de détecter la présence de différents profils d'agriculteurs : le profil majoritaire, agriculteur attiré par un modèle productiviste, synonyme de simplification des systèmes de production et de plus grande rentabilité, et des agriculteurs plus "paysans". Ces deux profils se superposent à une opposition entre deux visions du « progrès » en agriculture : une misant sur l'entrée dans les exploitations d'innovations s'appuyant sur des intrants, ou encore sur des innovations technologiques comme la méthanisation, et une autre misant sur les connaissances agro-écologiques en essayant de s'appuyer et d'optimiser les services écosystémiques en limitant les recours à des intrants chimiques et énergétiques.

Certains agriculteurs sont ainsi engagés dans l'AMAP (Association pour le maintien de l'agriculture paysanne) du Pré Vert et sont ainsi particulièrement restrictifs dans leur définition de ce que doit être une agriculture vertueuse. Leur positionnement sur l'obligation de labellisation bio est ainsi perçu comme extrémiste et sectaire par d'autres agriculteurs et les collectivités, et des ventes à la ferme et autres projets de magasins en circuits courts, non réservés aux produits bio, émergent par ailleurs (PARRILLA et BARATAUD, 2020). La démarche portée par les agriculteurs du Pré Vert demeurerait ainsi assez marginale et marginalisée. Les collectivités et certains agriculteurs défendraient ainsi une autre vision de la relocalisation, ouverte à plusieurs modèles d'agriculture. PARRILLA et BARATAUD (2020) ont observé un sentiment d'isolement de certains agriculteurs engagés, qui perdent leurs anciennes relations professionnelles et qui entrent en conflit relationnel avec leurs voisins suite à leurs différences de valeurs.

Le rôle du lycée agricole de Château-Salins est central dans ce rapport à la connaissance et au progrès de la jeune génération des agriculteurs. Si PARRILLA et BARATAUD (2020) positionnaient le lycée agricole comme

soutien à l'intensification, les témoignages recueillis à l'occasion de ce nouvel exercice ont montré une position plus hybride.

Une autre classification est encore possible, distinguant les agriculteurs cherchant à s'émanciper du "système" (PAC, grandes coopératives) pour gagner en autonomie.

2.1.7 Un dialogue difficile autour de l'agriculture et de l'environnement

Comme évoqué en Section IV.2.1.3, le bassin versant de la Seille appartient à une zone intermédiaire, qui se caractérise par une faible cohésion sociale. Pour certains acteurs, la répartition de l'urbanisation et de l'habitat pourrait jouer dans ce phénomène. En effet, la Seille connaît un habitat assez épars, notamment avec la présence d'un bâti agricole. On note tout de même la présence régulière de petits centres urbains en particulier le long de la Seille, celle-ci se déversant finalement dans la Moselle dans l'agglomération de Metz (288 000 habitants dans l'agglomération, 118 000 dans la commune de Metz). On note également la présence de Nancy à proximité directe du bassin, au sud de celui-ci (287 000 habitants dans l'agglomération, 105 000 habitants dans la commune de Nancy). Metz et sa périphérie sont très influencés par la proximité du Luxembourg, et hébergent ainsi de nombreux travailleurs transfrontaliers. L'agglomération de Metz est ainsi pleinement intégrée à la mégalopole européenne. Metz est également très marquée par son port. La métropole héberge par ailleurs de nombreuses institutions : préfecture de Moselle, Agence de l'Eau Rhin-Meuse, chambre d'agriculture de Moselle… On note donc un contraste fort entre agglomérations denses et constituant des plateformes d'échanges humains, commerciaux, économiques, etc., et l'arrière-pays très rural.

Un agriculteur conventionnel ressent de façon critique une rupture entre la perception souhaitée et idéalisée de l'agriculture par les acteurs urbains, et les réalités du terrain et de l'économie agricole. « Allez voir Goliath [3] au cinéma. L'agriculture se fait démonter. Elle fait naître des bébés sans bras, donne des cancers à tout le monde… ». Il dénonce par ailleurs un déni des consommateurs qui continuent à préférer les produits les moins chers tout en souhaitant une agriculture plus vertueuse. Un autre s'inquiète des réglementations sanitaires de plus en plus sévères pesant sur les élevages. Les décisionnaires infligeraient ainsi, pour certains agriculteurs, des réglementations inconséquentes et toujours plus sévères à un métier déjà fortement mis sous pression. Les décisionnaires s'opposeraient ainsi à de nombreuses innovations considérées comme vertes par les agriculteurs, mais perçues comme non paysannes ou non agroécologiques, non éthiques, non sécurisées, etc. telles que la méthanisation. Un autre acteur évoque l'agribashing.

Certains acteurs de l'environnement interrogés perçoivent en retour les agriculteurs comme peu dynamiques, peu engagés et individualistes. Cela semble pouvoir en partie être lié au maillage de l'habitat, très peu dense. Une autre explication est la difficulté économique et l'espoir de développement qui repose principalement sur l'agrandissement : « On a plutôt tendance à regarder l'exploitation du voisin en espérant pouvoir la reprendre une fois qu'elle aura fait faillite ». Pourtant, les projets collectifs sont nécessaires à l'innovation, d'après un des interlocuteurs, car elle permet de diviser la crainte du risque et favorise le partage d'expériences. D'une certaine façon, cette organisation atomisée de l'agriculture aurait conduit à la délégation du fonctionnement systémique et de la réflexion à des structures que sont les coopératives.

Aux antipodes de ce relatif immobilisme et isolement des habitants et agriculteurs, les décisionnaires locaux semblent se mobiliser en réseaux et partenariats dynamiques, mais pourtant impuissants à mettre en place un changement significatif sur le bassin versant de la Seille. De multiples groupes de travail sont ainsi créés, sur la promotion des solutions fondées sur la nature pour l'adaptation (programme LIFE ARTISAN), le climat, la biodiversité, particulièrement au niveau régional. De nombreux postes d'animation et d'appui sont en place dans des structures publiques sur des thématiques liées à la transition écologique : bioéconomie à l'ADEME, agroécologie à la DRAAF, etc. De nombreuses actions reposent sur des programmes de volontariat, de communication, ou encore de lobbying auprès d'instances produisant des documents à valeur réglementaire. D'autres actions des acteurs de l'environnement resposent sur des outils financiers et réglementaires. Nous avons choisi d'analyser les actions environnementales comme une tendance, et celles-ci ont ainsi plutôt été détaillées en Section IV.2.2.2.

3. Film français de Frédéric Tellier sorti le 9 mars 2022

Un tel dynamisme paraît incohérent avec le relatif immobilisme perçu de notre territoire d'étude : que deviennent les actions menées par ces personnes et groupes de travail ? Cela semble mettre en lumière une difficulté à se comprendre entre décideurs et agriculteurs du bassin versant de la Seille. Les deux parties semblent percevoir les autres comme insuffisamment scientifiques : les décideurs urbains sont perçus comme idéalisant la nature et niant les effets néfastes qu'elle peut entraîner sur elle-même, l'économie agricole et la santé ; les agriculteurs sont accusés de nier les impacts de leurs activités sur les milieux naturels et les services écosystémiques. Un point névralgique de cette mésentente repose notamment sur l'identification des responsables de la dégradation de la qualité de l'eau. La mésentente paraît extrêmement critique, proche du conflit : « J'en prends vraiment plein la gueule sur ce territoire-là ». Certains acteurs interrogés indiquent ainsi préférer mettre en place des actions avec les territoires et acteurs déjà dynamiques et volontaires, et laisser plutôt de côté les territoires et acteurs peu motivés, comme le bassin versant de la Seille. Si ce choix peut paraître pragmatique, il peut aussi être perçu comme un désinvestissement des fonctionnaires. Le programme Aquae-Seille (voir Section IV.2.2.2) nécessite beaucoup d'efforts de certains décideurs et conseillers, produisant notes de communication et audits mais est perçu par beaucoup comme peu efficace en termes d'actions et d'effets concrets.

De plus, les acteurs de l'environnement ressentent un manque de moyens face aux difficultés sur le bassin versant de la Seille. Les contrôles des obligations réglementaires et du respect des cahiers des charges motivant les subventions leur paraissent très insuffisants. Un groupe de travail sur les captages avait été mis en place sur le territoire, mais celui-ci n'a pas motivé les acteurs locaux. L'opération Aquae-Seille, évaluée tous les quatre ans, ne génèrerait que peu d'émulation, et les financements de l'Agence de l'Eau pour cette opération pourraient ne plus être reconduits. Les actions de renaturalisation des cours d'eau sont freinées par les propriétaires qui ne souhaitent pas voir leurs terrains empiétés. De plus, le rehaussement des cours d'eau, souhaité par les acteurs de la renaturalisation, peut mettre hors service les drains et les méandres peuvent gêner les engins agricoles. Plus généralement, les politiques et actions menées font rarement l'objet d'un suivi et d'une évaluation.

Le territoire est ainsi un lieu de conflits entre monde agricole et acteurs de l'environnement, qui peinent à résoudre les problématiques environnementales. Les différentes mesures de protection du patrimoine et de transition agroécologique sont souvent perçues comme insuffisantes par les acteurs chargés de leur mise en œuvre au regard des objectifs de résultats fixés, comme le bon état chimique et écologique des cours d'eau. Pour autant, elles sont perçues comme injustement sévères par certains agriculteurs. Un agriculteur dénonce ainsi la difficulté de la démarche pour faire accepter son projet de méthaniseur : « On a dû passer en commission pour faire passer le méthaniseur. [...] Il a fallu que trente corps de métiers acceptent que le méthaniseur se fasse. Je ne sais pas s'il y avait autant de monde lors de la première centrale nucléaire ! »

Ainsi, le bassin versant est à l'intersection de désirs multiples et paradoxaux entre les acteurs qui l'occupent : volonté de développement économique de l'agriculture par la modernisation, parallèlement à des objectifs de conservation du patrimoine naturel et historique, de transition écologique, oppositions entre agriculteurs et pouvoirs publiques... L'issue de ces conflits paraît décisive pour le futur du bassin versant de la Seille.

2.2 Un territoire soumis à des évolutions paradoxales

2.2.1 Un développement économique agricole passant principalement par l'intensification et l'agrandissement des surfaces des exploitations...

Le territoire connaît un fort développement économique agricole se concrétisant par l'intensification. Cette intensification s'expliquerait par l'aspiration des agriculteurs à une moindre pénibilité au travail et à un meilleur niveau de vie : « Il y a toujours des éleveurs passionnés, mais les jeunes veulent pouvoir sortir, partir en vacances. Les conjoints ne veulent plus être isolés. L'agriculteur ne veut plus être derrière ses vaches H24 ». D'après PARRILLA et BARATAUD (2020), la majorité des éleveurs du Saulnois désireraient abandonner l'élevage pour une production céréalière. La prairie et les politiques de préservation des prairies seraient ainsi plutôt perçues comme des contraintes. Les MAE fauche tardive ont notamment fortement pénalisé certains agriculteurs suite aux inondations de l'été 2021, celles-ci ayant eu lieu avant la fauche.

On observe ainsi une diminution très importante de l'élevage et des surfaces en prairies, converties en céréales pour de l'élevage intensif, puis en cultures de vente. On observe également une suppression des haies et des arbres en milieu agricole en général. L'élevage notamment ovin, emblématique du territoire, est en forte perte de vitesse. La conversion des prairies en grandes cultures intensives entraînerait une augmentation de l'utilisation d'engrais et une dégradation de la qualité des eaux de surface et souterraines.

On observe par ailleurs un fort agrandissement des exploitations, qui s'explique à la fois par la volonté des exploitants agricoles de s'agrandir pour augmenter leurs revenus, et par l'effondrement du nombre d'agriculteurs. La qualification de la réussite d'une activité agricole sur ce territoire passerait effectivement principalement par la surface de l'exploitation, et peu par la diversification. Les jeunes agriculteurs se demandent entre eux « combien tu as d'hectares ? ».

Par ailleurs, les prix des terres agricoles sont perçus comme extrêmement élevés, rendant difficile l'installation de jeunes agriculteurs et favorisant l'agrandissement d'exploitations préexistantes. Ce même prix encourage également la mise en place de cultures rentables pour compenser le fort investissement à l'achat : « On essaie de sensibiliser les jeunes agriculteurs à l'environnement, mais quand ils achètent du terrain à 12-13 000 € l'hectare, la première chose qu'ils font c'est retourner la prairie pour mettre une culture rentable dessus ».

Pour un grand nombre d'acteurs interrogés, plutôt défenseurs de l'environnement, la PAC amplifierait les tendances « naturelles » liées aux signaux du marché, ou du moins leur laisserait libre cours, notamment depuis le découplage des aides en 1992 et le maintien des aides proportionnelles à la surface comme principal élément de répartition des subventions. Ce dernier point encourage notamment l'agrandissement des exploitations. Par ailleurs, une partie importante des aides PAC aurait progressivement été déléguée à des acteurs plus locaux pour définir des objectifs territorialisés. La région Grand Est distribue ainsi des subventions dans le cadre de contrats de filière qui visent principalement l'augmentation de la production. Le pilier vert de la PAC et le conditionnement des aides est ainsi très souvent perçu comme très insuffisant. D'après une des personnes interrogées, « 90 % des fonds vont être destinés à produire et pas à préserver les espaces » dans la nouvelle PAC. Certaines personnes interrogées dénoncent par ailleurs l'abandon des aides au maintien en BIO, et la perception d'aides équivalentes dans le cadre des écorégimes pour l'agriculture (Haute Valeur Environnementale) prévus dans la nouvelle PAC. Cela inquiète particulièrement le PNRL, qui craint que les MAE protégeant les prairies de la Seille ne soient à l'avenir plus assez compétitives par rapport à un changement de production.

Les acteurs publics plus marqués comme soutenant les agriculteurs et l'économie agricole voient pourtant dans le développement économique de la Seille un levier face aux difficultés agronomiques et économiques de ce secteur, tout en sélectionnant un modèle de développement avec le moins de contreparties environnementales possibles. L'amélioration des pratiques est donc conditionnée à un objectif de maintien des revenus des agriculteurs.

Un autre facteur de disparition des élevages pourrait par ailleurs être la mise en place de réglementations toujours plus contraignantes sur ces derniers notamment afin de réduire les pollutions aux nitrates et les risques sanitaires. Cela constitue éventuellement un effet pervers, si les élevages qui disparaissent permettaient le maintien de prairies, qui elles-mêmes permettaient justement de préserver la qualité de l'eau nécessaire à la santé des milieux et des êtres humains. Par ailleurs, la diminution des élevages s'explique aussi par la hausse des importations, la diminution de la consommation de bovins (AGRESTE et FRANCEAGRIMER, 2022), ou encore la diminution des débouchés pour la production de laine.

On relève l'intervention et l'influence d'acteurs économiques importants poussant la mise en place de modèles agricoles intensifs. Un des agriculteurs interrogés a ainsi répondu à un appel de Cristal Union pour cultiver de la betterave à destination d'une importante sucrerie d'Alsace. Les grandes coopératives agricoles visent en premier lieu la rentabilité adhérent, en se calant sur les choix culturaux encouragés par la PAC.

L'intensification de l'agriculture serait de plus permise notamment par l'augmentation du niveau d'études des agriculteurs, qui peuvent mobiliser des techniques avancées. PARRILLA et BARATAUD (2020) estiment ainsi que l'imaginaire du progrès motive la majorité des exploitants sur le bassin versant. Si cette intensification a rencontré de nombreux freins dans le passé récent de la part de nombreux acteurs publics soucieux de préserver l'environnement, la guerre Russo-Ukrainienne, débutée en 2022, entraînerait une politique d'augmentation de

la production pour assurer les souverainetés alimentaire et énergétique à la France. Au regard des aspirations des jeunes agriculteurs, la tendance à la diminution de l'élevage et à la simplification des exploitations devrait se poursuivre.

Sur le volet aquaculture, des difficultés similaires ont également été relevées. La population d'aquaculteurs est vieillissante et les prix d'acquisition des étangs rédhibitoires. Deux pisciculteurs auraient récemment fait faillite. La filière semble donc tenir seulement grâce à l'action publique : gestion de l'étang de Lindre par le conseil départemental de Moselle, acquisition des étangs au départ à la retraite des agriculteurs par le conservatoire d'espaces naturels de Lorraine. La filière en tant que moteur économique autonome du secteur paraît donc aujourd'hui menacée.

2.2.2 … auquel répondent des actions de protection de l'environnement et de préservation des filières historiques

Ces dernières décennies, de nombreuses actions de protection de l'environnement ont été mises en place. Certaines visent à notamment à répondre aux impacts de l'intensification de l'agriculture, tendance caractéristique du bassin versant de la Seille.

Beaucoup de ces actions trouvent leur origine dans des dispositifs à l'échelle de l'Union Européenne (PAC, directive cadre sur l'eau, etc.). Au niveau national, l'État a développé progressivement un cadre réglementaire pour la protection de l'environnement qui doit s'appliquer à l'ensemble des territoires. Enfin, les actions et outils génériques définis au niveau européen et national sont conçus pour être déployés et définis plus précisément à un niveau plus local selon différents outils : réglementations, subventions, etc. Les services déconcentrés de l'État au niveau régional et départemental sont ainsi chargés de produire des arrêtés et doctrines protégeant l'environnement et la santé humaine. Les **politiques de protection de l'environnement** évoquées par les personnes interrogées sont ainsi :

- le verdissement de la PAC, qui subventionne des pratiques plus respectueuses de l'environnement, et conditionne les aides distribuées au respect de certaines règles. Pour un des agriculteurs interrogés, le retournement des prairies aurait ainsi ralenti sous l'effet du verdissement de la PAC. Comme nous l'avons vu, les subventions prévues dans le pilier vert peuvent ainsi servir à soutenir certaines actions, notamment les MAE mises en place sur les prairies de la Seille. Des bandes enherbées ont été mises en place le long des cours d'eau.
- le programme AquaeSeille mené par la chambre d'agriculture de Moselle. Ce programme vise à communiquer auprès des agriculteurs pour améliorer les pratiques notamment dans un objectif de l'amélioration de la qualité de l'eau et des milieux. Cette opération vise à communiquer des méthodes aux agriculteurs permettant de réduire les impacts de leurs activités sur l'eau. Elle s'appuie sur le volontariat.
- la carte des linéaires de cours d'eau, établissant les cours d'eau et donc les tronçons sur lesquels des aménagements sont susceptibles de perturber l'écoulement et nécessitant une autorisation de la police de l'eau, l'obligation de mettre en place des bandes enherbées, etc. La police de l'eau de la Moselle a défini une stratégie d'opposition à déclaration en 2014 informant sur les conditions d'autorisation ou d'interdiction des projets pouvant perturber l'écoulement des cours d'eau.
- le réseau d'exploitations DEPHY engagées sur la réduction des produits phytosanitaires. Les méthodes encouragées vont notamment s'appuyer sur la diversification pour allonger les rotations et donc mieux lutter contre les adventices et ravageurs.
- les actions du PNRL : le PNRL déploie des actions de conservation, de valorisation de l'environnement et du patrimoine historique et paysan. Il est à l'origine d'initiatives sur l'agroforesterie, ou encore la mise en place de la filière Mos-laine. Cette dernière vise à redynamiser la filière laine et donc l'élevage ovin à travers de nouveaux débouchés textiles et pour l'isolation, permettant indirectement le maintien des prairies. D'autre part, le PNRL coordonne des MAE. Celles-ci subventionnent les agriculteurs qui acceptent notamment de réduire leur apport de fertilisants, ou encore de maintenir des prairies remarquables et de les faucher tardivement.

- la directive nitrates définie au niveau européen en 1991 et déclinée par l'État français a notamment conduit à l'obligation de mise en place d'intercultures pour piéger les nitrates, la limitation de la fertilisation azotée, ..., sur les zones vulnérables à délimiter. Ainsi, 90 % de la surface du département de la Moselle aurait été classée en zone vulnérable contre 25 % auparavant, en lien avec un abaissement des critères de qualification. Le bassin versant de la Seille serait ainsi intégralement ou quasi intégralement en zone vulnérable, imposant la mise en place d'intercultures ainsi que l'agrandissement des fosses à lisier. L'ARS (Agence Régionale de Santé) a identifié des périmètres autour de captages sur lesquels des prairies doivent être obligatoirement maintenues avec des règles spécifiques.
- les PAOT (Plan d'Action Opérationnel Territorialisé) définis à l'échelle départementale, mais déclinés en actions sur des masses d'eau précises. Des actions portent ainsi sur la réhabilitation et la création de stations d'épuration, sur la restauration et renaturation de cours d'eau, le rétablissement de la continuité écologique, la préservation et gestion durable des zones humides, la réduction des impacts des pratiques agricoles sur la qualité de l'eau des captages, et sur la connaissance et la réduction des impacts des activités industrielles.
- plus spécifiquement, sur la naturalisation des cours d'eau, il est ainsi notable qu'avant 2014, aucun projet hydraulique ou écologique ambitieux n'avait été mené sur le bassin versant de la Seille. Les syndicats réalisaient simplement de l'entretien notamment par le biais du curage. Aujourd'hui, les syndicats réalisent des projets de restauration sur la Seille et ses affluents sur plusieurs kilomètres avec une modélisation des impacts. Ce changement s'opère notamment sous l'influence des financeurs tels que l'AERM, qui n'accepte de subventionner que des projets d'une certaine envergure désormais, en lien avec la création de la compétence GEMAPI et la multiplication des demandes.
- les outils fonciers : des acteurs acquièrent des parcelles dans un but environnemental. Le conseil départemental est ainsi devenu propriétaire de l'étang de Lindre. Il s'est depuis donné pour mission de préserver la biodiversité de l'étang de Lindre par le biais de l'aquaculture extensive. Depuis plus de trente ans, un cordon de roselière de plus de 10 m de large a été mis en place. L'étang de Lindre a été labellisé bio 3 ans auparavant. De façon comparable, le conservatoire de Lorraine acquiert régulièrement des biens fonciers qu'il souhaite préserver tels que des étangs ou des prairies remarquables, afin de définir par la suite des baux ruraux avec des agriculteurs avec des conditions permettant la préservation du milieu.
- limitations des pesticides : des produits ont été interdits, comme certains pesticides en zones drainées.
- le plan de relance, l'État français a défini une enveloppe de 1,2 milliards d'euros pour l'agroécologie, dont 50 millions d'euros pour la replantation de haies et 5,5 millions d'euros pour la région Grand Est. Néanmoins, un acteur précise que peu de dossiers ont été déposés dans ce cadre en Moselle par rapport au reste de la région Grand Est. D'autres appels à projet sont prévus dans ce cadre, pour la trame verte et bleue notamment. Si ces investissements sont prévus uniquement dans le cadre du Plan de Relance, un acteur interrogé pense que cela pourrait créer une dynamique autour de la replantation de haies.

Ces mesures sont supposées s'amplifier dans le futur pour permettra la transition écologique. Les **actions futures déjà prévues**, ou plans définissant des objectifs évoqués par les acteurs interrogés, sont ainsi :

- la stratégie « de la ferme à la fourchette ». Elle prévoit une réduction par trois des IFT (indicateur de fréquence de traitement phytosanitaire) d'ici 2030.
- la nouvelle PAC. Elle prévoit un pourcentage de terres qui doivent être non productives (bandes tampons, jachères) s'élevant à 3 % si l'on s'engage à couvrir les sols en interculture, 4 % sinon. La nouvelle PAC inclura par ailleurs des écorégimes récompensant notamment certains systèmes de production considérés comme écologiques (BIO, HVE. . .) notamment par la réduction des intrants polluants et la diversification.
- la directive cadre sur l'eau est à l'origine de critères d'évaluation de la qualité des masses d'eau et a défini un objectif de bon état des masses d'eau à atteindre d'ici 2027.
- le syndicat de la Seille souhaite également s'appuyer sur les outils fonciers pour acquérir des terres bordant les cours d'eau et mettre en place des actions de renaturalisation du cours d'eau. De façon tendancielle, il est donc envisageable de prévoir une réduction des surfaces cultivées et un maintien minimal de prairies dans le cadre de ces actions.
- les paiements pour services environnementaux, notamment sur l'aspect de la protection de la qualité de l'eau, coordonnée par l'AERM.

- la mise en place d'une filière de légumineuses encouragée par la région Grand Est, avec notamment la production de pois et de pois chiche. Néanmoins, les sols du bassin versant de la Seille ont une tendance hydromorphe, et il n'est pas certain que les agriculteurs de ce secteur rejoignent l'initiative.

Néanmoins, l'ensemble des acteurs interrogés avec lesquels cette thématique a été abordée indiquent que les actions menées sont insuffisantes sur le bassin versant de la Seille, expliquant et expliquées par les difficultés évoquées dans la Section IV.2.1, et en particulier dans la Section IV.2.1.7. Le manque de moyens couplé au manque de motivation des agriculteurs freine fortement les progressions environnementales, voire met en péril le maintien des dispositifs. Les acteurs sont ainsi assez unanimes sur le fait que le bon état chimique écologique des cours d'eau ne sera pas atteint en 2027 tel que défini dans la directive cadre sur l'eau. Certains acteurs pensent que cela pourrait conduire à l'utilisation d'outils réglementaires plus sévères et à davantage de contrôles. Face au constat de l'inefficacité des mesures mises en place, on pourrait également passer progressivement à des mesures plus pragmatiques et simples à contrôler. Pour la qualité de l'eau, on pourrait passer d'une réglementation des pratiques à la mise en place obligatoire de cultures à bas niveau d'impact. Le respect des dispositions prévues dans la directive nitrates est en effet actuellement simplement soumis à déclaration et difficile à contrôler. Il est ainsi possible pour un préfet de définir des zones soumises à contrainte environnementale, mais cet outil est peu utilisé.

De plus, un changement de paradigme plus récent sur la **transition agroécologique**, porté par les acteurs urbains et institutionnels, a été décrit. Celui-ci repose sur le choix de solutions fondées sur la nature et de solutions intégrées.

Au niveau des terres agricoles et d'un point de vue économique, les acteurs de l'agriculture conçoivent ainsi l'agroécologie comme les méthodes favorisant l'autonomie technique et fonctionnelle des exploitations et des territoires, impliquant notamment un bouclage des cycles géochimiques. Ainsi, l'agroécologie consiste en la limitation des intrants dans le fonctionnement des exploitations, le recyclage des matières, la valorisation de la régulation naturelle qui permet de réduire les intrants chimiques et biologiques, etc. Par ailleurs, nombreux sont les acteurs qui considèrent comme essentiel que les mesures mises en place portant sur les cultures et itinéraires techniques soient intégrées à une logique de viabilité de la filière.

Les acteurs de l'environnement souhaitent quant à eux particulièrement favoriser les solutions permettant de résoudre l'ensemble des problématiques environnementales à l'échelle d'un territoire. Beaucoup de mesures souhaitent ainsi à l'échelle d'un paysage renaturaliser les cours d'eau, préserver voire développer l'agroforesterie, ainsi que les prairies notamment par l'intermédiaire de l'élevage. La protection contre les inondations est ainsi aujourd'hui associée plus généralement à la gestion des milieux aquatiques à travers la compétence GEMAPI (gestion des milieux aquatiques et protection contre les inondations) confiée aux EPCI (Etablissement Public de Coopération Intercommunale) depuis 2018 par les lois MAPTAM (modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles) et NOTRe (nouvelle organisation territoriale de la République). En cohérence avec les objectifs de bon état chimique et écologique des masses d'eau, les personnes chargées de la protection contre les inondations sur le bassin versant de la Seille mènent des actions visant à renaturaliser les cours d'eau, critiquant le suraménagement des cours d'eau. En effet, le curage et la rectification des cours d'eau sont désormais perçus comme des mesures de court terme et peu "fonctionnelles" par les gestionnaires. Selon eux, la renaturalisation des cours d'eau serait un moyen d'atténuer le risque inondation tout en améliorant la qualité chimique et écologique des cours d'eau de façon durable. La création de la GEMAPI a par ailleurs permis d'accélérer les projets en obligeant les territoires à s'investir. Néanmoins, ces arguments sur la renaturalisation ne convainquent pas facilement les agriculteurs, qui font davantage confiance aux méthodes plus traditionnelles, telles que le curage. De plus, les personnes chargées de la protection contre les inondations admettent elles-mêmes que les aménagements s'appuyant sur la renaturalisation ne permettent pas une protection contre les évènements les plus extrêmes. Les secteurs menacés étant principalement des secteurs considérés comme à faibles enjeux puisqu'agricoles, des aménagements « lourds » tels que des bassins d'écrêtement des crues ou des digues ne sont pas envisagés. Des digues pourraient n'être envisagées qu'au niveau des villes de Marly ou de Metz.

Au-delà de la protection des prairies en tant que patrimoine, leur protection, voire leur développement, vise pour les acteurs les mettant en place à maintenir la qualité de l'eau et gagner en résilience face aux inondations. Les actions de redynamisation de l'élevage pourraient ainsi favoriser le maintien des prairies dans l'objectif

d'un cercle vertueux, parallèlement aux actions ciblées sur la ressource en eau directement, notamment la réglementation des pratiques de fertilisation, la mise aux normes des stations d'épuration des eaux usées, etc. La plantation d'arbres est perçue par ailleurs comme une solution pour créer des revenus alternatifs pour les agriculteurs tout en favorisant la biodiversité, la lutte contre les inondations et l'atténuation du changement climatique.

Les agriculteurs s'approprient ces démarches environnementales de différentes façons : quand certains y sont fermement opposés, d'autres y voient des opportunités d'accroissement des revenus par le biais d'une plus forte valeur ajoutée ou de subventions, et d'autres, minoritaires, font preuve d'un réel engagement. Pour certains acteurs, les agriculteurs du bassin versant de la Seille ayant mis en place des démarches environnementales l'ont principalement fait parce qu'ils étaient motivés par les revenus que ces démarches permettent de générer. La hausse des revenus, conditionnée par les subventions et le marché, constituerait alors bien, pour la majorité des agriculteurs, le principal facteur de choix. C'est notamment le cas des MAE, mais aussi de la transition vers le bio ou la HVE qui peut générer des hausses de revenus par la hausse du prix de vente et permettre d'obtenir des aides spécifiques notamment via la PAC. Les pisciculteurs autres que les fonctionnaires de l'étang de Lindre ne verraient ainsi pas l'intérêt d'obtenir une certification bio si celle-ci ne leur permet pas d'augmenter leurs revenus.

Enfin, certains acteurs ont perçu une dynamique nouvelle autour de la protection de la biodiversité et de l'eau portée par la communauté de communes du Saulnois (CCS) depuis l'arrivée de son nouveau président Jérôme End, également président du PNRL. Celui-ci promeut un projet de trame verte et bleue encore en réflexions et souhaiterait notamment la replantation de haies. De plus, celui-ci serait favorable à la mise en place d'un contrat de territoire eau et climat.

A ce stade, on relève donc une opposition entre tendance au développement (Section IV.2.2.1) et mesures de conservation.

2.2.3 Un objectif de relocalisation des productions et consommations

Dans cette optique de transition agroécologique, on relève par ailleurs la naissance d'une volonté de mettre en place des circuits courts et des filières de valorisation locale. Un cadre national a été défini à travers la loi EGalim. Des acteurs interrogés au profil plus urbain ou institutionnel souhaitent en effet un retour à une production locale « pour nourrir les gens » et quitter le marché de négoce. Des agriculteurs se sont ainsi organisés en collectif pour répondre à une demande locale. L'AMAP de Dieuze et l'Inventerre du Pré Vert, magasin associatif s'approvisionnant auprès de 18 agriculteurs d'agriculteurs et comptant 500 adhérents en 2020, montre ainsi une volonté citoyenne et paysanne de mettre en place de tels circuits courts dans le Saulnois, en association avec une agriculture biologique (PARRILLA et BARATAUD, 2020). Les agriculteurs/paysans investis dans l'Inventerre du Pré Vert travailleraient par ailleurs en collaboration avec le PNRL sur des chantiers de maintien et replantation des prairies. Si les acteurs plus représentatifs de l'économie agricole trouvent l'idée d'une agriculture entièrement tournée vers le local peu réaliste et non souhaitable, il leur paraît dommage de ne pas avoir davantage de transformation et donc de création de valeur ajoutée localement. On note par ailleurs dès 2014-2015 la réalisation d'une étude par le bureau d'étude Ecozept qui avait déploré une faible valorisation locale des productions et avait préconisé les évolutions suivantes :

- Développer et structurer la pisciculture d'étang ;
- Favoriser la restructuration des vergers traditionnels ;
- Améliorer la valorisation de la viande ovine ;
- Développer l'intégration des produits locaux dans l'offre commerciale des professionnels de l'alimentation.

PARRILLA et BARATAUD (2020) décrivaient une faible avancée depuis la définition de ces préconisations, mais des évolutions sont tout de même à noter depuis leur étude. L'étang de Lindre est ainsi en train de monter un projet d'atelier de transformation collectif avec les intercommunalités du Saulnois et de Sarrebourg. Le PNRL ainsi que l'AERM sont très actifs sur la création de filières de valorisation de productions perçues comme vertueuses, comme Mos-laine sur la Seille, projet de valorisation de la laine en matériau d'isolation.

Sur des territoires voisins, d'autres filières ont été accompagnées : le foin à destination de zoos et de lapins, le cuir de moutons, le pain de la farine du parc, etc. La Métropole de Metz et la CCS en collaboration avec la communauté de Sarrebourg constituent chacune un Plan Alimentaire Territorial. Le Conseil régional a défini des objectifs stratégiques sur ces aspects et favorise notamment le développement des productions de fruits et de légumes pour la restauration hors domicile.

On note néanmoins que, conformément à l'analyse de PARRILLA et BARATAUD (2020), les circuits courts semblent pour l'instant être davantage perçus comme une opportunité de développement économique parmi d'autres à l'échelle individuelle que comme un levier de modification profonde de l'économie agricole par les agriculteurs conventionnels et leurs conseillers, ainsi que les collectivités. Un acteur interrogé craint par ailleurs que les PAT (plans alimentaires territoriaux) ne soient pas réellement suivis d'effets. Un seul des agriculteurs interrogés était membre d'une AMAP. Les agriculteurs n'ont pas entendu parler d'éventuelles démarches pour valoriser leurs productions en local par le biais des collectivités mettant en place des PAT. Par ailleurs, il est important de définir ce qui relève du local. PARRILLA et BARATAUD (2020) expliquent ainsi que certains agriculteurs engagés dans l'Inventerre du Pré Vert approvisionnent des chaînes de magasins bios ou des grandes surfaces pour écouler leurs productions, et souvent en dehors du périmètre de la CCS. En effet, la consommation dans le Saulnois et dans la région est aujourd'hui principalement concentrée dans des grandes surfaces, ou bien dans les agglomérations locales (Metz, Nancy). Les acteurs économiques agricoles interrogés, s'ils savent qu'il faudra développer les circuits courts et notamment le maraîchage, ne savent pas encore quelles surfaces agricoles vont être mobilisées. Il n'est pas aisé de déterminer à ce stade qui des petites coopératives ou des grosses coopératives vont s'emparer de ces nouveaux débouchés.

2.2.4 La mise à l'agenda de la thématique « changement climatique, eau, agriculture »

L'agriculture, à échelle mondiale, est au cœur de bilans de carbone intervenant dans le changement climatique : elle est émettrice de méthane par l'intermédiaire de l'élevage de ruminants, et de CO_2 par la combustion d'énergies fossiles et le relargage du CO_2 stockés dans les terres agricoles ; elle peut au contraire être captatrice de CO_2 atmosphérique, par le stockage via la photosynthèse et l'immobilisation du carbone organique dans les biomatériaux sur les terres agricoles. Elle est également impactée par le changement climatique, qui perturbe la phénologie, peut soumettre les cultures à de plus forts stress hydriques et thermiques, diminuer les ressources en eau disponibles, etc. Face au changement climatique, la pression exercée par l'agriculture sur la ressource en eau pourrait s'aggraver.

A l'échelle nationale et sur le bassin versant de la Seille, l'agriculture est ainsi perçue depuis déjà plusieurs années comme un levier d'atténuation du changement climatique, ce qui a été source de nombreuses politiques publiques : stockage de carbone via l'agroforesterie et dans les sols, diminution de l'élevage, diminution des intrants, agroénergies, biomatériaux. Parmi les actions liant agriculture et changement climatique, la région Grand Est et notamment le bassin versant de la Seille se sont particulièrement mobilisés pour la méthanisation. Les agriculteurs du bassin versant de la Seille se sont montrés particulièrement intéressés par cette innovation technologique. Cette dernière est source de nombreuses controverses sur ses impacts environnementaux et sur la qualité du cadre de vie du voisinage. Selon certains acteurs, le développement de la méthanisation accélèrerait la diminution de l'élevage et augmenterait les surfaces de cultures (intermédiaires) éventuellement consommatrices d'eau.

Plus récemment, le discours sur l'adaptation de l'agriculture au changement climatique s'est répandu, notamment suite au "Varenne agricole de l'eau". Lors de sa clôture le 1er février 2022, l'évènement a été l'occasion d'annoncer de nombreuses actions, telles que (GOUVERNEMENT, 2022) :

- la refonte de l'assurance récolte,
- le soutien à l'achat de matériel innovant,
- le soutien à la structuration de filières alimentaires et relocalisation de maillons industriels,
- le financement d'ouvrages hydrauliques,
- le lancement d'une évaluation scientifique des volumes prélevables hivernaux.

Ces nombreuses actions ont et vont encore mobiliser les acteurs locaux, qui devront évaluer les potentiels et contraintes de celles-ci sur leur périmètre d'influence. Les Agences de l'Eau vont ainsi devoir réviser leurs plans d'adaptation au changement climatique des bassins afin de prendre en compte les préconisations du Varenne et les chambres d'Agriculture régionales vont devoir également élaborer un plan d'adaptation régional. Le rapport de la réunion du 18 mars 2022 du comité de bassin Rhin-Meuse dispose ainsi d'une section consacrée aux objectifs suite au Varenne, et prévoit un plan d'action territorialisé sur le Saulnois portant sur l'optimisation du chapelet d'étangs sur le secteur pour répondre aux besoins agricoles. Les étangs de grande capacité gérés par VNF (Stock, Gondrexange, etc.) sont principalement visés, mais ces deux étangs cités dans le rapport se situent en dehors du périmètre du bassin versant de la Seille.

Par ailleurs, de nombreux projets ont émergé sur notre secteur, notamment à l'échelle de la région Grand Est. Celle-ci a en effet connu ces dernières années d'importantes sécheresses, très inhabituelles (2017, 2018, 2019, 2020 et 2022). Il en résulte beaucoup d'incertitudes sur la priorisation et les dispositifs à mettre en place sur notre territoire face à cette thématique nouvelle. La région Grand Est a notamment fait réaliser une importante étude sur l'impact du changement climatique à l'échelle de la région. La DRAAF avait produit un « Dire de l'Etat » en 2020 afin de définir une posture commune des acteurs de l'Etat sur les questions d'agriculture et de changement climatique, à l'interface de politiques publiques parfois contradictoires. Celui-ci a notamment permis d'identifier des vulnérabilités des cultures au changement climatique, définir des leviers d'adaptation et les leviers pour les activer. Ce diagnostic a été remobilisé pour les études demandées aux régions dans le cadre du Varenne. Des outils génériques ont par ailleurs été développés, notamment l'outil climat XXI [4] permettant de calculer l'évolution d'indicateurs agro-climatiques à échéance 2050 et donc de tester des scénarios. Des tests ont ainsi été réalisés par la chambre d'agriculture de la Moselle, notamment pour identifier les aspects positifs du changement climatique. Un projet dans le cadre du programme LIFE Biodiv'Est mobilise le PNRL sur la question de l'adaptation des espèces végétales prairiales.

Cet engouement pour les études prospectives n'est pas spécifique au secteur de la Seille. Les acteurs ont ainsi également cité l'étude LACCAVE menée sur la vigne. L'association SOLAGRO a mené des études sur l'adaptation plutôt dans le Sud de la France. L'ADEME a construit des scénarios pour atteindre la neutralité carbone à échéance 2050. Le Shift Project a produit récemment un Plan de transformation de l'économie française avec notamment un volet sur l'agriculture.

De nombreuses productions auraient souffert lors des années de sécheresse, en particulier le maïs, mais aussi les fourrages. Un des agriculteurs interrogés qui s'est installé en 2016 explique par ailleurs qu'un grand nombre des arbres qu'il avait plantés à son installation n'ont pas survécu. Ces arbres avaient été choisis par le PNRL qui défend plutôt la préservation d'espèces traditionnellement présentes en Lorraine, adaptées au climat historique de Lorraine, et donc sensibles à la chaleur et aux sécheresses. Le colza ne parvient parfois plus à lever en raison de la sécheresse des sols en fin d'été. Des éleveurs peinent à abreuver leur bétail dans les sources habituelles. Des études de faisabilité accompagnent désormais souvent les méthaniseurs qui s'appuient beaucoup sur les productions végétales et mettent en place des volumes de stockage importants. Des agriculteurs adaptent leurs pratiques, choisissant de guetter les pluies pour planter du colza. Ces difficultés auraient fait naître les prémices d'une volonté d'irriguer de certains agriculteurs, notamment pour des cultures sensibles (maraîchage, maïs, etc.). Un agriculteur partage ainsi sa désillusion après avoir conçu un système agricole qu'il souhaitait résilient grâce à une gestion agroécologique de la réserve hydrique du sol et les atouts apportés par les arbres, et a dû mettre en place une irrigation d'appoint même pour ses cultures maraîchères en pleines terres. Des pompages illégaux à des fins d'irrigation auraient été réalisés dans l'étang de Lindre. Néanmoins, cette velléité serait encore marginale et peu ancrée pour certains acteurs. Le matériel et les aménagements nécessaires sont en effet éventuellement coûteux et non rentables pour une utilisation exceptionnelle. L'année 2021 et ses fortes pluies auraient notamment fait reculer ce souhait.

Sous l'effet des années de sécheresse et des conclusions du Varenne agricole de l'eau, des acteurs publics ont commencé à mettre en place certaines mesures et conseils assurant une meilleure résilience face aux impacts du changement climatique et face au déficit en eau pour l'agriculture. Le conseil régional distribue ainsi des aides pour le stockage de fourrage ou encore pour la récupération d'eau pluviale. La chambre d'agriculture conseille

4. https://grandest.chambre-agriculture.fr/agro-environnement/sadapter-au-changement-climatique/clima-xxi-prospective-climatique-pour-une-perspective-agricole/

de ne pas appliquer de traitements au colza avant que celui-ci ait levé, pour ne pas risquer des dépenses inutiles. Les syndicats de gestion des cours d'eau prévoient dans leurs réaménagements de réduire la largeur des cours d'eau pour continuer à assurer une certaine profondeur.

Comme à l'échelle nationale, on note un certain désaccord des acteurs institutionnels et économiques sur l'irrigation et le stockage. Des acteurs sont ainsi très opposés au développement de l'irrigation, perçue comme une maladaptation. Ils craignent ainsi une fuite en avant des exploitations irriguées vers une agriculture intensive valorisant cette irrigation pour rembourser les investissements réalisés et augmenter la rentabilité. L'irrigation serait ainsi responsable pour eux d'une moindre résilience aux sécheresses, puisque les cultures mises en place seraient plus dépendantes de l'eau. De plus, le développement de l'irrigation créerait des conflits d'usage vis-à-vis de secteurs préleveurs ayant déjà eu des difficultés lors des dernières sécheresses, tels que la navigation, le refroidissement de centrales nucléaires, l'alimentation en eau potable. On note également un enjeu géopolitique, la Seille s'écoulant dans la Moselle qui rejoint le Luxembourg. Des acteurs craignent par ailleurs que le stockage fasse disparaître les zones humides naturelles en retenant l'eau, prenne la place de zones de biodiversité, voire menace la continuité écologique pour les barrages et seuils. La police de l'eau va ainsi devoir définir une doctrine d'instruction et d'opposition sur les retenues notamment collinaires. La position sur les prélèvements directement dans les cours d'eau est par ailleurs définie, mais très bloquante actuellement. Elle est en effet dimensionnée sur les débits d'étiage estimés trop faibles pour que les cours d'eau puissent être prélevés, si bien qu'il paraît difficile de développer l'irrigation sans stockage sur le territoire, ce qui est renforcé par le caractère très salé de la Seille. Les acteurs défendant l'environnement adoptent ainsi généralement une résolution des enjeux du changement climatique par des solutions fondées sur la nature, ce qui a notamment conduit au programme LIFE ARTISAN, coordonné par l'OFB. Pour d'autres, le développement de l'irrigation paraît être essentiel au maintien de l'agriculture sur le bassin versant de la Seille.

Au-delà des aspects ressource en eau, l'agriculture subit également de plein fouet les impacts de l'artificialisation, des ravageurs et mauvaises herbes, des zoonoses, etc. La production de tournesol s'est ainsi fortement développée sur le bassin versant en réaction à l'envahissement des cultures par du lupin.

2.3 Description des variables identifiées lors de l'enquête

Les acteurs interrogés ont identifié de très nombreuses variables, dont le devenir peut être décisif pour l'agriculture et la gestion de l'eau sur le bassin versant de la Seille. L'avenir de ces variables peut en effet tendre vers différentes hypothèses. Ces hypothèses servent ensuite à construire des scénarios contrastés d'évolution de l'agriculture sur le bassin versant de la Seille. La déclinaison spatiale de ces variables sur le bassin versant de la Seille est précisée lors de la formulation des hypothèses en Section IV.2.4.

Un travail de redéfinition et de regroupement des variables a été réalisé, menant finalement au diagramme présenté en Figure IV.6. Les intitulés des variables ont été simplifiés pour rendre le diagramme plus lisible. Les différentes variables qui interviennent dans le diagramme, et notamment leur lien avec le contexte spécifique de la Seille, ainsi que leurs influences réciproques, sont détaillées dans les Sections IV.2.3.1, IV.2.3.2, IV.2.3.3.

2.3.1 Variables résultat modélisables

Nous appelons "variables résultat" les variables qui, selon des hypothèses contrastées en fonction des scénarios construits, vont alimenter le modèle, permettant in fine de comparer les impacts des scénarios. De nombreuses variables résultat potentielles ont été identifiées par les acteurs interrogés. Nous avons choisi de retenir les suivantes pour l'exercice de modélisation :

- **Assolements :** surfaces annuelles de chaque culture, et répartition spatiale de ces cultures sur le territoire modélisé ;
- **Surfaces irriguées :** proportion de surfaces irriguées pour chaque culture, et répartition spatiale des zones irriguées ;

- **Stockage d'eau pour l'irrigation :** éventuelle mise en place d'un stockage pour l'irrigation, répartition spatiale des volumes stockables ;
- **Règles de gestion de l'étang de Lindre :** règles de gestion qui vont déterminer la dynamique de stockage et de vidange de l'eau dans l'étang de Lindre.

D'autres variables résultat ont été recensées, mais ne feront pas l'objet d'hypothèses contrastées selon les scénarios. Ce choix a été motivé par une recherche de facilitation de la comparaison entre les différents scénarios, ou par la difficulté à émettre des hypothèses solides sur la valeur prise par ces variables, ou les deux. Nous listons les variables concernées ci-dessous, et les hypothèses que nous avons choisi de réaliser, communes à l'ensemble des scénarios :

- **Surface agricole utile totale (SAU) :** Nous avons choisi de maintenir constante la surface agricole utile totale. En effet, les acteurs avec lesquels ce point a été abordé ont estimé peu réaliste une diminution de la SAU, alors que les politiques publiques tendent à protéger le foncier agricole et que les terrains agricoles sont actuellement très prisés par les agriculteurs malgré des prix jugés élevés. Il nous paraît ainsi difficile en l'état de scénariser une diminution de la SAU, et réaliser des hypothèses contrastées sur cette variable risque de rendre difficilement comparables nos scénarios ;
- **Modification de paramètres agronomiques en répercussion de solutions fondées sur la nature :** Les acteurs ont évoqué de nombreuses solutions fondées sur la nature pour l'adaptation de l'agriculture au changement climatique : agriculture de conservation, paillage, enrichissement en matière organique du sol, agroforesterie... Cependant, les conséquences de celles-ci, qui se traduiraient par des modifications des paramètres agronomiques (réserve utile du sol, coefficients culturaux...) sont encore peu connues. Nous avons abordé plus spécifiquement ces stratégies en Section X.3 des Discussions générales. Nous choisissons ainsi de garder des jeux de paramètres homogènes entre les différents scénarios. Néanmoins, les paramètres agronomiques seront systématiquement ajustés pour prendre en compte les effets du changement climatique sur la temporalité des cultures.
- **Règles de restriction en cas de sécheresse :** Nous maintiendrons les mêmes valeurs seuil de débit des alertes sécheresse, et les mêmes règles de limitation des prélèvements en résultant, de façon à maintenir une pression de la ressource sur la demande homogène pour les différents scénarios.

2.3.2 Variables explicatives

Les hypothèses réalisées pour les variables résultat sont formulées au regard de variables explicatives, qui peuvent elles-mêmes suivre des tendances contrastées. Nous décrivons ici les variables explicatives décrites par les acteurs interrogés sur le bassin versant de la Seille.

Tout en amont de notre diagramme (Figure IV.6), nous avons indiqué les variables **Limites environnementales** et **Evolutions technico-économiques extrinsèques** :

- Les **limites environnementales** désignent les freins aux activités humaines liés aux conditions environnementales. On peut inclure ici les impacts du changement climatique sur l'agriculture, avec l'augmentation du risque de sécheresse, la pression accrue de ravageurs, les risques sanitaires touchant les élevages, etc. On peut également inclure les contraintes environnementales historiques et spécifiques du bassin versant la Seille : inondations, salinité. Ces contraintes doivent être prises en compte dans les scénarios de façon à ce que ces derniers soient réalistes. Les conséquences de la salinité en matière d'exploitabilité de l'eau pour l'irrigation sont ainsi analysées en Annexe E, tandis que les conséquences sur les assolements de l'aléa submersion sont analysées en Annexe D.
- les **évolutions technico-économiques extrinsèques** couvrent les évolutions globales du contexte économique et technique. Par exemple, le coût des intrants peut évoluer, modifiant les coûts de production. Le prix des productions peut évoluer sous l'effet de la demande, ou de politiques économiques, et peuvent ensuite orienter les choix stratégiques de production. La technologie peut évoluer, modifiant également les coûts de production, ou créant de nouvelles demandes.

Ces variables ne feront pas l'objet de définition d'hypothèses contrastées dans l'exercice de scénarisation, car elles nous paraissent relever, pour une partie non négligeable, de **facteurs non maîtrisables**, et donc sortir d'une réflexion stratégique adaptée aux objectifs de la thèse. Néanmoins, nous prendrons bien en compte plusieurs scénarios radiatifs de projections climatiques dans les simulations, sans les intégrer dans notre propre exercice de scénarisation au niveau local. Chaque scénario local sera croisé avec l'ensemble des scénarios climatiques retenus pour la réalisation des projections.

Ensuite, les entretiens nous ont permis de relever l'importance de l'action publique pour les personnes interrogées. Nous avons choisi de traiter dans la même variable **les actions publiques environnementales et agricoles**, car elles paraissent intimement liées sur notre territoire d'étude, qu'elles soient en opposition ou complémentaires : il est impossible de décrire la politique environnementale sur le bassin versant de la Seille sans décrire la politique agricole, et inversement.

Au sein de cette variable, nous relevons tout d'abord une sous-variable **objectifs environnementaux**. En effet, les politiques environnementales couvrent de nombreux objectifs, dans lesquels on peut notamment inclure la gestion qualitative et quantitative de l'eau, la protection des milieux et de la biodiversité associée, voire la création de nouveaux espaces d'intérêt écologique (trames vertes et bleues...), l'atténuation et l'adaptation au changement climatique, la protection et la prévention contre les inondations. Nous remarquons notamment sur notre territoire une certaine opposition entre :

- d'une part un discours plutôt plutôt moderniste. On regroupe alors dans ce discours la valorisation de la diminution de l'élevage, émetteur de gaz à effet de serre, la valorisation de la méthanisation en ce qu'elle permet la production d'une énergie verte au moyen de la valorisation de déchets, la volonté de protéger davantage les terres contre les inondations et d'empêcher les débordements ;
- d'autre part un discours promouvant des solutions fondées sur la nature. On promeut alors le maintien des prairies au moyen de l'élevage, ainsi qu'une meilleure régulation de l'implantation et gestion des méthaniseurs pour des raisons écologiques, patrimoniales et de qualité de l'eau, la renaturalisation des cours d'eau, la plantation d'arbres, etc.

De façon moins dichotomique, les objectifs environnementaux pourront plus ou moins encourager la diversification des cultures, perçue comme une solution d'adaptation au changement climatique et permettant de réduire les recours aux intrants, la mise en place de cultures à bas niveau d'impact, de cultures peu gourmandes en eau et résilientes aux aléas climatiques, le développement de labels tels que le label bio ou le label HVE, etc. La volonté de développer les cultures de protéagineux, ou encore de relocaliser les productions de légumes et fruits, est notable. La **position des décideurs sur l'irrigation et le stockage à destination d'irrigation sur le bassin versant de la Seille** paraît également incertaine et déterminante. En effet, l'irrigation et le stockage d'eau agricole peuvent être perçus soit comme une stratégie d'adaptation pertinente face au changement climatique, soit comme une maladaptation. Actuellement, il n'y a pas d'irrigation, et donc de stockage à destination d'irrigation, sur le bassin versant de la Seille. On pourrait ainsi voir naître une politique très permissive, renonçant à s'assurer du bon état des cours d'eau et zones humides, ou au contraire une politique restreignant fortement les prélèvements et l'implantation de retenues qui risqueraient d'impacter négativement les milieux.

De plus, de nombreux acteurs ont évoqué un décalage entre les objectifs environnementaux fixés par les acteurs publics, définis en terme de résultats, et les moyens réellement accordés pour remplir ces objectifs. Un exemple notamment évoqué concernait les objectifs de la directive cadre sur l'eau pour 2027, objectifs qui ne seront vraisemblablement pas atteints par les cours d'eau du bassin versant de la Seille. Des acteurs relèvent par ailleurs le manque d'ambition de la nouvelle PAC au regard des objectifs environnementaux. Ainsi, la nature et l'ambition des objectifs environnementaux fixés paraissent déterminantes.

Nous relevons ensuite une sous-variable **objectifs agricoles**. Ces derniers vont dépendre directement des objectifs environnementaux qui s'appliquent à l'agriculture. Ces objectifs environnementaux vont néanmoins être confrontés aux objectifs de rentabilité économique et de croissance, aux objectifs de sécurité et de souveraineté alimentaire, de protection sanitaire des populations en lien avec les risques de propagation de zoonoses par les élevages, de géopolitique, la France ayant tissé un réseau de partenaires économiques par le biais du commerce de productions agricoles, mais aussi aux objectifs d'indépendance énergétique avec le développement des agro-énergies.

Les objectifs agricoles et environnementaux vont résulter en la mise en place d'**outils d'actions publiques**. Certains outils vont viser à soutenir ou au contraire contraindre certaines productions et certains types d'exploitations, comme par exemple :

- la **politique économique agricole** à échelle européenne et nationale, au travers de la politique agricole commune (PAC), qui a été largement évoquée comme un déterminant majeur de l'évolution des systèmes agricoles. La version actuelle de la PAC a notamment souvent été perçue comme peu dirigiste, et ne favorisant que peu les exploitations considérées comme vertueuses sur le plan environnemental. Ce faible dirigisme de la PAC, officialisé depuis le découplage en 2003, se justifierait par la délégation de la répartition des aides aux acteurs plus locaux, à-même de définir des objectifs adaptés à leurs territoires, et à la capacité du marché à adapter l'offre à la demande, afin d'assurer des débouchés aux productions. Sur le bassin versant de la Seille, on note toutefois la déclinaison d'enveloppes de la PAC permettant de favoriser le maintien de prairies via les MAE gérées par le PNRL. Un autre instrument, comparable au MAE, pourrait se développer : les **paiements pour services environnementaux**.
- les **assurances agricoles** (récolte, calamité), qui pourraient être plus ou moins ambitieuses, et plus ou moins dirigistes. En effet, elles pourraient protéger préférentiellement certaines cultures ou pratiques considérées comme plus résilientes. Si les assurances protègent peu les agriculteurs, ces derniers pourraient être amenés à développer eux-mêmes des stratégies leur permettant de gagner en résilience : stockage des productions, stockage d'eau.
- la **politique foncière**, qui va couvrir les priorités d'attribution des terres agricoles selon le type de production ou le type d'exploitation. On a noté la volonté actuelle d'acteurs publics d'acquérir des terres agricoles pour des objectifs de conservation (Conservatoire de Lorraine) ou d'aménagements écologiques, notamment pour la renaturalisation des cours d'eau (syndicat du bassin versant de la Seille). Actuellement, on note un certain paradoxe entre un prix élevé des terres agricoles, qui rend difficile l'acquisition de terres par de jeunes agriculteurs qui voudraient lancer leur activité, et les règles d'attribution des terres par la SAFER, qui souhaite les attribuer en priorité aux jeunes agriculteurs.
- les **interdictions, obligations, et taxations**, qui peuvent localement ou à échelle nationale conduire à la diminution de certaines cultures ou de pratiques au profit d'autres. On note par exemple l'obligation déjà effective d'incorporer des cultures intermédiaires sur la quasi-totalité du bassin versant de la Seille (obligation locale) ou de présence de bandes enherbées au bord des cours d'eau (obligation nationale). Ces mêmes outils pourraient être mobilisés pour généraliser la présence de cultures à bas niveau d'impacts, maintenir les prairies sur certains secteurs, diminuer la présence de certaines cultures perçues comme néfastes, etc.

Concernant la gestion quantitative de l'eau agricole, il sera nécessaire de définir des règles d'autorisation de l'irrigation et de stockage sur le bassin versant. On pourrait aussi envisager une politique permettant l'irrigation ou le stockage pour seulement certaines cultures, ou sous conditions de pratiques considérées comme vertueuses. On peut encore envisager au contraire la mobilisation d'outils de soutien aux projets de développement de l'irrigation et du stockage sur le bassin versant, ces projets étant coûteux.

Ensuite, les entretiens ont mis en avant le questionnement sur le devenir de la **socio-économie du bassin versant**. Nous avons rassemblé sous cette variable à la fois une sous-variable agriculteurs, afin de décrire l'évolution de ce(s) groupe(s) social(aux), et l'évolution de l'organisation des filières.

- L'**organisation des filières** paraît primordiale pour les acteurs du bassin versant de la Seille. L'existence de débouchés rentables pour les productions est perçue comme absolument nécessaire. Aussi, une éventuelle diversification, ou substitution d'une culture par une autre, devra s'accompagner de l'existence ou de la création d'un débouché et d'une logistique de filière. De plus, l'organisation actuelle des filières sur le bassin versant de la Seille paraît déterminante sur les cultures et modes de production en place. En effet, nous avons vu que les filières agricoles du territoire étudié sont organisées autour de l'exportation de produits bruts via le port de Metz. Cette exportation est dirigée par de grandes coopératives, associant les agriculteurs. Cette organisation orienterait vers une uniformisation des productions des exploitations. Or, plusieurs acteurs interrogés aspirent à une part plus importante de valorisation locale des productions, via la mise en place d'activités de transformation, et/ou pour alimenter localement les agglomérations du bassin versant. La CCS et la métropole messine rédigent ainsi actuellement chacune leur propre plan alimentaire territorial. Metz constitue notamment un bassin de consommation potentielle

très important. Aujourd'hui déjà, une demande locale pour des fruits et légumes est à souligner, avec un déficit de production pour ces cultures. De plus, on souligne les initiatives de développement de petites filières vertueuses, accompagnées par le PNRL et/ou l'agence de l'eau. On note également l'éventualité de développer d'autres débouchés économiques pour les agriculteurs, par exemple via l'agritourisme, ou encore par la mise en place de filières d'agroénergies, et en particulier la méthanisation.

- Les **agriculteurs du bassin versant de la Seille** présentent des visions assez différentes de l'agriculture, le groupe majoritaire étant plutôt décrit comme constitué d'agriculteurs en quête de rentabilité par l'agrandissement des exploitations, la production de céréales dans des systèmes simplifiés, et un éventuel intérêt pour les innovations quand elles constituent des sources de rentabilité supplémentaire. Les acteurs de l'environnement ressentent ainsi une défiance de la part des agriculteurs du bassin versant de la Seille sur les innovations écologiques. Néanmoins, nous avons également pu rencontrer des agriculteurs avec des visions bien différentes, misant sur la résilience, la biodiversité, le bien-être animal, l'indépendance économique durable par rapport à la PAC et par rapport aux grosses coopératives. Certains agriculteurs sont également en quête d'une meilleure valorisation de leurs productions, via les circuits courts. Ainsi, dans un même contexte géographique et politique, on observe une certaine variabilité des profils d'agriculteurs, de leurs aspirations et du fonctionnement de leurs exploitations. De plus, les agriculteurs sur le bassin versant de la Seille ont souvent été décrits comme individualistes. Néanmoins, nous avons vu qu'ils étaient en mesure de s'associer pour créer de grandes exploitations collectives, ou encore pour alimenter des méthaniseurs pour les agriculteurs productivistes, ou dans le cadre d'AMAP pour les profils plus atypiques. Leur capacité à s'associer pourrait être déterminante pour le partage de l'eau : mise en place de tours d'eau, quotas, réserves collectives plutôt qu'individuelles, etc. De plus, l'évolution de leur nombre est une sous-variable critique. Une forte tendance à la diminution du nombre d'agriculteurs est en cours, orientant vers un agrandissement des exploitations et une simplification des systèmes de production. On note plus particulièrement une diminution du nombre d'éleveurs, en particulier des systèmes d'élevage en prairie sur le bassin versant de la Seille, s'expliquant par la faible attractivité actuelle de cette activité.

Les variables **Demande des consommateurs** et **Rentabilité/désirabilité des cultures et modes de production**, influencées par de nombreuses variables, ont souvent été mises en avant par les personnes interrogées. Elles nous paraissent nécessairement devoir être discutées pour établir les hypothèses de socio-économie sur le bassin versant de la Seille.

Enfin, il paraît nécessaire de décrire l'évolution des **espaces naturels et patrimoniaux** sur le bassin versant de la Seille, que nous divisons en trois volets : l'évolution des **prairies**, l'évolution des **milieux aquatiques**, et l'évolution du **domaine de l'étang de Lindre**. En effet, le devenir de ces espaces paraît particulièrement incertain et contrasté selon les directions que pourrait prendre le bassin versant de la Seille. Ces espaces pourront être plus ou moins sanctuarisés pour des raisons de conservation écologique et patrimoniale, ou au contraire mis à profit pour des usages économiques, ou bien faire l'objet de compromis, voire de stratégies "gagnant-gagnant". La question de l'évolution des objectifs de gestion de l'étang de Lindre paraît particulièrement cruciale. Celui-ci pourrait préserver sa vocation de conservation écologique par la pisciculture, ou bien évoluer en bassin écrêteur de crue, de soutien d'étiage, voire en réserve pour l'irrigation.

2.3.3 Interrelations entre les variables identifiées

Nous avons volontairement représenté des liens non directionnels dans le diagramme présenté en Figure IV.6. En effet, les influences sont souvent réciproques, même si ces influences ne sont pas nécessairement de même nature, ni synchroniques.

La variable **Actions publiques agricoles et environnementales** est soumise à l'évolution de limites environnementales et du contexte technico-économique extrinsèque, en cherchant à en tirer partie, mais aussi à les influencer (politique d'atténuation du changement global, investissement dans la recherche et l'innovation, politique économique, etc.). Couplée aux limites environnementales et aux évolutions technico-économiques, elle paraît fortement explicative de l'évolution de la rentabilité et de la désirabilité des cultures, productions et

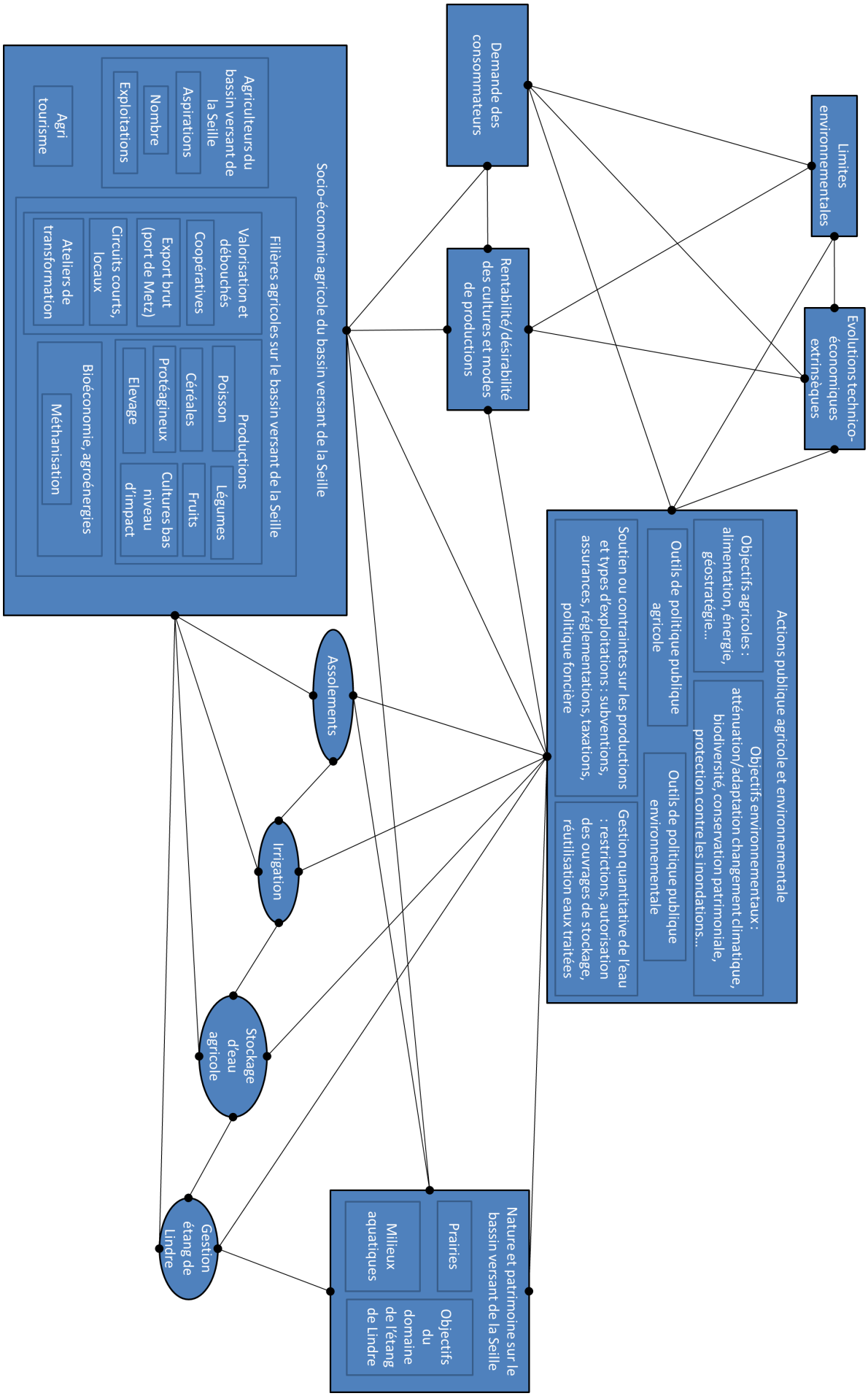


FIGURE IV.6 – Interrelations entre les variables explicatives déterminant le devenir des variables résultat. Les rectangles représentent les variables explicatives, les ellipses représentent les variables résultat modélisables

modes de production, qui va ensuite influencer la socio-économie agricole du bassin versant de la Seille. Par l'utilisation d'instruments réglementaires et incitatifs, les actions publiques et environnementales vont ainsi influencer agriculteurs et filières du bassin versant de la Seille et les assolements. Néanmoins, cette influence n'est pas monodirectionnelle, les agriculteurs et filières étant des acteurs pouvant influencer les actions publiques, notamment sur le bassin versant de la Seille. Par exemple, sous l'action des agriculteurs, le rôle de l'étang de Lindre est régulièrement questionné. Cette variable influencera également l'irrigation et le stockage d'eau agricole en étant plus ou moins facilitante ou contraignante sur ces aspects. Enfin, elle influencera la gestion de l'étang de Lindre, en fonction des objectifs qu'elle lui assignera et des outils d'actions publiques mobilisés pour les appliquer.

La variable **Socio-économie du bassin versant de la Seille** est donc, nous l'avons vu, influencée par les limites environnementales, les évolutions technico-économiques extrinsèques, et les actions publiques agricoles et environnementales qui vont plus ou moins encourager certaines productions, et donc les rendre plus ou moins attractives. La demande des consommateurs paraît également déterminante pour mettre en place des filières viables économiquement, si le marché agricole demeure relativement libre. De façon évidente, cette variable va ensuite jouer sur les assolements, en fonction des productions valorisées dans les filières, mais également la mise en place de l'irrigation et du stockage, et leur organisation, reflet des aspirations des agriculteurs et acteurs de l'économie agricole sur le bassin versant, et des choix d'organisation, individuelle ou collective. L'aspect filière jouera sur le devenir de l'étang de Lindre, inclus dans la case Nature et patrimoine sur le bassin versant de la Seille, puisque le devenir de l'activité piscicole à long terme mérite d'être interrogé. Enfin, la volonté des agriculteurs et acteurs de l'économie agricole sur le bassin versant jouera plus généralement sur le devenir des espaces naturels et patrimoniaux tels que les prairies et les milieux aquatiques.

La **Nature et le patrimoine sur le bassin versant de la Seille** paraissent donc à l'interface des actions publiques et de la socio-économie du territoire étudié, notamment au travers des questionnements sur la conservation des filières traditionnelles, i.e. d'élevage en prairie ou de pisciculture.

2.4 Hypothèses contrastées des variables explicatives pour la construction des scénarios

Les variables explicatives retenues pour l'exercice de scénarisation sont donc :

- Action publique agricole et environnementale ;
- Socio-économie agricole du bassin versant de la Seille ;
- Nature et patrimoine sur le bassin versant de la Seille.

A partir de ces variables, et au regard des différentes hypothèses pour ces variables et associations d'hypothèses évoquées par les acteurs interrogés, trois scénarios contrastés ont été construits : "Intensification", "Repaysannisation [5]" et "Agroécologie industrielle". Ces trois scénarios et les hypothèses sur lesquelles ils reposent sont résumés dans le Tableau IV.1, qui correspond à l'analyse morphologique présentée en Figure II.3 dans l'Introduction. Les narratifs et hypothèses correspondants sont décrits dans les sections ci-après. Ces scénarios sont contrastés, voire stéréotypés, permettant de prendre en compte l'incertitude de l'évolution de l'agriculture sur le territoire étudié.

2.4.1 Scénario Intensification

Action publique et environnementale :

La politique économique agricole à échelle nationale a favorisé le développement économique de l'agriculture pour rendre l'agriculture et l'industrie agroalimentaire française compétitives et ne pas dégrader le niveau de vie des agriculteurs. Cet objectif de croissance économique, dans tous les secteurs, est perçu comme nécessaire, et un faible dirigisme et une faible pression réglementaire pour la protection de l'environnement sont

5. Terme notamment employé dans l'essai "Les paysans du XXIe siècle - Mouvements de repaysannisation dans l'Europe d'aujourd'hui" (PLOEG, 2014)

considérés comme les façons les plus optimales d'y parvenir. Pour l'agriculture, un faible dirigisme laisserait de la souplesse aux agriculteurs et acteurs économiques de l'agriculture permettant de s'adapter au marché et de saisir des opportunités. Cela permettrait notamment une adaptation aux contraintes et opportunités locales.

Malgré un relativement faible dirigisme, le souhait de souveraineté alimentaire et énergétique, renforcé par la hausse des coûts de l'énergie et des produits agricoles à échelle mondiale, s'est concrétisé dans l'action publique nationale. Alors que le soutien économique aux projets de méthanisation a été sujet de débats au début des années 2020, le soutien s'est finalement amplifié à la suite de la guerre russo-ukrainienne qui a motivé la France à acquérir davantage d'autonomie énergétique. Le soutien au développement de la méthanisation a été particulièrement fort dans les années 2030.

Le faible dirigisme a par ailleurs facilité le développement de cultures intensives capables de produire beaucoup de calories directement consommables par les humains, ce qui est compatible avec l'objectif de souveraineté alimentaire.

Les politiques publiques environnementales à l'échelle de l'État n'ont ainsi pas évolué vers plus d'ambition écologique, au sens du maintien de la qualité de l'eau, des écosystèmes, du patrimoine. L'ambition écologique s'est plutôt traduite par la diminution de l'élevage et le développement de la bioéconomie. En effet, la priorité est d'assurer la souveraineté alimentaire et énergétique. Les discours d'opposition sont généralement perçus ou présentés comme idéalistes et peu pragmatiques.

Au niveau plus local, sur le bassin versant de la Seille, l'action publique a suivi sans difficulté ces tendances à plus large échelle. On note ainsi un soutien au développement économique agricole sans viser de cultures considérées comme vertueuses. Dès les années 2020, le ton est donné sur la gestion qualitative et quantitative de l'eau : l'eau de la Seille est présentée comme naturellement de mauvaise qualité, à cause de sa salinité, et il n'est donc pas utile de chercher à atteindre un bon état chimique ou écologique. Les mares abandonnées sont encouragées à être valorisées pour l'approvisionnement en eau, afin de s'adapter au changement climatique. Le conseil départemental va rester propriétaire de l'étang de Lindre jusqu'en 2030, puis celui-ci sera confié à une ASA (Association Syndicale Autorisée) pour en faire une réserve d'irrigation et un bassin écrêteur de crue. Des canalisations sous pression jusqu'à 10 km de long sont mises en place à partir de l'étang de Lindre pour irriguer le secteur alentour. L'implantation de méthaniseurs est soutenue financièrement par des aides locales. De nombreuses contraintes sur l'implantation de méthaniseurs sont levées progressivement.

Socio-économie agricole sur le bassin versant de la Seille :

Le faible interventionnisme de l'État n'a pas permis de contrer la diminution du nombre d'agriculteurs, ce qui a conduit à un agrandissement des exploitations et une simplification des systèmes de production sur le bassin versant de la Seille. L'élevage disparaît ainsi presque intégralement, pour être remplacé par des grandes cultures partout où cela est possible. Ces grandes cultures sont destinées, comme aujourd'hui pour la majorité, à l'export sous forme brute par le port de Metz.

Les résidus de culture et la généralisation de la mise en place d'intercultures ont d'abord permis d'alimenter les méthaniseurs. La baisse de la consommation de viande a conduit à valoriser d'anciennes surfaces destinées à l'alimentation animale pour alimenter des méthaniseurs.

Autrefois plutôt solitaires au niveau de la gestion des exploitations, les agriculteurs du bassin versant de la Seille se sont associés pour optimiser le travail sur de grandes exploitations (partage du matériel, partage des coûts d'acquisition de nouvelles surfaces...). Ils se sont également associés pour la méthanisation. La vente demeure coordonnée par de grandes coopératives. Une gestion collective de l'eau d'irrigation est également créée pour l'étang de Lindre et pour partager l'eau des petites mares au début des années 2030.

Les agriculteurs productivistes ont tissé un réseau d'influence politique très fort sur le bassin versant de la Seille. La faible ambition des politiques environnementales à échelle nationale a conduit à la diminution de l'influence d'acteurs de l'environnement locaux (AERM, PNRL...). Les élections municipales sur le bassin versant de la Seille et départementales en Moselle et Meurthe-et-Moselle ont reflété cette forte influence des

agriculteurs productivistes, et a notamment permis la modification des objectifs de gestion de l'étang de Lindre pour qu'ils correspondent aux vœux des agriculteurs productivistes.

Nature et patrimoine sur le bassin versant de la Seille :

Les acteurs de l'environnement sur le bassin versant de la Seille (AERM, PNRL...) n'ont pas eu les outils et moyens nécessaires pour préserver en l'état les écosystèmes et maintenir les filières traditionnelles. Les prairies ont donc été retournées pour mettre en place de la céréaliculture sauf dans les zones inondables. Les prairies restantes sont fauchées pour alimenter des méthaniseurs principalement, et les MAE fauche tardive ont été abandonnées sur ces dernières.

L'étang de Lindre a cessé sa production de poissons et sert désormais de réserve d'eau pour l'irrigation et de bassin écrêteur de crues pour limiter les inondations sur le Saulnois. Le niveau d'eau est ainsi maintenu aussi bas que possible en hiver, et rempli le plus possible pour juin et juillet. De petites populations de poissons sont tout de même parvenu à persévérer dans l'étang, alimentant encore certains oiseaux. Le site a ainsi gardé un certain intérêt patrimonial, bien que très loin de ce qu'il a été jusque dans les années 2020.

Les petites mares sont utilisées pour irriguer quand elles ne sont pas situées sur des zones salines.

2.4.2 Scénario Repaysannisation

Action publique et environnementale :

Sous l'impulsion de partis écologistes, de personnalités charismatiques, de la hausse du coût de la vie et d'une prise de conscience individuelle, la volonté politique à échelle nationale, en compatibilité avec l'Union Européenne, est devenue de revenir à une situation historique d'équilibre Homme-Nature, s'accompagnant d'un certain "retour en arrière" de l'agriculture et des modes de vie. Il faut alors soutenir la relocalisation des productions et consommations, la remise en place de systèmes de production traditionnels extensifs, mais aussi l'introduction de nouvelles espèces, variétés, pratiques pour s'adapter au changement climatique, être encore plus vertueux que les systèmes de production traditionnels et maintenir un niveau de production acceptable.

Une politique économique agro-environnementale très dirigiste s'est mise en place. Celle-ci s'est traduite par un soutien à des cultures et des systèmes agricoles perçus comme vertueux, en particulier les fermes familiales de polyculture-élevage. Des aides importantes ont ainsi été destinées à l'installation des jeunes agriculteurs, pour rendre cette activité attractive, ainsi que pour la remise en place de prairies, la plantation de haies, la production de fruits, légumes, légumineuses, biomatériaux (lin, chanvre, etc.) en zone de déficit. De plus, des réglementations et taxations des élevages et systèmes de production intensifs ont été mises en place. La politique agro-environnementale menée doit permettre une amélioration de la qualité de l'eau et des milieux et la préservation des écosystèmes selon une vision intégrée.

Le prix de la viande et des produits laitiers a beaucoup augmenté avec le déclin de l'élevage intensif, menant finalement à une réduction de 50 % de la demande en viande à l'échelle de la France.

L'approvisionnement agricole doit être le plus local possible pour l'alimentation des humains. Les régions françaises se sont vu confier la mission d'atteindre l'autonomie alimentaire au maximum.

Les méthaniseurs et le stockage de l'eau ne font pas l'objet d'une politique de soutien.

Socio-économie agricole sur le bassin versant de la Seille :

La réforme agroenvironnementale menée, encourageant fortement les modes de production plus traditionnels et nécessitant de la main d'œuvre, a conduit à un certain exode urbain vers les campagnes. Les populations d'agriculteurs du bassin versant de la Seille ont dont été modifiées, constituées maintenant en proportion non négligeable de néo-ruraux favorables à une agriculture paysanne.

La Région Grand Est est parvenue à l'autonomie alimentaire, et a même des excédents de production de grandes cultures et de produits animaux. Ils servent notamment à alimenter la région Ile-de-France, qui ne peut pas atteindre l'autonomie, et le Nord de l'Europe, par le port de Metz.

Les agriculteurs écoulent ainsi en grande partie leur production en local, soit par de la vente directe ou en circuit très court (marchés, AMAP, etc.), soit en passant des intermédiaires : coopératives, distributeurs en région Grand Est, ou exportations dans d'autres régions françaises ou à l'étranger par le port de Metz.

Un tiers de la surface agricole utile du bassin versant de la Seille est ainsi consacrée à la consommation locale. Celle-ci sert pour 49,8 % à la production de viande et d'œufs, 19,0 % pour les produits laitiers, qui se répartissent en prairies et fourrages principalement, et un peu de céréales pour l'alimentation animale, 22,9 % pour les céréales, oléagineux, protéagineux destinés à l'alimentation humaine, 5,2 % pour les fruits, 3,2 % pour les légumes [6]. Le reste de la surface est occupée par des grandes cultures, pour l'export brut et pour de l'alimentation animale, de la prairie et du fourrage pour de l'alimentation animale.

Malgré l'absence de soutien par l'action publique au stockage d'eau et à l'irrigation, les paysans ont besoin d'irriguer pour assurer leur production. Les mares et l'étang de Lindre sont donc utilisés pour l'irrigation du maraîchage, qui représente néanmoins une faible surface du bassin versant. L'irrigation à partir de l'étang de Lindre et des mares se fait à courte distance, puisqu'aucune infrastructure de distribution de l'eau n'a pu être mise en place.

La méthanisation s'est développée à petite échelle, pour le fonctionnement des exploitations, permettant des économies d'énergie et financières pour les agriculteurs.

Des activités de transformation, à la ferme ou non, se sont développées pour répondre à la demande locale.

L'activité piscicole s'est maintenue dans l'étang de Lindre et s'est même redéveloppée dans les petites mares et étangs, pour l'alimentation locale en poissons.

Nature et patrimoine sur le bassin versant de la Seille :

La surface de prairies a nettement augmenté. Les filières traditionnelles se sont non seulement maintenues mais se sont développées. L'étang de Lindre maintient ses objectifs actuels, tout en étant néanmoins utilisé pour l'irrigation du maraîchage à proximité de ce dernier.

2.4.3 Scénario Agroécologie industrielle

Action publique et environnementale :

L'action publique encourage la transition agroécologique, mais sans que celle-ci ne s'accompagne d'une transformation sociétale et de l'économie de l'agriculture de façon radicale. L'objectif demeure donc bien de répondre aux besoins d'une population majoritairement urbaine, et demande donc un maintien d'une logique industrielle et d'optimisation de la production agricole, tout en réduisant les impacts de l'agriculture sur l'environnement. La transition agroécologique doit donc être compatible avec une bonne rentabilité de l'agriculture et des prix à maintenir bas pour les consommateurs.

La PAC cherche à encourager les rotations plus longues et les intercultures, pour protéger la qualité de l'eau. L'allongement des rotations permet de limiter les recours aux pesticides (rupture des cycles de prédateurs) et aux engrais (introduction de légumineuses fixatrices d'azote). De plus, la diversification permet une meilleure résilience face au changement climatique. Les labels d'agriculture plus vertueuse (BIO, HVE) sont encouragés. De plus, face à l'efficacité insuffisante des mesures d'amélioration de la qualité de l'eau et à la difficulté de vérifier leur bonne application, l'introduction d'intercultures et de cultures à bas niveau d'impact dans la rotation est devenue obligatoire dans les périmètres problématiques. En accompagnement de ces aides à la production, une forte communication et une politique d'accompagnement des industries agroalimentaires

6. Modèle de productions établi avec l'outil PARCEL https://parcel-app.org/

s'est mise en place pour introduire davantage de légumineuses dans le régime alimentaire pour valoriser ces nouvelles productions.

On encourage le recul de l'élevage de ruminants, émetteur de gaz à effet de serre, et le développement de la bioéconomie, mais à condition de maintenir les prairies en place. Sur le bassin versant de la Seille, les prairies qui ne sont plus pâturées mais qui ne peuvent pas être retournées servent notamment à alimenter des méthaniseurs, ou sont fauchées pour l'alimentation animale d'élevages à proximité en substitution d'importations.

De plus, une politique de relocalisation des productions de fruits et légumes s'est bien opérée dans le cadre des PAT de l'agglomération messine ou de la CCS, mais est restée très marginale.

L'utilisation de la télédétection et de méthodes de traitement automatique de l'information communiquée par les agriculteurs permet désormais un très bon contrôle du respect des mesures, notamment de non retournement des prairies, d'introduction de cultures à bas niveau d'impact dans les rotations, etc.

Face au changement climatique, les pouvoirs publics souhaitent encourager une irrigation de résilience via la mobilisation de ressources en eau peu valorisées par ailleurs, dans les secteurs sur lesquels l'irrigation n'est pas encore pratiquée. L'État français finance ainsi la mise en place de réseaux d'irrigation à partir de ces ressources. Ce n'est qu'en cas de sécheresse importante qu'il est possible d'irriguer à partir de ces ressources. Ce choix de n'irriguer qu'en cas de sécheresse est justifié par la crainte d'un effet rebond si une ressource en eau est rendue disponible tous les ans, avec la mise en place de cultures potentiellement plus rentables mais plus gourmandes en eau. Au niveau du bassin versant de la Seille, de petits plans d'eau abandonnés, ainsi que l'étang de Lindre, sont ainsi exploitables en cas de sécheresse. Toutefois, les réseaux mis en place autour de l'étang de Lindre, qui doit aussi garder un objectif de sauvegarde de la biodiversité, ne peuvent irriguer que jusqu'à cinq kilomètres de ce dernier. Les réseaux d'eau mis en place ne peuvent être utilisés que si un arrêté l'autorise. La télédétection permet de repérer très efficacement si de l'eau semble prélevée illégalement dans les plans d'eau.

Socio-économie agricole sur le bassin versant de la Seille :

Le nombre d'agriculteurs a encore légèrement diminué, mais s'est finalement stabilisé. Les agriculteurs se sont associés en exploitations collectives pour partager le matériel et le travail administratif sur de grandes exploitations. Les grandes coopératives ont su s'adapter pour permettre aux agriculteurs de profiter des aides PAC accompagnant la diversification et les labels.

Les cultures principales demeurent majoritairement destinées à l'exportation brute. Les coproduits agricoles sont en grande partie valorisés pour la méthanisation, ou pour des filières innovantes de bioéconomie.

Malgré des oppositions importantes à l'obligation de maintenir les prairies, l'obligation d'introduire des cultures à bas niveau d'impact dans les rotations, ou encore l'interdiction d'irriguer tant qu'un arrêté n'est pas paru pour l'autoriser, les amendes encourues et les améliorations des moyens de contrôle ont permis de faire respecter ces nouvelles mesures. De plus, les nouveaux débouchés créés pour les cultures à bas niveau d'impact et les prairies ont achevé de faire accepter ces nouvelles mesures.

Nature et patrimoine sur le bassin versant de la Seille :

Les prairies ont été maintenues, mais certaines de ces prairies ne sont plus pâturées, ou peu pâturées, ce qui a entraîné un changement de biodiversité sur ces dernières. Les filières traditionnelles d'élevage, notamment ovin, ont fortement décliné.

La production de poissons s'est en partie maintenue dans l'étang de Lindre, mais en cas de sécheresse, l'eau peut être utilisée en priorité pour l'irrigation voire le soutien d'étiage. Pour éviter que l'eau soit trop chargée en déjections de poissons, le nombre de poissons dans l'étang a été fortement diminué.

TABLEAU IV.1 – Résumé des hypothèses contrastées des variables explicatives pour chaque scénario

Scénario / Variable	**Intensification**	**Repaysannisation**	**Agroécologie industrielle**
Action publique et environnementale	Faible dirigisme de la politique économique agricole, avec néanmoins un objectif prioritaire de souveraineté alimentaire et énergétique	Fort dirigisme pour accompagner la relocalisation des productions et encourager des modes de production moins impactants, inspirés de la paysannerie traditionnelle	Compromis entre production efficace et rentable, avec peu de moyens humains, et diminution des impacts de l'agriculture sur l'environnement
Socio-économie agricole sur le bassin versant de la Seille	Exportation de produits bruts, avec une faible diversité de production. Mise en place de grandes exploitations collectives, développement des méthaniseurs, diminution des surfaces destinées à l'élevage. Faible résistance, voire complaisance des pouvoirs publics vis-à-vis des souhaits des agriculteurs productivistes, permettant la mise en place d'irrigation	Les agriculteurs deviennent plus paysans : polyculture-élevage, circuits courts... Un tiers de la surface est destinée à la consommation locale. Extensification de l'élevage, impliquant une augmentation des surfaces destinées à l'élevage, mais une plus faible production. Irrigation des surfaces en maraîchage	L'amélioration des contrôles a permis de faire appliquer les réformes agrienvironnementales : diversification, et irrigation uniquement de résilience, malgré une certaine opposition initiale des agriculteurs. Les coopératives se sont adaptées à ces nouvelles productions
Nature et patrimoine sur le bassin versant de la Seille	Disparition des prairies sauf en zone inondable, disparition des filières d'élevage et d'aquaculture traditionnelles. L'étang de Lindre devient une réserve d'irrigation et un bassin écrêteur de crues.	Redéveloppement des prairies et des filières traditionnelles. L'étang de Lindre peut néanmoins servir désormais aussi de réserve d'eau pour l'irrigation maraîchère	Maintien des prairies, diminution des filières traditionnelles, maintien de la pisciculture de l'étang de Lindre, mais moins ambitieuse, l'étang pouvant aussi servir pour l'irrigation et le soutien d'étiage

2.5 Conséquences des scénarios sur les variables résultat modélisables

Nous devons finalement traduire ces scénarios en hypothèses sur les variables résultat modélisables. On rappelle que les variables résultat retenues sont :

- Assolements ;
- Surfaces irriguées ;
- Stockage d'eau pour l'irrigation ;
- Règles de gestion de l'étang de Lindre.

Les valeurs prises par les variables résultat modélisables sont résumées dans le Tableau IV.2 à la fin de cette Section. Nous détaillons de plus les valeurs prises par les variables résultat modélisables pour chaque scénario ci-après.

Dans cette section, nous décrivons les hypothèses définies dans le cadre du travail de prospective pour les variables résultat de façon relativement qualitative. **Les arbitrages en matières de modification des données d'entrée pour simuler les scénarios au regard de ces hypothèses seront détaillées dans la Section VIII.2** relative au travail de modélisation.

2.5.1 Scénario Intensification

Assolements :

Les prairies permanentes sont supprimées, sauf celles en bord de Seille, car il s'agit de zones inondables (Annexe D) et/ou salines (Annexe E). Les prairies transformées deviennent des rotations de grandes cultures pour les trois quarts, des monocultures de maïs pour le quart restant. Les parcelles de monoculture de maïs initialement présentes sont maintenues dans ce système.

Les parcelles de rotations de grandes cultures adoptent la rotation suivante : colza, maïs, orge d'hiver, tournesol, blé, orge de printemps, permettant une alternance entre cultures d'hiver et cultures de printemps et donc de casser les cycles des ravageurs. Les cultures de printemps sont systématiquement précédées d'une culture intermédiaire. Il s'agit donc d'une variante de la rotation classiquement pratiquée sur le bassin versant : colza, blé, orge, permettant une certaine diversification, et d'interrompre les cycles de développement des ravageurs.

Surfaces irriguées :

Les surfaces en monoculture de maïs et en rotation de grandes cultures peuvent être irriguées. On répartit les surfaces irriguées au regard des stocks d'eau disponibles localement, en irriguant en priorité les cultures à forte valeur ajoutée via l'irrigation. Néanmoins, il paraît moins rentable d'investir dans du matériel et des infrastructures d'irrigation si on ne peut pas irriguer la majorité des cultures sur une parcelle. Ainsi, si trop peu de cultures peuvent être irriguées sur chaque îlot, on définira ensuite une part d'îlots comme non irrigués.

Stockage d'eau pour l'irrigation : On peut valoriser l'ensemble des volumes stockables préexistants pour l'irrigation dans les zones qui ne sont pas trop salines (Annexe E). De plus, le Lindre devient une réserve d'irrigation. Il approvisionne en eau jusqu'à 10 km de distance.

Règles de gestion de l'étang de Lindre : L'étang de Lindre a un double objectif de réserve d'irrigation et d'écrêtement des crues. La gestion doit donc viser un remplissage pour le début de la période de besoins en eau d'irrigation, mais maintenir par ailleurs un niveau suffisamment bas.

2.5.2 Scénario Repaysannisation

Assolements : On distingue la surface destinée à la consommation locale (1/3), et la surface destinée à l'exportation (2/3).

La surface destinée à la consommation locale est composée de prairies à 44,9 %, de céréales, oléagineux, protéagineux à 38,1 %, de cultures fourragères à 5,2 %, de fruits à 5,2 %, de légumes à 3,2 %, de cultures industrielles(pomme de terre, betterave à sucre...) à 2,3 %, de légumineuses à 1,1 % [7]. Nous choisissons de fusionner certaines catégories :

- nous faisons une catégorie grandes cultures incluant les surfaces de céréales, oléagineux, protéagineux, mais aussi les fruits, cultures fourragères et légumineuses. Nous préférons en effet "effacer" les vergers, pour des raisons de simplification, et nous considérons que les cultures fourragères et les légumineuses peuvent être inclues dans la rotation définie ci-dessous.
- les cultures industrielles et les légumes sont englobés dans une catégorie maraîchage.

Nous obtenons ainsi un assolement de destiné à la consommation locale composé à 49,6 % de grandes cultures, 44,9 % de prairie et 5,5 % de maraîchage.

7. Modèle de productions établi avec l'outil PARCEL https://parcel-app.org/

L'assolement destiné à l'exportation s'appuie sur l'assolement destiné à la consommation locale, mais en en supprimant les surfaces destinées au maraîchage. Les surfaces obtenues sont composées de grandes cultures à 52,5 % et de prairies à 47,5 %.

Les parcelles en rotation de grandes cultures adoptent la rotation suivante : féverolle, sorgho, blé, tournesol, orge d'hiver, soja, céréale à paille, orge de printemps, permettant une alternance entre cultures d'hiver et cultures de printemps, et une diversification avec introduction de protéagineux.

Les cultures de printemps sont systématiquement précédées d'une culture intermédiaire.

Surfaces irriguées : Seul le maraîchage est irrigué, soit 5,5 % du tiers de la SAU. La surface irriguée représente donc seulement 1,9 % de la SAU. Les surfaces maraîchères sont en priorité réparties sur les zones avec suffisamment d'eau stockée.

Stockage d'eau pour l'irrigation : Les plans d'eau peuvent être utilisés pour l'irrigation des surfaces en maraîchage à proximité, dans les zones non salines (Annexe E). L'étang de Lindre permet notamment d'irriguer seulement les surfaces à proximité directe de celui-ci.

Règles de gestion de l'étang de Lindre : L'étang de Lindre maintient sa gestion actuelle. Néanmoins, une partie de l'eau est utilisée pour l'irrigation des surfaces en maraîchage à proximité.

2.5.3 Scénario Agroécologie industrielle

Assolements : Les prairies permanentes actuelles sont maintenues. Les autres parcelles adoptent la rotation : colza, sorgho, céréale à paille (blé), tournesol, orge d'hiver, soja, céréale à paille, orge de printemps, permettant une alternance entre cultures d'hiver et cultures de printemps, une diversification avec introduction de protéagineux.

Surfaces irriguées : Les surfaces en rotation de grandes cultures peuvent être irriguées. On répartit les surfaces irriguées au regard des stocks d'eau disponibles, en irriguant en priorité les cultures les plus sensibles au stress hydrique et stratégiques, seulement les années de sécheresse intense. Néanmoins, il paraît moins rentable d'investir dans du matériel et des infrastructures d'irrigation si on ne peut pas irriguer la majorité des cultures sur une parcelle, et si trop peu de cultures peuvent être irriguées sur chaque îlot. On définira donc ensuite une part d'îlots comme non irrigables.

Stockage d'eau pour l'irrigation : On peut valoriser l'ensemble des volumes stockables préexistants pour l'irrigation dans les zones qui ne sont pas trop salines (Annexe E) lors de sécheresses exceptionnelles. De plus, l'étang de Lindre devient une réserve d'irrigation stratégique en cas de sécheresse extrême. Il approvisionne en eau jusqu'à 5 km de distance.

Règles de gestion de l'étang de Lindre : L'étang de Lindre a un double objectif de réserve d'irrigation de résilience et de soutien d'étiage.

TABLEAU IV.2 – Valeurs prises par les variables résultat modélisables

Scénario / Variable	**Intensification**	**Repaysannisation**	**Agroécologie industrielle**
Assolements	Prairies transformées en grandes cultures et monoculture maïs. Grandes cultures en rotation : colza, maïs, orge d'hiver, tournesol, céréale à paille (blé), orge de printemps	Augmentation des surfaces de prairies, grandes cultures en rotation : féverolle, sorgho, céréale à paille (blé), tournesol, orge d'hiver, soja, céréale à paille, orge de printemps, développement de maraîchage et arboriculture	Prairies permanentes actuelles maintenues, grandes cultures en rotation : colza, sorgho, céréale à paille (blé), tournesol, orge d'hiver, soja, céréale à paille, orge de printemps
Surfaces irriguées	Au maximum	Surfaces maraîchères, à proximité des volumes stockés disponibles	Au maximum, mais irrigation seulement en crise
Stockage d'eau pour l'irrigation	Mobilisation volumes préexistants en zone non saline. Périmètre de 10 km pour irriguer à partir de l'étang de Lindre	Mobilisation volumes préexistants en zone non saline. Périmètre de 5 km pour irriguer à partir de l'étang de Lindre	Mobilisation volumes préexistants en zone non saline. Périmètre de 5 km pour irriguer à partir de l'étang de Lindre
Règles de gestion de l'étang de Lindre	Stockage pour irrigation, vidange pour écrêtement de crue	Vidange pour pisculture, eau mobilisable pour irrigation maraîchage	Vidange pour pisciculture, eau mobilisable pour irrigation en cas de sécheresse, vidange pour soutien d'étiage

3 Discussion et conclusion du chapitre

La méthodologie de prospective s'appuyant sur des entretiens auprès d'experts nous a permis de construire trois scénarios contrastés pour le bassin versant de la Seille. Ces derniers explorent différents degrés et modes d'adaptation au changement climatique parallèlement à différentes évolutions possibles des paysages agricoles influencés par les variables les plus explicatives sur le bassin versant de la Seille : qualité de l'eau, inondations, souhaits de développement économique dont méthanisation, dispositifs de protection du patrimoine écologique et historique, etc. Si les entretiens nous ont permis d'identifier des contraintes fortes et caractéristiques importantes sur le territoire, les scénarios ont tout de même été finalisés "en chambre" plutôt qu'en co-construction avec l'ensemble des acteurs du territoire dans le cadre de réunions participatives. Il est donc possible que ces scénarios ne soient pas perçus comme parfaitement plausibles par l'ensemble des acteurs interrogés dans leur version finalisée.

Par ailleurs, les scénarios construits sont sans doute très influencés par notre panel de personnes interrogées, "expertes". Ainsi, nous avons imaginé un scénario à forte dominante environnementale, "repaysannisation", comme grandement influencé par une action publique forte, telle qu'imaginé par plusieurs des acteurs interrogés, mais il aurait aussi été possible d'imaginer l'occurrence d'un tel scénario via une mobilisation citoyenne locale.

Les scénarios construits peuvent maintenant faire l'objet d'une modélisation pour en quantifier la vulnérabilité au changement climatique.

A retenir :

Les trois scénarios construits sont :

- Agroécologie industrielle ;
- Intensification ;
- Repaysannisation.

Ils se traduiront dans la modélisation par des hypothèses différenciées d'assolements, de surfaces irriguées, de volumes mobilisables, de gestion de l'étang de Lindre.

Développement de la modélisation intégrée

Chapitre V

Développement d'une modélisation de la demande en eau agricole

Avant-propos :

Nous avons construit des scénarios à modéliser au Chapitre IV. Nous devons maintenant développer un modèle capable de quantifier les impacts du changement climatique et des scénarios locaux. Notre modèle doit en premier lieu intégrer un modèle de demande en eau d'irrigation des cultures.

Dans ce chapitre, nous présentons des travaux ayant fait l'objet d'une publication dans la revue "Irrigation Science" (SOUTIF-BELLENGER et al., 2023). Ces derniers ont porté sur le développement d'un modèle de demande en eau d'irrigation s'appuyant sur CropWat (ALLEN et al., 1998) à l'échelle du bassin versant de l'Aveyron aval, bassin choisi en raison de l'irrigation qui y est pratiquée, et pour l'existence d'une instance de la plateforme MAELIA sur ce bassin. Une comparaison a été menée avec la demande en eau d'irrigation simulée par MAELIA, ainsi qu'une analyse de sensibilité à des hypothèses de simplification, et aux règles de déclenchement et de dosage de l'irrigation.

1 Résumé de l'article en français

La quantification de la demande en eau d'irrigation est cruciale pour la gestion de l'eau à l'échelle régionale. Cependant, la quantification de la demande en eau d'irrigation est souvent obtenue par des modélisations simplifiées et des hypothèses fortes. Dans cette étude, de nombreuses simulations d'une portion aval de l'Aveyron ont été réalisées dans le but d'évaluer les impacts des simplifications de la modélisation de l'irrigation et des hypothèses de modélisation. Deux modèles de bilan en eau des cultures ont été comparés : CropWat, associé à deux approches de modélisation d'irrigation régionale, et AqYield, inclus dans la plateforme MAELIA. CropWat s'appuie sur la méthode des K_C développée par la FAO (ALLEN et al., 1998), permettant de calculer l'ET_C et l'ET_R à chaque pas de temps. AqYield est comparable à CropWat, mais s'en distingue notamment par la modélisation dynamique de la maturation de la culture en fonction d'une somme de degrés.jour et la formulation de l'évapotranspiration. La plateforme MAELIA modélise les opérations techniques réalisées sur chaque parcelle, telles que les semis, l'irrigation, la récolte, résultant de la modélisation du comportement des agriculteurs selon des règles SI-ALORS, et selon un certain nombre de contraintes, principalement en termes de limites temporelles, et de priorité entre les actions. Pour faire une comparaison approfondie entre les simulations, plusieurs indicateurs caractérisant l'irrigation journalière simulée ont été calculés et une décomposition de la variance a été effectuée sur ces indicateurs pour mesurer les impacts des facteurs de variation explorés dans cette étude. Nous avons constaté que plusieurs approches simplifiées étaient capables de reproduire le modèle d'estimation de haute précision de l'irrigation développé dans la plateforme MAELIA, mais nous avons obtenu une grande variabilité entre les simulations en fonction des hypothèses de modélisation. Les facteurs de variation décisifs

identifiés étaient les règles de déclenchement et de quantification de l'irrigation quotidienne sur les unités de simulation, la définition de la période d'irrigation, l'estimation de l'évapotranspiration. Des recommandations pour prendre en compte la variabilité mise en évidence sont introduites dans ce travail consistant à combiner un ensemble de modèles d'irrigation.

2 Article : "As simple as possible but not simpler ? : the case of irrigation modeling at catchment scale in southwestern France"

Irrigation Science
https://doi.org/10.1007/s00271-023-00846-x

ORIGINAL PAPER

As simple as possible but not simpler?: the case of irrigation modeling at catchment scale in southwestern France

Myriam Soutif-Bellenger[1,2] · Guillaume Thirel[2] · Olivier Therond[3] · Jean Villerd[3]

Received: 8 April 2022 / Accepted: 3 January 2023
© The Author(s) 2023

Abstract
The estimation of irrigation water requirements (IWR) amount and timing is crucial for designing water management strategies at the regional scale. Irrigation requirements can be estimated with different types of models: very complex and detailed crop models, agent-based models, or simplified modeling approaches. Because simplified approaches are often preferred, in this study, we evaluate the consequences of using simplified approaches for IWR assessment at a catchment scale and the consequences of various modeling choices, providing information on the uncertainties. To this end, different simple modeling approaches based on the CropWat model are compared with an agent-based approach (MAELIA), which serves as a benchmark. To assess simulations in detail, partial variance is calculated for several indicators characterizing daily simulated irrigation. Our sensitivity analysis, applied over a sub-catchment of the Aveyron River (southwestern France), shows a high variability in simulations produced by CropWat between the modeling assumptions tested, principally explained by the rules for irrigation triggering and the quantification of daily irrigation. The analysis also shows that several simplified approaches are able to reproduce the irrigation simulated by the high-accuracy MAELIA model, but not necessarily corresponding to an optimal irrigation scheme. Hence, this study confirms the possibility of assessing daily irrigation with simplified approaches, but warns about high modeling uncertainties, reflecting uncertainty in effective irrigation practices. This uncertainty can be taken into account by water managers and modelers through the combination of a set of irrigation models.

Introduction

Water withdrawals for irrigation water requirements (IWR) have a huge impact on low flows in water-stressed agricultural catchments (Martin et al. 2016). Their impact may increase with climate change as a consequence of the decrease in water resources in summer and the increase in crop water requirements (Wanders and Wada 2015), as is expected in France (Collet et al. 2015). Hence, IWR assessment is essential for managing water resources in water-stressed agricultural catchments. It might become essential to take into account irrigation withdrawals processes and their evolution while performing hydrological modeling and considering future climate change. Moreover, IWR assessment may help to evaluate the relevance of adaptation strategies to climate change scenarios in association with hydrological projections. The IPCC (2014) recommended planning water management at the catchment scale. In France, a new planning and dialog tool was created, coined "PTGE" (*Projets de Territoire pour la Gestion de l'Eau,* i.e., Territory Project for Water Management; MTES and MAA 2019), to build water management strategies at the local scale. To support the design of such planning or strategies, many hydrological simulations have been coupled with estimations of irrigation withdrawals based on IWR assessment (Collet et al. 2013; Dehghanipour et al. 2020; Gorguner and Kavvas 2020; Kolokytha and Malamataris 2020; Wanders and Wada 2015). Likewise, several studies estimated crop water stress induced by limited water resources for irrigation (Collet et al. 2013; Elliott et al. 2014).

IWR in a catchment can be estimated from observation data. However, observation data are often lacking, leading to a preferential use of automatic irrigation algorithms for irrigation assessment (Uniyal and Dietrich 2019; Wriedt et al. 2009), i.e., algorithms based on soil–crop water balance

Communicated by Erko Stackebrandt.

✉ Myriam Soutif-Bellenger
myriam.soutif-bellenger@inrae.fr

1 AgroParisTech, 75005 Paris, France

2 Université Paris-Saclay, INRAE, UR HYCAR, 92160 Antony, France

3 Université de Lorraine, INRAE, LAE, 68000 Colmar, France

Published online: 21 January 2023

models. Specifically, irrigation algorithms simulate automatic triggering and nominal irrigation depths to quantify irrigations. This enables, for example, long-term IWR projections in the context of climate change. Most often, irrigation is triggered according to decision rules based on soil moisture deficit or crop water stress thresholds. Irrigation amounts can be fixed (Bouras et al. 2019; Rouhi Rad et al. 2020), or can be calculated to fill the soil reservoir totally (Collet et al. 2013; Hori et al. 2008) or partially (Funes et al. 2021; Smith et al. 2012). To estimate soil moisture or crop water stress, a soil–crop water balance model is often used. The development and the use of sophisticated crop models have been largely investigated (Di Paola et al. 2016). The spatio-temporal distribution of farmers' practices strongly determines irrigation dynamics and amounts (Bergez et al. 2012; Zaccaria et al. 2013). McInerney et al. (2018) explored the impacts of different spatio-temporal distribution methods of observed irrigation among hydrological response units (HRUs) of a catchment and showed that the choice of distribution method might have an important impact on flows. An approach was developed to estimate IWRs at the regional scale based on a high-accuracy reproduction of farmers' practices, taking into account spatio-temporal variability. This approach is agent-based and is called the "MAELIA" (Modelling of socio-Agro-Ecological system for Landscape Integrated Assessment) platform (Allain et al. 2018; Martin et al. 2016; Therond et al. 2014). In this last example, farmers' practices are represented on an individual basis, using decision algorithms and taking into account field size and spatial allocation, irrigation equipment, and working time constraints. Nevertheless, the complexity of the spatio-temporal distribution of farmers' practices is often overlooked in efforts aiming to develop operational methods of irrigation quantification and to deal with the lack of data. However, the spatio-temporal variability of irrigation practices might be high and might have strong impacts on hydrology, and simplifying assumptions might lead to biases that should be evaluated.

Few previous studies performed a sensitivity analysis of IWR assessment methods. Multsch et al. (2015) quantified wheat IWR with different potential evapotranspiration formulas and crop coefficients sets and analyzed the variability obtained. Wada et al. (2013) and Wan et al. (2018) developed a hydrological multi-model approach to estimate global IWR. However, to our knowledge, the sensitivity of IWR assessment to different automatic irrigation rules at a regional scale has not been quantified. Moreover, these comparisons between IWR simulations are usually based on annual or monthly scales, while regulatory constraints and objectives are usually defined on the basis of shorter time steps (e.g., day(s)) and on small catchment scale as is the case, for example, in France (Mazzega et al. 2014; MEDDTL 2011).

The present study aims to fill these gaps in IWR assessment by comparing the impact of different automatic irrigation rules with other sources of potential variability on which many researchers focus their efforts, such as crop evapotranspiration estimation, or root growth estimation. In an operational perspective and for integrated hydrological modeling, it is important to identify the strongest source of uncertainty in IWR assessment. Two types of modeling approaches involving different levels of simplification of farmers' practices are compared with the MAELIA benchmark in a French southwestern water basin with a significant water deficit. MAELIA has already been calibrated and validated on this study area in a previous work (Martin et al. 2016; Murgue et al. 2016). Different versions of these approaches are explored and compared with the MAELIA outputs. To this end, indicators characterizing irrigation hydrographs at the daily time step are used. The impact of modeling hypotheses was quantified with variance decomposition.

The following research questions are investigated in the present study:

1. What is the sensitivity of daily IWR assessment to simplifying modeling assumptions at different spatial scales? How should this sensitivity be taken into account by hydrological modelers and water managers?
2. Is it possible to adequately reproduce simulations of a high-accuracy agent-based model with simplified approaches?

Study area and data

Study area

The study focuses on an 840-km^2 downstream portion of the Aveyron River basin, a tributary of the Garonne River, located in southwestern France (Fig. 1). This area is mostly agricultural, with 58,500 ha of cropland, 22,000 ha of forests and semi-natural areas, and only 3500 ha of artificialized soils. Irrigated crops comprise 8000 ha. Maize is by far the main irrigated crop, followed by wheat and orchards. Murgue et al. (2016) estimated that mono-cropping of grain maize in alluvial soils reached an annual average irrigation amount of 255–305 mm during the 2003–2007 period in the study area.

This area is highly water-stressed and agricultural withdrawal restrictions are common in summer. These restrictions are aimed at avoiding ecological degradation of the

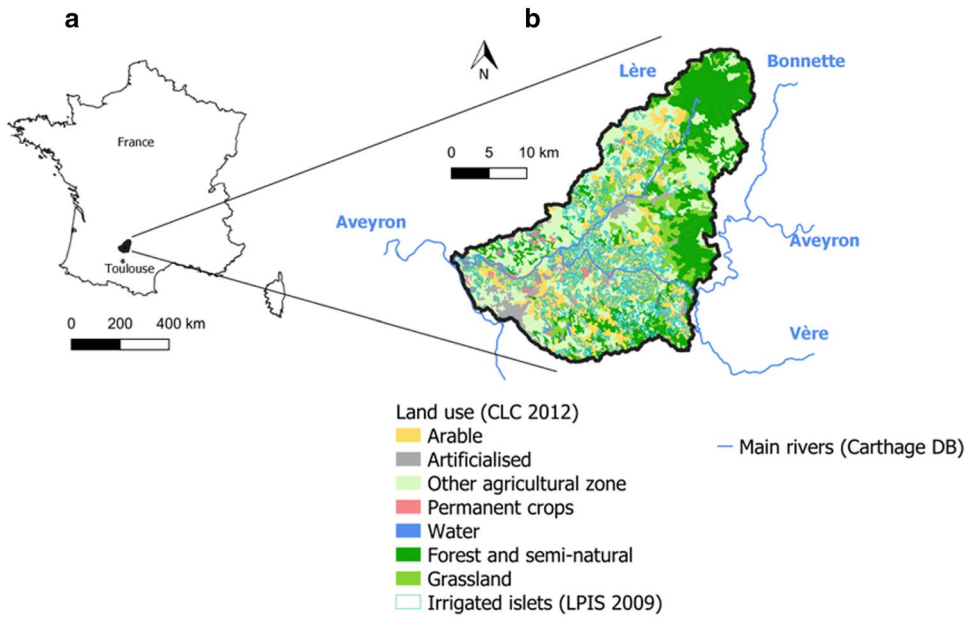


Fig. 1 Study area location (**a**) and land use (**b**)

aquatic environment and ensuring water is available for domestic and industrial use.

The climate is temperate with an annual mean air temperature of 13 °C and mean annual precipitation of approximately 750 mm. However, summers are dry and hot, when maize water needs are high, leading to a high irrigation dependency. Monthly precipitations are less than 50 mm in July and August, while monthly evapotranspiration is more than 115 mm during the same period.

Data

The following data were available:

- Crop rotation sequences and irrigated surfaces from the French Land Parcel Identification System (LPIS) database created in 2006, based on European Union Common Agricultural Policy declarations of cultivated plots;
- Soil characteristics from the Soil Geographical Data Base of France (SGDBF) (INRA 2018);
- Daily data of past climate conditions (precipitation and air temperature) from the SAFRAN reanalysis (Vidal et al. 2010).

Data were previously completed and adjusted through a survey among local farmers and stakeholders (see Murgue et al. 2015).

The major irrigated crops in the study area are cereals (other than maize), maize (six cultivars from very early to very late), maize seeds, maize silage, rapeseed, peas, soybean, sunflower, orchards, and grassland.

Modeling protocol

Irrigation modeling at regional scale

In the present study, we compare two approaches of varying complexity:

- The MAELIA platform, combining the soil–crop water balance model AqYield (Constantin et al. 2015) at plot scale and a high-accuracy agent-based automatic irrigation modeling. This modeling approach is called "MAELIA" (M);
- The soil–crop water balance model CropWat (Smith 1992) combined with two simpler regional automatic irrigation approaches called "Conceptual" (C) and "Semi-plot" (S).

These different approaches are described below and summarized in Fig. 2. Details about the soil–crop water balance models, CropWat and AqYield, are given in Appendix "Soil–crop water balance models". Their parameter calibration procedure is detailed in Appendix "Parameter calibration". The beginning of the simulation period is January 2008 and the end is December 2014. The year 2007 is used for initialization.

The MAELIA approach benchmark

MAELIA (Therond et al. 2014) is a high-accuracy platform modeling explicitly farmers' practices at a daily time step in each plot ($n = 15{,}224$) individually for each farm ($n = 1143$) described in the LPIS database of the study area. It provides

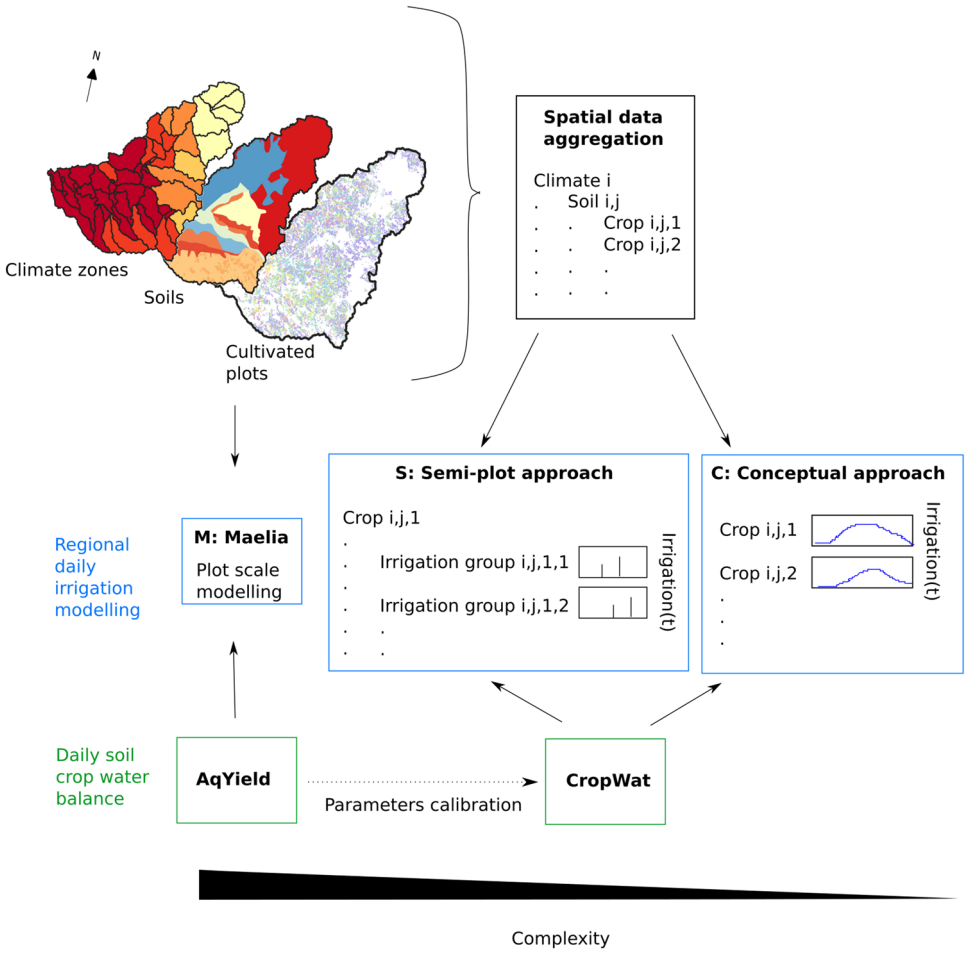


Fig. 2 The three modeling approaches used to assess irrigation water requirements (IWRs). The MAELIA (M) irrigation approach distinguishes 232 pedo-climatic zones and each individual plot and farm. The AqYield soil–crop water balance model is coupled to an agent-based model in MAELIA to assess IWR. A Conceptual approach (C) is used to simulate daily irrigation amounts on the basis of data aggregated on 200 pedo-climatic zones crossed with existing crops based on CropWat outputs. A Semi-plot approach (S) in which the simulation units of the C approach are surface-equally divided into irrigation water turn groups irrigated successively. At simulation unit scale, the S approach leads to irrigation events on singular days followed by several days without irrigation represented by peaks in the figure. AqYield outputs are used to calibrate the CropWat parameters

a plot-scale modeling of irrigation practices. Technical operation durations are taken into account to constrain the number of farmers' actions within a single day. Irrigation management strategies described through IF–THEN decision rules are defined for different combinations of crops, soils, irrigation equipment, farm types, etc. Each strategy defines a possible period for irrigation, the dose for each irrigation (mm), the conditions triggering irrigation (e.g., soil moisture and past and future rainfall thresholds, crop water stress), and the minimal temporal interval between irrigation applications in the same field (hereafter called "water turn"). Details regarding these decision rules are provided by Murgue et al. (2014). The irrigation strategies in our study area stem from a farm survey performed and described by Murgue et al. (2015).

The soil–crop model AqYield runs on each plot (Fig. 2), characterized by crop, technical management, soil properties, and climate. For the study area, 51 climatic zones (CZs) and 14 soils were differentiated. Crossing soils and CZs generate 232 pedo-climatic areas.

Unfortunately, irrigation data are very coarse in space, time span and time resolution, and their exactitude is highly questionable in France and particularly in the South-west region, where this information is highly sensitive. The only existing information is irrigation declared by farmers to the French Water Authority at an annual time step. Moreover, actual irrigation withdrawals cannot be directly compared with IWR, because withdrawals can be limited by water availability and restrictions. A comparison between simulated irrigation withdrawals with MAELIA, taking into account water availability and restriction rules, and annual individual farmer reports to French water authorities showed a very good fit (Martin et al. 2016). The temporal distribution of irrigation over weeks was also assessed through local expert interviews (Murgue et al. 2016). Therefore, we consider in our work that the MAELIA irrigation demand estimation, without taking into account water availability and restriction rules, is probably the best assessment of daily IWR that one can afford for this region given the available data and it will represent our reference in this study.

Conceptual approach

In many studies (Collet et al. 2015; Smith et al. 2012), regional irrigation modeling consists of bringing the amount of water (Irr, mm) to fill the soil reservoir, to maintain the

soil water deficit (Dr, mm) to a prefixed threshold (θ, mm) for each simulation unit, as expressed in Eq. (1). In this configuration, irrigation is triggered when Dr exceeds θ. A similar approach is to bring the amount of water needed to compensate for the lack of soil water to evapotranspirate at the crop maximal evapotranspiration (CET, mm day^{-1}) level, maintaining water at the readily available water (RAW, mm) level equivalent to a θ value (Funes et al. 2021):

$$\begin{cases} \text{if} \quad \mathrm{Dr}(d) < \theta(d), \mathrm{Irr}(d) = 0 \\ \text{else}, \mathrm{Irr}(d) = \mathrm{Dr}(d) - \theta(d) \end{cases}. \tag{1}$$

In this simplified approach, individual plots are not explicitly represented. Simulation units to calculate daily irrigation are defined for homogeneous crop, soil, and climate types (Fig. 2). In this study, 200 pedo-climatic zones were defined, aggregating MAELIA spatial units characterized by the same climate and water content characteristics.

Semi-plot approach

We developed an intermediate approach in this study, called the "Semi-plot" approach. It aims at reproducing a more realistic modeling of irrigation over plots, but in a more simplified way than the reference (MAELIA). In this approach, pedo-climatic zones are the same as in the Conceptual approach but the crop simulation units of the Conceptual approach are divided into irrigation water turn groups of equal area and are irrigated successively (Fig. 2). For example, for a 5-day water turn, a simulation unit would be divided in 5 groups, and the first group could be irrigated on days 1, 6, 11, etc., the second group could be irrigated on days 2, 7, 12, etc., and so on. The number of groups for each crop type was defined based on the number of water turns simulated by the reference experiment. This approach simulates more explicitly the dynamics of irrigation at the plot scale as each simulation unit can receive a high amount of water on a particular day followed by several days without irrigation (Fig. 2).

Indicators characterizing irrigation

While most studies only consider monthly or even annual IWR amounts, this study explores numerous indicators to characterize the temporal variability of withdrawals under different simulations. Indeed, water crises can occur in short time intervals, and a monthly estimation of IWR might not be sufficient to identify them (Mazzega et al. 2014). Indicators were selected to characterize seven features of irrigation:

- irrigation volumes (I, I_m),
- irrigation frequency (N, N_m),
- period of inter-annual mean highest irrigation (Max_regime, Max_regime_date),
- mean annual highest irrigation (Max_10, Max),
- irrigation daily variability (Q_dispersion, Var2),
- accuracy compared with reference irrigation simulation (KGE, KGE_10),
- crop water stress (ET_S, ET_S_m).

Details on these indicators are provided in Appendix "Indicator calculation". In particular, the Var2 indicator was developed to compare narrow temporal variabilities of irrigation.

Table 1 Mean, minimal, and maximal values of annual indicators ("Indicators characterizing irrigation") for Conceptual, Semi-plot and reference experiments (as described in "Irrigation modeling at regional scale" and "Sensitivity analysis experiments") for lumped outputs at the scale of the study zone

Indicator	Conceptual			Semi-plot			Reference
	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	
I (m^3)	1.40E+07	6.08E+06	2.48E+07	1.54E+07	4.83E+06	2.99E+07	1.41E+07
N (days)	120	79	188	148	83	269	154
Max_regime (m^3)	1.05E+05	7.20E+04	1.47E+05	1.10E+05	5.40E+04	1.72E+05	1.16E+05
Max_regime_date (DOY)	197 (16 July)	139 (19 May)	201 (20 July)	194 (13 July)	140 (20 May)	230 (18 August)	201 (20 July)
Max (m^3)	5.10E+05	2.81E+05	1.41E+06	4.21E+05	1.91E+05	8.08E+05	3.29E+05
Max_10 (m^3)	3.10E+05	1.94E+05	4.31E+05	3.22E+05	1.46E+05	5.07E+05	1.47E+05
Q_dispersion (–)	3.7	2.4	6.4	4.3	2.2	13.7	5.1
Var2 (–)	0.0021	0.0019	0.0027	0.0010	0.0006	0.0016	0.0009
ET_S (–)	0.97	0.87	1.00	0.97	0.83	1.00	0.93
KGE (–)	0.57	−0.1	0.81	0.56	−0.26	0.91	–
KGE_10 (–)	0.70	0.17	0.95	0.62	−0.21	0.96	–

Sensitivity analysis experiments

Balanced simulation plans were developed for both the Conceptual and Semi-plot approaches. They aim at studying the impact of modeling simplifications and at identifying sensitive parameters for each soil–crop water balance and regional irrigation modeling chain. The chosen variation factors are:

- Soil water deficit threshold θ. Many studies fix θ at a hypothetical RAW level (Neilsen et al. 2018; Rinaudo et al. 2013), corresponding to the value optimizing the amount of water brought to crops. Some studies fix various values of θ, e.g., at a value of 0 mm (Collet 2013), at a threshold of 50% of total available water (TAW, mm; Bouras et al. 2019), or at a threshold of $0.8 \times \mathrm{RAW} + 0.2 \times \mathrm{TAW}$ (Smith et al. 2012). Moreover, deficit irrigation amounts ($\theta > \mathrm{RAW}$) are also possible, particularly for crops resistant to water stress. Because irrigation is calculated at a daily time step, contrary to Collet et al. (2013), who considered a 10-day time step, we consider that θ cannot be equal to 0 in this modeling configuration. We also include a value higher than RAW to explore a deficit irrigation hypothesis. Accordingly, we explore a range of values for θ from $0.25 \times \mathrm{RAW}$ to $\mathrm{RAW} + 0.25 \times (\mathrm{TAW} - \mathrm{RAW})$;
- Irrigation amounts (IA). For Semi-plot experiments, different quantification methods of irrigation in simulation units are tested: one similar to the Conceptual approach simulation units ($\mathrm{Dr} - \theta$), one with a fixed amount for each crop (FixMeanC), as done by Bouras et al. (2019) or Rouhi Rad et al. (2020), and one to fill the soil water reservoir (Dr), as done by Hori et al. (2008);
- Seasonal variation of depletion factor p_var. Simulations were made with variable p or constant p to evaluate the importance of taking into account this seasonal variability (see Appendix "The CropWat model");

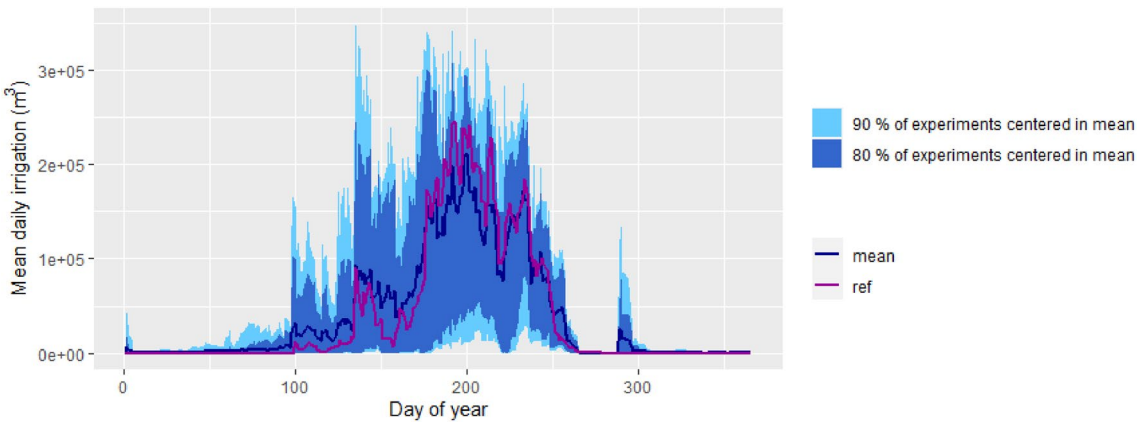


Fig. 3 Daily regimes of irrigation obtained at the study zone scale from the reference experiments (purple) and from the ensemble, the mean and the 80% and 90% envelopes of all C and S experiments (blue), as described in "Irrigation modeling at regional scale" and "Sensitivity analysis experiments" (color figure online)

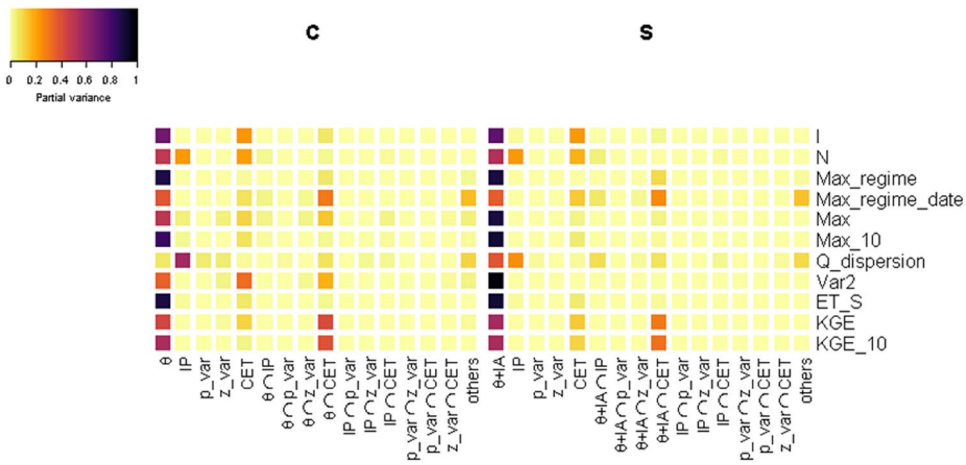


Fig. 4 Partial variance explained by the factors of annual indicators. On the left, the Conceptual (C) experiments, on the right, the Semi-plot (S) experiments. A higher partial variance indicates that the variability of the indicator is more affected by this factor

Table 2 Characteristics of the "best experiments" compared to the reference (MAELIA) for Conceptual and Semi-plot approaches

	Conceptual (96 experiments)			Semi-plot (256 experiments)		
				Number of experiments: 7		
				Factor	Modality	Number
KGE > 0.9	Number of experiments: 0			θ	varCrop	7
				IA	varCrop	7
				IP	0	3
					1	4
				CET	1	7
	Number of experiments: 1			Number of experiments: 58		
	Factor	Modality	Number	Factor	Modality	Number
KGE > 0.8	θ	varCrop	1	θ	0.25 × RAW	8
	IP	0	1		0.5 × RAW	16
	CET	1	1		0.75 × RAW	10
					RAW	8
					varCrop	16
				IA	Dr-θ	21
					FixMeanC	21
					varCrop	16
				IP	0	28
					1	30
				CET	0	19
					1	39
	Number of experiments: 36			Number of experiments: 100		
	Factor	Modality	Number	Factor	Modality	Number
KGE > 0.7	θ	0.5 × RAW	8	θ	0.25 × RAW	8
		0.75 × RAW	8		0.5 × RAW	17
		RAW	8		0.75 × RAW	32
		varCrop	16		RAW	20
	IP	0	18		RAW + 0.25 (TAW-RAW)	7
		1	18		varCrop	16
	CET	0	12	IA	Dr-θ	41
		1	24		Dr	3
					FixMeanC	40
					varCrop	16
				IP	0	48
					1	52
				CET	0	45
					1	55

For three thresholds of performant KGE (best potential performance for KGE = 1), modalities of corresponding experiments are indicated, aimed at identifying modalities that clearly result in an improvement of KGE

- Root growth z_var. Simulations were made with increasing rooting depth between initial and maximal rooting depth or constant rooting depth equal to maximal rooting depth (see Appendix "The CropWat model");
- Irrigation period (IP). MAELIA defines precise irrigation periods for each crop. However, in the context of inter-annual climate variability increasing with climate change, it seems important to let the model calculate irrigation potential needs outside the usual irrigation periods. For this, we simulated experiments following irrigation periods for each crop defined in the reference

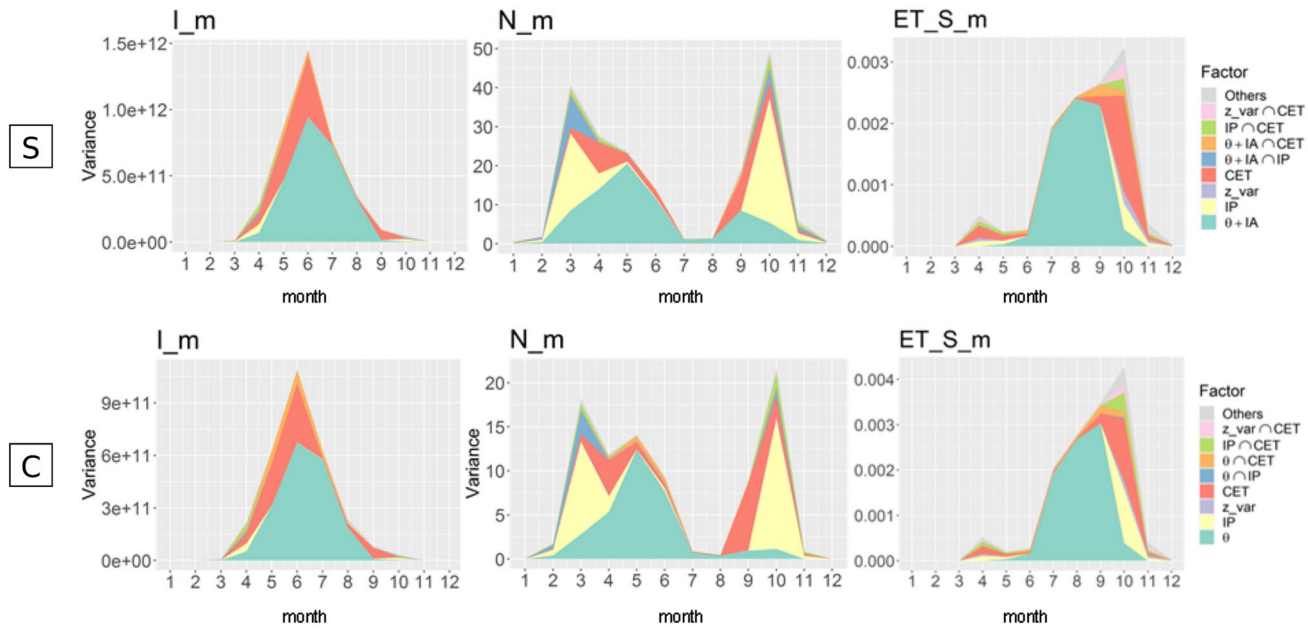


Fig. 5 Partial variance of monthly indicators related to different factors. For each month, partial variances are cumulated, and show the monthly variation in the contribution of each factor

Table 3 Mean, minimal, and maximal experiment values of mean CZ value for each indicator ("Indicators characterizing irrigation") for Conceptual, Semi-plot and reference experiments (as described in "Irrigation modeling at regional scale" and "Sensitivity analysis experiments")

Indicator	Conceptual			Semi-plot			Reference
	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	
I (m^3)	2.98E+05	1.29E+05	5,28E+05	3.27E+05	1.03E+05	6.37E+05	3.01E+05
N (days)	75	47	127	85	33	165	76
Max_regime (m^3)	4.53E+03	3.14E+03	6.28E+03	4.90E+03	2.39E+03	7.40E+03	4.86E+03
Max_regime_date (DOY)	198 (17 July)	143 (23 May)	218 (6 August)	196 (15 July)	142 (22 May)	222 (10 August)	197 (16 July)
Max_10 (m^3)	6.71E+03	4.31E+03	9.43E+03	7.29E+03	3.27E+03	1.29E+04	6.20E+03
Max (m^3)	1.12E+04	5.83E+03	3.01E+04	9.89E+03	4.00E+03	2.38E+04	8.80E+03
Q_dispersion (–)	1.47	1.09	1.87	2.21	1.26	3.68	1.45
Var2 (–)	0.0024	0.0021	0.0031	0.0018	0.0007	0.0031	0.0027
KGE_10	0.59	−0.03	0.86	0.47	−0.36	0.87	–
KGE	0.38	−0.39	0.64	0.28	−0.48	0.68	–

and compared them with experiments able to trigger irrigation at any time during the crop cycle;

- Crop maximal evapotranspiration calculation (CET) (see Appendix "The CropWat model"). The impact of the evapotranspiration calculation method has already been studied and quantified (Multsch et al. 2015). To identify the main sensitivity sources of regional irrigation uncertainty including evapotranspiration, we integrate experiments into our modeling scheme with a classic evaluation of CET and with experiments considering CET equal to PET-PM.

The modalities for each factor are summarized in Appendix "Varying factors in C and S experiments".

Some complementary experiments were conducted to evaluate the added value of defining different irrigation rules (θ and IA) between crops. For each crop, for each crossing of p_var, z_var, CET and IP hypotheses conditions, θ (for C experiments), and θ and IA (for S experiments), the

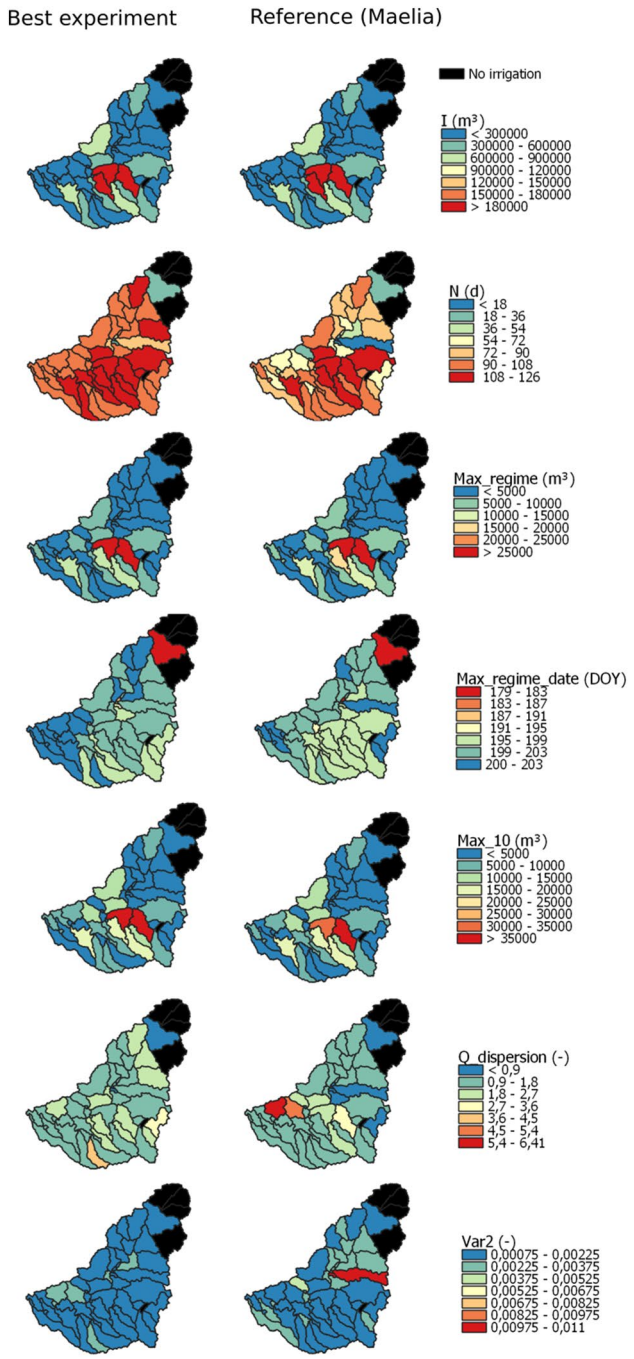


Fig. 6 Comparison of indicator values at the CZ scale between the reference (MAELIA) and the best experiment. This experiment corresponds to a Semi-plot approach, with irrigation rules defined specifically for each crop, no irrigation period delimitation, and root growth as well as seasonal variation of p and Kc taken into account (modalities varCrop, 0, 1, 1, 1 for θ+IA, IP, z_var, p_var, CET, respectively)

best-performing experiments in reproducing the reference experiment outputs at crop level were selected using the KGE-10 criterion (see "Indicators characterizing irrigation" and Appendix "Indicator calculation"). The resulting modality of θ and IA is called "varCrop."

The variance decomposition procedure we used to estimate the sensitivity of indicators to variation factors is detailed in Appendix "Variance decomposition".

Results

In this section, we assess the irrigation obtained from the reference, Conceptual and Semi-plot experiments at the basin scale as well as the factors explaining the variability. Then, we analyze the best experiments in terms of KGE and assess the experiments at the CZ scale.

Sensitivity of simulation to variation factors at the scale of the total study zone

General analysis of indicators

According to the results from the reference experiment, irrigation can start in April, is maximal in July (mean value of 6 million m^3), and ends in October. The results of the reference, Conceptual (C) and Semi-plot (S) simulations are summarized in Table 1, presenting values of annual indicators aggregated for the total study zone. With higher mean values of Q_dispersion, the S experiments show mean higher dephasing between daily values of high and low irrigation. However, with higher values of Var2, daily temporal variations of irrigation are globally higher in the C experiments. For almost all factors, the C results are within the envelope of the S results, which might be caused by the larger number of factors (IA) explored in the S experiments. Reference values of indicators are contained within the range of the C and S results except for the higher values reached by Max_10 and Var_2, which are not included within the range explored in the C experiments, showing that C experiments have a narrow higher daily variability than reference and S experiments (Appendix "Annual irrigation hydrographs") The inclusion of the reference experiment in the CropWat-based experiments is confirmed in Fig. 3, showing that the reference regime of irrigation is contained within the simulations produced by our experiments.

Distribution of the total variance in indicators between factors

The variance of annual indicators explained by different factors is plotted in Fig. 4. For the Semi-plot experiments, the six modalities of θ (0.25 × RAW, …, varCrop) and the four modalities of IA (Dr, …, varCrop) were merged into one factor θ+IA of 16 modalities to avoid an unbalanced experimental plan, because the varCrop modality for θ was run only with the varCrop modality of IA.

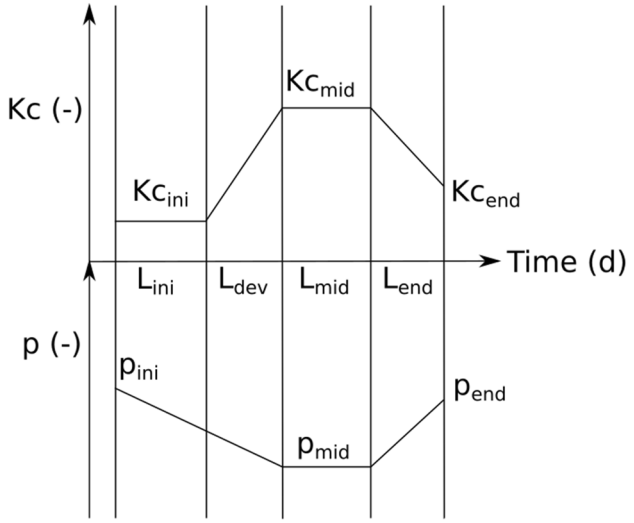


Fig. 7 Example of Kc (–) and p (–) curves for a set of parameters: crop coefficients (Kc_{ini}, Kc_{mid} and Kc_{end}), depletion factor parameters (p_{ini}, p_{mid} and p_{end}), and length of growth stages (L_{ini}, L_{dev}, L_{mid} and L_{end})

First, it is clear that the automatic irrigation parameters (θ for C experiments and θ+IA for S experiments) override the effects of the other factors for most indicators. CET is also very impactful for both the Conceptual and Semi-plot experiments, particularly on indicators I, N, Max_regime_date, Var2, and ET_S, while IP is also very impactful on indicators N and Q_dispersion. Factors p_var and z_var are systematically not impactful, for each indicator of the Conceptual and Semi-plot experiments. Second, we note that the interaction effects might be high. The interaction between automatic irrigation parameters (θ and θ+IA) and CET has a strong impact on the Max_regime_date and on KGE and KGE_10. Impacting factors on indicators are often the same between the C and S experiments, except for daily irrigation variability indicators, i.e., Var2, Q_dispersion. This difference between the C and S experiments is explained by the integration in the S experiments of several modalities of IA, leading to large variations between experiments for these indicators (Appendix "Impact of IA modalities on Var2 and Q_dispersion").

The evaluation of the impact of each modality on each indicator is detailed in Appendix "Impact of factor modalities on indicators". It is a necessary additional step after variance decomposition to select accurate modalities for modeling purposes and to identify the strengths and weaknesses of the chosen modalities. Notably, we naturally observed that higher θ leads to a decrease in annual irrigation and in irrigation maxima, and to a delay in irrigation. For the S experiments, the modality Dr of IA leads to higher amounts of irrigation.

Characterization of best performing configurations

Table 2 summarizes modalities of experiments that reach high KGE values. First, we observe that the Semi-plot experiments clearly outperform Conceptual experiments in KGE performance in reproducing the reference experiment daily irrigation. Moreover, varCrop experiments are overrepresented, particularly among experiments with an excellent KGE (> 0.9). This observation is not surprising, because the selection of the modalities for automatic irrigation rules (θ and IA for S experiments) was based on their KGE_10 performance. However, some experiments with homogeneous automatic irrigation rules among crops also reach good KGE values. KGE does not reveal a strong difference between IP modalities among the performant experiments. However, among the performant experiments, those with modality 1 of CET are clearly more frequent than experiments with modality 0 of CET. This shows a clear and constant benefit of taking into account crop coefficients for IWR assessment, albeit the resulting variability is not as high as with other tested factors.

A look at the monthly time step

In Fig. 5, partial variances of factors in monthly indicators are presented. The reactions of Semi-plot and Conceptual experiments with respect to the variation factors are relatively similar. The area under the curve for monthly variance of automatic irrigation parameters (θ and θ+IA) shows that these parameters are the most impactful parameters on each monthly indicator. Their impact reaches a peak in July for each indicator. Consequently, the June–July period appears to be the period with the highest variance for I_m between experiments. However, some factors have a strong impact in other months. CET and IP have a strong impact in spring months until the beginning of summer and in autumn. Under the influence of these last two factors cumulated with automatic irrigation factors, the periods of the highest variance for N_m are spring and autumn, and autumn for ET_S_m. IP has a strong impact on N_ m in winter and autumn months. Indeed, the irrigation periods defined for each crop often exclude those months, leading to large differences between experiments of modality 1 or 0 of IP factor. However, the IP factor is not as impactful on I_m during these periods. That can be explained by small amounts of irrigation applied in these periods, because cultivated surfaces are low, evapotranspiration is low, and rainfall is high. The variance of N_m is low at the end of autumn and winter because conditions for triggering irrigation are not reached and the modality 0 of IP is not sufficient to trigger irrigation in those extreme periods. The impact of CET is particularly

strong on ET_S in autumn. Indeed, in this season, the crop coefficient is supposed to be low, but with the modality 0 of CET, the crop coefficient is constantly equal to 1, which is a high value.

Impact of spatial resolution on experiment outputs

For each experiment, each indicator was calculated at the CZ scale. Then the mean CZ value was computed for each experiment (Table 3). Experiments at the CZ scale reach similar values as the reference for indicators, similarly to what was observed at the lumped scale. Indeed, reference values are still contained within intervals explored by our CropWat experiments. However, we observe that KGE values at the CZ scale are overall lower than KGE for lumped outputs (Table 1), which can be explained by a higher irrigation sporadicity at the CZ scale. The best mean KGE at the CZ scale reaches 0.68, while a value of 0.91 reached at the lumped scale. There was a greater deterioration in the performance of KGE for Semi-plot experiments than for Conceptual experiments.

To complete this analysis, we drew maps showing values of indicators for different CZs for the reference experiment and the experiment reaching the best KGE_10 (Fig. 6), called the "best experiment" below. This experiment corresponds to a Semi-plot approach, with irrigation rules defined specifically for each crop, no irrigation period delimitation, and root growth as well as seasonal variation of p and Kc taken into account (modalities varCrop, 0, 1, 1, 1 for $\theta+$IA, IP, z_var, p_var, CET, respectively). The spatial variability of indicators between CZs is linked to climatic (temperature and precipitations), pedologic and agronomic spatial variabilities. The spatial variability of the reference experiment is almost perfectly reproduced by the best experiment for I and Max_regime. Some CZs show different values for Max_10. More important differences are observed in the other indicators. For some indicators, we observe a bias in comparison with the reference, but this bias is spatially homogeneous. For example, Max_regime_date seems to occur globally a few days later for the best experiment than for the reference. The best experiment has more difficulties to fit reference values for N, Q_dispersion, and Var_2. For these three indicators, the best experiment seems to produce more spatially homogeneous results than the reference experiment, showing that the simplified approaches tested here might face more difficulties in reproducing spatial heterogeneity in daily irrigation variability than the spatial heterogeneity in the other factors. Despite these differences, all spatialized indicator values of the best experiment remain globally consistent with those of the reference experiment.

Discussion

Impact of tested variation factors on irrigation simulations

Our results showed that irrigation modeling choices have an impact on irrigation modeling outputs, not only on annual irrigation volumes, but also on the seasonal distribution of irrigation and high variations in irrigation in short time periods. For example, the date of the maximal irrigation period (Max_regime_date) varies greatly between 13 May and 10 August among our experiments.

Impact of modeling approaches

Tables 1 and 3 show that the ranges explored with both the Conceptual and Semi-plot approaches are quite similar and consistent with the reference experiment for most of indicators at lumped and CZ scales. However, the Semi-plot experiments are able to approach the results of the reference for the Var2 indicator, which represents daily variability, at the lumped scale, unlike Conceptual experiments. This difference leads to lower values of KGE for the Conceptual approach, because the daily variability of irrigation is different from the daily variability simulated by MAELIA. Indeed, the Conceptual approach can trigger irrigation in all simulation units, which can lead to high irrigation peaks and dips, which are not consistent with irrigation simulated by the reference and Semi-plot approaches at the lumped scale. As a consequence, taking into account water turns, which reproduce equipment availability constraints, might be decisive. Nevertheless, several simulations of both the Conceptual and Semi-plot approaches manage to approximate the reference experiment, reaching high KGE_10 and KGE values at the lumped scale: 37.5% of Conceptual experiments and 39% of Semi-plot experiments reach a KGE higher than 0.7.

The ability to obtain good performances for both the Semi-plot and Conceptual experiments in reproducing reference irrigation leads to the conclusion that calibration, particularly of irrigation rules, can be more impactful than the choice of the modeling approach among the approaches tested. However, although adequately reproducing irrigation at the lumped scale is possible, reproducing the daily irrigation simulated by the reference at the CZ scale is clearly more difficult (see "Impact of spatial resolution on experiment outputs"). This is easily explained by the sporadic behavior of irrigation at the local scale.

However, we applied an approach using a fixed Kc curve for CropWat experiments compared to an approach estimating crop growth based on a degree.day approach (Appendix "Soil–crop water balance models") for AqYield. Although this difference did not seem to be very impactful for the

study period, the change of crop growth dynamic in a context of climate warming might be very impactful in future. In this context, it will become necessary to adjust Kc curves, or to use models such as AqYield, to estimate irrigation needs.

Impact of variation factors

The impact of automatic irrigation factors (θ, IA) is very strong among the factors tested. The impact of CET is also important, confirming the value of taking into account uncertainties in evapotranspiration estimation. Although the impact of IP is not strong according to the KGE_10 indicator, it has an important impact on the number of days of irrigation. However, in a climate change context, restraining or not restraining irrigation to specific periods might be more impactful. Concerning the depletion factor and root depth curves, the modalities evaluated in this work were to take into account the variation in the parameters according to crop growth on the one hand (modality 1), or to fix a constant value on the other hand (modality 0). For example, concerning the rooting depth, the maximal value could be directly reached when the crop was sown (modality 0), or progressively increased with crop growth for other experiments (modality 1; Fig. 7). The maximal rooting depths resulting from the crossing of crops and soils were maintained for all experiments. Consequently, our results show that the dynamics of the evolution of these is not a key process for irrigation assessment at catchment scale, and their calibration should not be a priority. However, maximal root depth might be a key factor of interest to evaluate in future studies.

Beyond the statistical performance of the experiments, we can question their agronomic relevance and robustness. For example, extreme values of the modalities of factors investigated here can produce high KGE and KGE_10 values for some experiments while they might also lead to unrealistic simulations when combined with other modalities of other factors. To reinforce the probability of modeling choices to represent realistic irrigation over space and time, we advise selecting realistic modalities of each variation factor represented. Following the same logic, our study also reveals the importance of interactions between some variation factors. Hence, with the modality 0 of IP but a high value of θ, irrigation can be triggered late enough in the year to reproduce the reference scenario adequately.

There are numerous impacts related to the variation factors tested. Our study shows that evaluating and comparing irrigation modeling based on a single indicator, for example, annual irrigation, is not enough. Some modalities can lead to a decrease in annual irrigation (I), but without changing irrigation peaks in IWR (Max, Max_10, Max_regime_date) and thereby without an impact on extreme values of hydrologic droughts.

Many studies approximate irrigation inputs and withdrawals by calculating optimized values of irrigation, which would correspond, for our CropWat simulations, to the use of a θ equal to RAW (Funes et al. 2021; Neilsen et al. 2018; Rinaudo et al. 2013). However, in our study site, more experiments with a θ fixed at $0.5 \times$RAW or $0.75 \times$RAW were able to reproduce the reference simulations very well. Our results might be linked to the fact that farmers in our case study tend to implement an over-irrigation strategy (Allain et al. 2018), as in other catchments (Battude 2017; Tan 2019). To take into account this uncertainty, we would advise modelers using automatic irrigation algorithms to use several irrigation thresholds of θ to represent uncertainty linked to farmers' practices. Finally, defining irrigation parameters adapted to each crop (varCrop) can lead to significantly more accurate irrigation modeling. However, it leads to a complexification of calibration while some experiments with homogeneously calibrated irrigation for the different crops were still able to reach high scores.

Potential consequences for hydrological modeling and water management

Simulating dynamics of irrigation is of particular interest when considering the impact of irrigation during low-flow periods. Irrigation has two main impacts on hydrology: on the one hand withdrawals impacts, i.e., taking out water from the system, and on the other hand, irrigation rain impacts, bringing water to the system. Periods of irrigation, periods of maximal irrigation, and daily irrigation variations can change significantly between simulations obtained from different model configurations. A model bringing high amounts of irrigation in short periods could have an impact on hydrological modeling that is different from a model bringing low but regular amounts of irrigation.

Finally, similarly to Multsch et al. (2015), our results showed that the evapotranspiration estimation method might be an impactful variation factor between irrigation simulations, even if this factor might be less important than the irrigation rules. If an exhaustive coupling between crops and hydrological modeling is intended, evapotranspiration estimation might also be important as a direct input for hydrological models.

Our simplified approaches (Conceptual and Semi-plot) seem to be able to reproduce adequately the spatial variability of most indicators and should be compatible with semi-distributed and distributed hydrological modeling. However, we observed difficulties in reproducing irrigation at a daily time step and at the local scale, showing the difficulty of mimicking farmers' behavior regarding irrigation at these scales.

Limitations to this work and other variation factors to explore

We can identify several limitations of our study. First, the benchmark irrigation data we used correspond to modeling outputs. As a consequence, these data are distinct from reality, even if they represent the best reference data existing in our study area and even if MAELIA showed a very good capacity to simulate irrigation withdrawals. Therefore, we could assume that some of our experiments, even if not identified as the best ones, could be more realistic than MAELIA simulations. This supports the need to keep several modeling hypotheses and even to keep modalities that were less performant to reproduce reference simulations if they are considered as realistic and robust.

Furthermore, this work was carried out in only one study zone. This choice is notably justified by the availability of MAELIA outputs and the complexity of the modeling protocol used, which cannot be easily generalized to other areas. Consequently, conclusions drawn in this area should be carefully used for other areas, particularly in very different agro-climatic zones and cropping systems.

The modeling approaches tested here aimed at studying different levels of modeling simplifications. However, more simplified models exist. For example, the impact of spatio-temporal aggregation of input data and the reduction in the number of simulated crops could also be explored in further studies. Moreover, the reference model, MAELIA, itself relies on several simplifications, and not all processes are described in detail. For example, the run-on of water and its impact on the redistribution of water between crop simulation units is not taken into account.

Climate data are deterministic in this study. However, for operational purposes (prediction, projection, generic characterization of irrigation distribution), climate inputs might result from hypotheses, simulations or estimations, which might also bring additional uncertainty. For example, Jie et al. (2022) considered precipitation and evapotranspiration statistical distributions as sources of variability to evaluate generic irrigation variability. Moreover, even deterministic precipitation amounts and spatio-temporal distribution carry unavoidable uncertainty. Comparing the relative impacts of climate modeling uncertainty and irrigation modeling uncertainty might be very informative. This is however not in the scope of this study.

Last but not least, coupling these simulations with hydrological modeling is necessary to confirm or contest the significance of the differences between irrigation simulations for water management and resource issues. Indeed, the differences between outputs might seem significant, but they may have a moderate impact on hydrology.

Conclusion

This work described the methodology and the results of a sensitivity analysis of irrigation modeling at the local to river-basin scale. Two simplified modeling approaches (Conceptual: lumping irrigation simulation for homogeneous crop, soil, and climate conditions; Semi-plot: dividing simulation units into water turns groups) were compared with a more complex, agent-based, benchmark (MAELIA). For the two simplified approaches, the impacts of several modeling hypotheses regarding irrigation variation factors were analyzed. A sensitivity analysis based on variance decomposition was performed. The relative impacts of variation factors were measured based on several indicators of irrigation dynamics, with the objective of exploring the irrigation modeling effect beyond the simplistic annual sum of irrigation. This work highlighted that calibration of variation factors is more crucial than the choice of a given modeling approach. It showed the strong impact of irrigation-triggering rules and quantification of nominal irrigation amount parameters on regional irrigation assessment. It also confirmed that the definition of evapotranspiration and irrigation periods can have an important impact on irrigation modeling, a key issue for simulation under future climatic conditions. Several configurations of simpler approaches (Conceptual and Semi-plot) managed to reproduce adequately the simulations of the more complex approach (MAELIA). Experiments managing to reproduce adequately MAELIA were actually quite heterogeneous, showing a multiplicity of possible performing modeling configurations and the ability of the modalities tested to offset each other. Finally, this work enabled us to identify the following recommendations that might be followed for irrigation modeling: using multi-parameter simulations of irrigation; including different rules for triggering and quantifying irrigation; and evaluating irrigation with diverse indicators capturing its levels, frequency, and dynamics.

Appendices

Soil–crop water balance models

Soil water content mainly results from the balance between rain and irrigation inputs and evapotranspiration outputs. Evapotranspiration on cropland can be estimated with soil–crop water balance models. However, many of these models are complex, which makes them too computationally and data demanding for regional applications. On the other hand, semi-empiric crop coefficient methods

described by the FAO (Allen et al. 1998) are still largely used in research work and their performance and robustness, if well calibrated, have been demonstrated. The single crop coefficient (Kc) approach was implemented in the CropWat model and is used in this study.

The CropWat model

In a single crop coefficient (Kc) approach, crop maximal evapotranspiration (CET, mm day^{-1}) is calculated at each time step (t) using Eq. (2) with the crop coefficient Kc (–) and potential evapotranspiration (PET, mm day^{-1}) estimated through the Penman–Monteith equation:

$$\mathrm{CET}(t) = \mathrm{Kc}(t) \times \mathrm{PET}(t). \tag{2}$$

In CropWat, three values of Kc are defined for each crop corresponding to the initial, mid-, and end stage of the crop cycle, linked by linear interpolation and associated with length of growth stages (Fig. 7). Water balance is calculated at a daily time step (d). Soil water availability for crops consists of a single bucket. Total available water (TAW, mm), describing the depth of the bucket, is calculated using Eq. (3), with ω_{fc} the water content at field capacity (m^3 m^{-3}), ω_{wp} the water content at wilting point (m^3 m^{-3}), and Z_r the rooting depth (mm):

$$\mathrm{TAW}(d) = \left(\omega_{fc} - \omega_{wp}\right) \times Z_r(d). \tag{3}$$

The rooting depth is estimated at each time step by a linear interpolation between initial root depth and maximal root depth, the latter being reached at mid-stage. Readily available water (RAW) is calculated as follows in Eq. (4), with p (–) the depletion factor:

$$\mathrm{RAW}(d) = p(d) \times \mathrm{TAW}(d). \tag{4}$$

In CropWat, p is represented by a curve with p_{ini}, p_{mid}, p_{end} defined for each crop associated with length of growth stages (Fig. 7).

Water level is estimated at a daily time step by the root zone depletion Dr (mm), i.e., the gap between TAW and soil water content. Soil water content is updated with daily rain, irrigation and evapotranspiration amounts. If Dr exceeds the RAW value, evapotranspiration is reduced because of water stress, leading to the calculation of actual evapotranspiration (AET, mm day^{-1}). AET is estimated with Ks (–), the water stress coefficient, as shown in Eq. (5). Ks is calculated through Eq. (6):

$$\mathrm{AET}(d) = \mathrm{Ks}(d) \times \mathrm{CET}(d), \tag{5}$$

$$\mathrm{Ks}(d) = \begin{cases} \frac{(\mathrm{TAW}(d) - \mathrm{Dr}(d))}{(\mathrm{TAW}(d) - \mathrm{RAW}(d))} & \text{if } \mathrm{Dr}(d) > \mathrm{RAW}(d) \\ 1 & \text{if } \mathrm{Dr}(d) \leq \mathrm{RAW}(d) \end{cases}. \tag{6}$$

The AqYield model

The MAELIA platform includes its own soil–crop water balance model, AqYield. Like CropWat, it is based on a Kc approach. The main differences are:

- Transpiration and evaporation are calculated separately. Transpiration takes water from the root zone, while evaporation takes water from the shallow soil horizon. Maximal crop transpiration (MT, mm day^{-1}) is calculated as follows in Eq. (7), with evaporation (E, mm day^{-1}):

$$\mathrm{MT}(d) = \mathrm{Kc}(d) \times (\mathrm{PET}(d) - E(d)). \tag{7}$$

- Developments of Kc and roots are represented by smooth functions depending on crop parameters and sum of degree day, with thresholds corresponding to flowering and maturity stages;
- Water stress impact on transpiration is a smooth function of the soil water amount, without any break between Dr ≤ RAW and Dr > RAW, and is influenced by the clay rate.

Parameter calibration

MAELIA crop parameters were calibrated by experts of the AqYield model to fit the Aveyron basin context. To avoid bias linked to the crop parameters, CropWat parameters were estimated based on the MAELIA outputs. Hence, Kc curves were built on the basis of AqYield detailed outputs. However, Kc curves were kept fixed inter-annually unlike AqYield simulations. Moreover, AqYield detailed outputs were obtained for only one CZ due to constraints on data storage and computation time. As a consequence, Kc curves were built to correspond to AqYield evapotranspiration in one CZ and applied to the entire study area for CropWat experiments. A detailed explanation of CZ choice and Kc calibration methodology is given hereafter ("Choice of reference AqYield data for calibration", "CropWat crop coefficients adjustment").

Depletion factor p was adjusted locally with CET using the following FAO formula presented in Eq. (8):

$$p = \mathrm{pFAO} + 0.04 \times (5 - \mathrm{CET}), \tag{8}$$

p_{ini}, p_{mid}, and p_{end} values were calibrated to correspond to daily p values calculated with the FAO formula. Minimal root depths were set to 30 cm for each crop and maximal root depths were taken from FAO report no. 56.

Choice of reference AqYield data for calibration

AqYield detailed outputs were obtained in the CZ 2031 (Fig. 8).

The selection of this CZ was made with different criteria:

- each simulated crop is present;
- number of plots for every irrigated crop is high;
- number of different soils on which cultivated crops are present is high.

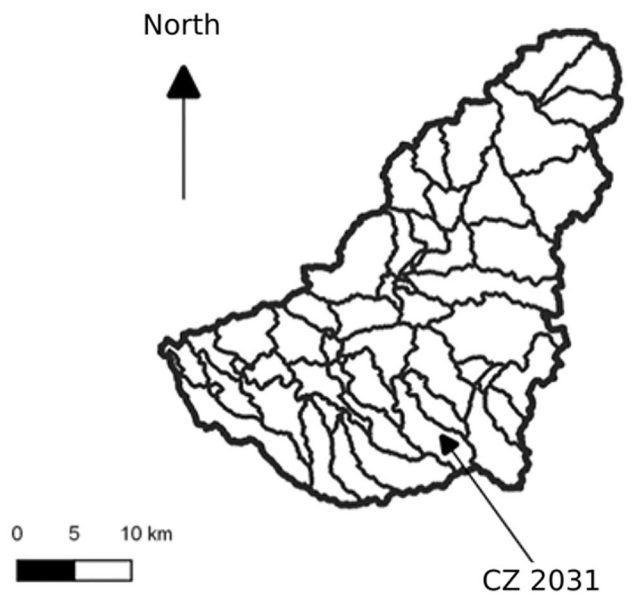


Fig. 8 Location of the reference CZ used for CropWat crop coefficients calibration

In CropWat, crop coefficients aim at calculating maximal crop evapotranspiration, cumulating evaporation, and transpiration, while in MAELIA, crop coefficients are designed to be proportional to maximal transpiration only. That is why we compiled for each plot the sum of maximal transpiration and evaporation simulated by AqYield between 2008 and 2014, considered as maximal evapotranspiration. Then, this maximal evapotranspiration was divided by potential evapotranspiration to obtain a crop coefficient curve comparable to the CropWat crop coefficient curve.

Finally, for each crop type, a mean daily inter-annual crop coefficient curve was calculated by the weighted mean of the crop coefficient curve of plots based on their surfaces (Fig. 9).

CropWat crop coefficients adjustment

Each crop Kc curve was calibrated manually with the objective of reproducing adequately MAELIA outputs (Fig. 10). The intercrop and initial-stages Kc calibrated value (Kc_{ini}) is lower than the optimal value for this crop stage, but fits the crop Kc curve during the development stage. This choice was made to avoid overestimation of evapotranspiration during the transition between the initial and development stages, which would lead to an overestimation of soil reservoir depletion. This choice results in an underestimation of maximal evapotranspiration during the end of winter and spring, leading to a possible underestimation of water stress, but it does not have a strong impact on soil water depletion. Indeed, the water level is maintained near field capacity during this period (explaining high values of evapotranspiration in AqYield). Excess water in CropWat is not integrated in the soil water reservoir and is not converted into evapotranspiration, but is simply considered as lost water.

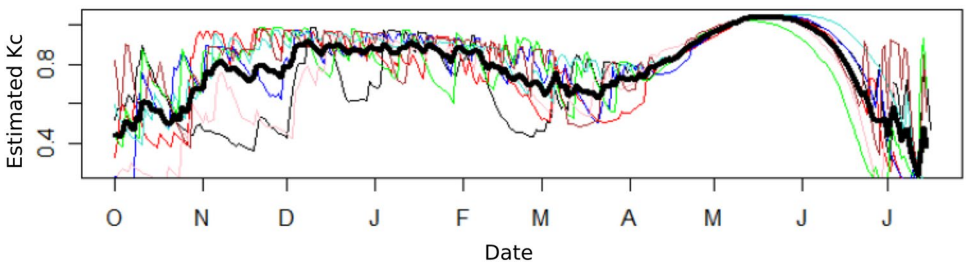


Fig. 9 Inter-annual variability of crop coefficients for wheat for CZ 2031. Each colored curve corresponds to a mean crop coefficient curve weighted by the surfaces of plots for a specific year. The bold curve corresponds to the inter-annual mean of the colored curves (color figure online)

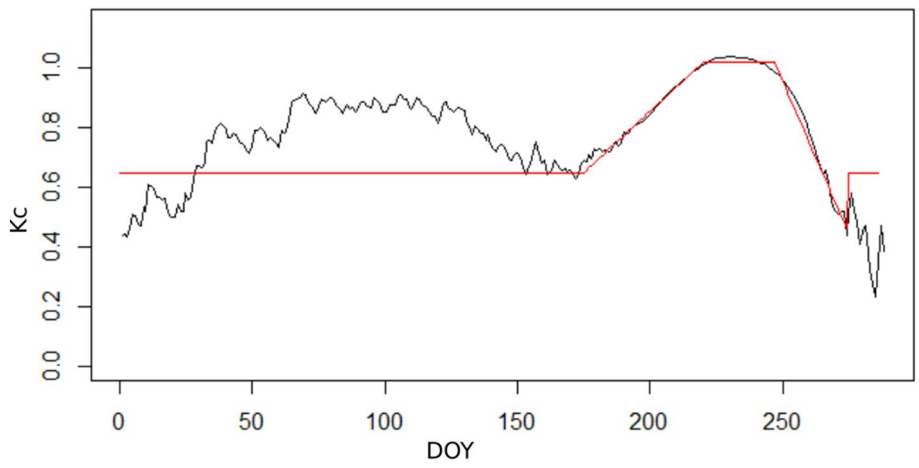


Fig. 10 Annual crop coefficient curve calculated with AqYield (black line) and calibrated for CropWat (red line) for wheat (color figure online)

Indicator calculation

Indicator name	Unit	Definition	Scale of calculation	Calculation	Variables
I	m^3	Mean annual irrigation	Lumped, CZ	$I = \frac{\sum_{d=1}^{N_d} I_d}{N_Y}$	N_d: number of days (–) d: day index (–) I_d: daily irrigation (m^3) N_Y: number of years (–)
I_m	m^3	Mean monthly irrigation	Lumped	For each month m, $I_m = \frac{\sum_{d=1}^{N_{d,m}} I_{d,m}}{N_Y}$	$N_{d,m}$: number of days in month m (–) d: day index (–) $I_{d,m}$: daily irrigation of day d in month m (m^3) N_Y: number of years (–)
N	(–)	Mean annual number of days of irrigation	Lumped, CZ	$N = \frac{N_{d,I>0}}{N_Y}$	$N_{d,I>0}$: number of days with $I_d > 0$ (I_d: daily irrigation (m^3)) (–) N_Y: number of years (–)
N_m	(–)	Mean monthly number of days of irrigation	Lumped	For each month m, $N_m = \frac{N_{d,I>0,m}}{N_Y}$	$N_{d,I>0,m}$: number of days of month m with $I_{d,m} > 0$ ($I_{d,m}$: daily irrigation of month m (m^3)) (–) N_Y: number of years (–)
Max_ regime	m^3	Maximum of irrigation for 10-day rolling periods on mean annual regime curve	Lumped, CZ	$\text{Max}_{\text{regime}} = \max\left(I_{10d}\right)$	I_{10d}: vector of 10-day rolling mean annual regime of irrigation (m^3,…,m^3) max(): maximal value (m^3)
Max_ regime_ date	DOY	Day of year of maximum of irrigation for 10-day rolling periods on mean annual regime curve	Lumped, CZ	$\text{Max_regime_date} = \text{DOY_max}\left(I_{10d}\right)$	I_{10d}: vector of 10-day rolling mean annual regime of irrigation (m^3,…,m^3) DOY_max(): date of maximal value (DOY)

Indicator name	Unit	Definition	Scale of calculation	Calculation	Variables
Max	m^3	Mean annual maximum of daily irrigation	Lumped, CZ	$\text{Max} = \frac{\sum_{Y=1}^{N_Y} \max(I_{d,Y})}{N_Y}$	$I_{d,Y}$: vector of daily irrigation for year Y (m^3,…,m^3) max(): maximal value (m^3) N_Y: number of years (–)
Max_10	m^3	Mean annual maximum of 10-day mean rolling irrigation	Lumped, CZ	$\text{Max_10} = \frac{\sum_{Y=1}^{N_Y} \max(I_{10d,Y})}{N_Y}$	$I_{10d,Y}$: vector of 10-day rolling mean of daily irrigation for year Y (m^3,…,m^3) max(): maximal value (m^3) N_Y: number of years (–)
Q_dispersion	(–)	(Q75–Q25)/Q50 of daily irrigation	Lumped, CZ	$Q\text{_dispersion} = \frac{Q_{75}\left(I_{d,I_d>0}\right)-Q_{25}\left(I_{d,I_d>0}\right)}{Q_{50}\left(I_{d,I_d>0}\right)}$	$I_{d,I_d>0}$: vector of daily irrigation I_d, with $I_d > 0$ (m^3,…,m^3) Q_x: quantile X% (m^3)
Var2	(–)	Mean of absolute second derivative of daily irrigation (m^3), divided by mean annual irrigation	Lumped, CZ	$\text{Var2} = \frac{\sum_{d=2}^{N_d-1} \lvert(I_{d+1}-I_d)-(I_d-I_{d-1})\rvert}{\text{I}}$	N_d: number of days (–) d: day index (–) I_d: daily irrigation (m^3) I: see indicator I (m^3)
KGE	(–)	Kling–Gupta efficiency comparing irrigation obtained from experiments with reference irrigation	Lumped	$\text{KGE} = 1 - \sqrt{(1 - r(I_d))^2 + (1 - \beta(I_d))^2 + (1 - \alpha(I_d))^2}$	r: the Pearson product–moment correlation coefficient between experiment values and reference values (–) β: the ratio between the mean of the experiment values and the mean of the reference values (–) α: the ratio between the standard deviation of the experiment values and the standard deviation of the reference values (–) I_d: vector of daily irrigation for experiment and reference (m^3,…,m^3)
KGE_10	(–)	Kling–Gupta efficiency comparing 10-day rolling irrigation obtained from experiments with reference 10-day rolling irrigation	Lumped	$\text{KGE_10} = 1 - \sqrt{(1 - r(I_{10d}))^2 + (1 - \beta(I_{10d}))^2 + (1 - \alpha(I_{10d}))^2}$	r: the Pearson product-moment correlation coefficient between experiment values and the reference values (–) β: the ratio between the mean of the experiment values and the mean of the reference values (–) α: the ratio between the standard deviation of the experiment values and the standard deviation of the reference values (–) I_{10d}: vector of 10-day rolling mean of daily irrigation for experiment and reference (m^3,…,m^3)

Indicator name	Unit	Definition	Scale of calculation	Calculation	Variables
ET_S	(–)	Sum of AET divided by sum of CET of cultivated surfaces during crop growth cycles	Lumped	$\mathrm{ET_S} = \frac{\sum_{d=1}^{N_d} AET_d}{\sum_{d=1}^{N_d} CET_d}$	N_d: number of days (–) d: day index(–) AET_d: daily actual evapotranspiration of all cultivated simulation units (between sowing date and harvesting date) (m^3) CET_d: daily crop maximal evapotranspiration of all cultivated simulation units (between sowing date and harvesting date) (m^3)
ET_S_m	(–)	ET_S calculated monthly	Lumped	$\mathrm{ET_S} = \frac{\sum_{d=1}^{N_{d,m}} \mathrm{AET}_{d,m}}{\sum_{d=1}^{N_{d,m}} \mathrm{CET}_{d,m}}$	$N_{d,m}$: number of days in month m (–) d: day index(–) $\mathrm{AET}_{d,m}$: daily actual evapotranspiration of all cultivated simulation units (between sowing date and harvesting date) in month m (m^3) $\mathrm{CET}_{d,m}$: daily crop maximal evapotranspiration of all cultivated simulation units (between sowing date and harvesting date) in month m (m^3)

Varying factors in C and S experiments

Factor name	Definition	Values
θ	Deficit threshold for irrigation	0.25 × RAW 0.5 × RAW 0.75 × RAW RAW RAW + 0.25 × (TAW − RAW)
IA[a]	Irrigation amounts	Dr − θ: equivalent to C approach Dr: irrigation amount is equal to Dr and soil is totally refilled FixMeanC: irrigation amount is equal to a value defined for the crop based on MAELIA parameters
p_var	Depletion factor variation	1: depletion factor varies along time according to p_{init}, p_{mid}, p_{end} (See Appendix "The CropWat model") 0: depletion factor is constantly equal to p_{mid}
z_var	Root depth variation	1: root depth varies along time from minimal to maximal root depth 0: root depth is constantly equal to maximal root depth
IP	Irrigation period delimitation	1: irrigation period delimitation is injected for each crop and crops cannot be irrigated before and after this irrigation period delimitation 0: crops can be irrigated at any time during their crop cycle if θ is reached
CET	Crop modulation of potential evapotranspiration	1: CET is calculated as a modulation of Penman–Monteith PET 2: CET is considered equal to Penman–Monteith PET

[a]IA variations were simulated only for S experiments

Variance decomposition

Conceptual and Semi-plot approaches consist of balanced simulation plans, allowing for simple variance decomposition. Variance decomposition is used to estimate the sensitivity of IWR indicators to variation factors (θ, IP, etc.). For each indicator I and each factor F, we calculate partial variance $V_{I,F}$ with Eq. (9), with $N_{F,\exp}$ the number of experiments for each modality of F, N_F the number of modalities of F,$\overline{X_i}$ the mean value of F for modality I, $\overline{X_.}$ the mean value of F, and $N_{\exp}$ the total number of experiments:

$$V_{I,F} = N_{F,\exp} \frac{\sum_{i=1}^{N_F} (\overline{X_i} - \overline{X_.})^2}{N_{\exp} - 1}. \tag{9}$$

Moreover, sensitivity to first-order interactions is also calculated with Eq. (10). For a factor F_1 and a factor F_2, the sensitivity to their interaction is V_{I,F_1,F_2}, with $N_{F_1 \cap F_2,\exp}$ the number of experiments for each crossing modality of F_1 and F_2:

$$V_{I,F_1,F_2} = N_{F_1 \cap F_2,\exp} \frac{\sum_{j=1}^{N_{F_2}} \sum_{i=1}^{N_{F_1}} (\overline{X_{i,j}} - \overline{X_{.,j}} - \overline{X_{i,.}} + \overline{X_{.,.}})^2}{N_{\exp} - 1}. \tag{10}$$

Then partial variance can be divided by the total variance to get the contribution of a factor to total variability.

Annual irrigation hydrographs

To complete our work based on inter-annual indicators, annual hydrographs are produced for dry–hot (2009) and wet–cold (2013) years globally over the basin. First, we observe the impact of inter-annual variability on the duration of crop cycles in MAELIA, which is not taken into account in other approaches: in a dry–hot year, MAELIA irrigation ends before the other experiments (Fig. 11), contrary to a cold–wet year (Fig. 12). We observe a higher difficulty to reproduce MAELIA irrigation in spring when irrigation is low. The same difficulty might be found at the CZ scale. We observe that the Conceptual experiments produce abrupt dips contrary to the Semi-plot experiments, explaining the lower KGE values and the higher Var2 values for the Conceptual experiments at the lumped scale. Irrigation during a wet–cold year seems to be more sporadic for all experiments, which can probably be explained by summer rain events limiting the irrigation needs during some short periods.

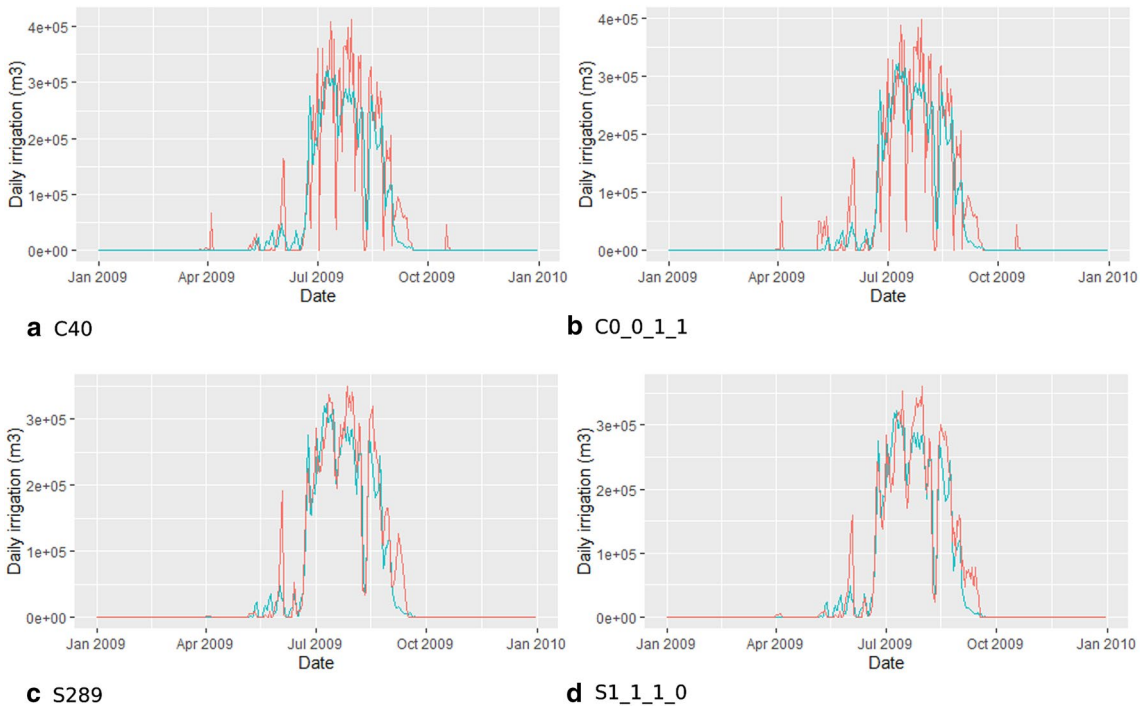


Fig. 11 Comparison between CropWat experiments daily irrigation (salmon) and MAELIA reference irrigation (turquoise) for the year 2009 (dry) globally over the basin. C40 (**a**) corresponds to the Conceptual experiment yielding the best KGE value without varCrop modality; C0_0_1_1 (**b**) corresponds to the Conceptual experiment yielding the best KGE value with varCrop modality; S289 (**c**) corresponds to the Semi-plot experiment yielding the best KGE value without varCrop modality; S1_1_1_0 (**d**) corresponds to the Semi-plot experiment yielding the best KGE value with varCrop modality

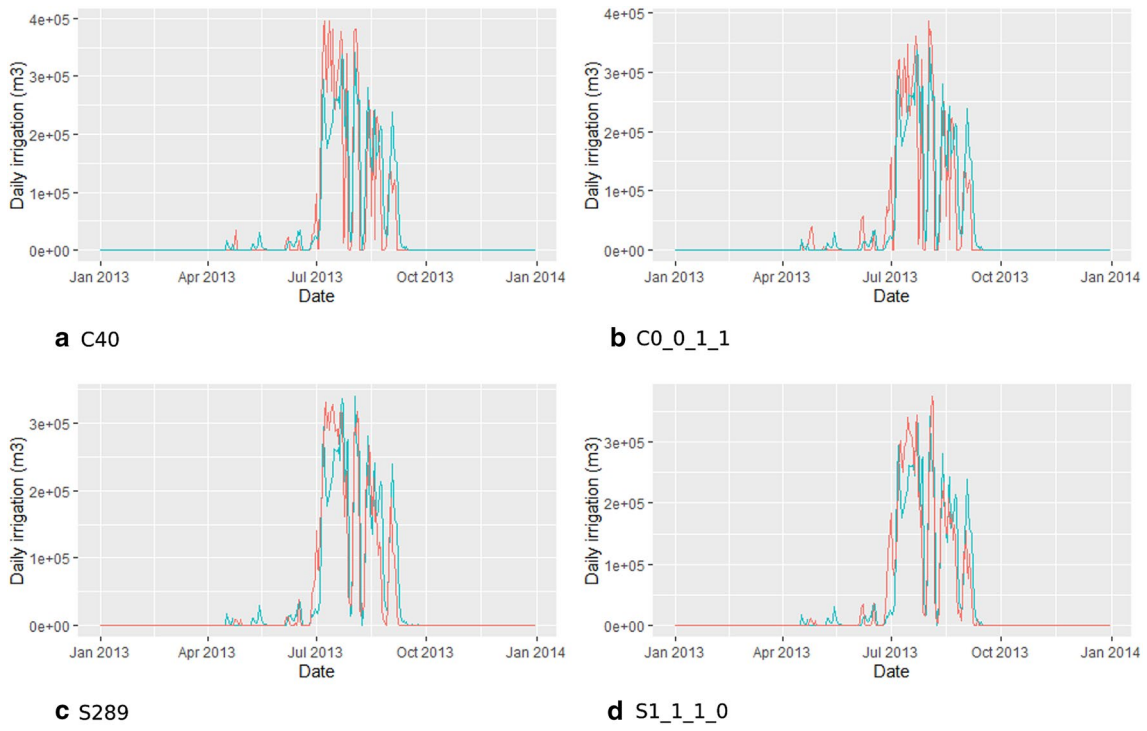


Fig. 12 Comparison between CropWat experiments daily irrigation (salmon) and MAELIA reference irrigation (turquoise) for the year 2013 (wet) globally over the basin. C40 (**a**) corresponds to the Conceptual experiment yielding the best KGE value without varCrop modality; C0_0_1_1 (**b**) corresponds to the Conceptual experiment yielding the best KGE value with varCrop modality; S289 (**c**) corresponds to the Semi-plot experiment yielding the best KGE value without varCrop modality; S1_1_1_0 (**d**) corresponds to the Semi-plot experiment yielding the best KGE value with varCrop modality

Impact of IA modalities on Var2 and *Q*_dispersion

Figure 13 shows the high influence of IA variation factor on Var2 and *Q*_dispersion indicators.

Impact of factor modalities on indicators

The impact of the different modalities of each factor on indicators is summarized in Fig. 14, compared with the MAELIA benchmark indicator values. The indicators for annual irrigation (I) and number of irrigated days (N) increase if θ decreases. Indeed, if θ is higher, irrigation is triggered for higher values of Dr. As a consequence, irrigation is triggered less frequently in simulation units and later in the year. I and N are lower for modality 1 of IP than for modality 0, since for modality 1, irrigation can only be triggered during specific periods for each crop. I and N are lower for modality 1 of CET. Indeed, the Kc curves for modality 1 of CET result in globally lower evapotranspiration than evapotranspiration estimated from PET directly in modality 0. A higher evapotranspiration leads to an increase in instantaneous IWR, resulting in increased annual irrigation and number of

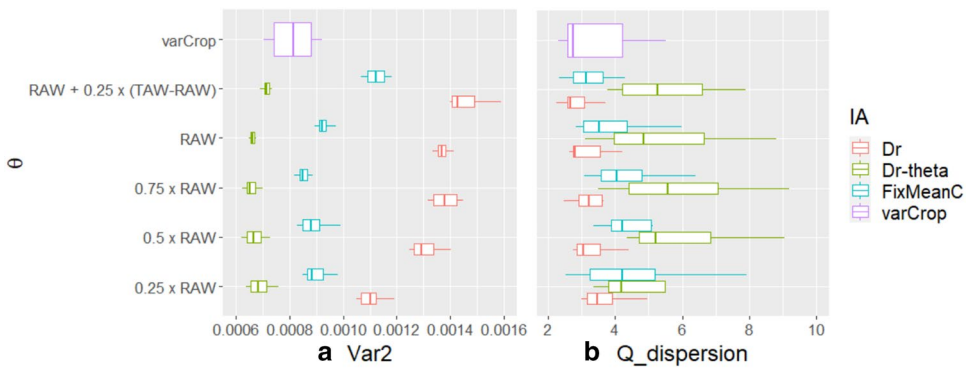


Fig. 13 Impacts of automatic irrigation parameters on daily irrigation variability for Semi-plot experiments. IA modalities have a strong impact on Var2 (**a**) and *Q*_dispersion (**b**) values

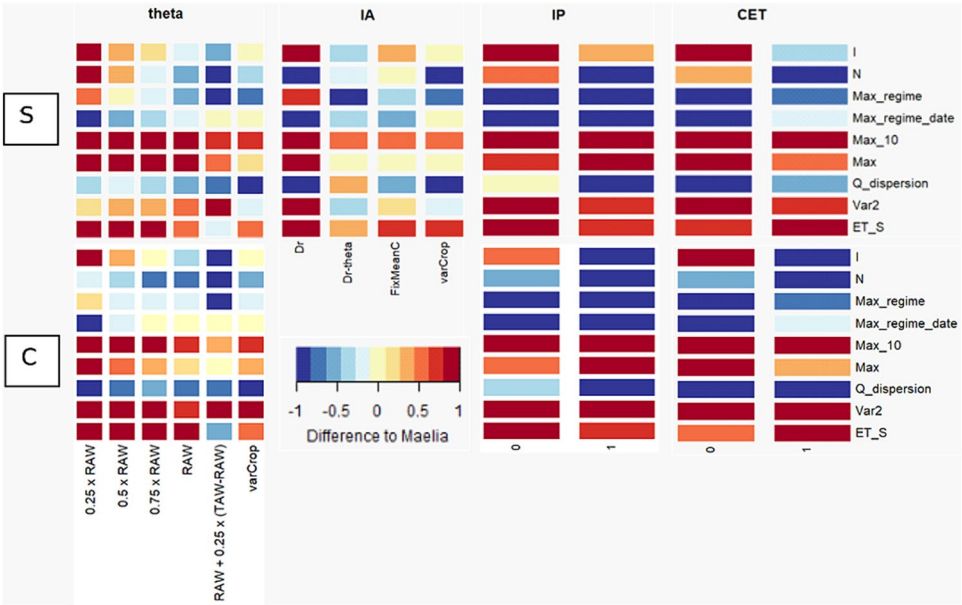


Fig. 14 Impact of the modalities of each factor on indicators compared with their reference values. The mean indicator value was calculated for each modality of each factor, then compared with the reference value (MAELIA). Differences between mean values for each modality and the reference value were then divided by the maximum absolute difference value for each indicator to get a relative variation between −1 and +1. Red: the mean modality value exceeds the reference value; blue: the mean modality value is below the reference value; yellow: the mean modality value is equal to the reference value. The color intensities are related to the variance of each factor separately, not to the total variance of all experiments. Consequently, some colors might be intense, but the total impact of this modality might remain relatively low compared to total variance. For the evaluation the partial effect of a variation factor, please refer to Fig. 4 (color figure online)

days of irrigation. For IA modalities, I is minimal and below the reference for Dr-θ, followed by varCrop near the reference value, by FixMeanC, and finally by Dr, both exceeding the reference value. It is clear that nominal amounts are higher for the Dr modality than for the Dr-θ modality, and this result shows that irrigation amounts brought with the Dr modality are globally higher than FixMeanC irrigation amounts. N is maximal for FixMeanC, followed by Dr-θ, by VarCrop, and by Dr. This observation can be linked to the explanation given for I: If nominal irrigation amounts are higher in simulation units, the frequency of irrigation is lower. Indeed, after an irrigation event in a simulation unit, if the irrigation amount was low, Dr after irrigation remains relatively high, and θ will be reached again after a shorter time than for a higher irrigation amount.

The maximum of irrigation for 10-day rolling periods on the mean annual regime curve (Max_regime) and its date of occurrence (Max_regime_date) are analyzed here. Max_regime_date is reached later for high values of θ. Indeed, with higher θ, irrigation is triggered later in simulation units, which results in a lag for the period of maximal irrigation. Max_regime decreases if θ increases. For lower values of θ, θ might be reached by more simulation units simultaneously, leading to higher values of irrigation during the maximum irrigation period. Max_regime is higher than the reference value for the Dr modality of IA, and lower than the reference value for the other modalities, particularly the Dr-θ modality. As for annual irrigation, it is clear that nominal amounts are higher for the Dr modality than for the Dr-θ modality, leading to higher lumped irrigation amounts during the period of maximal irrigation. Again, as for annual irrigation, the difference in Max_regime between the Dr and FixMeanC modalities can be explained by higher irrigation amounts with the Dr modality than with the FixMeanC modality during the period of maximal irrigation. Finally, we observe that Max_regime is slightly higher for modality 1 of CET. During the annual maximal irrigation period, some major crops have a Kc value higher than 1.0, leading to higher evapotranspiration than modality 0 of CET, which might lead to an increase in IWR during this specific period. Max_regime_date is seen to occur later for modality 1 of CET. During the period preceding the maximal irrigation period, evapotranspiration is globally lower with modality 1 of CET than evapotranspiration estimated with modality 0 of CET, leading to a temporal dephasing of irrigation-triggering conditions.

The mean annual maximum of daily (Max) irrigation and 10-day (Max_10) irrigation indicators are both globally

higher than the reference. Max_10 and Max slightly decrease with higher values of θ, in a similar manner to the Max_ regime. For S experiments, Max_10 and Max are higher for the Dr modality than for the other three modalities.

Regarding daily variability, indicators Var2 and Q_dispersion have opposite behavior, showing that these indicators measure different aspects of temporal variability. For C experiments, Var2 remains globally superior to the reference value, showing that C experiments have a narrow higher daily variability than reference and S experiments (Appendix "Annual irrigation hydrographs"). However, Q_dispersion is globally lower than for the reference experiment. This result can be obtained for simulation showing unstable variations between successive days, for example, increasing and decreasing very frequently, but keeping lumped irrigation values in the same order of magnitude. On the contrary, a theoretical experiment with a regular increase in irrigation from day to day would lead to a low value of Var2, but a high value of Q_dispersion.

Regarding crop water stress, the ET_S indicator decreases (meaning higher crop water stress) with higher modalities of θ. Obviously, with higher values of θ, Dr can be higher and as a consequence crop water stress too. However, we notice that only the modality $\mathrm{RAW} + 0.25 \times (\mathrm{TAW} - \mathrm{RAW})$, consisting of deficit irrigation, leads to lower ET_S (higher crop water stress) than the reference experiment. This can be explained by the difference in AET formulation between AqYield and CropWat. In AqYield, water stress is a smooth function of soil water deficit, with crop water starting for a zero deficit and progressively accelerating with an increasing deficit. In CropWat, there is a threshold effect since crop water stress begins when the deficit reaches RAW and is quickly high. Moreover, the calibration methodology of the Kc curve might also partly explain these differences (see Appendix "CropWat crop coefficients adjustment"). ET_S is higher (lower crop water stress) with modality 1 of CET. Indeed, in this case, the Kc curves result in globally lower evapotranspiration than evapotranspiration estimated from PET directly, and a lower evapotranspiration might lead to a lower crop water stress if conditions of irrigation are not triggered. ET_S is lower (higher crop water stress) for modality 1 of IP. Indeed, for this modality, irrigation cannot be triggered outside irrigation periods, leading to higher crop water stress. For IA impacts, ET_S is minimal for Dr-θ but still higher than the reference, followed by varCrop, Fix_ Mean_C, and then Dr: the higher the irrigation amounts for the same crop evapotranspiration, the lower the crop water stress.

Acknowledgements We are very grateful to Vazken Andreassian, Charles Perrin, and Gaëlle Tallec for their advice and for their re-reading of this manuscript, and to Renaud Misslin for his support on the MAELIA platform. We are also thankful to Météo-France for providing climate data. Finally, we thank the French Agriculture Ministry and Sorbonne University for supporting the PhD of Myriam Soutif-Bellenger.

Author contributions MS-B designed the experimental protocol and the analysis strategy for the results. The complete protocol and analysis strategy for the results were amended and validated by GT, OT and JV. MS-B coded the Conceptual and Semi-plot experiments and performed the analysis. JV coded outputs of the MAELIA platform and supervised the use of MAELIA platform. GT supervised the Conceptual and Semi-plot experiments and analysis. OT suggested supplementary analysis. The article was written by MS-B and corrected and amended by GT and OT.

Funding This work was supported by Agence de l'eau Rhin-Meuse (REG-2020-00735) and CLIMAE metaprogram of INRAE (MP-P02051).

Availability of data and materials The datasets generated during and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Declarations

Conflict of interest The authors have no relevant financial or non-financial interests to disclose.

Ethical approval Not applicable.

Consent to participate Not applicable.

Consent to publish Not applicable.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/.

References

Allain S, Ndong GO, Lardy R, Leenhardt D (2018) Integrated assessment of four strategies for solving water imbalance in an agricultural landscape. Agron Sustain Dev 38:60. https://doi.org/10.1007/s13593-018-0529-z

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) FAO irrigation and drainage paper No. 56. Rome Food Agric. Organ. U. N. 56, p 156

Battude M (2017) Estimation des rendements, des besoins et consommations en eau du maïs dans le Sud—Ouest de la France: apport de la télédétection à hautes résolutions spatiale et temporelle. Université Toulouse 3 Paul Sabatier, Toulouse

Bergez JE, Leenhardt D, Colomb B, Dury J, Carpani M, Casagrande M, Charron MH, Guillaume S, Therond O, Willaume M (2012) Computer-model tools for a better agricultural water management:

tackling managers' issues at different scales—a contribution from systemic agronomists. Comput Electron Agric 86:89–99. https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.04.005

Bouras E, Jarlan L, Khabba S, Er-Raki S, Dezetter A, Sghir F, Tramblay Y (2019) Assessing the impact of global climate changes on irrigated wheat yields and water requirements in a semi-arid environment of Morocco. Sci Rep 9:19142. https://doi.org/10.1038/s41598-019-55251-2

Collet L (2013) Capacité à satisfaire la demande en eau sous contraintes climatique et anthropique sur un bassin méditerranéen (Thèse de doctorat). Université Montpellier 2, Montpellier

Collet L, Ruelland D, Borrell-Estupina V, Dezetter A, Servat E (2013) Integrated modelling to assess long-term water supply capacity of a meso-scale Mediterranean catchment. Sci Total Environ 461–462:528–540. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.036

Collet L, Ruelland D, Estupina VB, Dezetter A, Servat E (2015) Water supply sustainability and adaptation strategies under anthropogenic and climatic changes of a meso-scale Mediterranean catchment. Sci Total Environ 536:589–602. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.093

Constantin J, Willaume M, Murgue C, Lacroix B, Therond O (2015) The soil-crop models STICS and AqYield predict yield and soil water content for irrigated crops equally well with limited data. Agric for Meteorol 206:55–68. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.02.011

Dehghanipour AH, Schoups G, Zahabiyoun B, Babazadeh H (2020) Meeting agricultural and environmental water demand in endorheic irrigated river basins: a simulation-optimization approach applied to the Urmia Lake basin in Iran. Agric Water Manag 241:106353. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106353

Di Paola A, Valentini R, Santini M (2016) An overview of available crop growth and yield models for studies and assessments in agriculture: overview of crop models for agriculture. J Sci Food Agric 96:709–714. https://doi.org/10.1002/jsfa.7359

Elliott J, Deryng D, Müller C, Frieler K, Konzmann M, Gerten D, Glotter M, Flörke M, Wada Y, Best N, Eisner S, Fekete BM, Folberth C, Foster I, Gosling SN, Haddeland I, Khabarov N, Ludwig F, Masaki Y, Olin S, Rosenzweig C, Ruane AC, Satoh Y, Schmid E, Stacke T, Tang Q, Wisser D (2014) Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. Proc Natl Acad Sci 111:3239–3244. https://doi.org/10.1073/pnas.1222474110

Funes I, Savé R, de Herralde F, Biel C, Pla E, Pascual D, Zabalza J, Cantos G, Borràs G, Vayreda J, Aranda X (2021) Modeling impacts of climate change on the water needs and growing cycle of crops in three Mediterranean basins. Agric Water Manag 249:106797. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106797

Gorguner M, Kavvas ML (2020) Modeling impacts of future climate change on reservoir storages and irrigation water demands in a Mediterranean basin. Sci Total Environ 748:141246. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141246

Hori T, Sugimoto T, Nakayama M, Ichikawa Y, Shiiba M (2008) Estimation of field irrigation water demand based on lumped kinematic wave model considering soil moisture balance. Phys Chem Earth Parts ABC 33:376–381. https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.02.013

INRA (2018) Base de Données Géographique des Sols de France à 1/1 000 000 version 3.2.8.0, 10/09/1998. https://doi.org/10.15454/BPN57S

IPCC (2014) Summary for policymakers. In: Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds) Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jie F, Fei L, Li S, Hao K, Liu L, Peng Y (2022) Effects on net irrigation water requirement of joint distribution of precipitation and reference evapotranspiration. Agriculture 12:801. https://doi.org/10.3390/agriculture12060801

Kolokytha E, Malamataris D (2020) Integrated water management approach for adaptation to climate change in highly water stressed basins. Water Resour Manag 34:1173–1197. https://doi.org/10.1007/s11269-020-02492-w

Martin E, Gascoin S, Grusson Y, Murgue C, Bardeau M, Anctil F, Ferrant S, Lardy R, Le Moigne P, Leenhardt D, Rivalland V, Sánchez Pérez J-M, Sauvage S, Therond O (2016) On the use of hydrological models and satellite data to study the water budget of river basins affected by human activities: examples from the Garonne Basin of France. Surv Geophys 37:223–247. https://doi.org/10.1007/s10712-016-9366-2

Mazzega P, Therond O, Debril T, March H, Sibertin-Blanc C, Lardy R, Santana D (2014) Critical multi-level governance issues of integrated modelling: an example of low-water management in the Adour-Garonne basin (France). J Hydrol 519:2515–2526. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.043

McInerney D, Thyer M, Kavetski D, Githui F, Thayalakumaran T, Liu M, Kuczera G (2018) The importance of spatiotemporal variability in irrigation inputs for hydrological modeling of irrigated catchments. Water Resour Res 54:6792–6821. https://doi.org/10.1029/2017WR022049

MEDDTL (2011) Circulaire du 18 mai 2011 relative aux mesures exceptionnelles de limitation ou de suspension des usages de l'eau en période de sécheresse

MTES, MAA (2019) Instruction du Gouvernement du 7 mai 2019 relative au projet de territoire pour la gestion de l'eau 19

Multsch S, Exbrayat J-F, Kirby M, Viney NR, Frede H-G, Breuer L (2015) Reduction of predictive uncertainty in estimating irrigation water requirement through multi-model ensembles and ensemble averaging. Geosci Model Dev 8:1233–1244. https://doi.org/10.5194/gmd-8-1233-2015

Murgue C, Lardy R, Vavasseur M, Burger-Leenhardt D, Therond O (2014) Fine spatio-temporal simulation of cropping and farming systems effects on irrigation withdrawal dynamics within a river basin. In: Ames DP, Quinn NWT, Rizzoli AE (eds) Presented at the 7th int. congress on Env. Modelling and Software (iEMSs), San Diego, CA, USA, p 10

Murgue C, Therond O, Leenhardt D (2015) Toward integrated water and agricultural land management: participatory design of agricultural landscapes. Land Use Policy 45:52–63. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.01.011

Murgue C, Therond O, Leenhardt D (2016) Hybridizing local and generic information to model cropping system spatial distribution in an agricultural landscape. Land Use Policy 54:339–354. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.02.020

Neilsen D, Bakker M, Van der Gulik T, Smith S, Cannon A, Losso I, Warwick Sears A (2018) Landscape based agricultural water demand modeling—a tool for water management decision making in British Columbia, Canada. Front Environ Sci 6:74. https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00074

Rinaudo J-D, Maton L, Terrason I, Chazot S, Richard-Ferroudji A, Caballero Y (2013) Combining scenario workshops with modeling to assess future irrigation water demands. Agric Water Manag 130:103–112. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.08.016

Rouhi Rad M, Araya A, Zambreski ZT (2020) Downside risk of aquifer depletion. Irrig Sci 38:577–591. https://doi.org/10.1007/s00271-020-00688-x

Smith M (1992) CROPWAT: a computer program for irrigation planning and management. Version 5.7. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, p 1992

Smith P, Calanca P, Fuhrer J (2012) A simple scheme for modeling irrigation water requirements at the regional scale applied to an Alpine River Catchment. Water 4:869–886. https://doi.org/10.3390/w4040869

Tan M (2019) Mismatch between crop water requirements and irrigation in Heihe River Basin, Northwestern China. Irrig Sci 37:95–103. https://doi.org/10.1007/s00271-018-0608-6

Therond O, Sibertin-Blanc C, Lardy R, Gaudou B, Balestrat M, Hong Y, Louail T, Nguyen VB, Panzoli D, Sanchez-Pérez J-M, Sauvage S, Taillandier P, Vavasseur M, Mazzega P (2014) Integrated modelling of social-ecological systems: the MAELIA high-resolution multi-agent platform to deal with water scarcity problems. In: Ames DP, Quinn NWT, Rizzoli AE (eds) Presented at the 7th int. congress on Env. Modelling and software (iEMSs), San Diego, CA, USA, p 8

Uniyal B, Dietrich J (2019) Modifying automatic irrigation in SWAT for plant water stress scheduling. Agric Water Manag 223:105714. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105714

Vidal J-P, Martin E, Franchistéguy L, Baillon M, Soubeyroux J-M (2010) A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. Int J Climatol 30:1627–1644. https://doi.org/10.1002/joc.2003

Wada Y, Wisser D, Eisner S, Flörke M, Gerten D, Haddeland I, Hanasaki N, Masaki Y, Portmann FT, Stacke T, Tessler Z, Schewe J (2013) Multimodel projections and uncertainties of irrigation water demand under climate change: irrigation demand under climate change. Geophys Res Lett 40:4626–4632. https://doi.org/10.1002/grl.50686

Wan W, Zhao J, Li H-Y, Mishra A, Hejazi M, Lu H, Demissie Y, Wang H (2018) A holistic view of water management impacts on future droughts: a global multimodel analysis. J Geophys Res Atmos 123:5947–5972. https://doi.org/10.1029/2017JD027825

Wanders N, Wada Y (2015) Human and climate impacts on the 21st century hydrological drought. J Hydrol Drought Process Model Mitig 526:208–220. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.047

Wriedt G, Van der Velde M, Aloe A, Bouraoui F (2009) Estimating irrigation water requirements in Europe. J Hydrol 373:527–544. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.05.018

Zaccaria D, Lamaddalena N, Neale CMU, Merkley GP (2013) Simulation of peak-demand hydrographs in pressurized irrigation delivery systems using a deterministic–stochastic combined model. Part II: model applications. Irrig Sci 31:193–208. https://doi.org/10.1007/s00271-011-0308-y

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

3 Apport des résultats de l'article pour la suite des travaux de thèse

Les travaux présentés dans l'article nous permettent de confirmer la possibilité d'utiliser une modélisation plus simple qu'une modélisation très explicite telle que MAELIA pour estimer la demande en eau agricole. Dans la suite des travaux de thèse, nous réutiliserons donc la modélisation développée, issue de CropWat, dans le développement d'une modélisation intégrée agro-hydrologique parcimonieuse. De plus, ces travaux mettent en évidence la nécessité de prendre en compte les incertitudes liées à la modélisation de la demande agricole, et la possibilité de s'appuyer sur un jeu de plusieurs paramétrisations des seuils et des dosages d'irrigation pour prendre en compte ces incertitudes sur la demande en eau d'irrigation.

A retenir :

Le modèle s'appuyant sur CropWat pour simuler l'irrigation paraît pouvoir être utilisé pour simuler l'irrigation à l'échelle d'un bassin versant de façon satisfaisante.

On note une importante variabilité selon les règles de déclenchement de l'irrigation, qui nous permet de pouvoir être utilisée pour prendre en compte les incertitudes de l'irrigation effectivement demandée par les agriculteurs.

Chapitre VI

Développement d'une modélisation intégrée agro-hydrologique "GRcrop"

Avant-propos :

Nous développons une modélisation agro-hydrologique : dans ce chapitre, nous décrivons le fonctionnement de la modélisation agro-hydrologique développée, que nous appellerons GRcrop. Pour adopter une approche parcimonieuse, nous avons choisi de nous appuyer sur le modèle hydrologique GR pour la modélisation de la ressource en eau et sur le modèle agronomique CropWat pour la modélisation de la demande en eau, décrit dans le chapitre précédent. Le couplage entre la modélisation des débits et de la demande est effectué via le package airGRiwrm (DORCHIES et al., 2021). Nous décrivons également l'implémentation de ce modèle sur les deux zones d'étude : le bassin versant aval de l'Aveyron et le bassin versant de la Seille.

1 Modèle de référence : La modélisation agro-socio-hydrologique multi-agents MAELIA

Nous prévoyions initialement d'effectuer des simulations à la fois avec la modélisation parcimonieuse développée dans le cadre de cette thèse et avec MAELIA, une plateforme de modélisation intégrée agro-hydologique modélisant explicitement le comportement des agriculteurs et s'appuyant sur le modèle hydrologique SWAT (THEROND et al., 2014). Néanmoins, MAELIA, dans sa version intégrée et suite à de nouveaux développements effectués par le LAE pour répondre aux objectifs de la thèse, a montré des dysfonctionnements sur le bassin versant de l'Aveyron aval. Le développement de MAELIA dans sa version intégrée n'a de plus pas été achevé à temps sur le bassin versant de la Seille pour être considéré dans le présent manuscrit. Nous n'avons ainsi finalement utilisé que la modélisation de la demande en eau d'irrigation sur le bassin versant aval de l'Aveyron, telle que présentée dans le Chapitre V et l'article (SOUTIF-BELLENGER et al., 2023). Les experts en agronomie du LAE ont néanmoins été largement sollicités afin de déterminer certains éléments de la modélisation de la demande en eau ainsi que pour modéliser la gestion des retenues.

2 Les modèles du génie rural (GR)

2.1 La modélisation GR globale

Les modèles GR sont des modèles hydrologiques de bassin versant conceptuels et globaux dans leur version originelle (Section II.3.2). Ces modèles sont parcimonieux : ils présentent une faible complexité, avec un nombre restreint de paramètres libres et de données d'entrée nécessaires. Ils fonctionnent en effet avec pour seules données d'entrée une chronique de précipitations et d'évapotranspiration potentielle, au même pas de temps que celui de simulation. Ces modèles nécessitent également une chronique de débits observés lorsque l'on souhaite réaliser un calage des paramètres et fonctionner de façon optimale.

Différentes structures de modèles GR ont été développées selon le pas de temps modélisé (annuel, mensuel, journalier ou horaire, voire infra-horaire). Au pas de temps annuel, il n'est pas nécessaire de répartir précisément dans le temps l'eau issue du bilan entre précipitations et évapotranspiration, ainsi une fonction de production, déterminant quelle proportion de la précipitation s'évapore et quelle proportion ruisselle, est suffisante. À des pas de temps plus fins, les modèles GR reposent sur l'association d'une fonction de production et d'une fonction de routage, qui elle permet de répartir dans le temps l'eau issue de la fonction de production. Ces fonctions consistent en l'association de réservoirs reliés par des fonctions de transfert.

Pour chaque pas de temps modélisé, il existe des variantes des modèles GR, admettant une certaine complexification quand celle-ci permet une amélioration des performances de modélisation. Nous souhaitons utiliser un modèle journalier, afin que l'approche développée permette de calculer des indicateurs d'étiage classiquement utilisés par les opérateurs, et faire dialoguer avec suffisamment de précision la ressource et la demande. Nous avons sélectionné le modèle GR5J (LE MOINE, 2008), qui est une variante du modèle journalier GR4J (EDIJATNO et MICHEL, 1989), car il permet de mieux représenter les étiages que le modèle GR4J, tout en demeurant très parcimonieux. Le modèle GR5J possède cinq paramètres à optimiser (Figure VI.1) :

- **X1** : la **capacité maximale du réservoir de production (mm)**, réservoir qui permet de déterminer l'évapotranspiration et le ruissellement. Un réservoir de production de capacité plus élevée va pouvoir stocker plus de précipitations, ce qui peut s'assimiler à la capacité des sols à retenir les précipitations, par exemple par infiltration, plutôt que favoriser un ruissellement de surface vers les cours d'eau. Les précipitations non stockées vont alimenter directement la fonction de routage ;
- **X2** : le **coefficient d'échange souterrain (mm j^{-1})**, qui permet d'apporter ou de perdre de l'eau vers les nappes profondes et les bassins voisins ;
- **X3** : la **capacité maximale à un jour du réservoir de routage (mm)**, réservoir qui permet de déterminer la réactivité d'un cours d'eau. Plus la capacité est élevée, plus le réservoir stockera et retiendra l'eau avant son arrivée à l'exutoire. Au contraire, des valeurs faibles de ce paramètre mèneront à des simulations de débits très réactives aux précipitations ;
- **X4** : le **temps de base de l'hydrogramme unitaire (j)**, qui permet de répartir dans le temps l'eau produite par la fonction de production ;
- **X5** : le **seuil d'inversion du sens de l'échange souterrain (-)**. C'est ce paramètre qui permet de distinguer le modèle GR4J du modèle GR5J. Dans le modèle GR4J, le sens des échanges souterrains est constant. Le paramètre X5 permet d'inverser le sens des échanges souterrains au cours de la simulation en fonction du niveau atteint dans le réservoir de routage.

2.2 La modélisation GR semi-distribuée

Si les modèles GR ont initialement été "pensés" pour fonctionner de façon globale, i.e. à l'échelle du bassin versant (à ne pas confondre avec les modèles hydrologiques appliqués sur le globe entier), des méthodes ont été développées de façon à pouvoir les utiliser de façon semi-distribuée sur des unités représentant des sous-bassins versants. C'est le cas du modèle GRSD (GR semi-distribué) développé par LOBLIGEOIS et al. (2014), qui permet de relier plusieurs sous-bassins liés par une dépendance amont-aval. Ces sous-bassins sont alors modélisés chacun par un modèle GR global, dont les débits sont routés en aval par une fonction de routage

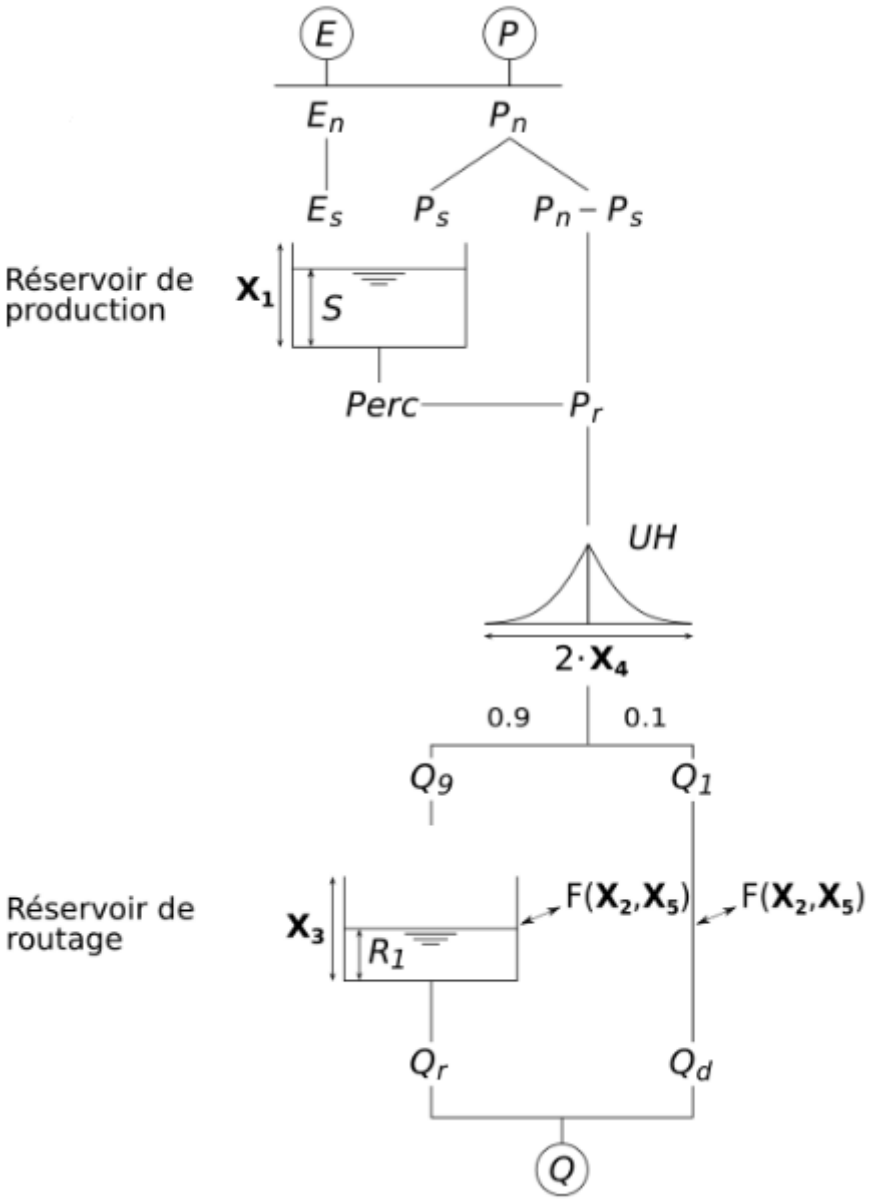


FIGURE VI.1 – Structure du modèle GR5J (LE MOINE, 2008)

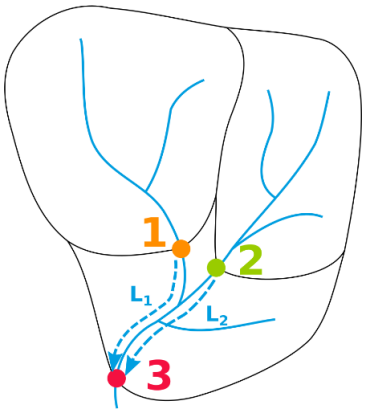
(en fait un simple retard) associée à un paramètre de célérité (Figure VI.2.2). Nous reprendrons cette structure de base dans ce travail pour coupler avec plus de précision spatiale les débits et les prélèvements, i.e. en les localisant dans le sous-bassin où ils se situent, et pour identifier les secteurs de tension sur la ressource.

2.3 Le fonctionnement du package R airGRiwrm

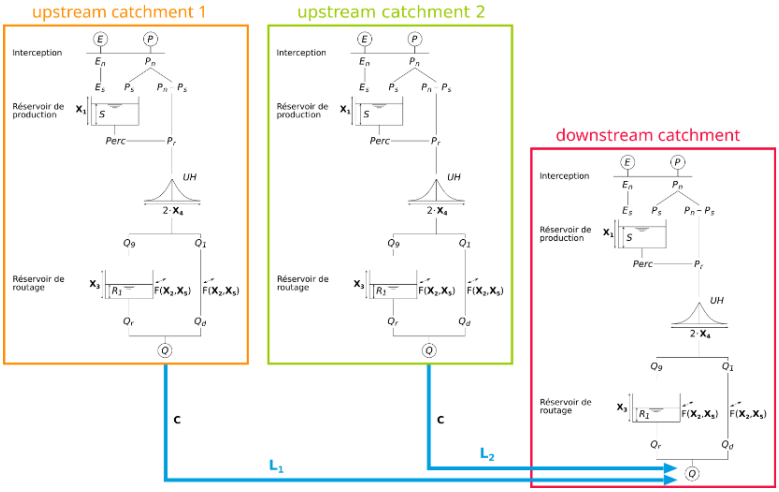
Le package airGRiwrm (DORCHIES et al., 2021 ; DORCHIES, 2022) est un outil récent qui se base sur les fonctions proposées dans le package airGR qui est largement utilisé pour la modélisation hydrologique à l'aide des modèles GR globaux. Ce nouveau package permet d'automatiser la mise en place de la structure d'un modèle GR semi-distribué [1].

Par ailleurs, ce package donne la possibilité d'inclure dans le modèle de façon claire et facilitée des prises et restitutions d'eau de surface. De même que pour les débits de l'amont vers l'aval, les influences sont alors transférées avec un retard selon le paramètre de célérité du bassin sur lequel elles sont localisées, et en fonction de leur distance à l'exutoire (Figure VI.3).

1. https://hydrogr.github.io/airGR/page_publications.html#Use_and_mention_of_airGR

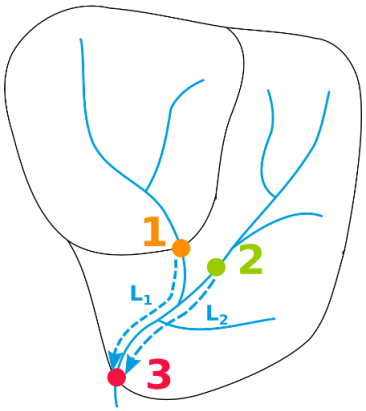


(a) Sous-bassins versants : les bassins versants 1 et 2 sont des sous-bassins versants amont du bassin versant 3 ; l'exutoire du bassin 1 se situe à une distance hydraulique L1 de l'exutoire du bassin 3 ; l'exutoire du bassin 2 se situe à une distance hydraulique L2 de l'exutoire du bassin 3

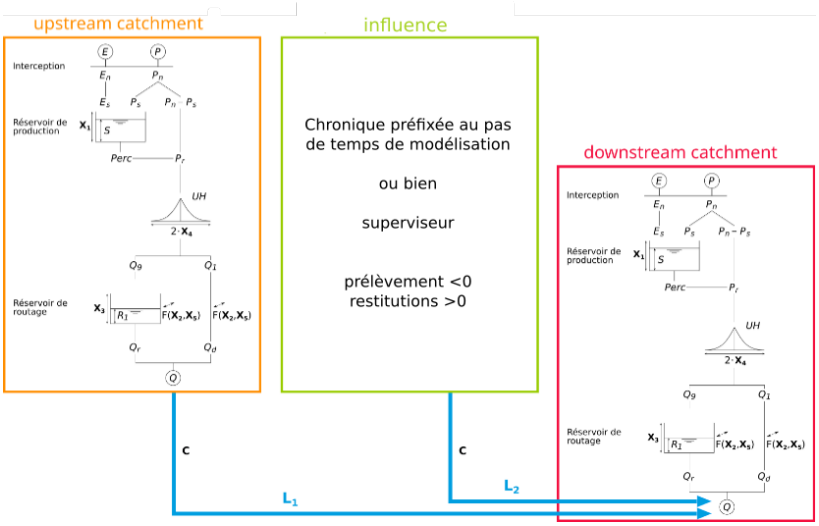


(b) Modélisation semi-distribuée des sous-bassins versants : Trois modèles hydrologiques permettent de simuler des chroniques de débit aux points 1, 2 et 3. Les débits simulés sur les bassins 1 et 2 sont propagés jusqu'à l'exutoire du bassin 3 avec un retard selon leur distance hydraulique à l'exutoire du bassin 3 et la célérité (c) caractérisant le sous-bassin 3 ; le débit simulé sur le sous-bassin 3 est le débit partiel constitué uniquement de l'eau produite sur la surface excluant les bassins amont ; la somme des débits des bassins amont 1 et 2, avec un retard, et du sous-bassin 3 constitue le débit simulé à l'exutoire du bassin 3.

FIGURE VI.2 – Représentation schématique de la modélisation GR semi-distribuée (figure adaptée d'une présentation de David Dorchies)



(a) Sous-bassins versants et influence : le bassin versant 1 est un sous-bassin versant amont du bassin versant 3 ; une influence impacte les débits au point 2 ; l'exutoire du bassin 1 se situe à une distance hydraulique L1 de l'exutoire du bassin 3 ; le point d'influence 2 se situe à une distance hydraulique L2 de l'exutoire du bassin 3



(b) Modélisation semi-distribuée des sous-bassins versants : Deux modèles hydrologiques permettent de simuler des chroniques de débit aux points 1 et 3. Le débit simulé sur le bassin 1 est propagé jusqu'à l'exutoire du bassin 3 selon sa distance hydraulique L1 à l'exutoire du bassin 3 et la célérité caractérisant le sous-bassin 3 ; l'influence au pas de temps de modélisation est propagée jusqu'à l'exutoire du bassin 3 avec un retard selon sa distance hydraulique L2 à l'exutoire du bassin 3 et la célérité (c) caractérisant le sous-bassin 3 ; le débit simulé sur le sous-bassin 3 est le débit partiel constitué uniquement de l'eau produite sur la surface excluant la surface du bassin amont 1 ; la somme du débit du bassins amont 1, de l'influence au point 2, tous les deux retardés, et du débit du sous-bassin 3 constitue le débit simulé à l'exutoire du bassin 3.

FIGURE VI.3 – Représentation schématique de la modélisation airGRiwrm avec prise en compte d'une influence (figure adaptée d'une présentation de David Dorchies)

Si les prélèvements et rejets sont connus ou obtenus par pré-traitement à un pas de temps identique à celui de la modélisation hydrologique, ils peuvent être directement pris en compte dans le modèle. Une chronique de prélèvements ou de rejets, associée à un point d'influence caractérisé par sa distance à l'exutoire, permet ainsi de répercuter ces prélèvements ou rejets sur les débits simulés à l'aval selon le paramètre de célérité du sous-bassin concerné, mais aussi de les répercuter sur l'ensemble des simulations de débits situées encore plus en aval jusqu'à l'exutoire du bassin versant.

Par ailleurs, airGRiwrm permet de définir des environnements R appelés « superviseurs », qui ont pour objectif de consulter les variables du modèle, notamment un débit à une station donnée. Des objets « contrôleurs » sont associés aux superviseurs, permettant de définir des règles de gestion dépendant des variables suivies par les superviseurs. Par exemple, il peut s'agir de déclencher un débit de soutien d'étiage depuis un barrage (via un contrôleur) quand le débit atteint à une station de référence (connu via un superviseur) devient trop faible. Nous avons choisi de nous appuyer sur airGRiwrm avec superviseur pour pouvoir modéliser des règles de gestion en fonction des débits simulés, et ainsi modéliser une "gestion intégrée des bassins versants" (Section II.4).

3 Développement d'une modélisation intégrée parcimonieuse : "GRcrop"

Nous souhaitons développer une modélisation intégrée agro-hydrologique parcimonieuse, couplant, grâce à airGRiwrm, une modélisation hydrologique GR, un modèle de demande en eau développé dans la Section V et une gestion intégrée.

Notre état de l'art (Section II) a mis en avant la nécessité d'établir des arbitrages sur :

- la spatialisation du couplage ;
- la nature des compartiments hydrologiques mobilisés ;
- la modélisation du stockage de la ressource en eau ;
- les règles de limitation des prélèvements.

3.1 La spatialisation du couplage

Différentes entités sont définies. Elles sont récapitulées et leurs liens sont décrits dans la Figure VI.4.

3.1.1 Sous-bassins versants modélisés par un modèle GR (SBGR)

Le bassin à modéliser est tout d'abord divisé en sous-bassins au regard de stations jaugées. C'est sur ces entités que la simulation hydrologique GR est effectuée, avec propagation des débits des SBGR amont vers les SBGR aval. C'est aussi sur ces entités que les paramètres de GRSD sont optimisés.

3.1.2 Entités spatiales de disponibilité de l'eau (AWZ : Available water zone)

Sur chaque SBGR, un maillage plus fin définit les zones à l'échelle desquelles la demande et le stockage d'eau sont agrégés. Il s'agit en réalité de sous-bassins versants élémentaires dont l'exutoire du cours d'eau principal se situe à la confluence avec un autre cours d'eau également principal d'une autre AWZ, ou au niveau d'un exutoire de SBGR.

Chaque AWZ est caractérisée par sa distance par rapport à l'exutoire du SBGR auquel elle appartient. Les prélèvements pour l'irrigation directe ou pour le stockage sont ainsi calculés et agrégés pour chaque AWZ. La distance du prélèvement est prise en compte pour propager temporellement l'impact des prélèvements.

3.1.3 Entités agronomiques

Sur chaque AWZ, nous définissons les entités de modélisation agronomique de façon à distinguer, par sol [2] et climat homogène, les cultures, selon leur caractère irrigué ou non, éventuellement selon leur groupe de tour d'eau (Chapitre V, Figure VI.4 ci-dessous). De plus, nous avons séparé ces entités agronomiques selon le type de ressource en eau qu'elles mobilisent : surface (en rivière), ou bien eau stockée, qui peut elle-même être de différents types (Section VI.3.3). Ainsi, une entité agronomique va disposer d'une courbe de Kc influençant la capacité à évapotranspirer et d'une chronique d'irrigation qui lui seront spécifiques, selon son caractère irrigué, le groupe de tour d'eau et la disponibilité de la ressource mobilisée. La demande en eau d'irrigation est calculée selon les approches basées sur CropWat développées dans le Chapitre V.

3.2 Les compartiments hydrologiques mobilisés

Les modèles GR ne représentent explicitement que les débits simulés à l'exutoire des bassins versants simulés. Le package airGRiwrm ne permet ainsi que de répercuter l'impact de prélèvements et de rejets sur les débits à l'exutoire, avec un retard temporel pour prendre en compte la distance des influences par rapport à cet exutoire en fonction du paramètre de célérité du bassin versant influencé. Cela revient ainsi à modéliser des prélèvements uniquement dans les eaux de surface d'un bassin versant. **Le modèle GRcrop développé n'est donc pas capable, à l'heure actuelle, de représenter explicitement les prélèvements souterrains.**

De plus, le package airGRiwrm ne permet pas, à l'heure actuelle, de modifier dynamiquement les données d'entrée de précipitations et d'évapotranspiration au regard de l'irrigation apportée aux parcelles irriguées. De surcroît, la prise en compte de l'irrigation comme apport d'eau dans la fonction de production hydrologique nécessiterait de distribuer la modélisation hydrologique par entité irriguée homogène. **Le modèle développé n'est donc qu'un modèle de dialogue entre la ressource et la demande, et ne prend pas en compte les rétroactions de l'irrigation sur la fonction de production hydrologique.** Le couplage n'est donc pas aussi complet que l'on pourrait le souhaiter, mais permet tout de même de s'attaquer aux questions de recherche soulevées en Introduction. Ces manques devront faire l'objet de travaux ultérieurs à cette thèse.

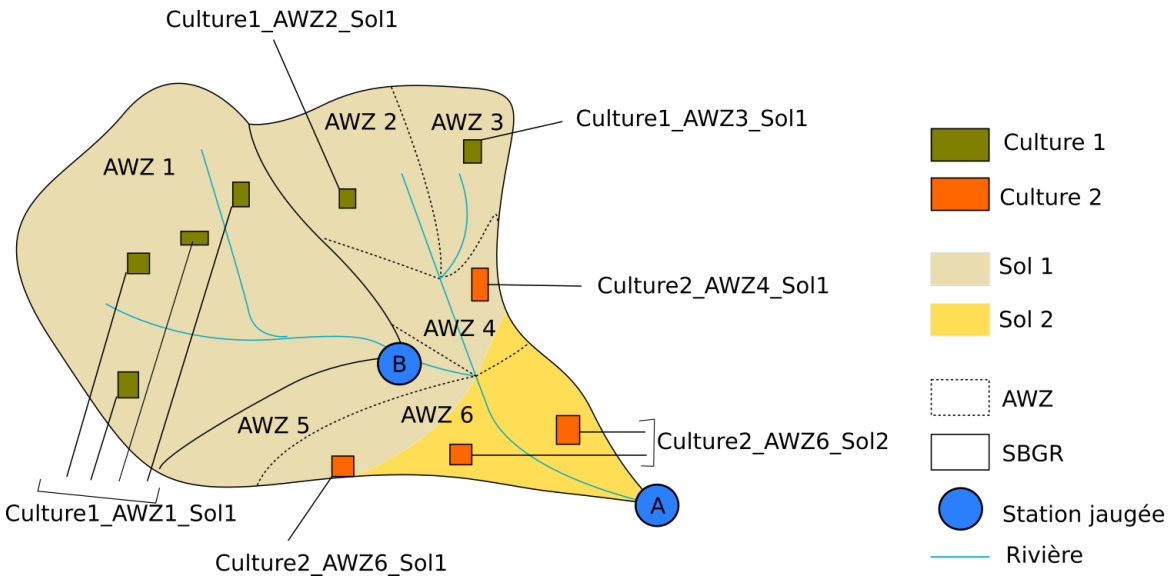
3.3 La modélisation du stockage de la ressource en eau

Il est nécessaire de prendre en compte le stockage de la ressource en eau pour ne pas exagérer l'impact de l'irrigation en période de basses eaux, et pour intégrer la gestion des grands ouvrages si ces derniers sont présents sur une zone à modéliser. Cela permet également de quantifier l'impact des ouvrages de stockage sur l'hydrologie. Dans l'état de l'art sur la modélisation du stockage (Section II.3.4), nous avons vu que la modélisation des retenues pouvait diverger au regard de deux principaux facteurs :

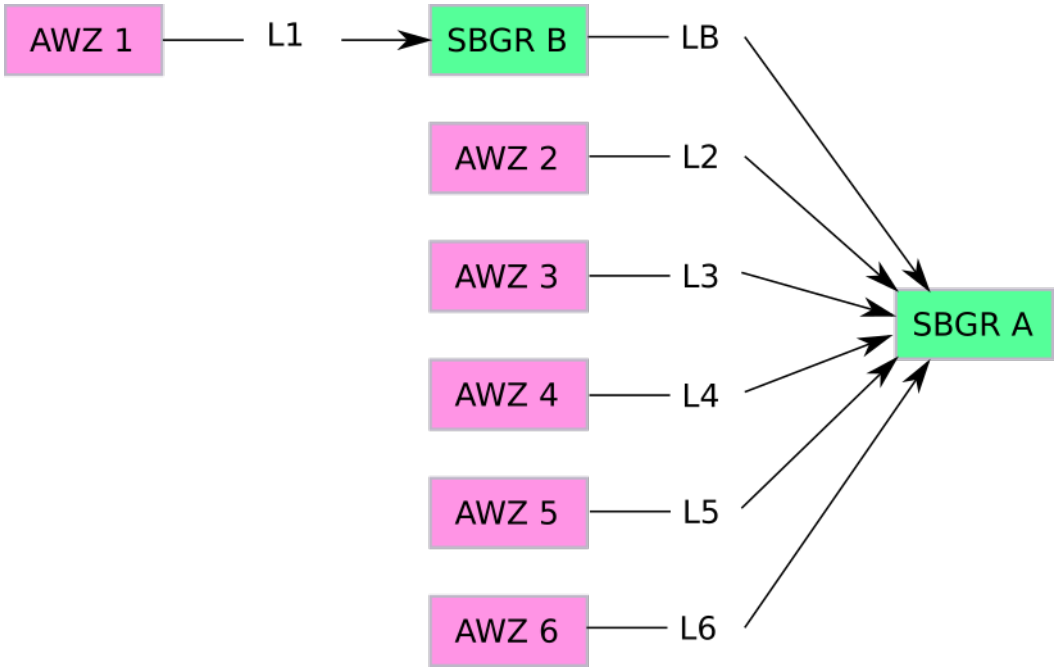
- la représentation spatiale des retenues et des influences des retenues entre elles ;
- le choix et la modélisation des flux intervenant dans le bilan en eau des retenues.

Pour notre approche, le modèle GRcrop, nous avons choisi de distinguer deux principales catégories de réservoirs : les retenues spécifiques, qui sont modélisées individuellement afin de prendre en compte la spécificité des règles de gestion des flux leur attenant, et les retenues simples, agrégées à l'échelle des AWZ. La modélisation du stockage développée dans le cadre de la thèse ne représente que le remplissage par interception de l'écoulement de surface. Le remplissage par pompage actif dans une ressource, de surface ou souterraine, n'est pas représenté, car il n'est pas connu sur les zones modélisées.

2. Les sols se distinguent par leur réserve utile et leur profondeur maximale, voir Section V



(a) Entités de GRcrop : On suppose que les cultures présentes sont du blé non irrigué (kaki, culture 1) et du maïs irrigué (orange, culture 2). Le SBGR amont B se compose d'une unique AWZ, d'un unique sol et seulement de blé, résultant en une unique entité de simulation agronomique, Culture1_AWZ1_Sol1. Le SBGR A se décompose en cinq AWZ et deux sols, avec la présence des deux cultures et résulte finalement en cinq unités de simulation agronomique. Le climat est homogène sur chaque AWZ. Les entités de simulation agronomiques vont de plus se répartir éventuellement en tours d'eau et selon les ressources (surface, local, AWZ_amont, bassin_amont) mobilisées : on modélise distinctement la demande en eau selon le tour d'eau et selon la ressource mobilisée



(b) Diagramme airGRiwrm construit dans GRcrop à partir de la Figure (a). L1, LB, L2, ..., L6 représentent les distances hydrauliques des AWZ et SBGR à l'exutoire de SBGR suivant. Les prélèvements d'irrigation et de remplissage des retenues simples (Section VI.3.3) sont agrégés par AWZ. Les influences sont ensuite répercutées sur le débit à l'exutoire en prenant en compte la distance de l'AWZ à ce dernier.

FIGURE VI.4 – Spatialisation des entités hydrologiques et agronomiques dans GRcrop

3.3.1 Modélisation de retenues spécifiques

La modélisation des retenues spécifiques est la plus intuitive, car elle permet de simuler individuellement les retenues concernées et leurs règles de gestion. Ce type de retenue a été mis en place pour prendre en compte notamment les grands barrages.

Ces retenues spécifiques sont caractérisées par leur distance par rapport à l'exutoire du SBGR auquel elles appartiennent, leur impluvium [3], leur capacité de stockage, leur surface et leur débit réservé associés. Ces retenues peuvent constituer des stocks disponibles pour les prélèvements directs d'irrigation ou peuvent servir à alimenter le débit dans les cours d'eau pour du soutien d'étiage. Le bilan des flux impactant ces retenues s'effectue en plusieurs temps (1 à 6), comme indiqué dans la Figure VI.5.

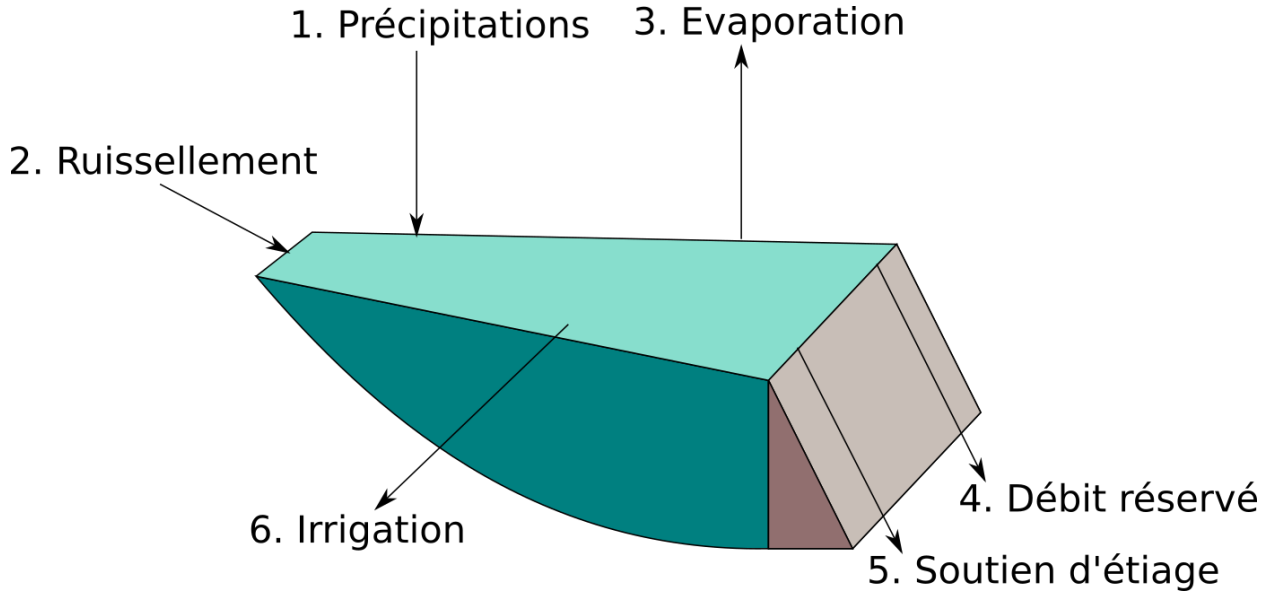


FIGURE VI.5 – Flux pris en compte pour la modélisation des retenues spécifiques, et ordre de prise en compte de ces flux pour mettre à jour le volume des retenues spécifiques

Les précipitations directes (1) comme l'évaporation (3) sont issues de données climatiques calculées à l'échelle des SBGR en mm j^{-1}, multipliées par la surface des retenues, pour obtenir des valeurs en m^3 j^{-1}. L'évaporation est estimée par une évaporation Penman (Annexe A).

L'apport par ruissellement (2) $US_{specifique}$, en m^3 j^{-1}, est calculé comme une fraction du débit modélisé sur le SBGR selon l'Equation VI.1, avec $ratioImpluvium$ le **rapport entre la surface de l'impluvium** du barrage et la surface du SBGR, en km^2 km^{-2}, Q_{vide}, le débit maximal journalier qui peut être prélevé par la retenue au regard volume disponible (i.e. volume encore vide) dans la retenue spécifique, en m^3 j^{-1}, et $Y_{nat_{part}}$ le débit naturel modélisé sur le SBGR en m^3 j^{-1}. On n'ajoute pas ici les éventuels débits provenant de SBGR amont, car ceux-ci n'alimentent pas la retenue. Dans ces travaux de thèse, les retenues spécifiques modélisées ne sont en effet pas influencées par les débits de SBGR amont. Les débits des SBGR amont sont néanmoins pris en compte explicitement pour remplir les retenues simples de type "bassin_amont", voir ci-après.

$$US_{specifique} = min(ratioImpluvium \times Y_{nat_{part}}, Q_{vide}) \tag{VI.1}$$

Le débit réservé (4) est défini spécifiquement pour chaque retenue. Les règles de soutien d'étiage (5) sont définies à l'échelle du SBGR, et chaque retenue est associée à un SBGR et se voit donc attribuer les règles du SBGR. Chaque retenue spécifique peut être associée à un SBGR à soutenir. En cas de restriction réglementaire sur le SBGR (Section VI.3.4), les retenues spécifiques sont mobilisées pour apporter de l'eau de façon à combler l'écart entre le seuil de restriction le moins grave et la moyenne des débits simulés sur le SBGR sur les sept derniers jours glissants, en prenant en compte les lâchers déjà effectués les sept derniers jours glissants également. Toutefois, ce soutien d'étiage ne peut pas dépasser une valeur de débit maximal défini pour chaque retenue spécifique. De plus, si plusieurs retenues spécifiques sont présentes sur le même SBGR, on mobilise en priorité les retenues spécifiques les plus remplies, en volume absolu.

3. Impluvium (impluvia au pluriel) est synonyme de bassin versant. On choisit ce terme ici pour parler spécifiquement de la surface des bassins versants interceptés par les retenues

Enfin, si des unités de simulation agronomiques sont rattachées à ces retenues spécifiques pour l'irrigation, ces retenues sont prélevées pour satisfaire cette demande (6).

3.3.2 Modélisation des retenues simples

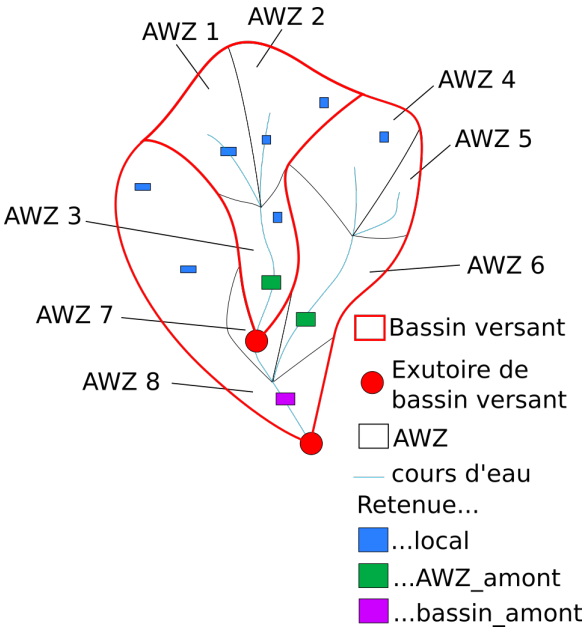
Comme indiqué précédemment, le stockage des retenues simples, qui sont en général de taille plus réduite, est agrégé à l'échelle des AWZ. Cela permet, contrairement à une agrégation à l'échelle de la zone simulée en entier, ou encore des SBGR, de contraindre de façon plus réaliste les prélèvements par l'eau stockée à proximité (ALLAIN et PLUMECOCQ, 2019). Cela constitue par ailleurs une simplification par rapport à une modélisation totalement distribuée des retenues. Néanmoins, au sein d'une AWZ, certaines retenues sont connectées à des cours d'eau principaux influencés par des AWZ plus en amont quand d'autres ne peuvent être remplies qu'à partir d'eau produite localement, au niveau de leur AWZ d'appartenance. C'est ce qui a conduit à la modélisation spatialisée des retenues sur les cours d'eau principaux dans MAELIA, décrite comme une modélisation semi-distribuée des retenues par LEBON (2021), comme expliqué dans la Section II.3.4.

Nous souhaitons simplifier cette modélisation semi-distribuée. La description qui suit consiste en des explications relativement détaillées des différents cas pris en compte dans la modélisation. Un compromis entre réalisme et parcimonie a mené à la configuration proposée ici. Des justifications sont apportées lorsqu'elles sont nécessaires, et des choix ont été faits suite à des tests non montrés pour des raisons de place. Si les explications présentées ici peuvent paraître très techniques et sont habituellement au mieux disponibles dans des rapports techniques ou bien absentes, nous avons fait le choix de les détailler par transparence ainsi que dans un souci de reproductibilité des travaux. Ainsi, nous agrégeons les retenues selon des catégories pertinentes pour simuler les différentes possibilités de remplissage, en distinguant les retenues remplies par du ruissellement local et les retenues remplies par du ruissellement également produit sur d'autres AWZ. Au sein d'une AWZ, les retenues ne sont donc pas spatialement explicites, puisque agrégées. Néanmoins, pour les retenues influencées par un SBGR amont, nous souhaitons prendre en compte les débits amont influencés pour les remplir, permettant pour ces retenues de prendre en compte les impacts cumulés des influences.

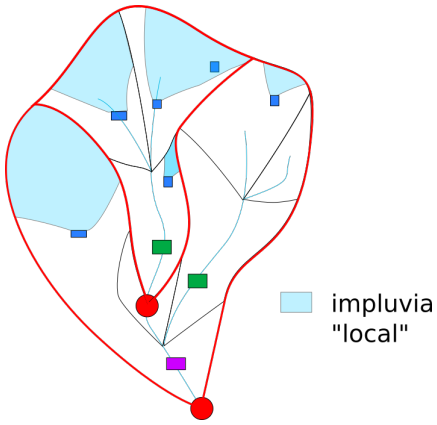
Dans la suite du manuscrit, les objets conceptuels résultant de l'agrégation des retenues simples sur chaque AWZ sont appelés "réservoirs" pour les distinguer des objets réels que sont les "retenues". Le modèle développé distingue ainsi trois types de retenues possibles, agrégées en trois types de réservoirs (Figure VI.6a). Le premier type de réservoir, "**local**", agrège les retenues remplies uniquement par de l'eau produite sur l'AWZ où elles se situent. Les retenues aggrégées dans ce réservoir sont donc soit non connectées à des cours d'eau, soit connectées à des cours d'eau dont le bassin versant est inclus dans l'AWZ. Le second type de réservoir agrège les retenues dont les impluvia intègrent également des AWZ plus en amont, mais qui restent dans le même SBGR. Il s'agit ainsi de retenues connectées au cours d'eau principal de l'AWZ, si cette AWZ est située en aval d'autres AWZ. Si ce deuxième type de réservoir n'est alimenté que par des AWZ situées sur le même SBGR (voir précédemment), on le qualifie de réservoir "**AWZ_amont**". Si ce réservoir est alimenté par des AWZ situées sur un ou plusieurs SBGR amont, il s'agit d'un troisième type de réservoir, que l'on qualifie de réservoir "**bassin_amont**". Chaque réservoir de chaque AWZ est caractérisé par sa surface d'impluvium contribuant au remplissage du réservoir, et par une surface de réservoir de stockage afin d'en déduire les pertes par évaporation et les apports directs par les précipitations.

Le calcul des impluvia diffère selon le type de réservoir (Figure VI.6). Le calcul de la surface d'impluvium **au sein de leur AWZ**, pour toutes les retenues, est exclusif : **les impluvia emboîtés ont été retirés de la surface des impluvia plus en aval au sein de la même AWZ**. Il est donc possible de sommer les impluvia des retenues pour calculer l'impluvium local agrégé des réservoirs. Pour les réservoirs **"AWZ_amont"** et **"bassin_amont"**, on ajoute à cet impluvium au sein de l'AWZ **la somme des surfaces totales des AWZ amont incluses dans le SBGR**. En effet, adopter une représentation exclusive des impluvia pour ces réservoirs, c'est-à-dire en retirant les impluvia des réservoirs sur les AWZ amont, conduirait à sous-estimer la surface réellement contributive à ces réservoirs.

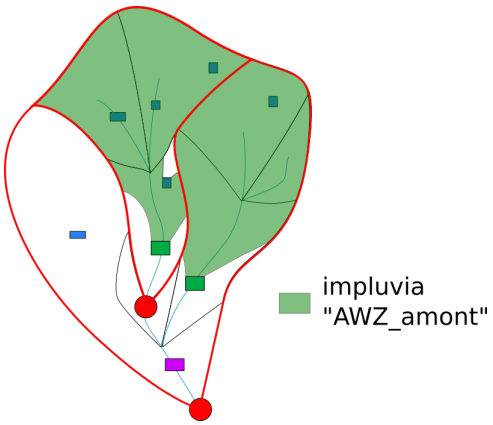
Enfin, pour les réservoirs "bassin_amont", on retire de la surface d'impluvium la surface des SBGR amont. En effet, l'eau produite par l'amont sera apportée explicitement, par propagation des débits de l'amont vers l'aval.



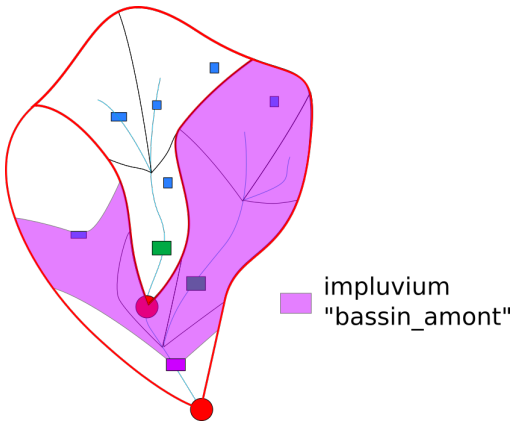
(a) Les types de retenues simples dans GRcrop. La figure représente des retenues "réelles", qui seront ensuite agrégées sur chaque AWZ par type de retenue pour faire les "réservoirs". Les AWZ 1, 2 et 4 auront ainsi un réservoir "local", l'AWZ 3 aura un réservoir "local" et un réservoir "AWZ_amont", l'AWZ 6 aura un réservoir "AWZ_amont", l'AWZ 8 aura un réservoir "local et un réservoir "bassin_amont".



(b) Calcul des impluvia des réservoirs de type "local". Les impluvia de deux retenues de type "local" sont fusionnés dans l'AWZ 2.



(c) Calcul des impluvia des réservoirs de type "AWZ_amont". L'impluvium local du réservoir AWZ_amont sur l'AWZ 3 exclut l'impluvium de la retenue locale, mais intègre la totalité des surfaces des AWZ en amont.



(d) Calcul des impluvia des réservoirs de type "bassin_amont". L'impluvium local du réservoir bassin_amont sur l'AWZ 8 exclut l'impluvium de la retenue locale, mais inclut la totalité des surfaces des AWZ amont situées sur le même SBGR.

FIGURE VI.6 – Catégorisation des retenues et calcul des impluvia des réservoirs agrégeant les retenues dans GRcrop

De même que pour les retenues spécifiques, le bilan des flux impactant les réservoirs issus des retenues simples s'effectue en plusieurs temps (1 à 4), comme illustré dans la Figure VI.7. La différence principale avec les retenues spécifiques se situe au niveau de l'absence de débit réservé spécifiquement défini et de soutien d'étiage. Le débit réservé est toutefois pris en compte dans l'estimation du débit disponible pour être prélevé (voir ci-après). Ainsi, les précipitations directes (1) comme l'évaporation (3) sont issues de données climatiques

calculées à l'échelle des SBGR en mm j^{-1}, rapportées à la surface des retenues. L'évaporation est estimée par une évaporation calculée par la formulation de Penman (Section II.3.4).

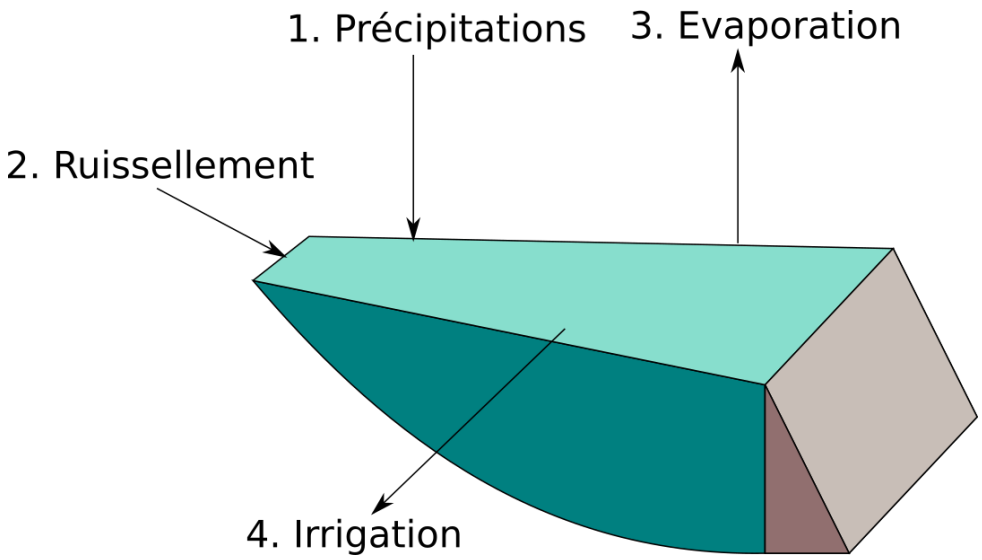


FIGURE VI.7 – Flux pris en compte pour la modélisation des retenues simples, et ordre de prise en compte de ces flux pour mettre à jour le volume des retenues spécifiques

L'apport par ruissellement (2) fait l'objet d'une répartition entre les différents types de réservoirs sur un SBGR. Il est résumé de façon simplifié dans la Figure VI.8 et est détaillé dans le texte ci-après.

Les réservoirs "bassin_amont" sont remplis à la fois par l'eau produite localement sur leur SBGR d'appartenance, en fonction de l'impluvium tel qu'estimé selon la méthode présentée dans la Figure VI.6, et par le débit du SBGR amont. Les réservoirs "local" et "AWZ_amont" ne sont alimentés quant à eux que par du ruissellement produit par leur SBGR d'appartenance. Ainsi, l'eau produite localement et en amont est déterminante pour calculer la capacité de prélèvement des réservoirs "bassin_amont" et seule l'eau produite localement, i.e. sur le SBGR, est déterminante pour calculer la capacité de remplissage des réservoirs "local" et "AWZ_amont".

$Q_{dispo_{amont}}$, l'eau produite en amont disponible pour remplir les réservoirs "bassin_amont" est calculée par l'Équation VI.2, avec $Q_{inf_{amont}}$ le débit influencé produit la veille par le SBGR amont en m^3 j^{-1}, et $Q_{reserve_{amont}}$ le débit réservé défini pour le SBGR amont en m^3 j^{-1}.

$$Q_{dispo_{amont}} = Q_{inf_{amont}} - Q_{reserve_{amont}} \tag{VI.2}$$

Dans les travaux de thèse, nous avons défini le débit réservé en un point comme étant égal au dixième du module à ce point (article L214-18 du Code de l'Environnement). Le débit réservé pour l'eau apportée par l'amont correspond ainsi au dixième du module à l'exutoire du SBGR amont. Si le débit produit la veille suffit à remplir l'ensemble des retenues "bassin_amont" du SBGR, ces retenues sont remplies. Sinon, le débit disponible amont est réparti entre les réservoirs "bassin_amont" en appliquant un ratio entre le débit disponible amont et le débit total demandé.

L'apport par **ruissellement local du SBGR**, U_S, en m^3 j^{-1}, est calculé comme une fraction de la différence entre le débit modélisé sur le SBGR et un débit réservé. Cet apport est calculé selon l'Équation VI.3, avec $ratioImpluvium$ le **ratio entre la surface de l'impluvium telle que calculée comme dans la Figure VI.6 et la surface du SBGR auquel le réservoir appartient**, en km^2 km^{-2}, $Y_{nat_{part}}$ le débit naturel modélisé produit exclusivement par le SBGR (on n'ajoute pas les éventuels débits provenant de SBGR amont, ces derniers ne contribuant pas au ruissellement local), en m^3 j^{-1}, $Q_{reserve_{part}}$ le débit réservé défini à l'échelle du SBGR, en m^3 j^{-1}, et Q_{vide} le débit maximal journalier qui peut être prélevé par le réservoir au regard du volume vide (i.e. qui peut encore être rempli) du réservoir, en m^3 j^{-1}. Il n'est ainsi pas possible de remplir le réservoir au-delà de sa capacité maximale. Le volume potentiellement prélevable par les retenues à l'échelle du bassin correspond à cet écart entre $Y_{nat_{part}}$ et $Q_{reserve_{part}}$. De même que pour le débit issu du SBGR amont, le débit réservé correspond au dixième du module, cette fois du débit naturel modélisé du SBGR $Y_{nat_{part}}$. Enfin, cet apport ne peut pas être négatif.

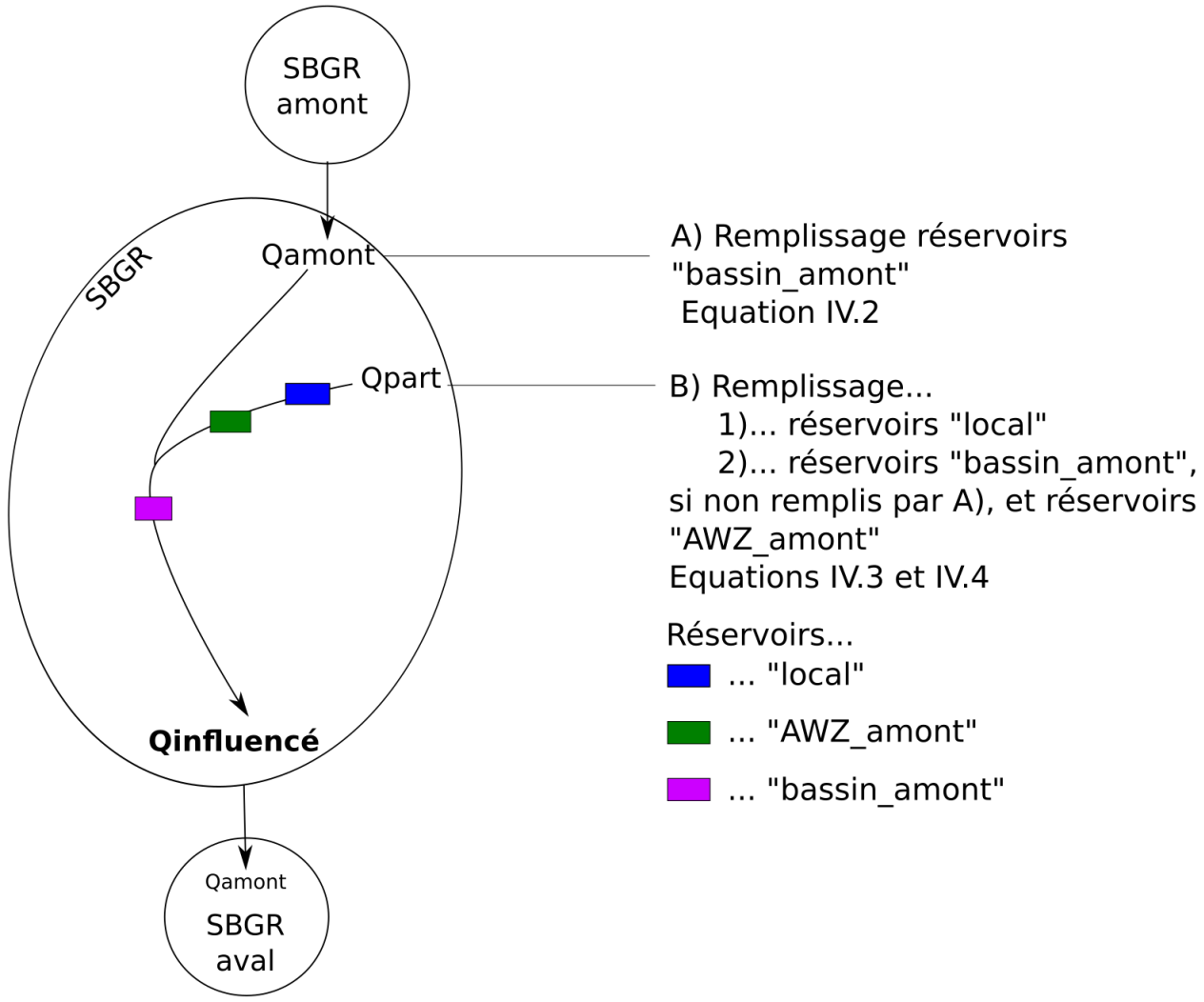


FIGURE VI.8 – Remplissage des réservoirs issus de l'agrégation des retenues simples par ruissellement. Les réservoirs "bassin_amont" sont remplis à la fois par l'eau produite localement sur leur SBGR d'appartenance, en fonction de l'impluvium tel qu'estimé selon la méthode présentée dans la Figure VI.6, et par le débit du SBGR amont. Les réservoirs "local" et "AWZ_amont" ne sont alimentés quant à eux que par du ruissellement produit par leur SBGR d'appartenance.

$$U_S = max(0, min(ratioImpluvium \times (Y_{nat_{part}} - Q_{reserve_{part}}), Q_{vide})) \tag{VI.3}$$

Pour les réservoirs "AWZ_amont" et "bassin_amont", on calcule ainsi un débit de remplissage par production locale "semi-naturelle". En effet, la propagation des débits des AWZ amont ne prend pas en compte les influences sur ces AWZ amont, puisqu'on intègre la totalité de la surface des AWZ amont. Ce débit est ainsi plutôt surestimé. Par conséquent, ce débit additionné au débit prélevé par les retenues spécifiques peut, à l'échelle d'un bassin versant, dépasser le débit potentiellement prélevable à l'échelle du SBGR (Équation VI.4, avec $Q_{reserve_{specifique}}$ le débit réservé associé à chaque retenue spécifique présente sur le SBGR en m^3 j^{-1}).

$$\sum_{SBGR} U_S + \sum_{SBGR} (U_{S_{specifique}} - Q_{reserve_{specifique}}) > Y_{nat_{part}} - Q_{reserve_{part}} \tag{VI.4}$$

Ainsi, si la somme des prélèvements locaux de remplissage des réservoirs est supérieure au débit naturel moins le débit réservé à l'échelle du SBGR, en prenant en compte le remplissage des réservoirs bassin_amont par le débit issu du SBGR amont, nous devons répartir l'eau produite localement entre les réservoirs d'un même SBGR. Les réservoirs de type "local" sont remplis en priorité, selon l'Équation VI.3. En effet, leur impluvium est exclusif et elles ne sont donc a priori pas impactées par d'autres retenues. L'eau produite localement est enfin répartie entre les retenues "AWZ_amont" et les retenues "bassin_amont" selon un simple ratio entre la somme des U_S sur le SBGR et le débit restant disponible sur le SBGR, soit $Y_{nat_{part}}$ moins $Q_{reserve_{part}}$ duquel on a retiré les prélèvements locaux effectués pour les réservoirs de type "local".

Les retenues simples peuvent finalement être prélevées pour l'irrigation. On prévoit deux modalités possibles de simulation des prélèvements dans les retenues simples :

- soit les retenues simples servent de retenue de secours, c'est-à-dire qu'elles ne sont mobilisées qu'en cas de restriction. Dans ce cas, les unités de simulation agronomiques sont irriguées à partir des eaux de surface tant qu'il n'y a pas de restriction ;
- soit les unités de simulation agronomiques connectées aux retenues ne sont irriguées qu'à partir de ces retenues, même en dehors des périodes de restriction.

On prévoit de plus dans le code mis en place la possibilité d'ajouter des contrôleurs supplémentaires (Section VI.2.3) dans le superviseur, en prévision de la gestion spécifique de l'étang de Lindre. Cela permettra notamment d'ajouter des règles de gestion des ouvrages de stockage non existantes à l'heure actuelle.

On l'a vu, la prise en compte des processus naturels et anthropiques liés à la présence de retenues nécessite une prise en compte complexe dans la modélisation, même en ayant pour but une philosophie de simplification. Cela est dû à la multiplicité des plans d'eau et de leurs interactions spatiales, nécessitant des ajustements pour s'assurer que les bilans en eau demeurent réalistes lorsque l'on souhaite les agréger tout en évitant de surestimer ou sous-estimer leur impact.

3.4 Les règles de limitation des prélèvements d'irrigation

Plusieurs limitations des prélèvements peuvent intervenir : des restrictions réglementaires, un manque d'eau dans les retenues, ou bien un manque d'eau en rivière.

3.4.1 Restriction réglementaire

Nous cherchons à représenter le système des arrêtés de restriction, tel que décrits dans la Section I.2.3.3. Chaque AWZ est associée à une station jaugée indicatrice, exutoire d'un bassin versant modélisé. Pour chaque station indicatrice, on associe différents seuils de bas débit, chacun associé à un pourcentage de restriction. Les seuils définis peuvent être adaptés selon le bassin modélisé. Ils sont définis pour l'Aveyron et la Seille dans la Section VI.4. Pour passer à un seuil de restriction plus restrictif, il faut que le débit moyen à une station sur les trois derniers jours ait été inférieur au débit seuil correspondant. Pour reculer d'un niveau de restriction (i.e. restrictions moindres), il faut que le débit moyen à une station sur les sept derniers jours ait été supérieur au débit seuil correspondant. Ces restrictions réglementaires s'appliquent aux prélèvements dans les eaux de surface. De plus, il faut se situer en période de restriction pour mettre en place un soutien d'étiage (Section VI.3.3).

3.4.2 Eau stockée insuffisante

Il n'est pas possible d'irriguer davantage que l'eau stockée dans les réservoirs associés aux entités de simulation agronomiques irriguées à partir de ces réservoirs.

3.4.3 Eau en rivière insuffisante

Pour éviter les débits négatifs, on restreint les prélèvements de surface à l'échelle des SBGR pour l'irrigation de façon à réserver un débit au moins égal à la moitié du débit influencé simulé la veille. Pour ce faire, on approxime dans un premier temps le débit total Q_tot sur le SBGR, incluant les apports amont selon l'Équation VI.5. Cette Équation reconstitue une approximation du débit total disponible sur le SBGR en sommant $Y_{nat_{part}}$, le débit naturel modélisé produit exclusivement par le SBGR, W les influences précédemment calculées sur le SBGR, autres que les prélèvements d'irrigation (remplissage des retenues, soutien d'étiage), qui peuvent donc être négatives ou positives, et enfin $Q_{inf_{amont}}$ le débit influencé amont.

$$\begin{aligned} Q_{dispo} &= Q_{tot} - \frac{Q_{veille}}{2} \\ \text{avec : } Q_{tot} &= Y_{nat_{part}} + W + Q_{inf_{amont}} \end{aligned} \tag{VI.5}$$

Si Q_{dispo} est insuffisante pour satisfaire la demande des prélèvements de surface, l'irrigation par prélèvement dans la rivière, calculée à partir du modèle de demande et les restrictions réglementaires, est donc restreinte de nouveau de manière proportionnelle à la demande de chaque unité de simulation agronomique avec irrigation selon l'Équation VI.6, avec :

- $Ratio$ le ratio appliqué pour réduire l'irrigation consécutivement à l'insuffisance du débit disponible (-) ;
- Q_{dispo} le débit disponible calculé par l'Équation VI.5 (exprimé ici en $m^3\ j^{-1}$) ;
- $I_{surface}$ la demande en irrigation calculée à l'échelle du SBGR à partir du modèle de demande en eau et des restrictions réglementaires ($m^3\ j^{-1}$) ;
- I_i l'irrigation calculée sur l'unité de modélisation agronomique irriguée à partir de prélèvements en rivière calculée à partir du modèle de demande et des restrictions réglementaires, mais avant la limitation liée au volume disponible en rivière ($m^3\ j^{-1}$) ;
- I_{i_f} l'irrigation finale calculée sur l'unité de simulation agronomique i irriguée à partir de prélèvements en rivière après prise en compte de la limitation par les volumes disponibles ($m^3\ j^{-1}$).

$$Ratio = \frac{Q_{dispo}}{I_{surface}} \tag{VI.6a}$$

$$I_{i_f} = Ratio \times I_i \tag{VI.6b}$$

Le fonctionnement du modèle GRcrop est ainsi résumé dans la Figure VI.9.

3.5 Calage de GRcrop

Le calage automatique de paramètres hydrologiques dans une modélisation intégrée (et donc couplée) peut être complexe, car les influences modélisées dépendent elles-mêmes des sorties de la modélisation hydrologique et des paramètres hydrologiques calés. Ainsi, elles-mêmes varient à chaque itération de l'algorithme de calage testant un nouveau jeu de paramètres hydrologiques. Le package airGRiwrm permet d'effectuer un calage prenant en compte des influences sous la forme de chroniques préfixées. Cependant, le package airGRiwrm ne permet pas d'effectuer un calage du modèle hydrologique intégrant des influences modélisées et donc "dynamiques". Or, les influences prises en compte dans GRcrop dépendent des débits modélisés et des paramètres hydrologiques : débits simulés aux stations indicatrices pour les limitations des prélèvements, rétroaction de l'eau apportée sur la demande en eau d'irrigation aux pas de temps suivants, débits naturels pour le remplissage des retenues. GRcrop ne peut donc pas être calé directement. Une procédure de calage par itérations a donc été mise en place afin de contourner ces limites :

1. Calage de la modélisation hydrologique avec prise en compte des influences correspondant à des chroniques préfixées (à la première itération, les influences sont nulles). On en déduit les paramètres de la modélisation hydrologique optimisés pour cette chronique ;

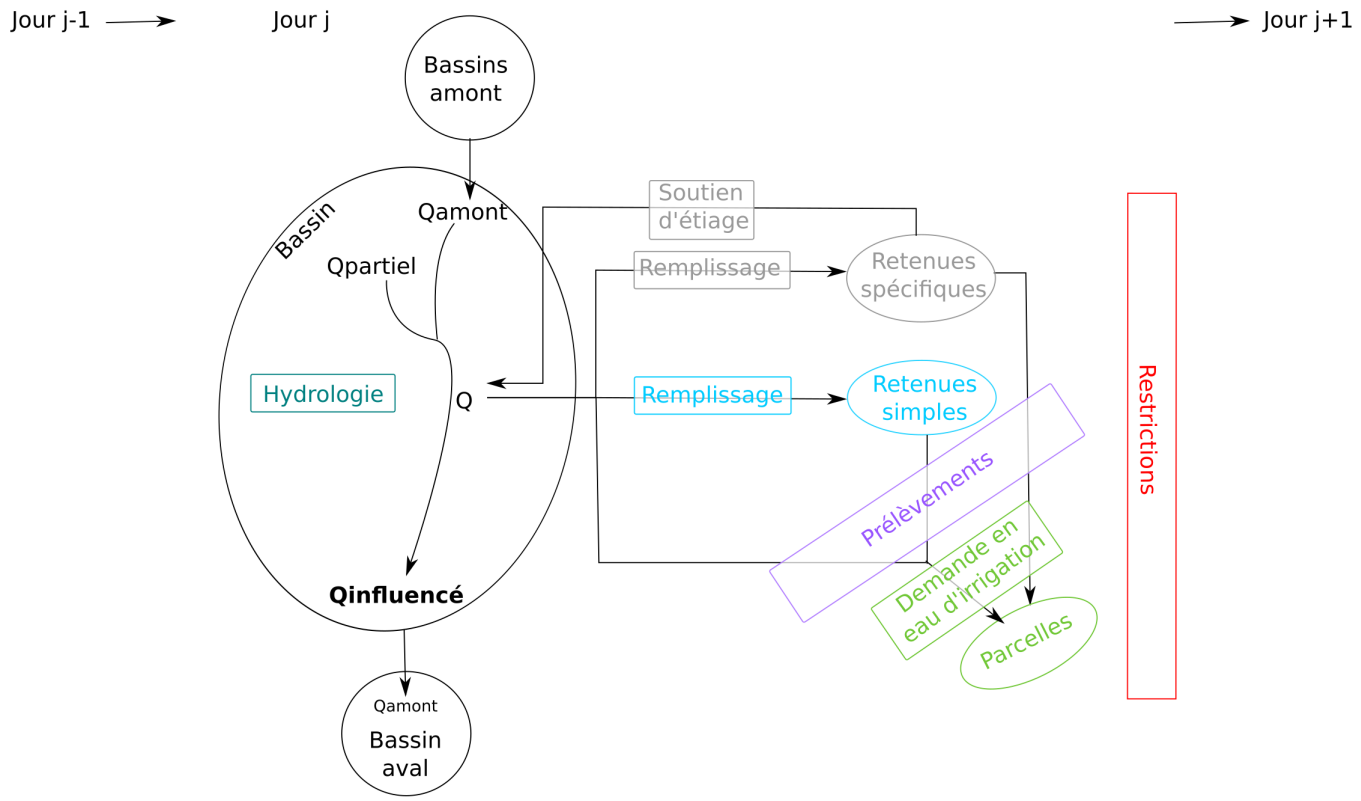


FIGURE VI.9 – Fonctionnement de GRcrop

2. Modélisation couplée via GRcrop permettant de simuler les chroniques d'influences dépendant du jeu de paramètres hydrologiques calés à l'étape précédente. Le remplissage des retenues, les restrictions, les prélèvements, les restitutions par soutien d'étiage sont donc potentiellement modifiés ;
3. Calcul du KGE (GUPTA et al., 2009) sur les débits pour chaque SBGR et comparaison, pour chaque SBGR, du KGE obtenu avec le KGE obtenu à l'itération précédente ;
4. Répétition de la première étape (i.e. passage à l'itération suivante) en prenant en compte les chroniques d'influences obtenues à l'étape 2.

L'algorithme stoppe lorsque la différence de KGE sur chaque SBGR est inférieure à 0,001. Tant que la différence de KGE ne respecte pas la condition d'arrêt, ou tant que le nombre d'itérations des deux étapes précédentes est inférieur à 11, les itérations se poursuivent. Le jeu de paramètres retenu est le jeu permettant d'obtenir le meilleur KGE moyen entre les SBGR dans la deuxième étape de l'itération, parmi toutes les itérations effectuées.

4 Implémentation du modèle GRcrop sur les zones d'étude

Les modèles sont implémentés sur les bassins versants de l'Aveyron aval et de la Seille avec les bases de données décrites dans le Chapitre III. Nous avions alors décrit pour les deux bassins les données d'entrée hydroclimatiques, les caractéristiques des retenues, les données agronomiques. Nous devons maintenant décrire la transformation de ces données brutes en données d'entrée de la modélisation GRcrop.

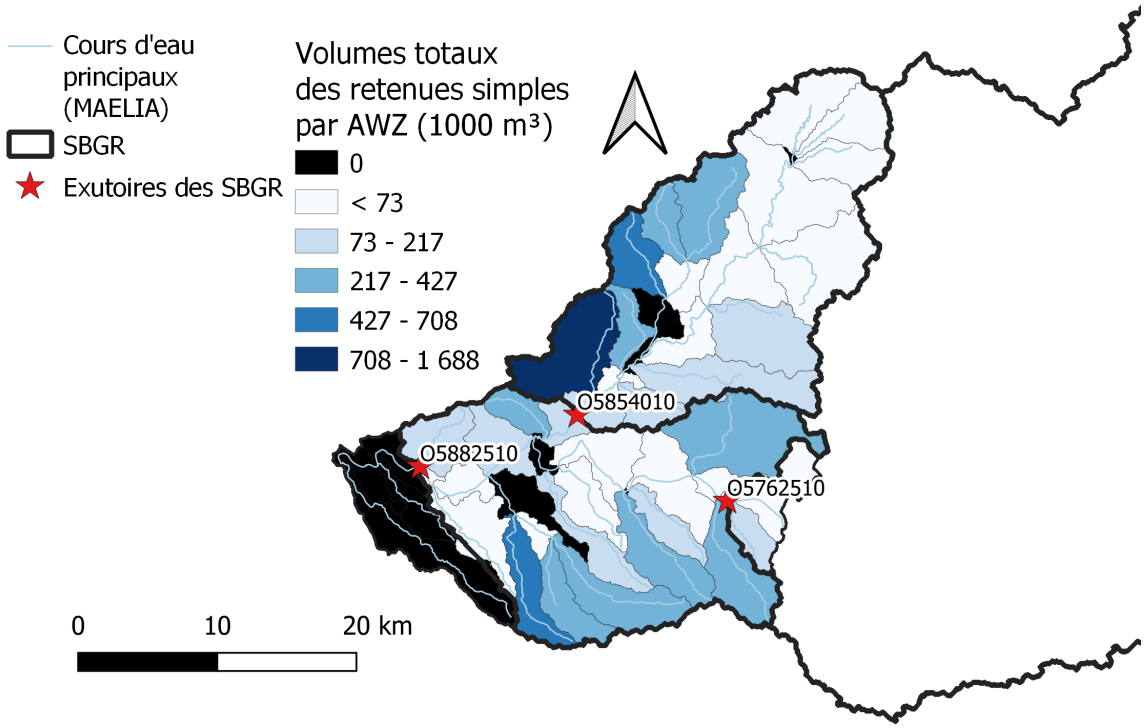


FIGURE VI.10 – Volumes totaux des retenues simples modélisées sur le bassin versant de l'Aveyron. Les AWZ 837 (non visible sur la carte, car l'AWZ 837 est de très petite dimension), directement en aval du SBGR O5762510 et 193, directement en aval du SBGR O5854010, sont situées à cheval sur deux SBGR. Les deux AWZ ont été attribuées au SBGR O5882510 : les prélèvements effectués sur ces AWZ sont répercutés sur les débits à l'exutoire du SBGR O5882510. Les AWZ en aval de l'exutoire de l'Aveyron à Montauban (O5882510) n'ont pas été prises en compte dans la modélisation intégrée.

4.1 Implémentation de GRcrop sur le bassin versant de l'Aveyron aval

4.1.1 Sous-bassins versants modélisés par un modèle GR (SBGR)

Les SBGR modélisés correspondent aux sous-bassins versants des stations sélectionnées et présentées dans la Section III.2.4.2, et que l'on rappelle dans la Figure VI.10.

4.1.2 Agrégation des retenues simples sur les AWZ

Les retenues sur le bassin versant de l'Aveyron (Section III.2.4.3) sont agrégées sur chaque AWZ par catégorie local_AWZ, AWZ_amont, bassin_amont sur chaque AWZ selon la méthodologie présentée dans la Section VI.3. Les AWZ ont été définies pour correspondre aux BVe du modèle MAELIA implémenté sur l'Aveyron.

Les volumes totaux ("local_AWZ", "AWZ_amont" et "bassin_amont") aggrégés par AWZ sont présentés dans la Figure VI.10. Nous présentons également les volumes totaux par catégorie de retenue simple (Tableau VI.1). Les volumes stockés sont majoritairement représentés par des retenues de type "local_AWZ". On note qu'il n'y a pas de retenue de type "bassin_amont" sur le bassin versant de l'Aveyron. En effet, les retenues proches du cours d'eau de l'Aveyron sont vraisemblablement des retenues alimentées par la nappe alluviale. Or le modèle représenté ne modélise pas explicitement les nappes, et nous avons donc choisi de ne pas représenter ces retenues.

	Volume (1000 m^3)
local_AWZ	8 125
AWZ_amont	13
bassin_amont	0

TABLEAU VI.1 – Volume total par catégorie de retenue simple sur le bassin versant de l'Aveyron

4.1.3 Paramétrisation des retenues spécifiques

Trois retenues spécifiques sont modélisées sur le bassin versant de l'Aveyron aval : le barrage des Falquettes, le barrage du Gouyre et le barrage du Tordre. Les paramètres de modélisation sont renseignés dans le Tableau VI.2. Nous ne disposions pas d'informations sur les surfaces irriguées prélevant directement dans ces barrages. Nous avons donc préféré simuler uniquement un soutien d'étiage, en maximisant le volume consacré à ce soutien d'étiage. Le soutien d'étiage simulé servira en effet indirectement à l'irrigation, celui-ci permettant de compenser les prélèvements dans les eaux de surface.

	Volume total (10^6 m^3)	Surface (ha)	Impluvium (km^2)	Volume soutien d'étiage (10^6 m^3)	Bassin soutenu	Débit maximal (m^3 s^{-1})
Falquettes	0,8	0,8	59,2	18,9	O5854010	0.5
Le Gouyre	3,4	2,8	68,5	11,1	O5882510	0.5
Le Tordre	3,2	2,5	3,5	13,9	O5882510	0.2

TABLEAU VI.2 – Paramètres des retenues spécifiques sur le bassin versant de l'Aveyron aval

4.1.4 Unités de modélisation agronomiques

Les assolements sont équivalents à ceux modélisés dans le Chapitre V. Néanmoins, les unités de simulation irriguées sont réparties selon les ressources mobilisées (surface, local, AWZ_amont, bassin_amont). Cette répartition est calculé au pro-rata des surfaces d'îlots irrigués reliés aux différents types de réservoirs d'après les données MAELIA.

4.1.5 Paramétrisation des cultures et de l'irrigation

Nous conservons les paramètres agronomiques des cultures mis en place dans le Chapitre V (dates de semis, courbes de Kc, paramètres des sols). Les paramètres culturaux sont détaillés dans l'Annexe G.

Dans ce même chapitre, nous avions constaté l'importante incertitude liée à la modélisation des règles de déclenchement et de dosage de l'irrigation. Par ailleurs, nous avions au contraire constaté une faible sensibilité à la modélisation de la dynamique de croissance des racines et du facteur de puisement au cours du temps. Nous choisissons donc de ne pas faire intervenir de perturbation de la dynamique de croissance des racines et du facteur de puisement, mais de tout de même les représenter systématiquement. De plus, nous avions repéré une assez grande variabilité au regard de la simplification de la modélisation de l'évapotranspiration, mais avec une dégradation systématique des performances par rapport à MAELIA avec la simplification. Enfin, nous avions souligné l'importance d'envisager une modification des périodes d'irrigation en projection climatique ; néanmoins, pour modéliser la situation passée, contraindre l'irrigation aux périodes d'irrigation habituelles nous paraît être une hypothèse raisonnable. De plus, nous avions vu que les résultats des simulations étaient en réalité peu perturbés par la prise en compte ou non de périodes (e.g. mois de l'année) lors desquelles l'irrigation est permise par le modèle, montrant que ces dernières correspondaient bien aux périodes de déficit hydrique significatif et donc de demande en eau d'irrigation. Nous proposons ainsi de n'utiliser que des expériences prenant en compte la variabilité temporelle des coefficient culturaux, de la profondeur racinaire et du facteur de puisement, et prenant en compte explicitement les périodes d'irrigation, mais avec plusieurs jeux de déclenchement et de dosage de l'irrigation. Nous choisissons de conserver les hypothèses de déclenchement et de dosage

de l'irrigation les plus parcimonieuses, c'est-à-dire de ne pas avoir recours à des paramétrisations distinctes pour chaque culture, car nous avions observé que des expériences n'ayant pas recours à de telles précisions parvenaient également à obtenir des performances satisfaisantes. Les jeux de paramètres ainsi conservés pour la paramétrisation de l'irrigation est détaillé dans le Tableau VI.3.

TABLEAU VI.3 – Jeu de paramètres conservé pour la modélisation de l'irrigation dans GRcrop sur l'Aveyron. Le KGE compare l'irrigation journalière simulée dans les approches sélectionnées à l'irrigation journalière simulée par MAELIA dans les travaux présentés en Chapitre V. RFU : Réserve facilement utilisable (mm) : tant que le déficit n'est pas supérieur à la RFU, la plante peut évapotranspirer au maximum ; D : Déficit hydrique du sol (mm) ; Sd : Seuil de déclenchement de l'irrigation (mm) : valeur de déficit pour laquelle on déclenche un évènement d'irrigation sur l'unité agronomique modélisé

Agrégation	**Seuil de déclenchement**	**Dose d'irrigation**	**KGE**	**Irrigation moyenne annuelle (10^6 m^3)**
Semi-parcellaire	0,25 × RFU	D - Sd	0,86	15,0
Semi-parcellaire	0,5 × RFU	D - Sd	0,85	12,5
Semi-parcellaire	0,5 × RFU	D	0,67	15,7
Semi-parcellaire	RFU	D	0,69	12,6
Conceptuelle	0,5 × RFU	D - Sd	0,77	12,9

4.1.6 Restrictions réglementaires

Les seuils de restriction et les pourcentages de restriction associés sont indiqués dans le Tableau VI.4. Les pourcentages s'appuient sur les arrêtés sécheresse mis en place sur le bassin versant de l'Aveyron. Nous considérons de plus que le recours aux volumes stockés s'effectue seulement en cas de restriction. En dehors des périodes de restriction, les surfaces connectées aux retenues irriguent tout de même à partir des eaux des rivières. En effet, c'est le mode d'irrigation habituel sur le secteur, d'après les experts du LAE. C'est également ce mode d'irrigation qui est implémenté par LEBON (2021) sur le bassin versant du Gélon également inclus dans le bassin versant de la Garonne.

	DOE	**DA**	**DAR**	**DCR**
O5854010 (L s^{-1})	100	80	47	20
O5882510 (L s^{-1})	4000	3200	2000	1000
Restriction (%)	85	70	50	0

TABLEAU VI.4 – Débits et pourcentage de restriction sur le bassin versant de l'Aveyron. DOE : débit objectif d'étiage ; DA : débit d'alerte ; DAR : débit d'alerte renforcée ; DCR : débit de crise renforcée

4.1.7 Calage de la modélisation hydrologique avec les influences

Comme précisé dans la Section III.2.4.2, la modélisation hydrologique est forcée par des débits amont observés et simulés sur le secteur de l'Aveyron aval. Pour le bassin versant de l'Aveyron aval, nous calons GRcrop sur les années 2008-2014, années pour lesquelles nous disposons des données d'assolement précises (RPG, Section III.3).

Plusieurs étapes sont ainsi nécessaires au calage et à la mise en place des données d'entrée finales :

1. Calage initial de la modélisation hydrologique sans prise en compte des influences sur la période 1973 - 2020 permettant de valoriser au mieux les chroniques hydrologiques disponibles sur tous les sous-bassins du bassin versant de l'Aveyron retenus dans la Section III.2.4.2. Le calage a été effectué avec le critère de Nash-Sutcliffe utilisant une transformation racine des débits ;
2. Comblage des lacunes des débits des stations en amont de la zone d'étude par une modélisation hydrologique selon les simulations obtenues en utilisant les paramètres déterminés à l'étape précédente ;

3. Calage du modèle GRcrop sur l'Aveyron aval (stations O5762510, O5854010, O5882510) sur la période 2008-2014 en injectant les débits amont complétés, selon la procédure présentée dans la Section VI.3.5. La fonction-objectif pour le calage final est toujours le critère de Nash-Sutcliffe, mais cette fois utilisant la transformation Box-Cox des débits. Cet ajustement a permis de davantage donner d'importance à la qualité de simulation des bas débits que la fonction racine.

De plus, nous effectuons un calage-contrôle, aussi appelé split-sample test (KLEMEŠ, 1986), qui permettra d'évaluer la transférabilité temporelle du modèle obtenu, en distinguant les sous-périodes P1 : 2008 - 2011 et P2 : 2012 - 2014. On notera que ces périodes sont plus courtes que celles utilisées classiquement en hydrologie, mais elles ont été définies ainsi en raison de l'archive courte de données d'usages. Le calage de GRcrop qui sera retenu pour les simulations futures sera tout de même celui obtenu sur la plus longue période, à savoir 2008-2014.

4.2 Implémentation de GRcrop sur le bassin versant de la Seille

4.2.1 Sous-bassins versants modélisés par un modèle GR (SBGR)

Les SBGR modélisés correspondent aux sous-bassins versants des stations sélectionnées, présentées dans la Section III.3.4.2, et rappelées dans la Figure VI.11.

4.2.2 Agrégation des retenues simples sur les AWZ

De même que pour le bassin versant de l'Aveyron aval, les retenues simples sont agrégées sur chaque AWZ par catégorie "local_AWZ", "AWZ_amont" et "bassin_amont" sur chaque AWZ selon la méthodologie présentée dans la Section VI.3. Comme pour le bassin versant de l'Aveyron, les AWZ ont été définies pour correspondre aux BVe du modèle MAELIA implémenté sur la Seille.

Les volumes totaux ("local_AWZ", "AWZ_amont" et "bassin_amont") aggrégés par AWZ sont présentés dans la Figure VI.11. Nous présentons également les volumes totaux par catégorie de retenue simple (Tableau VI.5). Les volumes stockés sont majoritairement représentés par des retenues de type "local_AWZ".

	Volume (1000 m^3)
local_AWZ	13 126
AWZ_amont	278
bassin_amont	23

TABLEAU VI.5 – Volume total par catégorie de retenue simple sur le bassin versant de la Seille

Contrairement aux barrages du bassin versant de l'Aveyron, le barrage de l'étang de Lindre sur la Seille n'est pas situé sur une AWZ amont. Nous avons choisi d'effacer les plans d'eau situés en amont de l'étang de Lindre et de considérer que l'entièreté du bassin versant en amont de l'étang de Lindre, de 103 km^2, contribue à son remplissage, permettant de le remplir simplement selon l'Équation VI.1.

4.2.3 Paramétrisation des retenues spécifiques

L'étang de Lindre est la seule retenue spécifique modélisée. On l'approxime par un volume modélisé de 13 millions de m^3, une surface d'impluvium de 103 km^2 et une surface de 620 ha.

De plus, un controller a été mis en place pour modéliser les vidanges de l'étang de Lindre, détaillé dans l'Annexe F.

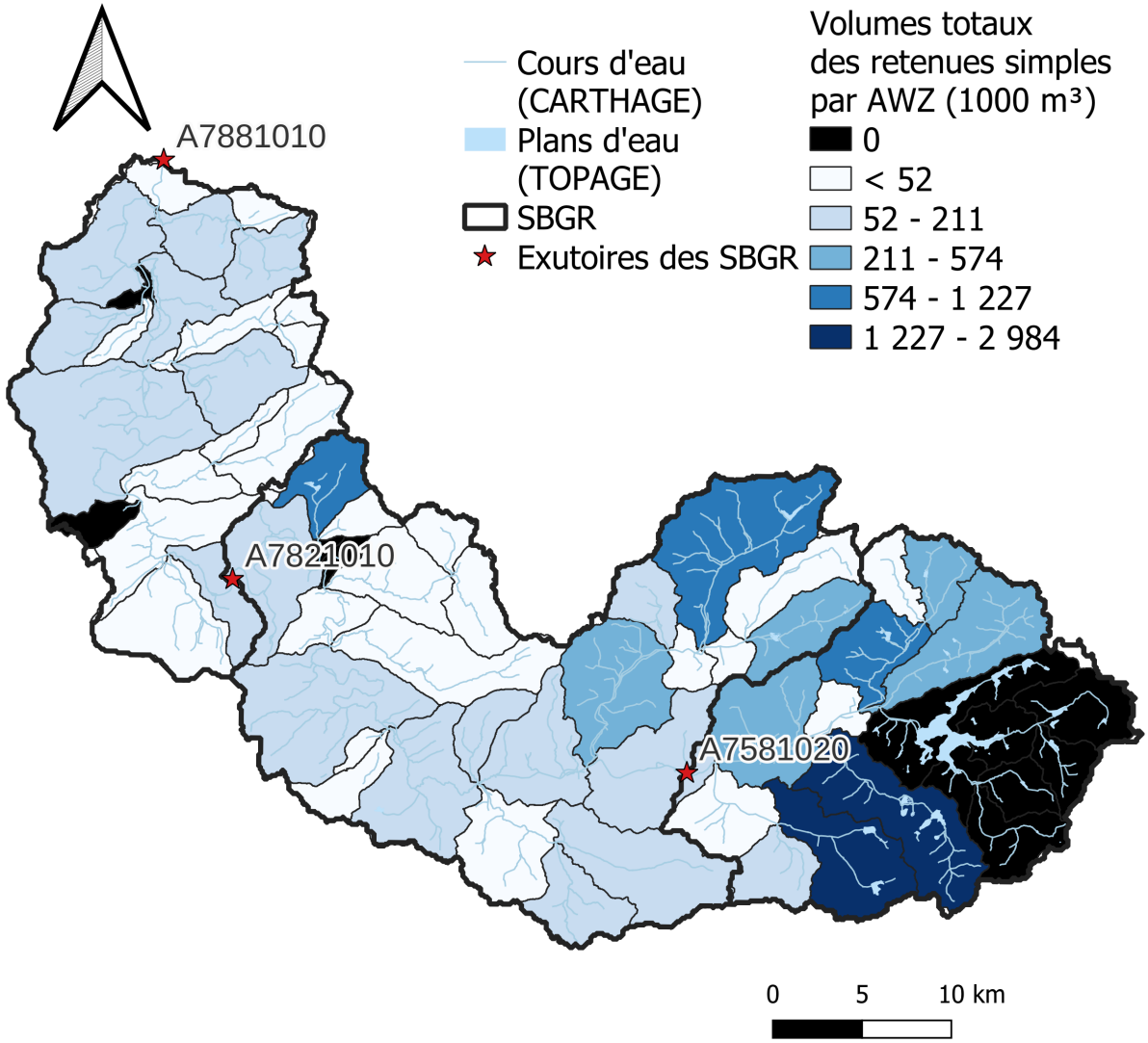


FIGURE VI.11 – Volumes totaux des retenues simples modélisées sur le bassin versant de la Seille. Les volumes des retenues simples des AWZ en amont de l'étang de Lindre ont été mis à zéro pour ne pas complexifier la modélisation du remplissage de l'étang de Lindre. Les AWZ 31, directement en aval du SBGR A7581020 et 41, directement en aval du SBGR A7821010, sont situées à cheval sur deux SBGR. Les deux AWZ ont été attribuées au SBGR A7821010 : les prélèvements effectués sur ces AWZ sont répercutés sur les débits à l'exutoire du SBGR A7821010.

4.2.4 Unités de modélisation agronomiques

Il n'y a pas d'irrigation dans la situation actuelle. Comme pour l'Aveyron dans la suite des travaux, on choisit d'agréger les données d'entrée climatiques de la modélisation agronomique à l'échelle des SBGR. Les unités de simulation agronomiques résultent donc simplement du croisement sol x culture x SBGR.

4.2.5 Paramétrisation des cultures

Nous adoptons une méthodologie similaire à celle développée sur le bassin versant de l'Aveyron pour déterminer les paramètres de la modélisation agronomique à partir des entrées et sorties de MAELIA pour les courbes de coefficient cultural. Nous extrayons les sorties de AqYield des unités de simulation d'une AWZ (AWZ 56 : cette AWZ est sélectionnée car elle permet de représenter l'ensemble des cultures présentes sur le bassin versant). Les profondeurs racinaires et les facteurs de puisement (p) sont extraits du rapport 56 de la FAO (ALLEN et al., 1998). De plus, nous modélisons des cultures intermédiaires avant les cultures de printemps, ces dernières étant généralisées sur le bassin versant de la Seille en raison des problèmes de qualité de l'eau (Section IV.2.1.2). Ces cultures intermédiaires sont représentées par des courbes de coefficient cultural et de croissance racinaire spécifiques. Le modèle CropWat ne permet cependant pas de représenter finement l'évolution de l'humidité avec la profondeur du sol, celui-ci étant représenté comme un compartiment unique dont la profondeur varie avec la profondeur racinaire. Nous choisissons notamment de réduire le déficit hydrique proportionnellement à la diminution de la profondeur racinaire lors de la disparition des cultures intermédiaires. Cela permet d'éviter de surestimer le déficit dans l'horizon exploré par les racines en début de cycle, mais néglige la mémoire du déficit hydrique dans les horizons plus profonds ayant été explorés par les racines des cultures intermédiaires. Les paramètres culturaux utilisés sont renseignés dans l'Annexe G.

Sur le bassin versant de la Seille, il n'y a actuellement pas d'irrigation. Il n'est donc pas nécessaire de définir les paramètres de déclenchement et de dosage de l'irrigation à ce stade.

4.2.6 Restrictions réglementaires

Il n'y a pas de prélèvement d'irrigation directement dans les eaux de surface, ni de soutien d'étiage. Il n'est donc pas nécessaire de modéliser des restrictions.

4.2.7 Calage de GRcrop sur le bassin versant de la Seille

Pour le bassin versant de la Seille, le calage de GRcrop est possible sur une période plus longue que pour l'Aveyron, car nous n'avons pas besoin de représenter l'irrigation, cette dernière n'étant pas pratiquée de manière significative. Nous calons sur la période 1986-2019 pour les bassins versants de la Seille à Moyenvic (A7581020) et à Nomeny (A7821010), et sur la période 1986-2015 pour le bassin versant de la Seille à Metz (A7881010), avec la modélisation simplifiée de l'étang de Lindre et la prise en compte des plans d'eau. De même que pour le bassin versant de l'Aveyron aval, nous réalisons un split-sample test (KLEMEŠ, 1986), en distinguant les sous-périodes P1 (1986-2000) et P2 (2000-2015). Ici aussi, le calage réalisé sur la plus longue période, 1986-2019, sera utilisé pour les simulations futures.

Thaïs Abrahão (2022), que j'ai encadrée dans le cadre de son stage de Master 1, a mobilisé la modélisation de la Seille prenant en compte la gestion de l'étang de Lindre pour effectuer des projections en contexte de changement climatique. Ces travaux ont été repris et améliorés dans le cadre de la thèse.

A retenir :

Nous avons mis au point une modélisation intégrant une modélisation de la demande en eau d'irrigation s'appuyant sur CropWat, une modélisation hydrologique via une version semi-distribuée du modèle GR5J, une modélisation du stockage de la ressource en eau, et interfaçant l'ensemble au regard de règles de limitation des prélèvements.

Nous allons désormais évaluer la modélisation développée et implémentée sur les bassins versants de l'Aveyron aval et de la Seille.

Chapitre VII

Évaluation multi-critère de la performance de la modélisation intégrée agro-hydrologique

Avant-propos :

Dans l'ensemble de ce chapitre, nous évaluons les différents éléments de la modélisation intégrée agro-hydrologique en décomposant les variables analysées. Nous commençons par décrire la méthodologie d'évaluation mise en place, puis nous présentons les résultats obtenus sur les deux bassins versants d'intérêt.

1 Méthodologie d'évaluation des modèles

L'évaluation de GRcrop sur une période passée, utilisant des données météorologiques observées (réanalyse SAFRAN), est un préalable à la mise en place de ce modèle sur une période future, utilisant des projections climatiques et des scénarios prospectifs d'évolution de l'agriculture. Cette évaluation repose à la fois sur une comparaison avec les données observées disponibles et sur une comparaison de sorties de GRcrop aux sorties de MAELIA. Elle permet d'évaluer la confiance que l'on peut accorder à la modélisation intégrée mise en place. Nous détaillons ici les données utilisées pour évaluer le modèle sur les deux bassins versants ainsi que les expériences mises en place.

1.1 Évaluation de GRcrop sur le bassin versant de l'Aveyron aval

Pour le bassin versant de l'Aveyron, les données observées disponibles pour l'évaluation, décrites plus en détail dans la Section III.2.4, sont :

- les débits journaliers en rivière, permettant :
  - ○ de caler le modèle hydrologique. Le bassin versant de l'Aveyron fait ainsi l'objet d'un calage sur la période 2008-2014, et d'un split-sample test (KLEMEŠ, 1986) en distinguant les sous périodes P1 : 2008-2011 et P2 : 2012-2014 ;
  - ○ de calculer le NSE (NASH et SUTCLIFFE, 1970) sur la transformée de Box-Cox des débits (SANTOS et al., 2018) ;
  - ○ de comparer les courbes de régime avec et sans prise en compte des influences ;
  - ○ d'évaluer la bonne représentation des étiages via le passage sous les seuils réglementaires, le QMNA5 et le VCN3.

- les prélèvements déclarés annuels ;
- les classes de remplissage des barrages (par tranche de 20 %).

Le QMNA5 est calculé en extrayant chaque année le débit mensuel minimal (QMNA), et en déterminant le QMNA de période de retour 5 ans via la méthode empirique : les QMNA sont classés par ordre décroissant, une fréquence cumulée empirique pour chaque QMNA F_i est calculée selon l'Équation VII.1, avec $Rang_i$ le rang entre 1 et N du débit classé et N le nombre de QMNA. On détermine ensuite le QMNA de fréquence empirique 0,8, équivalente à une période de retour de cinq ans par interpolation linéaire entre les débits obtenus les plus proches de la valeur de fréquence cumulée empirique visée.

$$F_i = \frac{Rang_i - 0,3}{N + 0,4} \tag{VII.1}$$

Le VCN3 est déterminé en extrayant chaque année le débit moyen sur trois jours consécutifs minimal. On en déduit un VCN3 moyen interannuel.

Les données suivantes, issues de simulations de MAELIA, permettent d'évaluer des variables supplémentaires simulées par GRcrop la demande en eau d'irrigation subannuelle. Nous prévoyions initialement d'effectuer des comparaisons avec MAELIA au regard d'autres variables (volumes des retenues, prélèvements effectifs, etc.), mais nous n'avons pas pu disposer d'une version de MAELIA intégrée opérationnelle sur le temps de la thèse.

De façon plus qualitative, nous pourrons évaluer si les courbes annuelles de lâchers de barrages, et la répartition spatio-temporelle de pression sur la ressource et de satisfaction de l'irrigation nous paraissent réalistes.

1.2 Evaluation de GRcrop sur le bassin versant de la Seille

Il n'y a pas d'irrigation sur le bassin versant de la Seille, et il n'y a donc pas lieu d'y questionner la qualité de la modélisation de l'irrigation. L'hypothèse réalisée ici est que la modélisation de l'irrigation qui est mise en place pour l'étude prospective, issue des travaux sur l'Aveyron, reste valable pour la Seille.

Pour le bassin versant de la Seille, les seules données observées disponibles pour l'évaluation, décrites plus en détail dans la Section III.3.4 sont :

- les débits journaliers en rivière, permettant :
  - ◦ de caler le modèle hydrologique. Le bassin versant de la Seille fait ainsi l'objet d'un calage sur la période 1986-2018 (1986-2015 pour le SBGR de la Seille à Metz, A7881010), et d'un split-sample test (KLEMEŠ, 1986), en distinguant les sous-périodes P1 (1986-2000) et P2 (2000-2015) ;
  - ◦ de calculer le KGE (GUPTA et al., 2009) sur la transformée Box-Cox des débits (SANTOS et al., 2018) ;
  - ◦ de comparer les courbes de régime simulées avec et sans prise en compte des influences ;
  - ◦ d'évaluer la bonne représentation des étiages : passage sous les seuils réglementaires, comparaison du QMNA5 et de VCNs observés ou simulés, etc ;
- les manœuvres de vannes de l'étang de Lindre, permettant d'évaluer la qualité de la détection des périodes de vidange.

A la date de rédaction du manuscrit de thèse, l'implémentation de MAELIA sur le bassin versant de la Seille n'est pas terminée. Nous avons pu utiliser la simulation des cultures pour calibrer les paramètres culturaux des cultures actuellement présentes, mais nous ne pouvons pas utiliser MAELIA comme référence pour évaluer nos simulations. Nous évaluerons donc qualitativement la simulation des volumes des retenues et de l'étang de Lindre.

1.3 Sensibilité du modèle aux usages

Afin de vérifier comment la modélisation mise en place réagit aux données d'entrée de modélisation, et d'évaluer la plus-value de la prise en compte des usages dans la modélisation hydrologique, nous effectuons des expériences de renaturalisation partielle (ou désinfluencement). Cela signifie que l'on active ou désactive, dans cinq expériences successives, certaines influences présentes sur les bassins versants. Ces expériences seront elles aussi réalisées sur la période passée.

1.3.1 Expériences de désinfluencement partiel sur le bassin versant de l'Aveyron

Cinq expériences de renaturalisation (ou désinfluencement) sont effectuées sur le bassin versant de l'Aveyron aval, permettant d'évaluer distinctement l'impact des ouvrages de stockage, de l'irrigation et du soutien d'étiage (Tableau VII.1) :

1. naturalisation totale : suppression des retenues (spécifiques et simples) et de l'irrigation. Grâce à cette expérience, on dispose de débits désinfluencés ;
2. suppression de l'irrigation mais maintien des ouvrages de stockage, qui ne font l'objet d'aucune utilisation (pas de soutien d'étiage) ;
3. suppression de l'irrigation, maintien des ouvrages de stockage et soutien d'étiage ;
4. irrigation mais suppression des ouvrages de stockage : l'irrigation se fait intégralement à partir des eaux de surface ;
5. irrigation et maintien des ouvrages de stockage, mais ces derniers ne font l'objet d'aucune utilisation (pas de prélèvements pour l'irrigation, pas de soutien d'étiage)

Ces expériences 1 à 5 pourront être comparées à l'expérience 0 décrivant une hydrologie totalement influencée. Ces expériences de désinfluencement partiel ne sont effectuées qu'avec la configuration d'irrigation correspondant à la deuxième ligne du Tableau VI.3. En effet, nous supposons que les interactions entre paramétrisation de l'irrigation et désinfluencement sont faibles, et que les résultats obtenus pour une configuration de l'irrigation devraient être généralisables.

	Irrigation	Retenues simples	Retenues spécifiques	Eau stockée mobilisable pour l'irrigation	Soutien d'étiage
Exp. 0	✓	✓	✓	✓	✓
Exp. 1	✗	✗	✗	/	/
Exp. 2	✗	✓	✓	/	✗
Exp. 3	✗	✓	✓	/	✓
Exp. 4	✓	✗	✗	/	/
Exp. 5	✓	✓	✓	✗	✗

TABLEAU VII.1 – Expériences de désinfluence partielle. ✓ : l'influence est prise en compte ; ✗ : l'influence n'est pas prise en compte ; / : sans objet

1.3.2 Expériences de désinfluencement partiel sur le bassin versant de la Seille

De façon similaire à l'Aveyron aval, mais de manière plus limitée puisque ce bassin versant ne présente pas d'irrigation, deux expériences évaluant la sensibilité à la modélisation des usages sont effectuées sur la Seille :

1. suppression des ouvrages de stockage (retenues et étang de Lindre) ;
2. maintien des ouvrages, mais arrêt des vidanges de l'étang de Lindre.

2 Résultats sur le bassin versant de l'Aveyron aval

2.1 Performance de la modélisation hydrologique

Les valeurs des paramètres de modélisation hydrologique (i.e. du modèle GR5J semi-distribué simple, c'est-à-dire sans prise en compte des influences, ou bien utilisé dans la modélisation intégrée GRcrop) obtenues par calage sur la période 2008-2014, ainsi que les valeurs de la fonction-objectif (NSE calculé sur la transformation Box-Cox des débits) sur les différents sous-bassins pour cette même période, sont indiquées dans le Tableau VII.2. Les valeurs de paramètres sont modifiées en raison de l'inclusion des influences dans la modélisation mais seulement de manière mesurée : aucun paramètre ne semble évoluer de manière importante. De plus, les performances de modélisation sont peu modifiées par la prise en compte des influences. Ces résultats peuvent signifier :

- qu'afin de représenter un comportement hydrologique impacté par des influences, les valeurs des paramètres de GR5J appliqué sans prise en compte des influences n'avaient pas évolué vers des valeurs potentiellement inhabituelles lors du calage ;
- que les influences impactent peu l'hydrologie.

Les valeurs des paramètres restent réalistes que l'on prenne en compte ou pas les influences. Les valeurs de paramètres sont davantage modifiées par la prise en compte des influences sur le bassin versant de la Lère à Réalville (O5854010) que sur les stations de l'Aveyron. Cela peut s'expliquer par le fait que l'impact relatif des influences par rapport au débit sur l'Aveyron est moindre que sur la Lère à Réalville, qui est de taille mesurée. Sur la Lère à Réalville, la prise en compte des influences tend à :

- diminuer légèrement la valeur du paramètre X1 : le modèle a moins "besoin" de stocker de l'eau disponible pour l'évapotranspiration ;
- augmenter la valeur du paramètre X2 : le modèle a moins "besoin" de faire "disparaître" de l'eau ;
- augmenter la valeur du paramètre X3 ;
- augmenter la valeur du paramètre X4 ;
- diminuer la valeur du paramètre X5.

On notera par ailleurs l'apparition d'un paramètre "lag", utile afin de router les influences sur ce bassin de tête.

TABLEAU VII.2 – Valeurs des paramètres pour chaque sous-bassin versant modélisé du bassin versant de l'Aveyron aval obtenues pour la modélisation sans les influences et pour la modélisation prenant en compte les influences par calage sur la période 2008-2014. Pour le modèle prenant en compte les influences, les valeurs moyennes entre les différentes configurations d'irrigation, et les valeurs minimales et maximales (indiquées entre crochets quand elle sortent de l'intervalle de résolution de la valeur moyenne correspondante), sont renseignées. / : sans objet.

	Bassin	**X1 (mm)**	**X2 (mm j^{-1})**	**X3 (mm)**	**X4 (j)**	**X5 (-)**	**lag (m s^{-1})**	**NSE Box-Cox]−∞ ; 1]**
Sans les influences	O5762510	149	-0,41	18,3	1,76	0,00	1,70	0,98
	O5854010	248	-0,77	40,6	1,51	0,26	/	0,91
	O5882510	148	-0,41	18,4	1,76	0,00	1,70	0,98
Avec les influences	O5762510	149 [148 ; 150]	-0,40	18,1 [18,0 ; 18,4]	1,76 [1,75 ; 1,76]	0,00	1,70	0,98
	O5854010	242 [238 ; 245]	-0,50 [-0,56 ; -0,48]	47,1 [44,3 ; 49,9]	1,56 [1,54 ; 1,57]	0,23 [0,23 ; 0,24]	0,65 [0,59 ; 0,71]	0,90
	O5882510	149 [148 ; 150]	-0,40 [-0,41 ; -0,40]	18,1 [18,0 ; 18,4]	1,77 [1,76 ; 1,77]	0,00	1,70	0,98 [0,97 ; 0,98]

Les paramètres montrant le plus de sensibilité à la configuration de l'irrigation, sensibilité visible via l'écart entre les valeurs maximales et minimales des paramètres, semblent être le X3 et le X2, surtout pour la Lère à Réalville.

Ce faible impact de la prise en compte ou non des influences en termes de modélisation hydrologique se retrouve sur les courbes de régime modélisées et observées sur la Figure VII.1, qui sont peu modifiées par la prise en compte des influences. On remarque notamment que la modélisation des débits sur les mois de mars à mai est médiocre pour la Lère à Réalville (O5854010) que l'on prenne ou non en compte les influences. La prise en compte des influences diminue les débits simulés au mois de juillet, s'éloignant légèrement des débits observés (peu visible sur la Figure VII.1). Cela peut signifier que ne mobiliser l'eau stockée que lorsque des restrictions sont déjà en place n'est pas suffisamment réaliste. Une autre hypothèse est que l'absence de prise en compte du retour d'eau d'irrigation dans la modélisation hydrologique renforce artificiellement l'impact des prélèvements. Néanmoins, le modèle avec influences paraît aussi satisfaisant que le modèle hydrologique sur ces critères généraux, tout en apportant davantage d'informations.

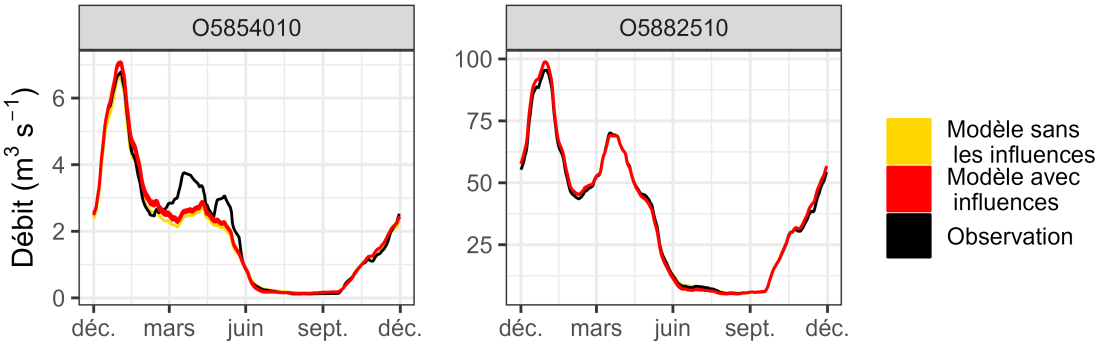


FIGURE VII.1 – Comparaison des régimes observés et simulés pour la période 2008-2014

Les résultats du split-sample test sont présentés dans la Figure VII.2. Pour les deux périodes de calage, nous obtenons de très bonnes performances en calage et en évaluation sur les deux sous-bassins versants. Pour le SBGR O5854010, les performances sont plus faibles pour les simulations sur la période P1 (2008-2011) en calage comme en évaluation, montrant une difficulté à bien modéliser les débits sur cette période. La prise en compte des influences ne permet de gagner ni en performance, ni en robustesse, par rapport à la simulation sans les influences. Cependant, la prise en compte des influences n'entraîne pas pour autant de fortes dégradations malgré les nouvelles contraintes ainsi imposées au modèle, ce qui est cohérent avec le faible impact sur les paramètres et les performances relevé plus faut. **Nous pouvons donc considérer que le modèle, avec et sans influences, est assez robuste et performant.**

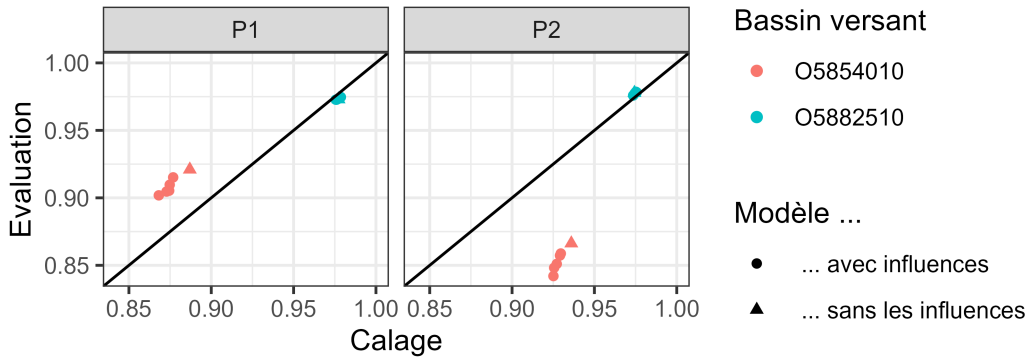
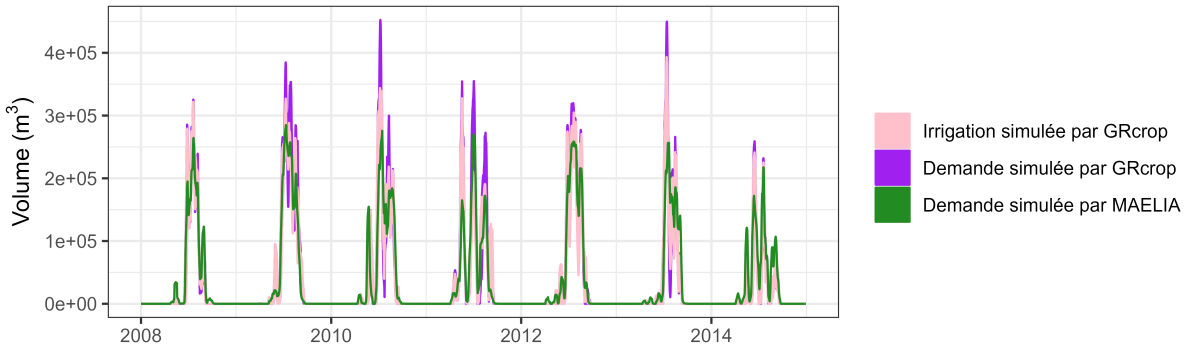


FIGURE VII.2 – Comparaison du NSE calculé sur la transformation Box-Cox des débits entre la période de calage et celle d'évaluation pour deux périodes de calage du modèle : P1 : 2008-2011 ; P2 : 2012-2014. Les différents points correspondent aux différentes configurations de l'irrigation présentées dans le Tableau VI.3

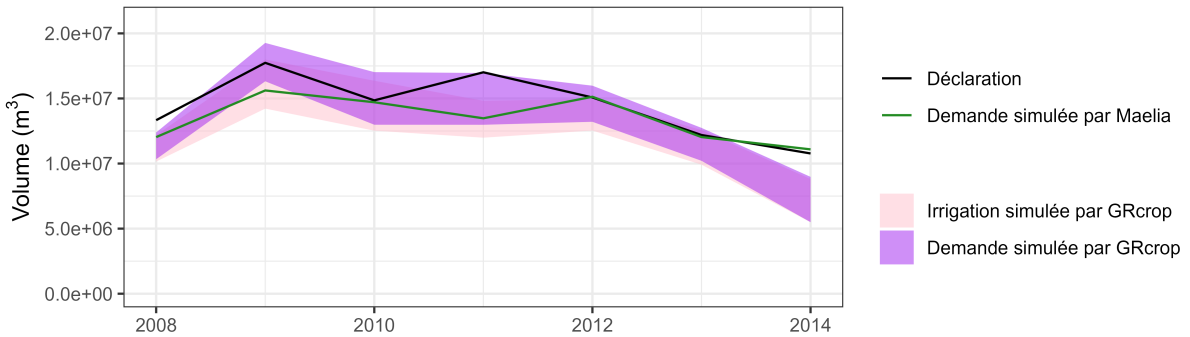
2.2 Performance de la modélisation de l'irrigation

Nous présentons l'irrigation simulée par GRcrop, ainsi que la demande simulée par MAELIA et GRcrop, dans la Figure VII.3. On rappelle que l'irrigation simulée par GRcrop représente la demande réduite en fonction des restrictions réglementaires et physiques du bassin. Nous voyons que les configurations sélectionnées de la modélisation de la demande en eau d'irrigation par GRcrop permettent de reproduire assez bien la demande en eau d'irrigation simulée par MAELIA à l'échelle annuelle (Figure VII.3 (b)), ainsi que la répartition infra-annuelle des prélèvements (Figure VII.3 (a)). Par ailleurs, on observe que l'irrigation simulée par GRcrop produit une certaine variabilité issue des valeurs de paramètres de CropWat utilisées, permettant de prendre en compte les incertitudes liées au déclenchement et aux apports unitaires d'irrigation.

L'irrigation effectivement simulée, c'est-à-dire prenant en compte la ressource disponible et les règles de gestion, permet d'écrêter les éventuels pics de demande. On note cependant peu de décrochage entre l'irrigation et la demande au pas de temps annuel. La modélisation couplée permet ainsi surtout une nouvelle répartition temporelle de l'irrigation. Enfin, on note que l'ordre de grandeur de l'irrigation simulée ou de la demande simulée à l'échelle annuelle est proche de celle des déclarations, même si une légère sous-estimation semble se dessiner. Diverses raisons peuvent être avancées sans pour autant que l'on soit en mesure de trancher. Cela peut s'expliquer par l'absence de la prise en compte de l'efficacité d'irrigation, par une sous-estimation des surfaces irriguées, par une erreur de modélisation, ou par une comptabilité imprécise des prélèvements, par exemple. On note en particulier que l'irrigation simulée autorise davantage de variabilité interannuelle que ne montre l'irrigation déclarée, mettant en avant un potentiel "conservatisme" de l'irrigation appliquée qui ne suit pas forcément la variabilité climatique. **La modélisation de l'irrigation dans GRcrop nous semble ainsi assez réaliste, et donc satisfaisante.**



(a) Moyennes glissantes sur 10 jours de la demande et de l'irrigation effective

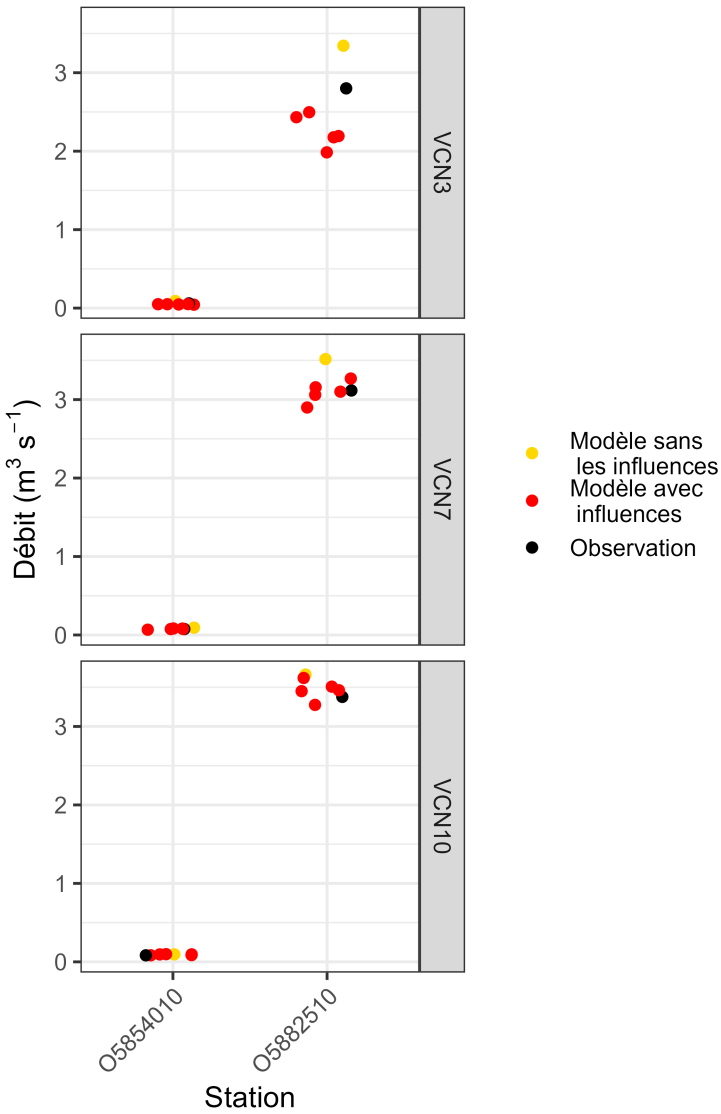


(b) Déclaration BNPE, demande et irrigation simulées

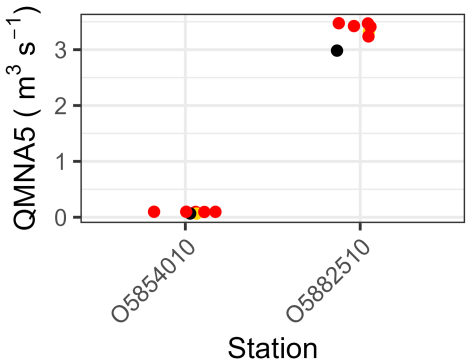
FIGURE VII.3 – Résultats de la modélisation de l'irrigation sur l'Aveyron aval : comparaison entre GRcrop et MAELIA

2.3 Performance de la modélisation des étiages

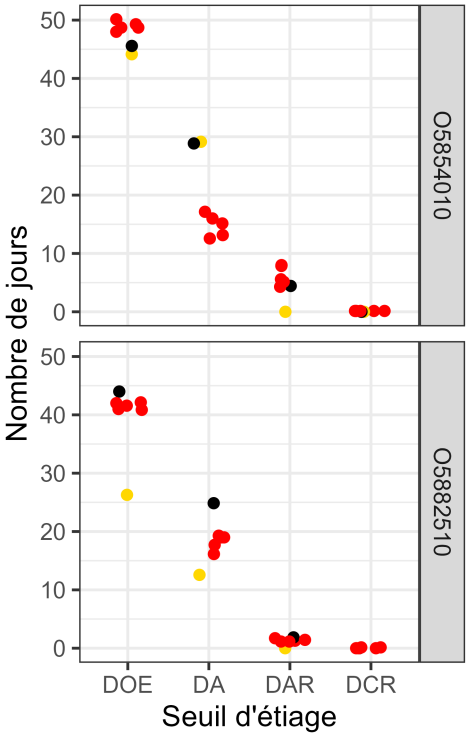
Nous comparons ici la capacité du modèle intégré à reproduire des indicateurs hydrologiques d'étiage. Nous présentons dans la Figure VII.4 les indicateurs d'étiage interannuels calculés sur la période 2008-2014. Nous présentons sur la Figure VII.5 des indicateurs d'étiage équivalents, mais cette fois calculés année par année, pour évaluer la capacité du modèle à reproduire les étiages annuels et leur variabilité. Enfin, nous présentons dans la Figure VII.6 la durée annuelle de passage sous des seuils d'étiage sur la Lère à Réalville (O5854010) et l'Aveyron à Montauban (O5882510), que nous comparons à la durée annuelle de passage sous des seuils d'étiage simulée par les modèles.



(a) VCN moyen interannuel pour plusieurs fenêtres temporelles (3, 7, ou 10 jours)

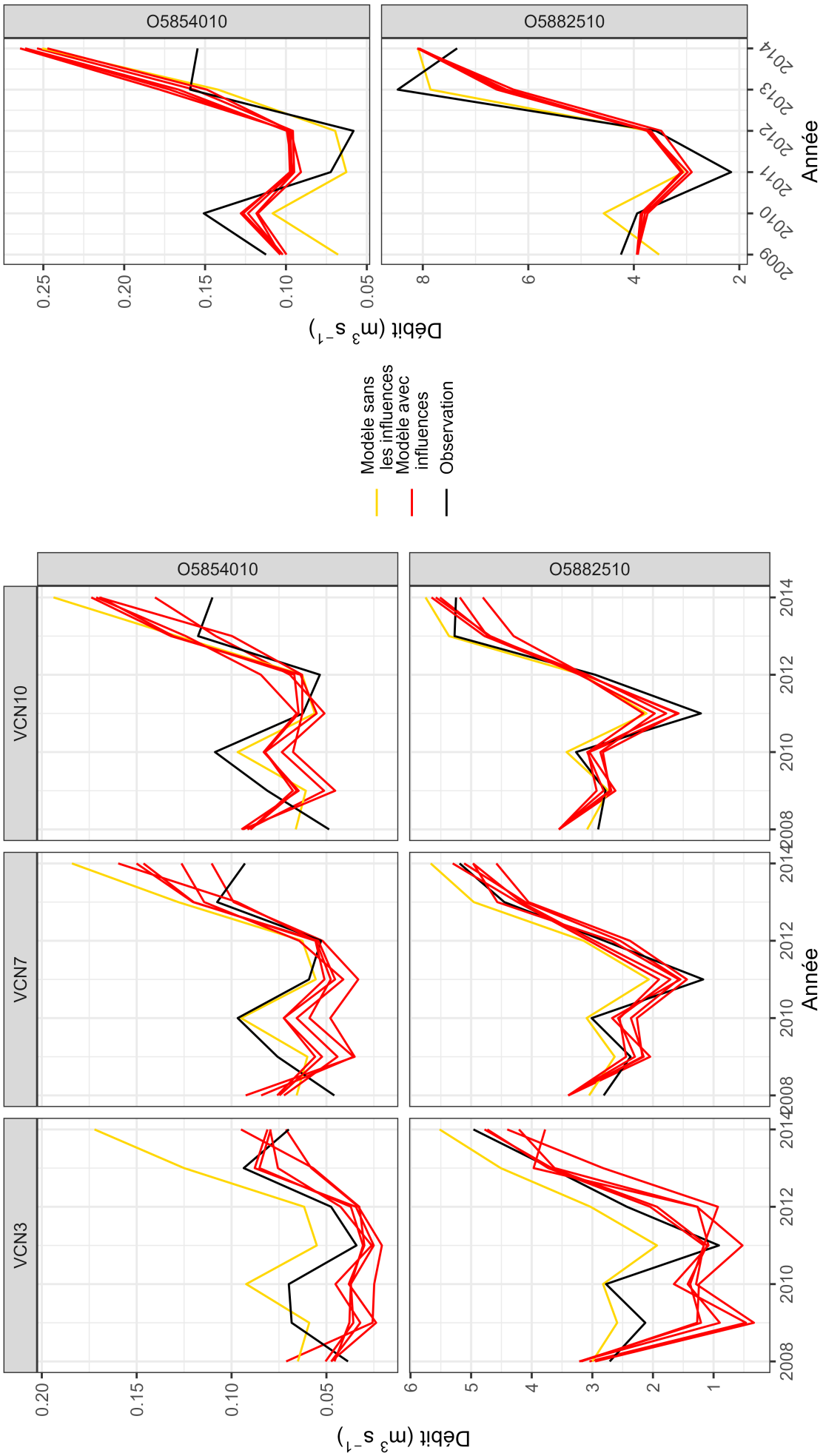


(b) QMNA5 calculé via la fréquence empirique



(c) Moyenne interannuelle du nombre de jours de passage sous les seuils d'étiage aux stations de la Lère à Réalville (O5854010) : DOE = 0,1 m^3 s^{-1}, DA = 0,08 m^3 s^{-1}, DAR = 0,05 m^3 s^{-1}, DCR = 0,02 m^3 s^{-1} et de l'Aveyron à Montauban (O5882510) : DOE = 4 m^3 s^{-1}, DA = 3,2 m^3 s^{-1}, DAR = 1,4 m^3 s^{-1}, DCR = 0,1 m^3 s^{-1}

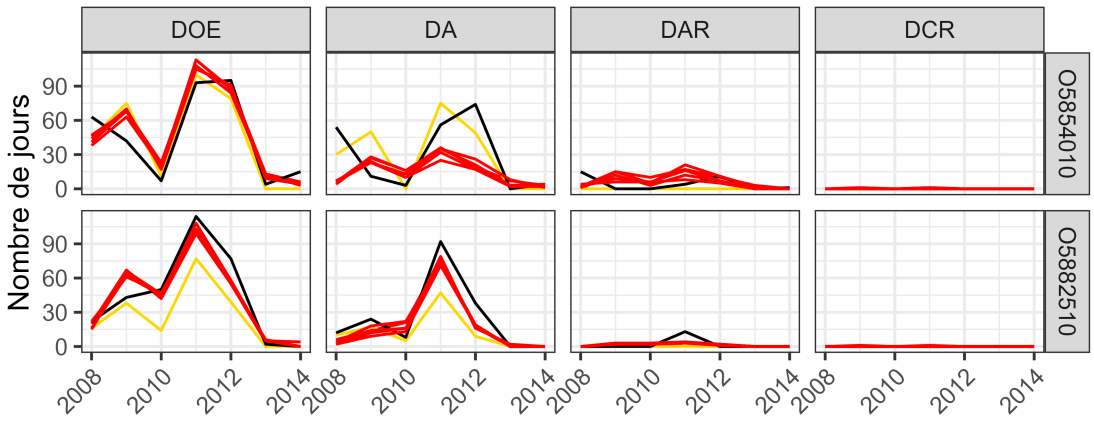
FIGURE VII.4 – Comparaison d'indicateurs d'étiage interannuels entre les observations, la modélisation prenant en compte les influences et la modélisation ne prenant pas en compte les influences (calages distincts) sur l'Aveyron, calculés sur 2008-2014



(a) VCN annuels pour plusieurs fenêtres temporelles (3, 7, ou 10 jours)

(b) QMNA annuels

FIGURE VII.5 – Comparaison d'indicateurs d'étiage annuels entre les observations, la modélisation prenant en compte les influences et la modélisation ne prenant pas en compte les influences (calages distincts)



(c) Nombre annuel de jours sous les seuils d'étiage aux stations de la Lère à Réalville (O5854010) : DOE = 0,1 $m^3 s^{-1}$, DA = 0,08 $m^3 s^{-1}$, DAR = 0,05 $m^3 s^{-1}$, DCR = 0,02 $m^3 s^{-1}$ et de l'Aveyron à Montauban (O5882510) : DOE = 4 $m^3 s^{-1}$, DA = 3,2 $m^3 s^{-1}$, DAR = 1,4 $m^3 s^{-1}$, DCR = 0,1 $m^3 s^{-1}$

FIGURE VII.5 – Comparaison d'indicateurs d'étiage annuels entre les observations, la modélisation prenant en compte les influences et la modélisation ne prenant pas en compte les influences (calages distincts) (Suite)

Les résultats sont mitigés : selon le SBGR, les indicateurs, et selon les années, la prise en compte des influences peut améliorer, dégrader, ou peu modifier la simulation des étiages.

La prise en compte des influences telles que modélisées dans les travaux de thèse semble notamment entraîner une diminution des VCN3 interannuels et annuels (Figure VII.4 (a), Figure VII.5 (a)). En effet, le modèle prélève exclusivement dans les cours d'eau tant que des restrictions ne sont pas mises en place. Or, la mise en place des restrictions nécessite que la moyenne des débits des trois derniers jours soit inférieure au DOE, maintenant une pression très importante des débits sur un laps de temps court. Cela entraîne une diminution critique des débits de surface avant la mise en place des restrictions. Finalement, certaines années, les VCNs estimés avec la modélisation intégrée se rapprochent des VCNs calculés à partir des observations par rapport au modèle ne prenant pas en compte les influences, mais d'autres années, les VCNs simulés deviennent trop faibles. On note cependant que le QMNA5 n'est que peu modifié par la prise en compte des influences pour les deux stations (Figure VII.4 (b), Figure VII.5 (b)).

La prise en compte des influences permet d'améliorer la simulation du nombre de jours sous les seuils d'étiage sur le SBGR O5882510, en augmentant ces derniers (Figure VII.4 (c)). La variabilité annuelle du nombre de jours sous les seuils est performante sur ce SBGR, avec ou sans prise en compte des influences (Figure VII.5). En revanche, le nombre de jours sous le DA pour le SBGR O5854010 est fortement diminué, et s'éloigne des observations, et cela est visible particulièrement sur certaines années. Cela pourrait s'expliquer par un soutien d'étiage trop performant par rapport à la réalité.

La Figure VII.6 permet de visualiser l'effet de la prise en compte des influences sur les périodes d'occurrence des étiages. On observe un étalement de celles-ci, et une plus forte sporadicité de ces dernières par rapport à la modélisation ne prenant pas en compte les influences. En effet, les prélèvements d'irrigation impactent les débits dès le début de l'été, déclenchant des niveaux d'étiage dès cette période. La plus forte sporadicité s'explique notamment par l'alternance de phases de restrictions et soutien d'étiage avec des périodes d'interruption des restrictions. La modélisation sans les influences souffre d'une trop grande continuité des étiages modélisés et ne parvient pas à représenter la précocité des étiages. Néanmoins, la sporadicité et l'étalement de la période d'étiage semblent trop prononcés dans le modèle prenant en compte les influences par rapport aux observations.

Ainsi, la modélisation des étiages est modifiée par la prise en compte des influences. La modélisation de certains indicateurs est améliorée, tandis que la modélisation d'autres indicateurs est dégradée. L'amélioration ou la dégradation demeurent cependant modérées. Néanmoins, il convient de rappeler qu'il existe une incertitude réelle sur la mesure des débits d'étiage, mais aussi que la représentation idéalisée des restrictions réglementaires dans le modèle peut différer de l'application réelle ainsi que du respect réel de ces restrictions. **Pour conclure, la modélisation des étiages, avec ou sans prise en compte des influences, nous paraît assez**

performante. Nous validons ainsi la possibilité de modéliser les étiages avec le modèle intégré développé, prenant en compte l'irrigation.

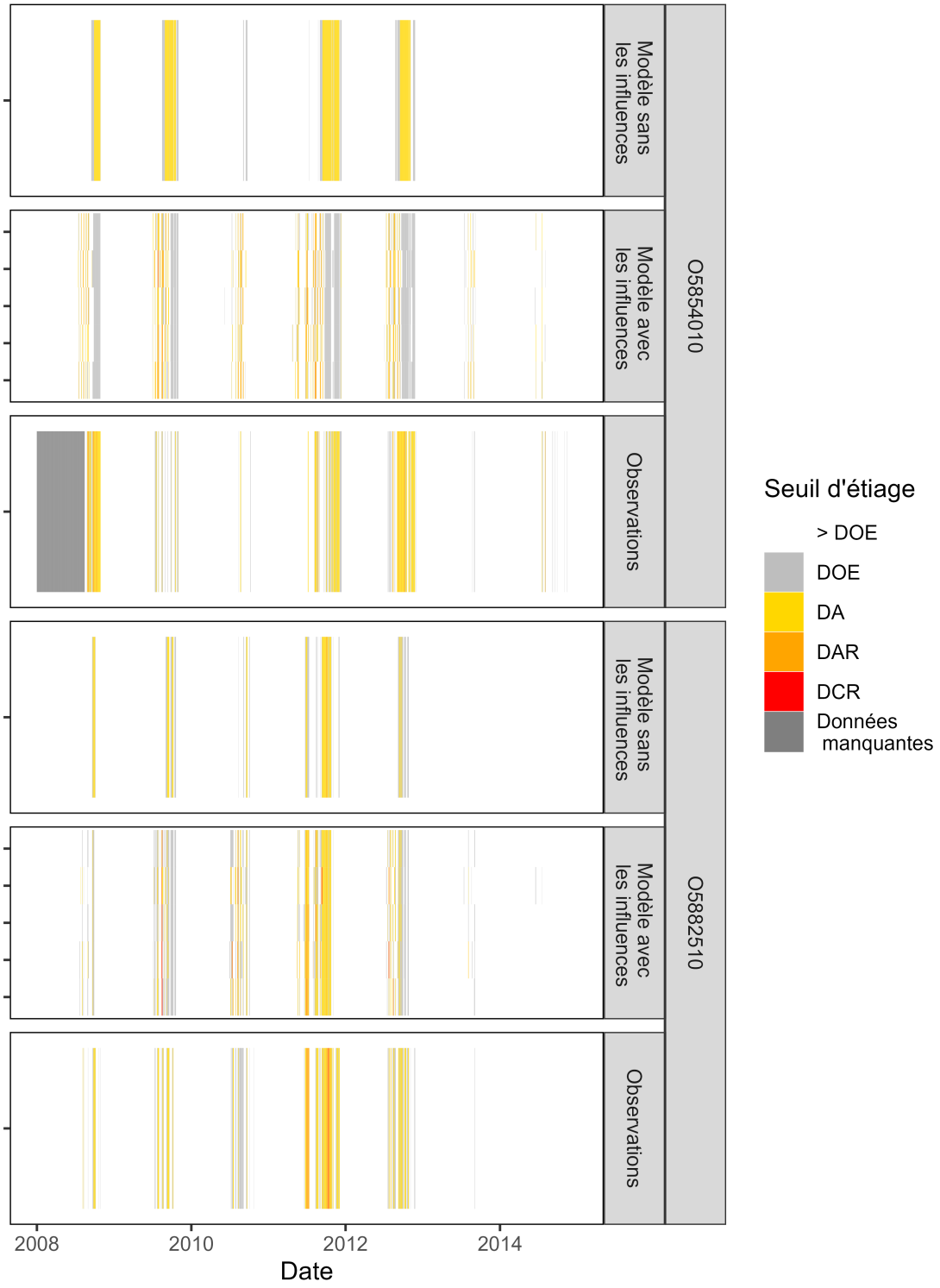
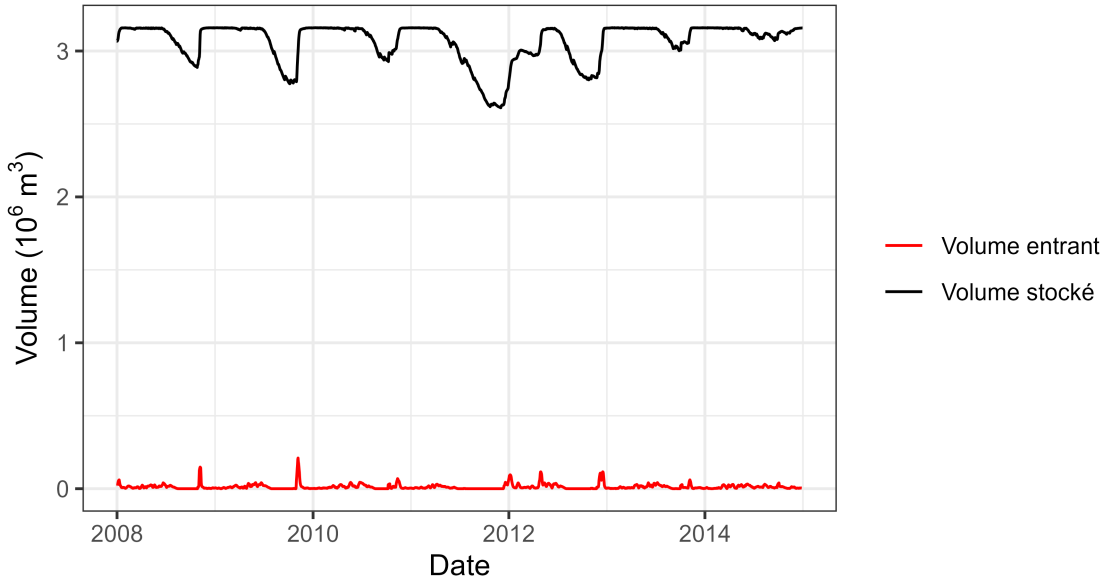


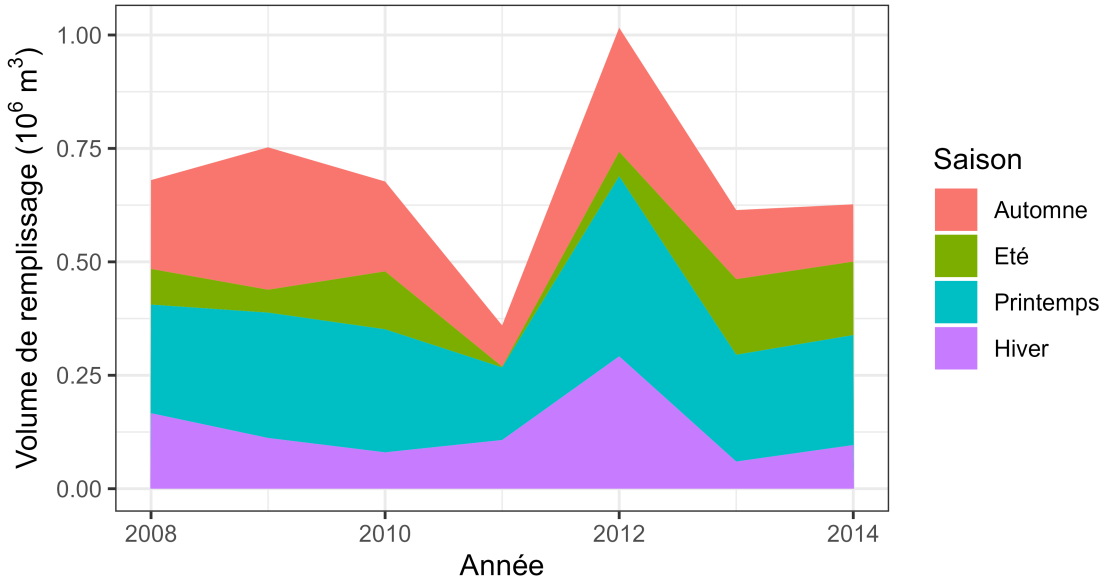
FIGURE VII.6 – Comparaison entre les seuils d'étiage atteints quotidiennement sur les stations de la Lère à Réalville (O5854010) et de l'Aveyron à Montauban (O5882510) et les seuils d'étiage modélisés avec et sans influence. Les cinq options pour la modélisation avec les influences correspondents aux différentes configurations de l'irrigation présentées dans le Tableau VI.3. Pour la Lère à Réalville : DOE = 0,1 m^3 s^{-1}, DA = 0,08 m^3 s^{-1}, DAR = 0,05 m^3 s^{-1}, DCR = 0,02 m^3 s^{-1} et pour l'Aveyron à Montauban (O5882510) : DOE = 4 m^3 s^{-1}, DA = 3,2 m^3 s^{-1}, DAR = 1,4 m^3 s^{-1}, DCR = 0,1 m^3 s^{-1}

2.4 Performance de la modélisation du remplissage des réservoirs

Nous évaluons qualitativement les simulations des volumes d'eau simulés dans les retenues simples (Figure VII.7) et spécifiques (Falquettes, le Gouyre, le Tordre, Figure VII.8) sur le bassin versant de l'Aveyron. De plus, pour les retenues spécifiques, nous comparons dans la Figure VII.9 les taux de remplissage aux classes de remplissage renseignées dans les bulletins de suivi des étiages (Section III.2.4.3).



(a) Volume stocké et entrant dans les retenues simples ne servant pas à l'irrigation du bassin versant de l'Aveyron. Le volume stocké est journalier, tandis que le volume entrant est présenté en somme glissante sur 7 jours. On rappelle que ces retenues ne se vident que par évaporation

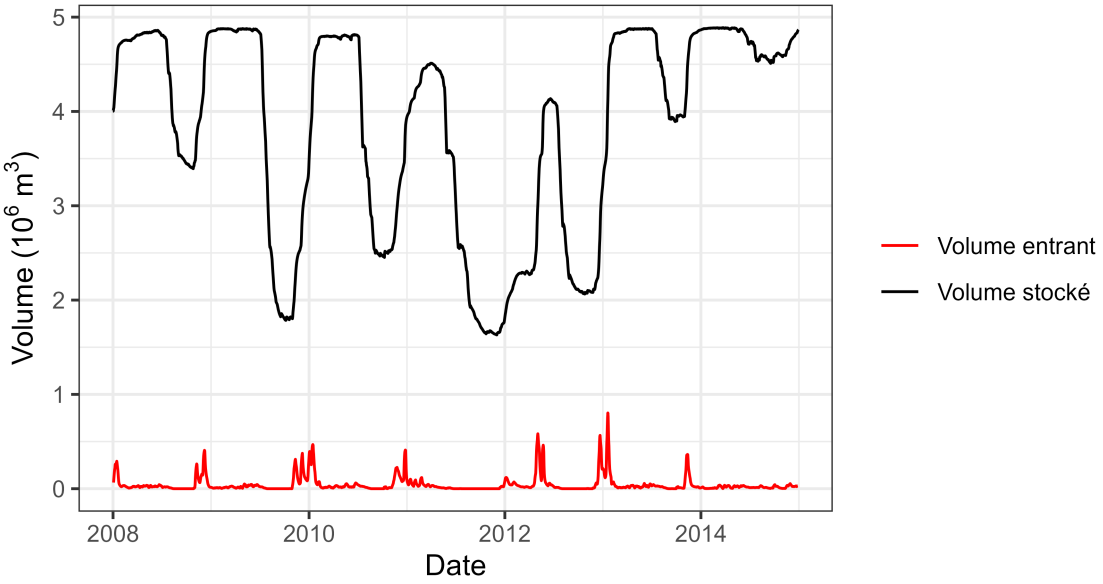


(b) Volume entrant dans les retenues simples ne servant pas à l'irrigation, annuellement et par saison. Hiver : janvier, février, mars ; Printemps : avril, mai, juin ; Été : juillet, août, septembre ; Automne : octobre, novembre, décembre

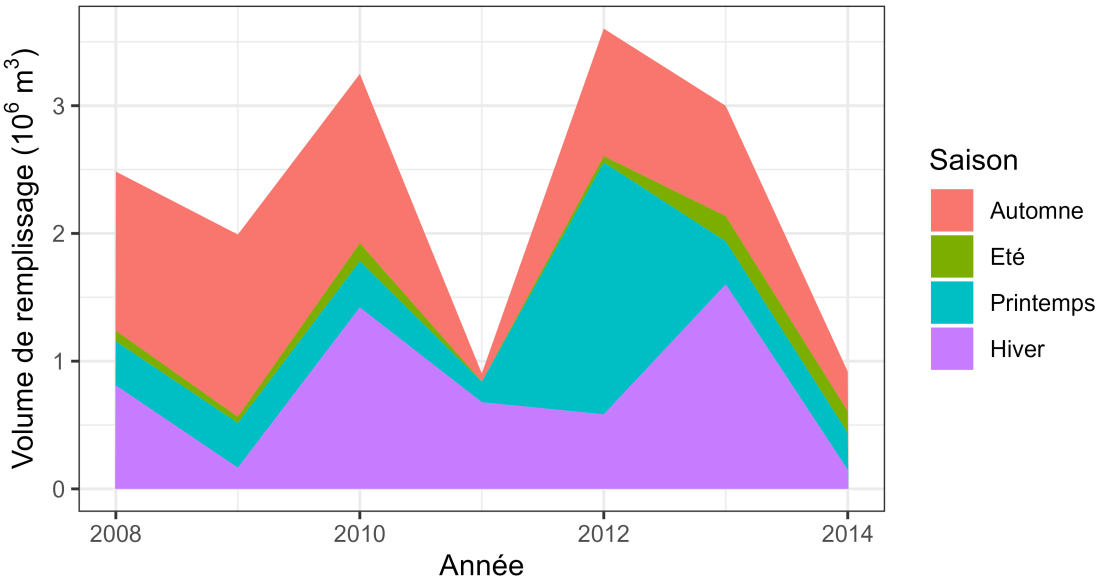
FIGURE VII.7 – Bilan hydrique des retenues simples sur le bassin versant de l'Aveyron. Seule la configuration de l'irrigation correspondant à deuxième ligne du Tableau VI.3 est représentée

On voit que les retenues simples se désemplissent et se reremplissent saisonnièrement (Figure VII.7). Le désemplissage des retenues simples ne servant pas à l'irrigation (Figure VII.7 (a) et (b)) s'explique par l'augmentation de l'évaporation et de la diminution du ruissellement en période estivale. Les volumes entrant sont assez bien répartis entre les différentes saisons. Ils sont toutefois plus importants au printemps et en automne,

périodes d'assez forte évaporation par rapport à l'hiver, et durant lesquelles le débit est produit en quantité suffisante pour contribuer au remplissage des retenues. Le remplissage est en effet légèrement moindre en été, montrant une certaine limitation de la capacité de remplissage du fait de la diminution du ruissellement en cette saison. Le désemplissage des retenues servant à l'irrigation (Figure VII.7 (c) et (d)) est augmenté par les prélèvements d'irrigation. La part de remplissage automnal et hivernal est plus élevée dans les retenues servant à l'irrigation. En effet, le désemplissage plus important en période d'irrigation a pour conséquence que le remplissage demeure plus faible en période automnale et hivernale par rapport aux retenues sans irrigation. Certaines années, les retenues servant à l'irrigation ne peuvent être entièrement remplies.



(c) Volume stocké et entrant dans les retenues simples servant à l'irrigation du bassin versant de l'Aveyron. Le volume stocké est journalier, tandis que le volume entrant est présenté en somme glissante sur 7 jours

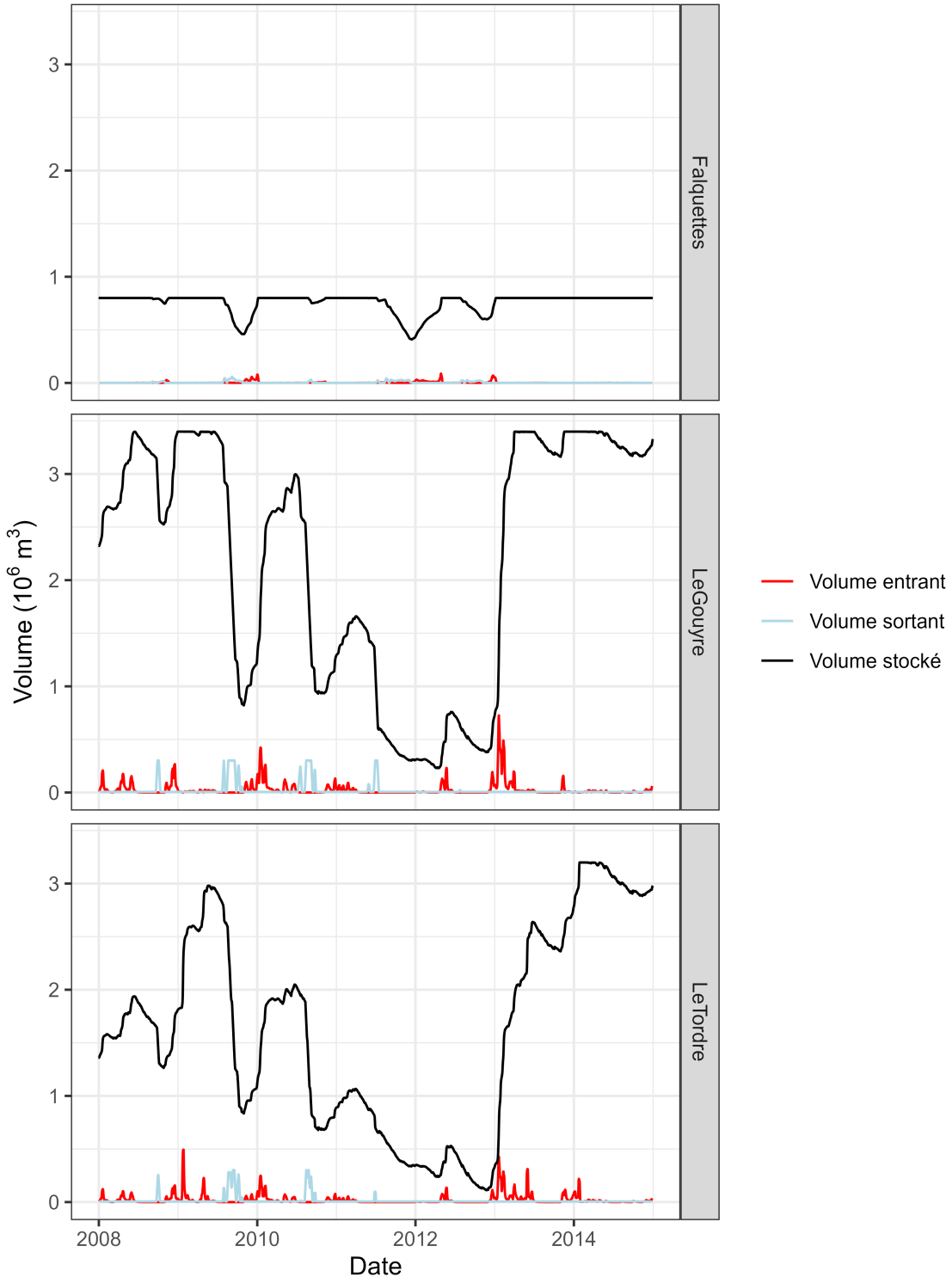


(d) Volume entrant dans les retenues simples servant à l'irrigation, annuellement et par saison. Hiver : janvier, février, mars ; Printemps : avril, mai, juin ; Été : juillet, août, septembre ; Automne : octobre, novembre, décembre

FIGURE VII.7 – Bilan hydrique des retenues simples sur le bassin versant de l'Aveyron. Seule la configuration de l'irrigation correspondant à la deuxième ligne du Tableau VI.3 est représentée (Suite)

Les volumes simulés des barrages (retenues spécifiques, Figure VII.8) montrent que les volumes entrants sont ici principalement concentrés en hiver. Le remplissage est à la fois déterminé par la compensation du désemplissage suite au soutien d'étiage, mais aussi par la disponibilité des débits de remplissage, qui sont plus

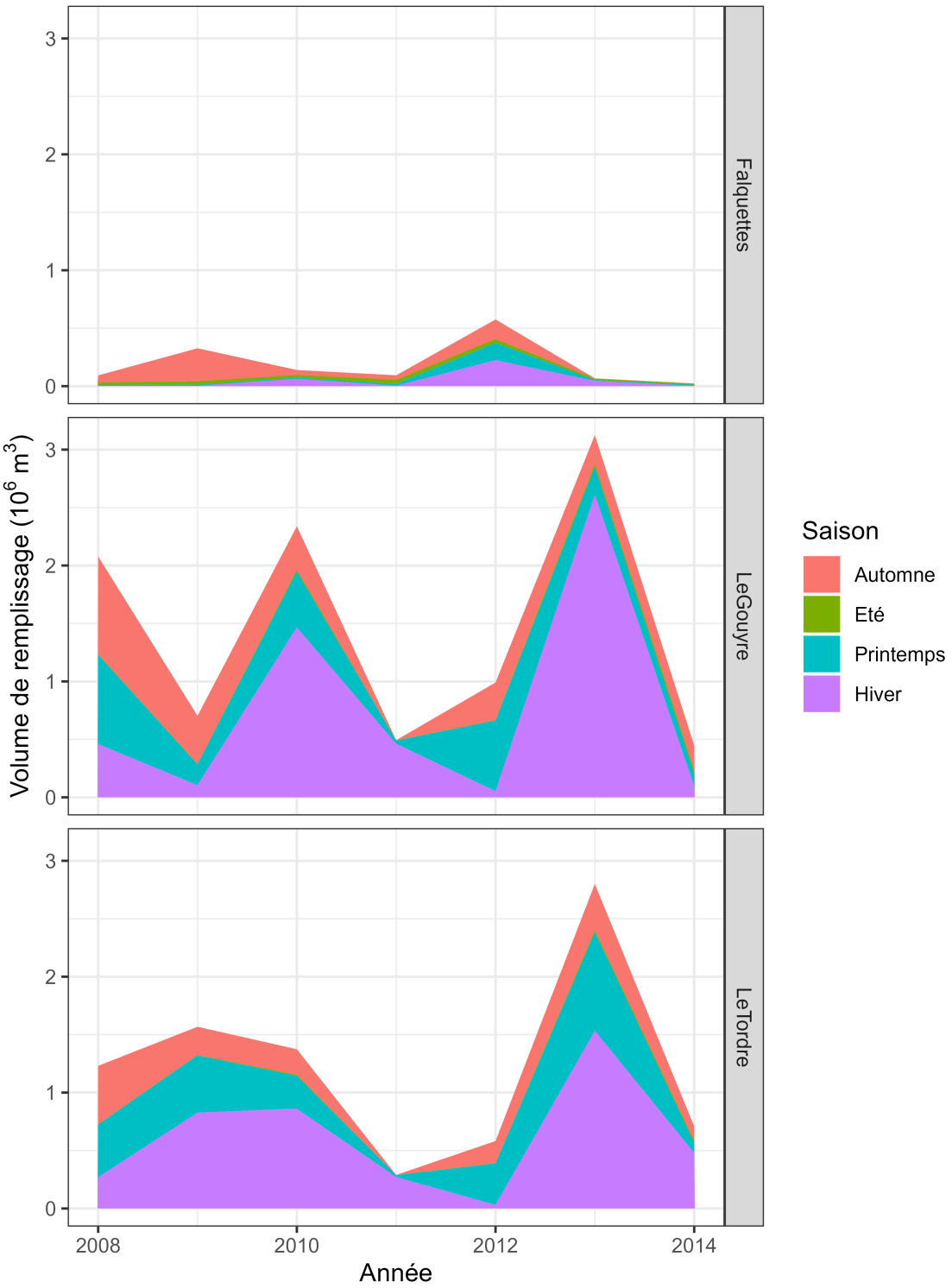
conséquents en hiver. On observe que les barrages du Gouyre et du Tordre ne parviennent que très peu à se remplir au cours des années 2011 et 2012.



(a) Volumes stocké, entrant et sortant dans les retenues spécifiques. Le volume sortant représente les sorties "actives" d'eau (débit réservé et volume vidangé), et n'incluent donc pas le volume sortant par "débordement". Les volumes stockés sont journaliers, tandis que les autres volumes sont présentés en somme glissante sur 7 jours

FIGURE VII.8 – Bilan hydrique des retenues spécifiques sur le bassin versant de l'Aveyron. Seule la configuration de l'irrigation correspondant à la deuxième ligne du Tableau VI.3 est représentée

La comparaison entre les volumes simulés dans les barrages du Gouyre et du Tordre avec les données des BSE (Figure VII.9) montre une très bonne cohérence, alors même que la modélisation des barrages mise au

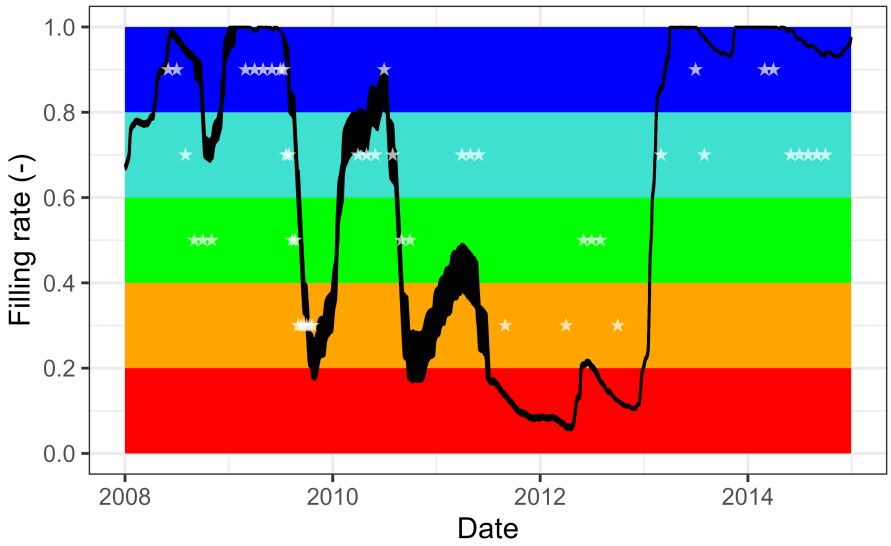


(b) Volume entrant dans les retenues spécifiques annuellement et par saison. Hiver : janvier, février, mars ; Printemps : avril, mai, juin ; Eté : juillet, août, septembre ; Automne : octobre, novembre, décembre. Ce volume entrant inclut les volumes qui pourront être réévacués dans la journée par les débits réservés et le soutien d'étiage, mais n'incluent pas les débits "débordants"

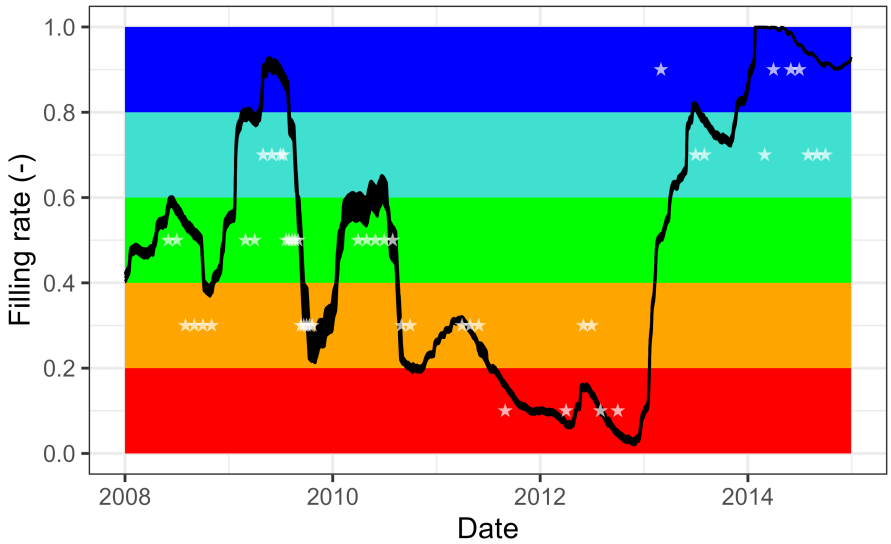
FIGURE VII.8 – Bilan hydrique des retenues spécifiques sur le bassin versant de l'Aveyron. Seule la configuration de l'irrigation correspondant à la deuxième ligne du Tableau VI.3 est représentée (Suite)

point est extrêmement simplifiée (compensation entre débits simulés et DOE). On parvient à reproduire les années lors desquelles les barrages ne sont pas reremplis et les années lors desquelles ils le sont. Le barrage

du Gouyre semble néanmoins assez "sur-sollicité" par rapport à la réalité. **Ainsi, les simulations des retenues nous paraissent vraisemblables et conformes aux hypothèses de modélisation formulées.**



(a) Le Gouyre



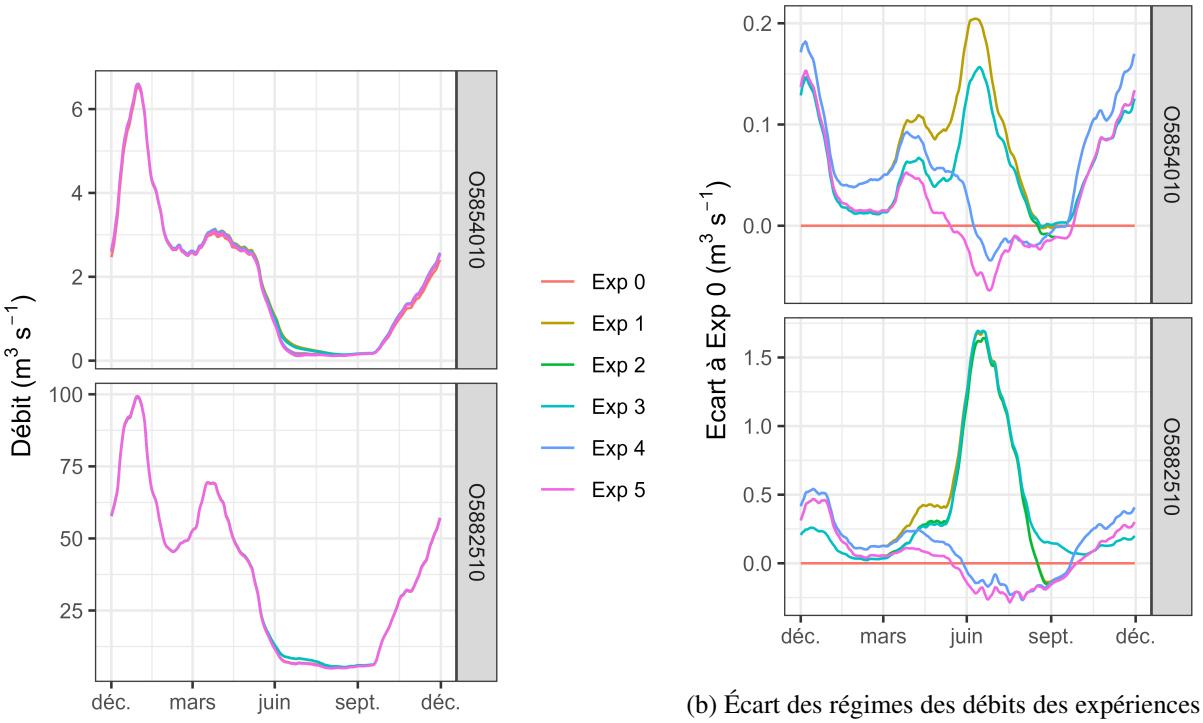
(b) Le Tordre

FIGURE VII.9 – Comparaison entre les taux de remplissage simulés et les taux de remplissage observés (par catégorie de 20 %, figurés par des étoiles) des barrages le Tordre et le Gouyre. Les étoiles indiquent la classe de remplissage renseignées dans les bulletins de suivi des étiages

2.5 Impacts du désinfluencement

Les régimes des simulations selon les différentes expériences de désinfluencement décrites dans la Section VII.1.3.1 sont présentés dans la Figure VII.10. Les expériences sans irrigation (Expériences 1, 2, 3) ont des débits supérieurs aux expériences avec irrigation (Expériences 0, 4, 5) sur les mois d'été (Figure VII.10 (a)). Les écarts relatifs restent plus mesurés le reste de l'année, induisant un impact faible sur les débits simulés. Par ailleurs, la présence de retenues, si elles ne sert pas à éviter que des prélèvements d'irrigation soient effectués en surface, entraîne une diminution des débits (Expérience 5 comparée à l'Expérience 4 ; Expérience 2 par rapport à l'Expérience 1 ; Figure VII.10 (b)). Néanmoins, les expériences permettant l'irrigation sans recourir au stockage (Expériences 4 et 5) entraînent une diminution des débits par rapport à la modélisation intégrée non désinfluencée (Expérience 0), c'est-à-dire qui permet le prélèvement des volumes stockés pour irriguer. Cette

aggravation dans le cas où l'irrigation ne peut mobiliser d'eau stockée est toutefois limitée par la limitation des prélèvements selon les restrictions réglementaires et les débits simulés disponibles. **Nous pouvons en conclure que le modèle semble réagir de façon réaliste aux influences que nous lui avons imposées.**



(a) Régimes des débits selon les différentes expériences de désinfluencement

(b) Écart des régimes des débits des expériences de désinfluencement partiel par rapport au régime de la simulation avec toutes les influences (Exp. 0).

FIGURE VII.10 – Comparaison des régimes des débits sur le bassin versant de l'Aveyron selon les différentes expériences de désinfluencement partiel présentées dans le Tableau VII.1. Les courbes correspondent à des moyennes interannuelles glissantes sur 10 jours de débit (a) et d'écart au débit de l'Expérience 0 (b). Les expériences 2 et 3 sont presque intégralement superposées pour la Lère à Réalville (O5854010)

3 Résultats sur le bassin versant de la Seille

3.1 Performance de la modélisation hydrologique

Les valeurs des paramètres de modélisation hydrologique (i.e. du modèle GR5J semi-distribué simple ou bien utilisé dans la modélisation intégrée GRcrop) obtenus par calage sur la période 1986-2019 (données disponibles sur 1986-2015 pour la Seille à Metz, A7881010), ainsi que les valeurs de la fonction-objectif (KGE appliqué à la transformation Box-Cox du débit) sur les différents sous-bassins pour cette même période, sont indiquées dans le Tableau VII.3. On remarque que la prise en compte des influences, notamment la gestion de l'étang de Lindre et des plans d'eau, permet d'obtenir de meilleures valeurs pour le critère de performance (KGE appliqué à la transformation Box-Cox du débit) sur les trois bassins versants modélisés. En ce qui concerne les valeurs de paramètres, celles-ci sont modifiées mais seulement de manière mesurée : aucun paramètre ne semble évoluer de manière importante grâce à l'inclusion de l'étang de Lindre dans la modélisation. De même que pour l'Aveyron, ce résultat peut notamment signifier :

- que le comportement hydrologique lié à l'étang de Lindre n'avait pas pu être "imité" par des valeurs des paramètres de GR5J non influencé qui auraient évolué lors du calage vers des valeurs potentiellement inhabituelles. Contrairement à l'Aveyron, étant donné que les performances sont significativement améliorées en prenant en compte les usages, cela signifie que l'inclusion des chroniques de vidange via un

couplage à un modèle de l'étang de Lindre dans la modélisation hydrologique semble être le seul moyen de bien représenter l'hydrologie en aval de celui-ci, et appuie l'utilisation d'une modélisation intégrée ;

- que les influences impactent peu l'hydrologie ; cependant, on a pu voir sur des chroniques de débit précédemment présentées ainsi que via le calcul du KGE sur la transformation Box-Cox des débits que ce n'est pas le cas. On écarte donc cette hypothèse.

	Bassin	**X1 (mm)**	**X2 (mm j^{-1})**	**X3 (mm)**	**X4 (j)**	**X5 (-)**	**lag (m s^{-1})**	**KGE Box-Cox]−∞ ; 1]**
Sans les influences	A7581020	244	-1,35	37,7	1,78	0,43	/	0,87
	A7821010	220	-0,79	31,3	2,03	0,43	0,33	0,93
	A7881010	174	-0,78	12,1	1,84	0,41	0,61	0,94
Avec les influences	A7581020	268	-1,37	42,5	1,89	0,44	0,33	0,92
	A7821010	224	-0,70	32,0	2,17	0,43	0,42	0,94
	A7881010	174	-0,78	11,5	1,90	0,40	0,61	0,95

TABLEAU VII.3 – Valeurs des paramètres pour chaque sous-bassin versant modélisé obtenues pour la modélisation sans les influences et pour la modélisation prenant en compte les influences par calage sur la période 1986-2019 (1986-2015 pour la Seille à Metz, A7881010)

Ces progrès en termes de modélisation hydrologique observés sur les scores de KGE se retrouvent sur les courbes de régime modélisées et observées sur la Figure VII.11. On observe bien un meilleur recouvrement entre la courbe de régime des débits simulés avec le modèle prenant en compte les influences et les observations, que ce n'est le cas pour le modèle ne prenant pas en compte les influences. On remarque en particulier l'effet des vidanges de l'étang de Lindre sur la fin de l'été et l'automne sur le bassin de la Seille à Moyenvic (A7581020), le plus proche de l'étang de Lindre. En revanche, les améliorations sont logiquement moins visibles sur le régime de la Seille à Metz, bassin le plus en aval et donc le moins influencé par cet étang.

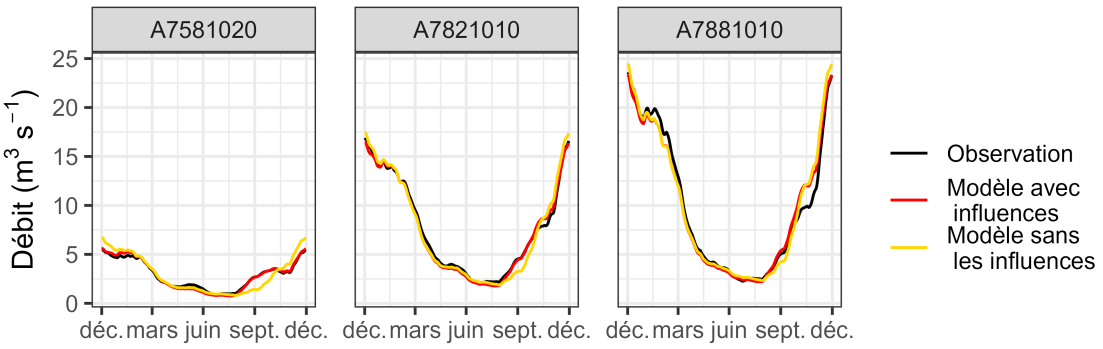


FIGURE VII.11 – Comparaison des régimes observés et simulés pour la période 1986-2019 (1986-2015 pour la Seille à Metz, A7881010)

Les résultats du split-sample test sont présentés dans la Figure VII.12. Pour les deux périodes de calage, nous obtenons de très bonnes performances en calage et en évaluation sur les trois sous-bassins versants. De plus, les performances ne sont que peu dégradées sur les périodes d'évaluation par rapport aux périodes de calage. Enfin, les performances sont meilleures pour la modélisation prenant en compte les influences, en calage comme en évaluation, ce qui est cohérent avec les résultats précédents. Nous pouvons donc considérer que le modèle, avec et sans influences, est robuste, mais que le modèle avec influences est plus performant.

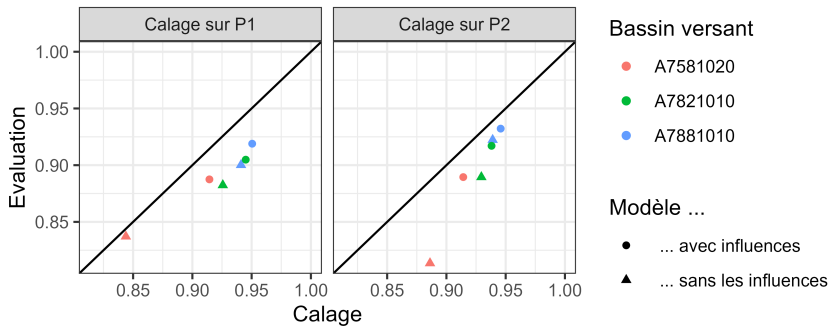
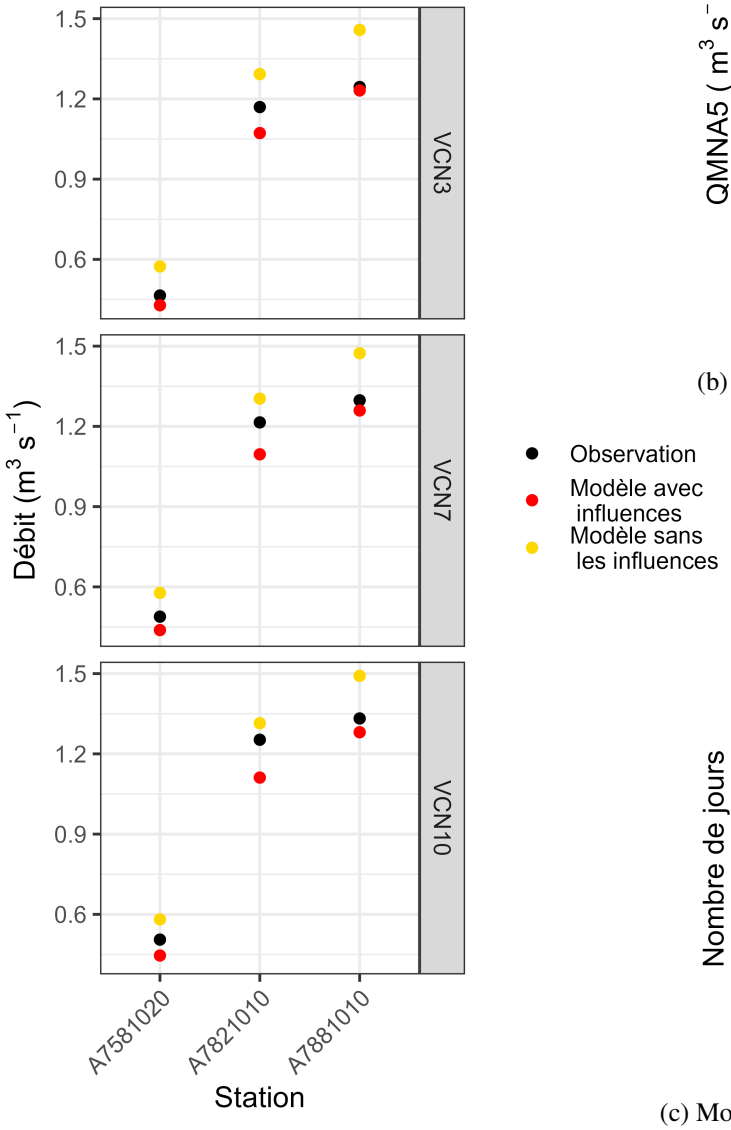


FIGURE VII.12 – Comparaison du KGE calculé sur la transformation Box-Cox des débits entre la période de calage et celle d'évaluation pour deux périodes de calage du modèle : P1 : 1986-2000 ; P2 : 2000-2015

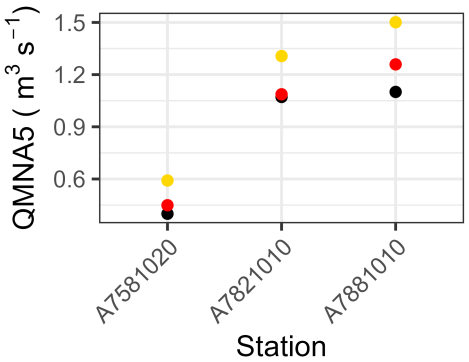
3.2 Performance de modélisation des étiages

De même que pour l'Aveyron, nous analysons la capacité du modèle intégré à reproduire des indicateurs hydrologiques d'étiage. Nous présentons dans la Figure VII.13 les indicateurs d'étiage interannuels calculés. Nous présentons sur la Figure VII.14 des indicateurs d'étiage équivalents, mais cette fois calculés année par année, pour évaluer la capacité du modèle à reproduire les étiages annuels. Enfin, nous présentons dans la Figure VII.15 le seuil d'étiage atteint quotidiennement sur la Seille à Metz, que nous comparons au seuil d'étiage atteint quotidiennement par les modèles.

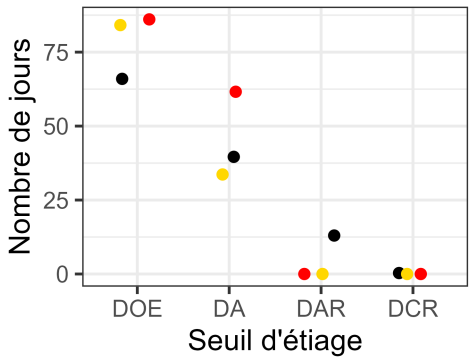
Le modèle prenant en compte les influences obtient des valeurs de VCN moyen interannuel et de QMNA5 plus proches des observations que le modèle ne prenant pas en compte les influences (Figure VII.13) pour deux des trois stations. En allant plus loin, on note que pour les deux modèles, le nombre de jours sous le DOE est trop élevé. Pour le modèle prenant en compte les influences, le nombre de jours sous le DA est également trop élevé. Au contraire, les modèles ne parviennent pas à simuler de débits sous le DAR et le DCR. Pour les projections, nous choisirons donc de ne pas considérer les passages sous le DAR et le DCR dans les indicateurs d'évolution de l'intensité des étiages. Si les valeurs des indicateurs interannuels obtenues pour les simulations nous paraissent globalement bien correspondre aux valeurs calculées à partir des observations, les modèles ont des difficultés à bien reproduire la variabilité annuelle des indicateurs d'étiage, en particulier pour les VCN (Figure VII.14 (a) et (b)). Le modèle prenant en compte les influences paraît toutefois mieux correspondre aux valeurs basses des indicateurs d'étiage annuels, et surtout mieux représenter les variations annuelles pour les VCN et les QMNA. Les variations annuelles de VCN demeurent néanmoins mal représentées. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cette difficulté : des influences ou processus naturels peuvent être non ou mal pris en compte dans la modélisation, par exemple des mouvements d'écluse pouvant entraîner de fortes réductions des débits ponctuels ; le calcul du rayonnement par la formule d'Hargreaves peut lisser les maxima d'évapotranspiration potentielle, etc. Enfin, l'étude des passages sous les différents seuils d'étiage confirme que les modèles tendent à simuler trop de jours sous le DOE, et que le modèle avec influences simule trop de jours sous le DA (Figure VII.14 (c)). Néanmoins, on observe que la temporalité des périodes d'étiage est très cohérente avec les observations (Figure VII.15). **Nous estimons ainsi que le modèle développé, prenant en compte les influences, représente de façon suffisamment performante les étiages pour être utilisé pour évaluer l'évolution des étiages dans les projections.**



(a) VCN moyen interannuel pour plusieurs fenêtres temporelles (3, 7, ou 10 jours)

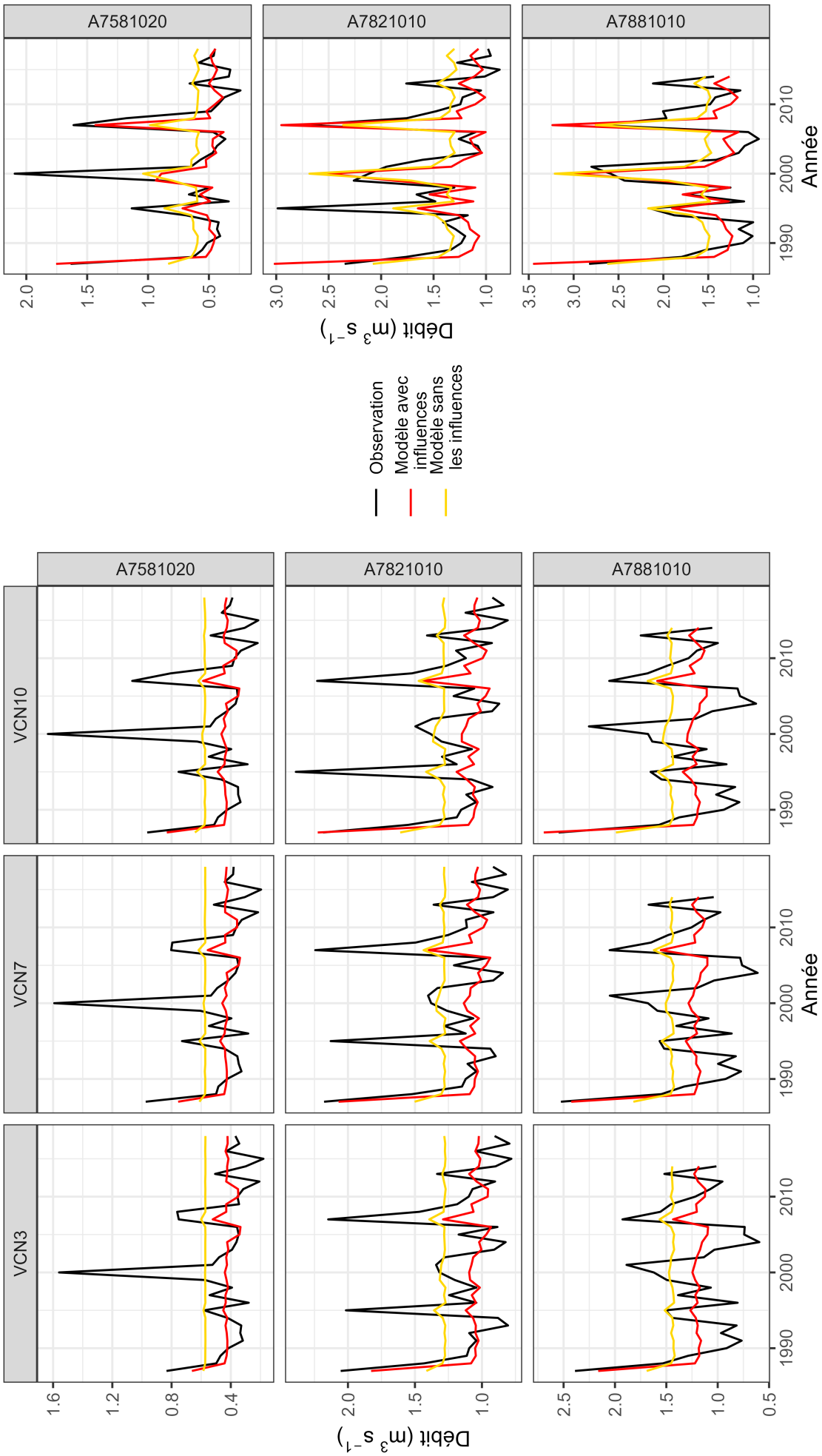


(b) QMNA5 calculé via la fréquence empirique



(c) Moyenne interannuelle du nombre de jours de passage sous les seuils d'étiage à la station de la Seille à Metz (A7881010) : DOE = 1,88 $m^3 s^{-1}$, DA = 1,5 $m^3 s^{-1}$, DAR = 1,09 $m^3 s^{-1}$, DCR = 0,67 $m^3 s^{-1}$

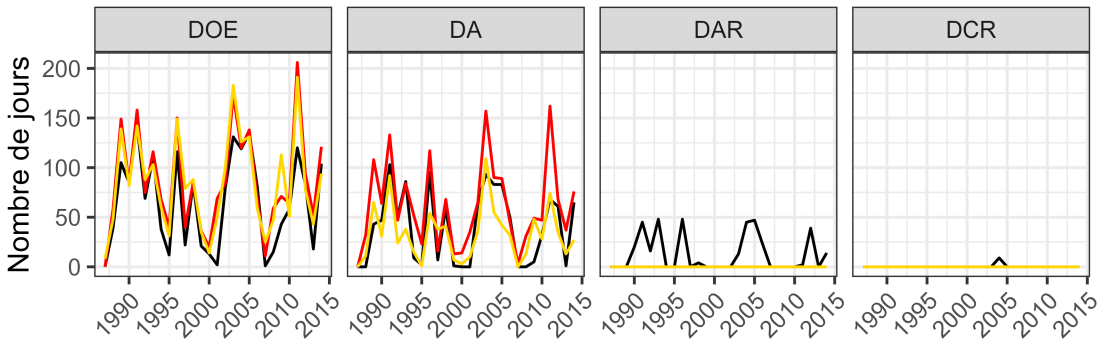
FIGURE VII.13 – Comparaison d'indicateurs d'étiage interannuels entre les observations, la modélisation prenant en compte les influences et la modélisation ne prenant pas en compte les influences (calages distincts)



(a) VCN annuels pour plusieurs fenêtres temporelles (3, 7, ou 10 jours)

(b) QMNA annuels

FIGURE VII.14 – Comparaison d'indicateurs d'étiage annuels entre les observations, la modélisation prenant en compte les influences et la modélisation ne prenant pas en compte les influences (calages distincts)



(c) Nombre annuel de jours sous les seuils d'étiage à la station de la Seille à Metz (A7881010) : DOE = 1,88 $m^3 s^{-1}$, DA = 1,5 $m^3 s^{-1}$, DAR = 1,09 $m^3 s^{-1}$, DCR = 0,67 $m^3 s^{-1}$

FIGURE VII.14 – Comparaison d'indicateurs d'étiage annuels entre les observations, la modélisation prenant en compte les influences et la modélisation ne prenant pas en compte les influences (calages distincts) (Suite)

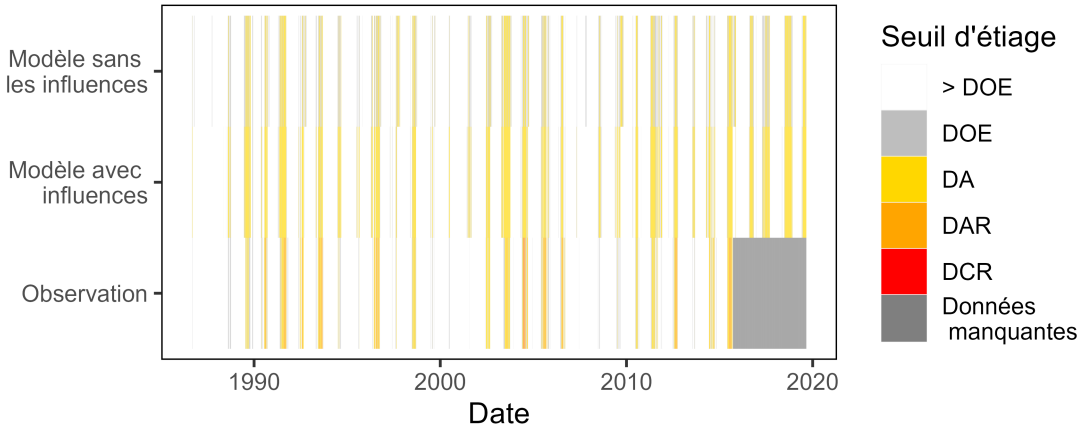


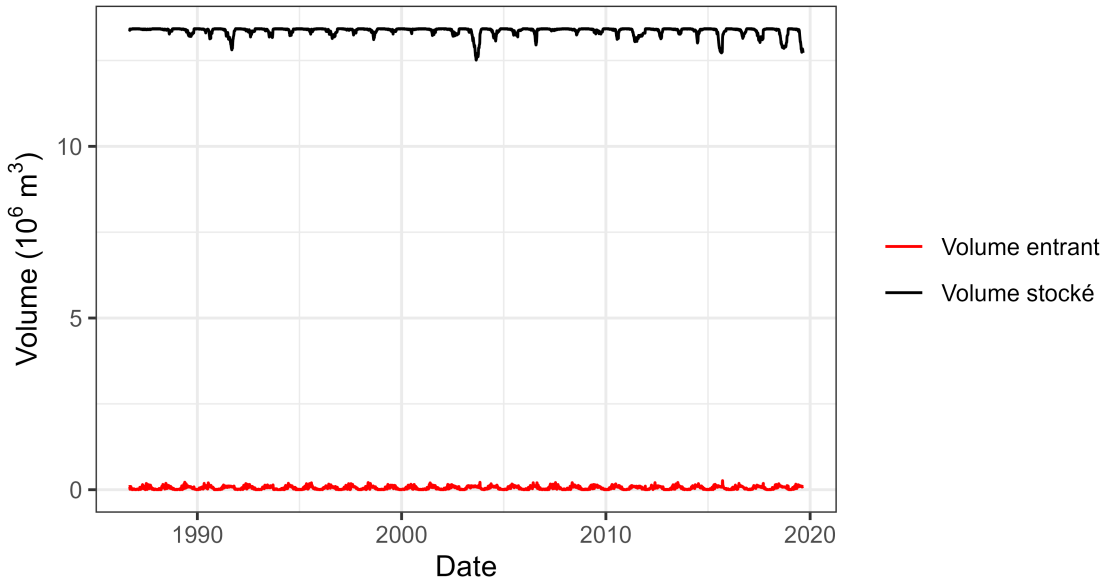
FIGURE VII.15 – Comparaison entre les seuils d'étiage atteints quotidiennement sur la station de la Seille à Metz et les seuils d'étiage modélisés avec et sans influence. DOE = 1,88 $m^3 s^{-1}$; DA = 1,5 $m^3 s^{-1}$; DAR = 1,09 $m^3 s^{-1}$; DCR = 0,67 $m^3 s^{-1}$.

3.3 Performance de la modélisation du remplissage des réservoirs

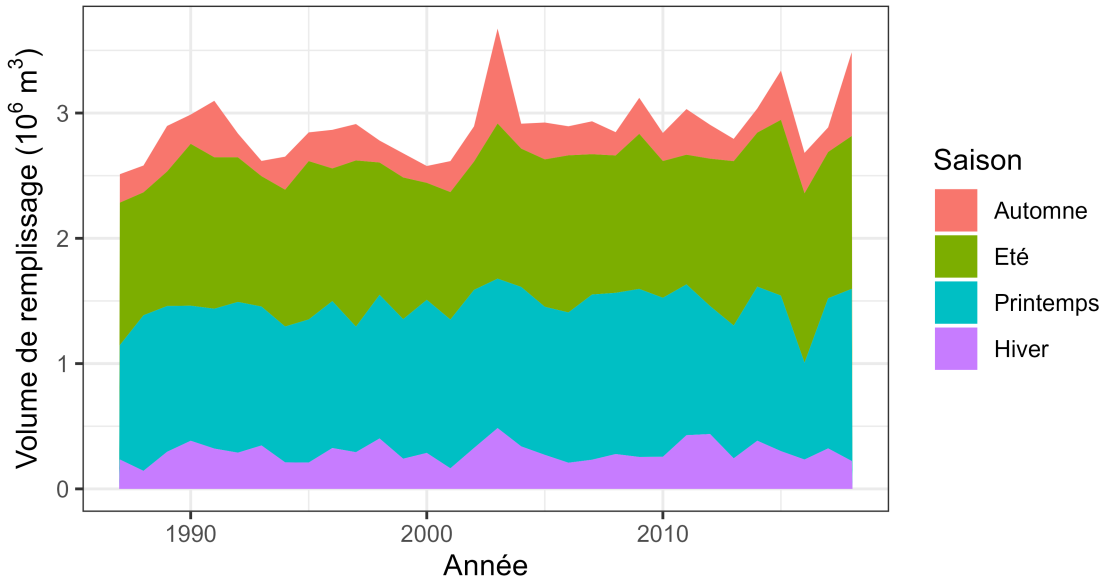
Nous évaluons qualitativement les volumes d'eau simulés dans les réservoirs et dans l'étang de Lindre. On voit que les retenues simples se désemplissent et se reremplissent saisonnièrement (Figure VII.16 (a)), montrant une réaction cohérente à l'augmentation de l'évaporation et à la diminution du ruissellement en période estivale. Les variations de niveau des retenues sont néanmoins assez faibles, conduisant à un faible volume entrant dans ces retenues. On remarque que l'année de réduction maximale de volume stocké dans les retenues est l'année 2003, correspondant à une année de forte canicule. Les volumes entrant sont principalement concentrés au printemps et en été (Figure VII.16 (b)), compensant le déficit entre évaporation et précipitations, et donc le désemplissage des retenues sur ces périodes. Le reremplissage est toutefois légèrement moindre en été, montrant une certaine limitation de la capacité de reremplissage du fait de la diminution du ruissellement en cette saison. Le reremplissage est faible en automne et en hiver en raison d'un taux de remplissage déjà élevé à ces périodes.

Les volumes simulés de l'étang de Lindre mettent bien en avant les années avec vidange, qui permettent effectivement de désemplir presque intégralement, voire intégralement, l'étang de Lindre (Figure VII.17). On repère également bien les périodes d'assecs pour travaux 2004 à 2006, et de 2009 à 2011. Les volumes entrant sont ici principalement concentrés en automne et en hiver suivant les vidanges. Encore une fois, le remplissage est ainsi principalement déterminé par la compensation du désemplissage de l'étang de Lindre, qui intervient

à l'automne, c'est-à-dire sur d'autres périodes que celles montrant un déficit entre précipitations et évaporation. **Ainsi, les simulations nous paraissent vraisemblables et conformes aux hypothèses de modélisation formulées.**

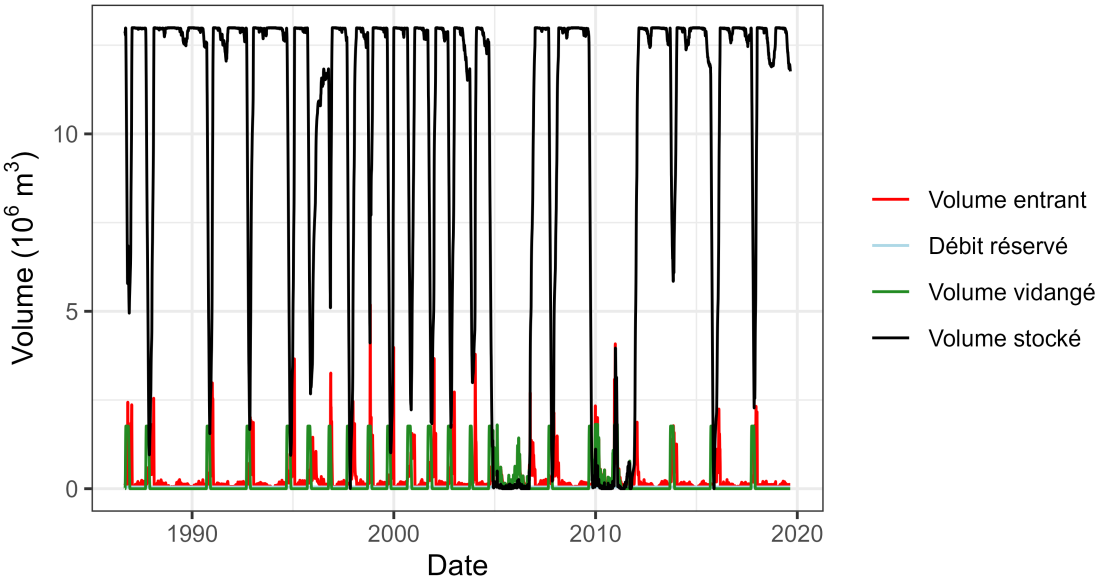


(a) Volume stocké et entrant dans les retenues simples du bassin versant de la Seille. Le volume stocké est journalier, tandis que le volume entrant est présenté en somme glissante sur 7 jours

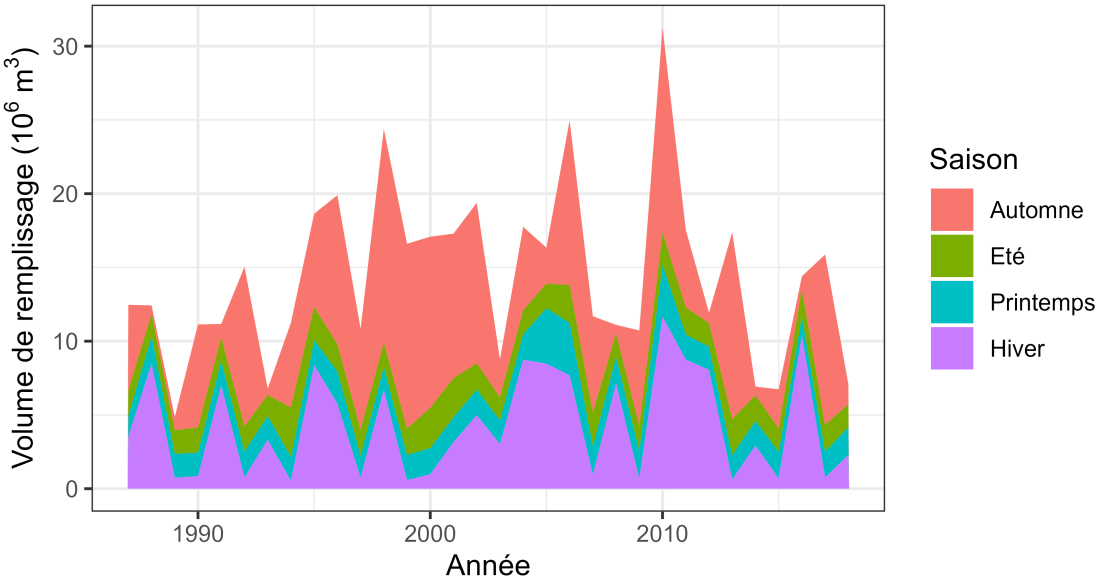


(b) Volume entrant dans les réservoirs annuellement et par saison. Hiver : janvier, février, mars ; Printemps : avril, mai, juin ; Été : juillet, août, septembre ; Automne : octobre, novembre, décembre

FIGURE VII.16 – Bilan hydrique modélisé dans les retenues simples sur le bassin versant de la Seille



(a) Volume stocké dans l'étang de Lindre, volume entrant et volume sortant (débit réservé et volume vidangé). Le volume vidangé représente les sorties "actives" d'eau de l'étang de Lindre, et n'inclue donc pas le volume sortant par "débordement" de l'étang de Lindre. Les volumes stockés sont journaliers, tandis que les autres volumes sont présentés en somme glissante sur 7 jours



(b) Volume entrant dans l'étang de Lindre annuellement et par saison. Hiver : janvier, février, mars ; Printemps : avril, mai, juin ; Eté : juillet, août, septembre ; Automne : octobre, novembre, décembre. Ce volume entrant inclue les volumes qui pourront être réévacués dans la journée par les débits réservés et vidange active, mais n'incluent pas les débits "débordant" de l'étang de Lindre

FIGURE VII.17 – Bilan hydrique modélisé dans l'étang de Lindre sur le bassin versant de la Seille

3.4 Impacts du désinfluencement

Ici nous comparons les simulations de trois expériences : avec les influences, sans aucune influence mais en utilisant le même jeu de paramètres hydrologiques, et sans les vidanges de l'étang de Lindre. Les régimes des débits simulés par ces expériences sont présentés dans la Figure VII.18. On observe ainsi que retirer l'ensemble des retenues, ou simplement arrêter les vidanges de l'étang de Lindre, entraîne une augmentation des débits hivernaux, en particulier sur la station de la Seille à Moyenvic (A7581020). Retirer les retenues entraîne de plus une augmentation des débits estivaux, en particulier sur la station de la Seille à Moyenvic (A7581020). De

plus, la suppression des vidanges entraîne logiquement une diminution des débits en fin d'été et en automne. Ces résultats paraissent cohérents : le remplissage et l'évaporation de l'étang de Lindre entraînent une diminution des débits en dehors des périodes de vidange. Le remplissage des autres retenues ne semble pas jouer très significativement sur les débits hivernaux par rapport au remplissage de l'étang de Lindre. **Le modèle semble ainsi réagir correctement aux influences que nous lui avons imposées.**

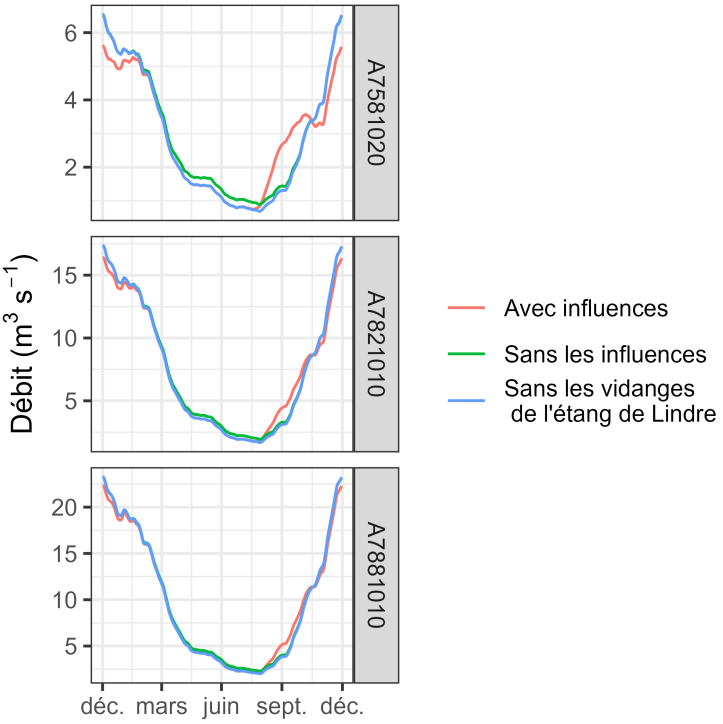


FIGURE VII.18 – Comparaison des régimes des débits avec toutes les influences, sans aucune influence, ou avec les plans d'eau mais sans vidange de l'étang de Lindre, sur la période 1986-2019 sur le bassin versant de la Seille

4 Conclusion sur l'évaluation du modèle intégré

Les résultats de simulation montrent des performances satisfaisantes de la modélisation intégrée agro-hydrologique sur le bassin versant de l'Aveyron. De même, les performances de simulation de la modélisation intégrée prenant en compte les plans d'eau et la gestion de l'étang de Lindre sur le bassin versant de la Seille sont très satisfaisantes, et le fonctionnement du modèle est plus réaliste que s'il ne prenait pas en compte les retenues. Les deux modèles permettent déjà, sur la période historique, de quantifier les impacts des usages sur l'hydrologie, et de restreindre les prélèvements par les débits simulés. On notera toutefois certaines limites quant à la représentation de certains indicateurs d'étiage.

Nous pouvons donc utiliser notre modélisation pour simuler les impacts de scénarios sur le bassin versant de la Seille. Le modèle implémenté sur la Seille va ainsi être réutilisé, en introduisant la modélisation de l'irrigation correspondant aux scénarios construits dans le Chapitre IV.

A retenir :

Les résultats de l'évaluation permettent de valider l'approche intégrée prenant en compte l'irrigation sur le bassin versant de l'Aveyron. Le modèle prenant en compte les retenues et la gestion de l'étang de Lindre est également jugé satisfaisant sur le bassin versant de la Seille. Pour effectuer les projections des scénarios sur le bassin versant de la Seille, avec irrigation, nous pourrons donc nous appuyer sur le modèle développé.

Evaluation des impacts des scénarios par la modélisation

Chapitre VIII

Méthodologie de modélisation des scénarios

Avant-propos :

Nous avons développé un modèle parcimonieux permettant d'intégrer hydrologie et irrigation à l'échelle de bassins versants de méso-échelle dans les Chapitres VI et VII. De plus, nous avons construit trois scénarios locaux sur le bassin versant de la Seille à échéance 2050 dans le Chapitre IV. Nous souhaitons désormais évaluer la possibilité d'utiliser le modèle développé pour quantifier les impacts des scénarios locaux et du changement climatique sur l'hydrologie et l'agriculture du bassin versant de la Seille, et par conséquent évaluer les impacts du changement climatique et des stratégies d'adaptation sur le bassin versant de la Seille. Nous décrivons ainsi dans ce chapitre la méthodologie mise en œuvre pour modéliser les scénarios et en évaluer les impacts, la traduction des scénarios en données d'entrée de la modélisation intégrée, et quelques effets du changement climatique explicités dans cette modélisation.

1 Méthodologie d'évaluation des impacts des scénarios et du changement climatique

1.1 Plan de simulation

Nous choisissons de comparer le climat du bassin versant de la Seille sur une période future à une période de référence historique. Nous souhaitons que chaque période dure 30 ans, pour être représentative d'un climat moyen, c'est-à-dire pour être en mesure de calculer des indicateurs moyens sur cette période, qui soient donc indépendants de la variabilité interannuelle climatique, qui s'ajoute au signal du changement climatique. On notera que cette durée de 30 ans, classiquement utilisée dans les rapports du GIEC, peut souffrir d'un climat qui évolue vite sur cette durée. On peut trouver parfois des durées utilisées de 20 ans seulement, y compris dans certaines figures des rapports du GIEC, mais nous avons voulu privilégier une durée de 30 ans en raison de la variabilité climatique interannuelle.

Nous sélectionnons par conséquent la période 1990-2019 afin de représenter la période de référence, qu'on appellera période historique. Il s'agit donc d'un passé récent, permettant de représenter la situation connue actuellement par les acteurs et habitants du bassin versant de la Seille. Ce choix d'une période plus récente que classiquement utilisée (on trouve souvent 1976-2005 dans la littérature) et qui est à cheval entre des projections climatiques forcées par des observations de concentration de gaz à effet de serre (jusqu'à 2005) et forcées par des scénarios de concentration de gaz à effet de serre (depuis 2006) se justifie afin de se rapprocher d'une situation de référence la plus actuelle possible. Nous sélectionnons enfin la période 2040-2069 pour l'horizon futur, permettant d'englober l'horizon 2050 utilisé pour imaginer les scénarios. Nous choisissons d'effectuer les simulations sur deux périodes disjointes plutôt sur une période continue pour des raisons de temps de calcul,

et pour ne pas avoir à effectuer des hypothèses complexes d'évolution transitoire des assolements ou encore de la gestion de l'étang de Lindre.

Pour les projections sur l'horizon historique comme sur l'horizon futur, une initialisation de quatre années est effectuée. La première année est utilisée pour initialiser le modèle hydrologique et les trois années suivantes sont utilisées pour initialiser les réservoirs simulés sur le bassin par GRcrop.

L'étude des impacts du changement climatique par la modélisation intégrée doit étudier des **évolutions de projections**, et non pas comparer les projections futures à des observations passées. Cela est nécessaire afin d'isoler la quantification de l'impact du changement climatique et des scénarios locaux de l'effet de l'erreur de modélisation. Nous choisissons donc de comparer :

- les simulations des scénarios présentés dans la Section IV.2, à modéliser dans l'horizon futur ;
- à la simulation des usages actuels, détaillés dans la Section VI.4.2, à modéliser dans l'horizon de référence.

Sur l'horizon futur, en plus des scénarios, on modélise le cas théorique "Usages constants", reprenant le modèle développé dans la Section VI.4.2, mais en le soumettant aux projections climatiques futures. Celui-ci consiste à reprendre le modèle hydrologique prenant en compte la gestion de l'étang de Lindre et les retenues tel qu'implémenté dans la Section VI.4.2. Il permettra d'isoler les effets du changement climatique de l'effet des scénarios locaux.

Des indicateurs d'évolution de l'hydrologie et des niveaux des réservoirs pourront ainsi être calculés entre les usages actuels sur la période historique, et les projections des scénarios et du cas "Usages constants". En revanche, la modélisation sur la période historique, utilisée comme référence des scénarios, ne comprend pas d'irrigation car elle n'est pas présente sur le bassin. Par conséquent, seule une comparaison entre les scénarios futurs pourra être réalisée concernant les critères liés à l'irrigation.

De plus, on effectue une projection hydrologique ne prenant pas en compte les influences, c'est-à-dire ne prenant même pas en compte la gestion de l'étang de Lindre et la présence de retenues, sur la période historique et la période future, afin d'isoler l'effet de la prise en compte des influences considérées dans les travaux de thèse. Les différentes simulations effectuées selon la période sont récapitulées dans la Figure VIII.1.

Les projections climatiques ont fait l'objet d'une sélection explicitée dans l'Annexe B. Les projections sélectionnées sont listées dans le Tableau VIII.1.

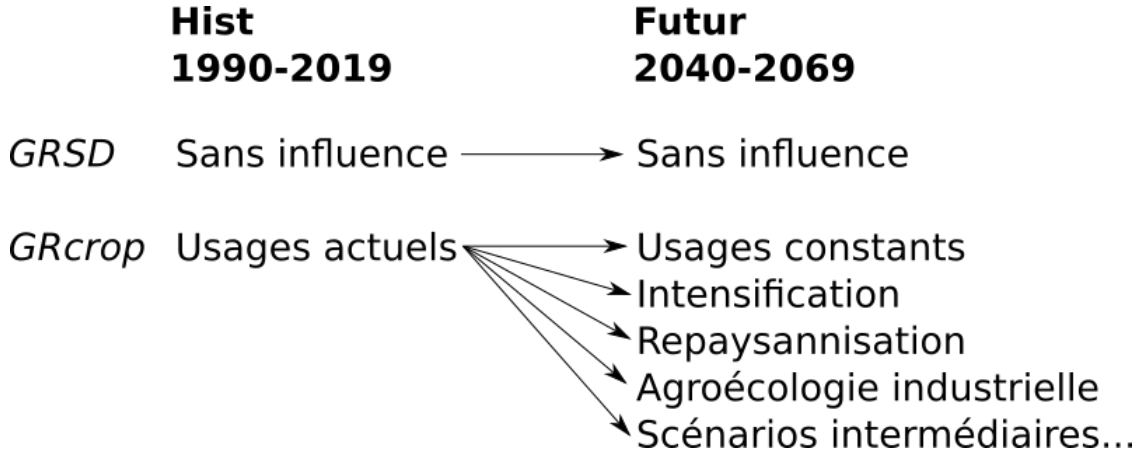


FIGURE VIII.1 – Simulations à effectuer selon l'horizon historique ou futur

TABLEAU VIII.1 – Couples de GCM/RCM sélectionnés pour effectuer les projections climatiques sur le bassin versant de la Seille

GCM	RCM	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	Nom simplifié
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CNRM-ALADIN63	✓	✓	✓	CNRM / ALADIN
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	KNMI-RACMO22E	✓	✓	✓	CNRM / RACMO
MOHC-HadGEM2-ES	CLMcom-CCLM4-8-17		✓	✓	HadGEM / CCLM
IPSL-IPSL-CM5A-MR	SMHI-RCA4		✓	✓	IPSL / RCA4
MPI-M-MPI-ESM-LR	MPI-CSC-REMO2009	✓	✓	✓	MPI / REMO
NCC-NorESM1-M	DMI-HIRHAM5		✓	✓	Nor / HIRHAM

1.2 Indicateurs étudiés

Indicateurs repris du Chapitre VII

Nous évaluerons l'évolution des indicateurs présentés dans le Chapitre VII, soit l'irrigation, la satisfaction de la demande en eau d'irrigation, les étiages. Pour l'étude des volumes et du remplissage des retenues simples et de l'étang de Lindre, nous nous appuyons cependant sur de nouveaux indicateurs, présentés dans un paragraphe ci-après. Les différents indicateurs, caractérisant les différents compartiments modélisés et leurs interactions, seront présentés de façon à distinguer les impacts des couples GCM / RCM, des RCP et des scénarios locaux, ainsi que leur évolution par rapport aux simulations de référence sur la période historique.

Estimation de l'évolution des rendements

Nous souhaitons de plus évaluer l'évolution du rendement des cultures liée à l'évolution du stress hydrique. Nous utilisons la méthode proposée dans le rapport 56 de la FAO (ALLEN et al., 1998), reprenant elle-même les travaux du rapport 33 de la FAO (DOORENBOS et al., 1979) et s'appuyant sur l'Équation VIII.1, avec Y_{act} le rendement (tonnes ha^{-1}), Y_{max} le rendement maximal potentiel (tonnes ha^{-1}, le rapport entre Y_{act} et Y_{max} donne donc le Rendement relatif au regard du stress hydrique R_w), K_y le facteur de réponse du rendement au stress hydrique sur la totalité du cycle (-, valeur positive), ETR l'évapotranspiration réelle sur la totalité du cycle de développement (mm) et ETC l'évapotranspiration culturale maximale sur la totalité du cycle de développement (mm). La valeur atteinte par R_w est égale à 1 si la culture a pu évapotranspirer à hauteur de l'ETC, ce qui correspond à un rendement maximal. Lorsque l'ETC n'est pas atteinte par l'ETR, alors le potentiel de rendement est inférieur à 1. Les valeurs pour chaque culture de K_y sont issues du rapport 56 de la FAO et sont renseignées dans l'Annexe G. Les valeurs peuvent varier de 0,85, pour le soja, à 1,25 pour le maïs.

$$R_w = \frac{Y_{act}}{Y_{max}} = 1 - K_y\,(1 - \frac{ETR}{ETC}) \tag{VIII.1}$$

Néanmoins, Y_{max} dépend lui-même de différents facteurs, notamment de l'effet fertilisant du CO_2, et des interactions entre le stress hydrique et d'autres facteurs peuvent perturber cette équation. De plus, il s'agit d'une approche très simplifiée de la perte de rendement liée au stress hydrique, qui peut donc ne pas être très précise. Si l'effet fertilisant du CO_2 sera évalué dans cette thèse (Section VIII.3.3), l'estimation du rendement choisie demeure très simple, permettant de donner une approximation de l'évolution des pertes de rendement liées au stress hydrique en modulant la réaction des cultures selon leur sensibilité au stress hydrique. Cet indicateur n'a pas vocation à donner une estimation précise des rendements.

Nouveaux indicateurs d'impacts des retenues

Nous souhaitons étudier plus en détail l'évolution des impacts des retenues sur les débits en fonction des scénarios et de l'évolution du climat. Nous définissons ainsi deux grandeurs : 1/ Les prélèvements nets des retenues ; 2/ La pression des prélèvements des retenues.

Les prélèvements nets des retenues sont les débits entrants dans les retenues desquels on retire les débits sortants contributifs au débit. Ils permettent d'évaluer saisonnièrement l'impact d'une retenue sur les débits : prélève-t-elle de l'eau, ou bien injecte-t-elle de l'eau dans les rivières ? Quel volume ? Pour l'étang de Lindre, on calcule le prélèvement net journalier $U_{Lindre_{net}}$, en m^3 j^{-1}, selon l'Équation VIII.2, avec $U_{S_{specifique}}$ le débit de remplissage des retenues spécifiques tel que décrit dans l'Équation VI.1 du Chapitre VI, en m^3 j^{-1}, $Q_{vidange}$ le débit vidangé en m^3 j^{-1}, $Q_{reserve}$ en m^3 j^{-1} , le débit réservé, et $Q_{soutien\ d'etiage}$ le débit de soutien d'étiage en m^3 j^{-1}. Les retenues simples ne présentent pas de débit sortant (le débit réservé est pris en compte directement dans le calcul du remplissage U_S dans l'Équation VI.3 du Chapitre VI). Ainsi, le prélèvement net correspond directement à U_S en m^3 j^{-1} pour les retenues simples.

$$U_{Lindre_{net}} = U_{S_{specifique}} - Q_{vidange} - Q_{reserve} - Q_{soutien\ d'etiage} \tag{VIII.2}$$

La pression consiste quant à elle à diviser les prélèvements nets par le débit simulé à l'exutoire du SBGR contenant les prélèvements. Nous choisissons de borner, dans le calcul de cet indicateur, les valeurs négatives des prélèvements nets à 0, pour n'étudier que la pression des prélèvements, et ne pas inclure les injections de débit dans l'indicateur (qui induiraient des pressions négatives). Le calcul de la pression P sur un bassin versant est explicité dans l'Équation VIII.3, avec U_{net} un prélèvement net en m^3 j^{-1} tel qu'explicité plus haut, Q le débit journalier d'un bassin versant en m^3 j^{-1}.

$$P = \frac{max(0, U_{net})}{Q} \tag{VIII.3}$$

Détails sur les boîtes à moustaches

Certains indicateurs feront l'objet de représentation sous la forme de boîtes à moustaches. Ces dernières représentent sous la forme de deux rectangles accolés :

- en bas du rectangle inférieur : la valeur du premier quartile ;
- entre les deux rectangles : la valeur de la médiane ;
- en haut du rectangle supérieur : le troisième quartile.

La longueur totale des deux rectangles représente l'écart interquartile. Les rectangles sont prolongés de lignes qui représentent :

- pour l'extrémité basse de la ligne inférieure : la plus petite valeur supérieure ou égale au premier quartile moins l'écart interquartile multiplié par 1,5 ;
- pour l'extrémité haute de la ligne supérieure : la plus grande valeur inférieure ou égale au troisième quartile plus l'écart interquartile multiplié par 1,5 ;

Les valeurs situées au-delà des extrémités, qui constituent des valeurs exceptionnelles, sont représentées sous la forme de points.

2 Traduction des scénarios locaux en données d'entrée de la modélisation intégrée

En collaboration avec les agronomes et modélisateurs du LAE, notamment Olivier Thérond et Jean Villerd, et la géographe Sara Fernandez (UMR GESTE), nous avons établi plusieurs scénarios sur le bassin versant de la Seille, se répercutant en plusieurs hypothèses de variables résultat (Section IV.2.4). De plus, nous disposons désormais d'une modélisation intégrée du bassin versant de la Seille (Chapitres VI et VII). Nous devons donc

maintenant traduire les hypothèses de chaque scénario en données et/ou paramètres d'entrée modélisables dans nos approches. La traduction de ces scénarios a été réalisée avec l'aide des agronomes du LAE.

Les données ou paramètres d'entrée modélisables qui seront modifiés pour les projections sont :

- les volumes mobilisables à des fins d'irrigation ;
- les assolements annuels ;
- les surfaces irriguées ;
- la gestion de l'étang de Lindre ;
- les paramètres de modélisation des cultures, impactées par le changement climatique.

2.1 Volumes mobilisables à des fins d'irrigation

Dans l'Annexe E, nous avons établi que l'eau d'irrigation ne pourrait venir que du stockage sur certains secteurs :

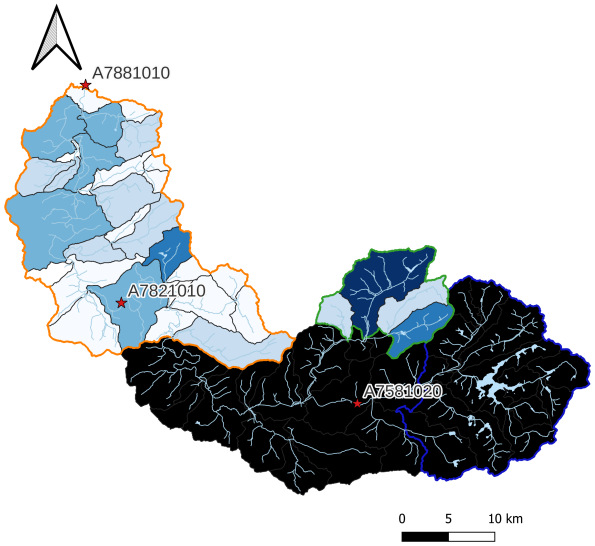
- l'étang de Lindre lui-même ;
- les bassins versants des affluents de la Seille sur le secteur aval, à partir du bassin versant du ruisseau des Ossons ;
- les bassins versants amont.

Nous avons délimité ces secteurs de façon à les faire coïncider avec les AWZs (Figure VIII.2 (a,b)). Nous distinguons le fonctionnement des prélèvements et de l'acheminement de l'eau à partir de l'étang de Lindre, sur le secteur "Lindre", du fonctionnement des prélèvements à partir des petits plans d'eau sur les secteurs "amont" et "aval".

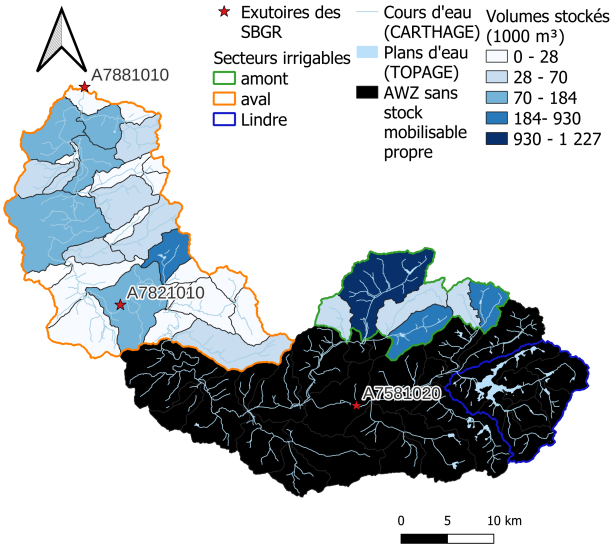
L'étang de Lindre constitue un volume très important localisé sur un secteur précis. Nous avons défini des hypothèses contrastées de distance d'irrigabilité à partir de l'étang de Lindre selon les scénarios (Section IV.2.4). Pour le scénario Intensification, nous considérons que des réseaux de transport de l'eau permettent de l'acheminer assez loin de l'étang de Lindre. Nous avons sélectionné les AWZs incluses dans une zone tampon de 10 kms autour de l'étang de Lindre. Pour les scénarios Repaysannisation et Agroécologie industrielle, seules les AWZs directement à proximité de l'étang de Lindre peuvent en exploiter l'eau. Cependant, on rappelle que nous avons choisi de supprimer tous les plans d'eau en amont de l'étang de Lindre dans GRcrop, de façon à simplifier la modélisation de cet ouvrage (Section VI.4). Cela signifie qu'au lieu d'inclure ces AWZs dans les secteurs irrigables "amont", nous les fusionnons avec le secteur "Lindre". Ainsi, pour simplifier le travail de modélisation, nous considérons pour les scénarios Repaysannisation et Agroécologie industrielle que les secteurs en amont de l'étang de Lindre, même éloignés, sont inclus dans le périmètre de l'étang de Lindre.

Une modélisation spécifique de l'irrigation à partir de l'étang de Lindre est ainsi développée dans le module de modélisation des barrages, permettant de prélever dans un barrage en dehors de l'AWZ simulée. De plus, nous considérons que les autres éventuels volumes stockables sur le secteur Lindre ne sont pas exploités : toute l'eau utilisée pour l'irrigation est tirée de l'étang de Lindre. Pour cette raison, nous ne faisons pas apparaître de volume stockable par AWZ sur ce secteur sur la Figure VIII.2 (a). Le périmètre d'irrigabilité à partir de l'étang de Lindre étant réduit pour les scénarios Agroécologie industrielle et Repaysannisation, les réservoirs de deux AWZ du secteur "amont" sont exploités à la place de l'étang de Lindre dans ces deux scénarios. Les volumes stockés et disponibles totaux sont ainsi représentés sur la Figure VIII.2 (b).

Sur les AWZs des secteurs "amont" et "aval", la modélisation de l'irrigation à partir des plans d'eau est similaire à celle développée sur l'Aveyron (Section VI.3). Pour faciliter le travail de modélisation, nous considérons que seules les retenues de type "local" sont mobilisables pour l'irrigation. De plus, celles-ci sont a priori moins impactantes écologiquement que des retenues directement sur les cours d'eau, et devraient donc être prioritairement mobilisées. On considère de plus que ces retenues ont moins de chance d'avoir été contaminées par le sel, l'enrichissement de l'eau en sel se faisant en se rapprochant de la Seille.



(a) Irrigabilité sur le bassin versant de la Seille selon pour le scénario Intensification.



(b) Irrigabilité sur le bassin versant de la Seille pour les scénarios Agroécologie industrielle et Repaysannisation.

FIGURE VIII.2 – Volumes d'eau stockée mobilisables et secteurs irrigués selon les scénarios. Les 13 millions de m^3 de l'étang de Lindre sont accessibles à l'ensemble du secteur irrigable Lindre. Les volumes des retenues "local" ont été agrégés sur les autres AWZ sur lesquelles l'irrigation est jugée possible

2.2 Assolements annuels

Pour chaque scénario, nous convertissons les données d'entrée de MAELIA de façon à constituer les nouveaux assolements. La construction des assolements s'est appuyée sur la caractérisation de types de rotations sur les parcelles via les successions culturales renseignées dans les données d'entrée de MAELIA sur la Seille, et sur la définition de nouvelles rotations selon les types de rotations d'origine sur les parcelles et d'autres critères spécifiés ci-après.

Les parcelles d'origine ont été classées comme "prairies semi-permanentes" quand la succession culturale renseignée dans MAELIA était composée à 50 % de prairies. Les prairies ainsi identifiées représentent 30 132 ha, soit 38 % de la surface cultivée. Pour les trois scénarios, les prairies semi-permanentes situées en zone inondable (Annexe D) deviennent des prairies totalement permanentes. Les prairies en zone inondable représentent 6 912 ha, soit 8,7 % de la surface cultivée.

2.2.1 Assolement du scénario Intensification

Les parcelles dont la succession culturale était composée à plus de 50 % de maïs, représentant une surface de 1 847 ha, deviennent de vraies monocultures de maïs.

Les prairies semi-permanentes hors secteur inondable, que nous considérons également comme des secteurs probablement hydromorphes (Annexe D), représentant une surface de 23 220 ha, sont entièrement converties. Nous souhaitons que 25 % de ces surfaces, représentant 5 805 ha, deviennent de la monoculture de maïs, et que 75 %, représentant 17 415 ha, deviennent de la rotation de grandes cultures. Nous répartissons les surfaces à convertir en monoculture de maïs proportionnellement aux volumes d'eau stockés sur les AWZs (Section VIII.2.1). Pour chaque AWZ, une règle de répartition automatique est créée, pour convertir les plus grandes parcelles de façon prioritaire.

Les parcelles restantes, représentant 47 104 ha, pour la plupart déjà occupées par une rotation de grandes cultures, deviennent entièrement de la rotation de grandes cultures.

Toutes les parcelles de grandes cultures se voient attribuer la rotation suivante : **colza, maïs, orge d'hiver, tournesol, blé, orge de printemps**. Les cultures de printemps (maïs, tournesol, orge de printemps) sont précédées d'une culture intermédiaire.

La procédure d'obtention des assolements pour le scénario Intensification est récapitulée dans la Figure VIII.3.

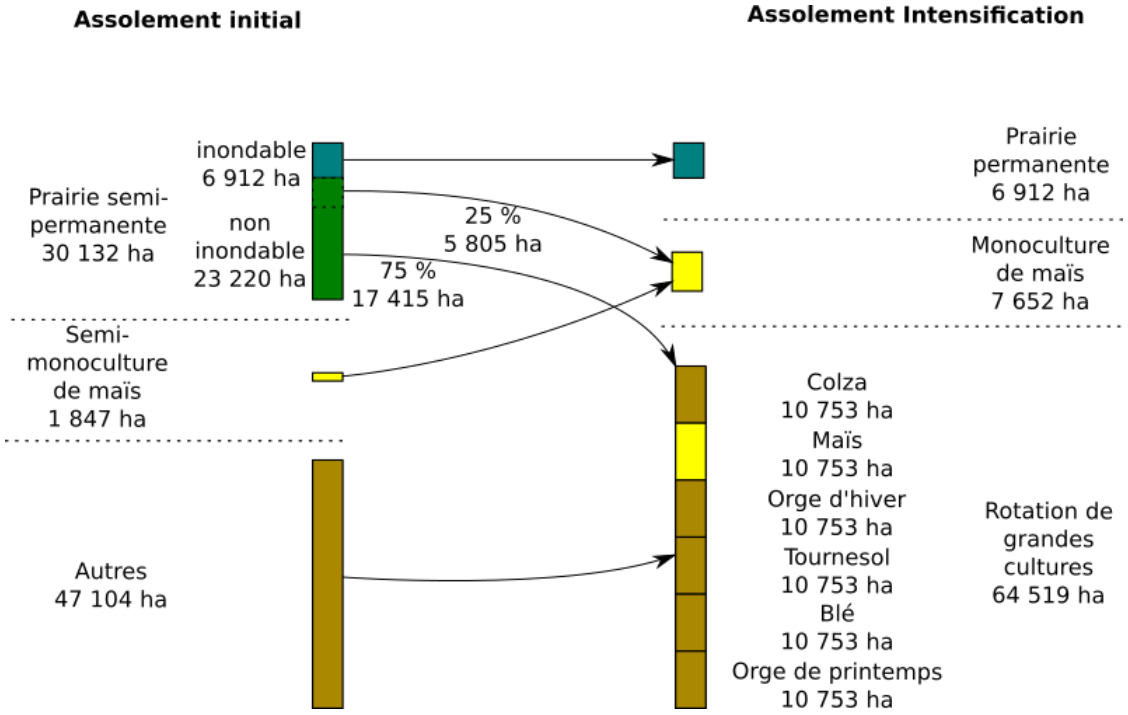


FIGURE VIII.3 – Transformation des assolements pour le scénario Intensification

2.2.2 Assolement du scénario Repaysannisation

Les assolements du scénario Repaysannisation sont conditionnés par les objectifs fixés en matière d'autonomie alimentaire locale, détaillés en Section IV.2.5. Un tiers des surfaces doit être consacré à l'alimentation locale. Les prairies doivent représenter 44,9 % de la SAU destinée à l'alimentation locale, et 47,5 % des surfaces destinées à l'alimentation, soit 46,6 % de la surface. Le maraîchage représente 5,5 % de la surface destinée à l'alimentation locale, et il n'y a pas de maraîchage destiné à l'exportation. Le maraîchage doit donc atteindre 1,9 % de la SAU. Le reste des surfaces correspond à une rotation de grandes cultures : **féverolle, sorgho, blé, tournesol, orge d'hiver, soja, blé, orge de printemps**.

La totalité de l'emprise inondable (Annexe D) et des prairies semi-permanentes, même hors zone inondable, représentant une surface totale de 35 523 ha, soit 44,9 % des surfaces, devient constituée de prairies permanentes. Pour nous rapprocher de la surface objectif, nous ajoutons les parcelles dont la séquence est composée à plus de 33 % de prairies. Nous obtenons alors une surface totale de 37 070 ha, soit 46,9 % des surfaces. Cela nous paraît très proche de la surface visée (46,6 %), et nous validons donc cette sélection.

La surface de maraîchage doit représenter 1,9 % de la surface cultivée, soit 1 503 ha. Nous répartissons cette surface au pro rata des volumes d'eau stockés. Nous considérons pour cela que le volume disponible pour le secteur irrigable à partir de l'étang de Lindre n'est que de $1{,}2.10^6$ m^3, soit le volume d'eau de l'AWZ avec le plus grand volume stocké hors secteur de l'étang de Lindre. En effet, l'étang de Lindre ne doit pas être surexploité pour l'irrigation, car dans ce scénario, l'étang de Lindre doit continuer d'être utilisé pour la pisciculture.

Toutes les autres parcelles deviennent des parcelles en rotation de grandes cultures selon la rotation définie plus haut.

La procédure d'obtention des assolements pour le scénario Repaysannisation est récapitulée dans la Figure VIII.4.

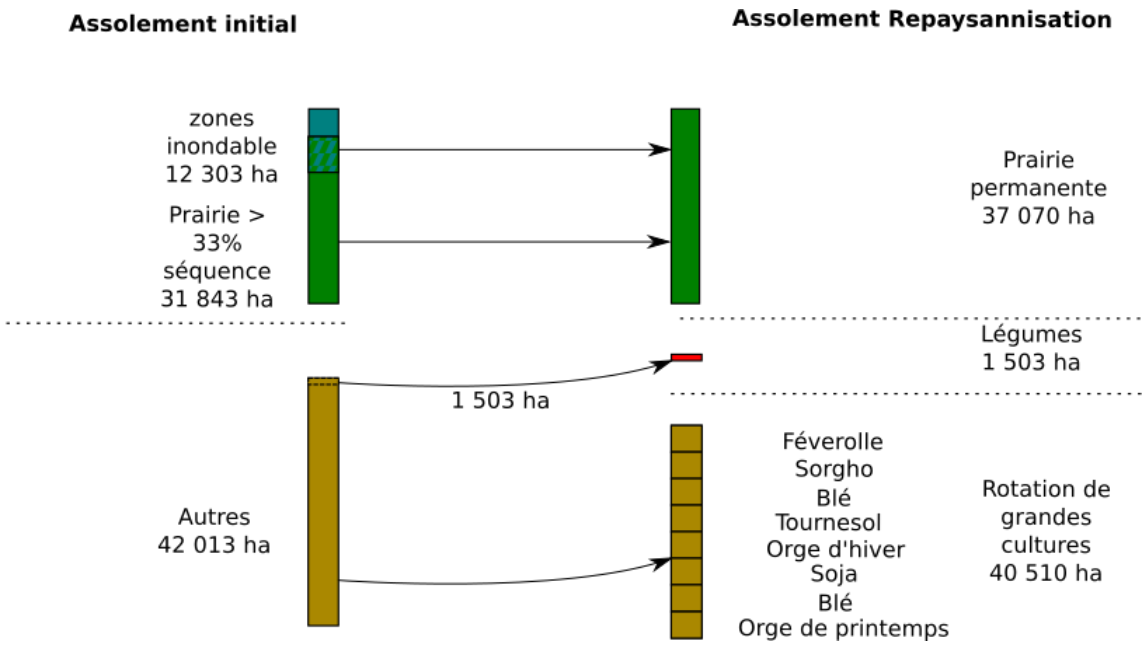


FIGURE VIII.4 – Transformation des assolements pour le scénario Repaysannisation

2.2.3 Assolement du scénario Agroécologie industrielle

Les prairies semi-permanentes deviennent des prairies permanentes à 100 %. Les autres surfaces adoptent la rotation **colza, sorgho, blé, tournesol, orge d'hiver, soja, blé, orge de printemps**.

La procédure d'obtention des assolements pour le scénario Agroécologie industrielle est récapitulée dans la Figure VIII.5.

2.3 Détermination des surfaces irrigables

2.3.1 Surfaces irrigables pour le scénario Intensification

Nous avons défini une liste de cultures potentiellement irrigables. Une estimation grossière des besoins annuels en eau a été effectuée pour chaque culture potentiellement irrigable, s'appuyant sur un bilan entre évapotranspiration culturale et précipitations efficaces par tranche de 30 jours. Les précipitations efficaces ont été estimées à l'aide de la formule de l'USDA (Equation VIII.4, avec P_{eff} les précipitations efficaces annuelles en mm et P_{tot} les précipitations annuelles totales en mm).

$$P_{eff} = \begin{cases} \frac{P_{tot}\ (125-0{,}2\times P_{tot})}{125} & \text{si } P_{tot} < 250\ mm \\ 125 + 0,1 \times P_{tot} & \text{sinon.} \end{cases} \tag{VIII.4}$$

Cette estimation a été réalisée à partir des données climatiques historiques sur la période 2010 à 2019.

Nous limitons les volumes disponibles sur chaque AWZ et pour le secteur Lindre à 75 % des volumes totaux. En fonction des assolements établis et des volumes stockés disponibles sur chaque AWZ et pour le secteur Lindre, nous attribuons le caractère irrigable :

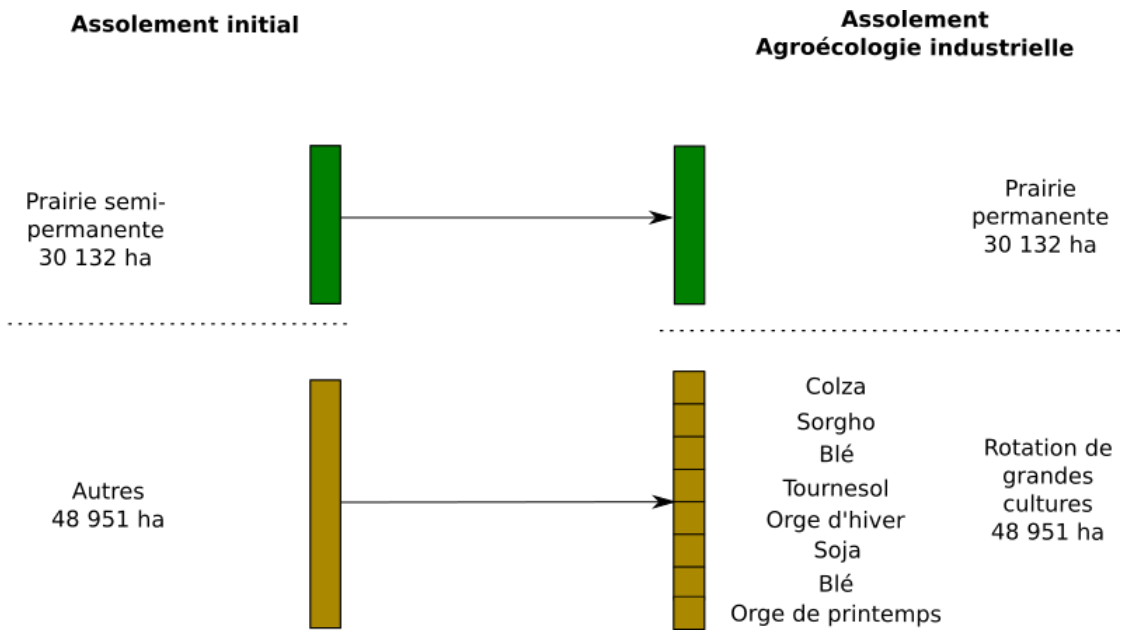


FIGURE VIII.5 – Transformation des assolements pour le scénario Agroécologie industrielle

1. à la monoculture de maïs ;
2. au maïs, tournesol et blé des parcelles en rotation de grandes cultures s'il reste encore du volume disponible.

Les surfaces irrigables et non irrigables par rotation sont ainsi résumées dans le Tableau VIII.2.

Rotation	Surface (ha)	Proportion de la SAU (%)
Monoculture de maïs irriguée	6 753	8,5 %
Monoculture de maïs non irriguée	898	1,1 %
Grandes cultures avec maïs, tournesol, blé irrigués	5 235	6,6 %
Grandes cultures non irriguées	59 285	75,0 %
Prairie non irriguée	6 912	8,7 %

TABLEAU VIII.2 – Surfaces irrigables et non irrigables par type de rotation pour le scénario Intensification

2.3.2 Surfaces irrigables pour le scénario Repaysannisation

Pour le scénario Repaysannisation, nous considérons que la totalité des surfaces en maraîchage est irriguée, soit 1 503 ha et 1,9 % de la surface cultivée. Il s'agit de la seule culture irriguée.

2.3.3 Surfaces irrigables pour le scénario Agroécologie industrielle

Nous réalisons une estimation grossière des besoins en eau des cultures avec la même méthodologie que pour le scénario Intensification. Nous considérons que seuls le sorgho, le soja, le tournesol et le blé, cultures que nous considérons comme les plus gourmandes en eau et les plus stratégiques, peuvent être irrigués. Pour les AWZ et le secteur de l'étang de Lindre, si les volumes suffisent à satisfaire l'ensemble des cultures irrigables, alors la rotation les considère comme irrigables. Sinon, on répartit les volumes disponibles entre les parcelles de grandes cultures en considérant que seuls le sorgho, le soja et le tournesol sont irrigués. On obtient finalement l'assolement par rotation présenté dans le Tableau VIII.3.

Rotation	Surface (ha)	Proportion de la SAU (%)
Grandes cultures avec sorgho, soja, tournesol et blé irrigués	2 620	3,3
Grandes cultures avec sorgho, soja, tournesol irrigués	3 921	5,0
Grands cultures non irriguées	42 410	53,6
Prairie non irriguée	30 132	38,1

TABLEAU VIII.3 – Surfaces irrigables et non irrigables par type de rotation pour le scénario Agroécologie industrielle

2.3.4 Détails des surfaces irrigables pour les trois scénarios

Nous avons indiqué pour chaque rotation de chaque scénario les surfaces irrigables par type de rotation. Nous présentons dans le Tableau VIII.4 les surfaces irriguées par culture, données d'entrée de GRcrop qui ne représente pas explicitement les successions culturales.

Culture	Agroécologie industrielle		Intensification		Repaysannisation	
	Surface pluviale (ha)	Surface irriguée (ha)	Surface pluviale (ha)	Surface irriguée (ha)	Surface pluviale (ha)	Surface irriguée (ha)
Blé	11 583	655 395 / 260 / 0	9 881	872 662 / 161 / 50	10 128	0
Colza	6 119	0	10 753	0	0	0
Féverolle	0	0	0	0	5 064	0
Légumes	0	0	0	0	0	1500 497 / 753 / 250
Maïs	0	0	10 779	7626 5 952 / 1 252 / 420	0	0
Orge d'hiver	6 119	0	10 753	0	5064	0
Orge de printemps	6 119	0	10 753	0	5064	0
Prairie	30 132	0	6 912	0	37 070	0
Soja	5 301	818 279 / 382 / 157	0	0	5 064	0
Sorgho	5 301	818 279 / 382 / 157	0	0	5 064	0
Tournesol	5 301	818 279 / 382 / 157	9 881	872 662 / 161 / 50	5 064	0

TABLEAU VIII.4 – Surfaces irriguées et non irriguées pour chaque culture et chaque scénario. Pour les surfaces irriguées, nous détaillons par SBGR dans l'ordre A7581020 / A7821010 / A7881010, qui correspond à l'ordre amont-aval

2.4 Gestion de l'étang de Lindre

Des hypothèses distinctes de gestion de l'étang de Lindre ont été établies dans la Section IV.2.5. Nous choisissons cependant de ne modéliser dans le cadre de la thèse que les éléments de gestion liés :

- à l'irrigation ;
- aux bas débits, soit au soutien d'étiage ;
- à la vidange de l'étang de Lindre pour effectuer des pêches.

Les hypothèses contrastées pour les différents scénarios sont ainsi décrites dans le Tableau VIII.5.

Scénario	Vidange	Irrigation	Soutien d'étiage
Intensification	✗	✓	✗
Repaysannisation	✓	✓	✗
Agroécologie industrielle	✓	✓	✓

TABLEAU VIII.5 – Hypothèses de modélisation de la gestion de l'étang de Lindre contrastées pour les trois scénarios. ✓ : usage modélisé dans le scénario ; ✗ : usage non modélisé dans le scénario

2.4.1 Détermination des vidanges futures

Pour la modélisation des vidanges, nous nous appuyons sur la chronique de vidange générée par ABRAHÃO (2022) lors de son stage et présentée dans la Figure VIII.6. Celle-ci a généré aléatoirement l'occurrence de vidanges sur la période 1950-2100 selon une loi de Bernouilli de probabilité 0,6, correspondant à la fréquence estimée d'occurrences de vidange sur la période 1985-2018 (Annexe F.2). Les dates de début de vidange, pour les années simulées avec vidange, ont quant à elles été aléatoirement distribuées selon une loi de probabilité discrète associant à chaque jour de l'année la fréquence de démarrage de la vidange sur la période passée (Annexe F.2). On obtient ainsi 16 années avec vidange sur l'horizon historique et 17 années avec vidange sur l'horizon de projection, sur 30 années pour chaque période. Le modèle de vidange reste le même que celui développé dans l'Annexe F.

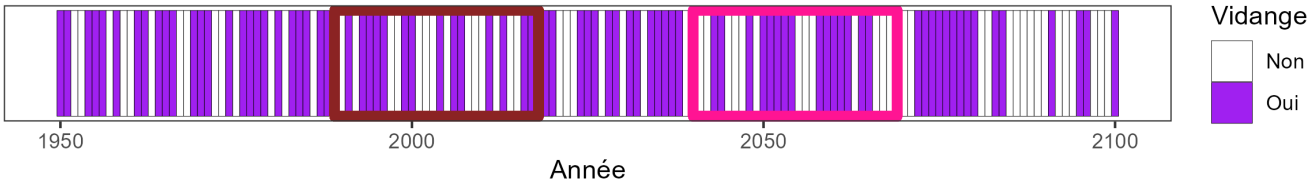


FIGURE VIII.6 – Projection de vidanges entre 1950 et 2100 générées aléatoirement (ABRAHÃO, 2022). L'encadré marron correspond à la période historique 1990-2019 et l'encadré rose correspond à la période de projection 2040-2069, utilisées dans les travaux de thèse

Pour bien distinguer l'impact de l'évolution des projections climatiques (GCM/RCM et RCP) de l'impact dû au fait que la séquence des vidanges varie entre l'horizon futur et l'horizon de référence, nous évaluerons les indicateurs d'étiage, les volumes stockés et la dynamique de remplissage des retenues en distinguant les années avec vidange et/ou précédées d'une vidange, des autres années. Nous créons donc la typologie présentée dans le Tableau VIII.6.

		Année avec vidange	
		oui	non
Année précédée d'une vidange	oui	V11	V10
	non	V01	V00

TABLEAU VIII.6 – Typologie des années en fonction de l'occurence de vidanges

2.4.2 Projections d'irrigation par prélèvement dans l'étang de Lindre

L'irrigation résulte des hypothèses d'assolements irrigués présentées dans la Section VIII.2.3 et du rattachement des îlots irrigués à l'étang de Lindre dès lors qu'ils sont dans le secteur d'irrigation correspondant (Figures VIII.2 (a,b) de la Section VIII.2.1). Les assolements irrigués à partir de l'étang de Lindre sont présentés dans les Tableaux VIII.7 et VIII.8.

TABLEAU VIII.7 – Assolements irrigués à partir de l'étang de Lindre par rotation pour chaque scénario

(a) Intensification

Rotation	Surface (ha)
Monoculture de maïs irriguée	5 290
Grandes cultures avec maïs, tournesol, blé irrigués	3 971

(b) Repaysannisation

Rotation	Surface (ha)
Légumes	329

(c) Agroécologie industrielle

Rotation	Surface (ha)
Grandes cultures avec sorgho, soja, tournesol et blé irrigués	1 579

TABLEAU VIII.8 – Surfaces irriguées à partir de l'étang de Lindre pour chaque culture et chaque scénario

Culture	Intensification	Repaysannisation	Agroécologie industrielle
Blé	662	0	197
Légumes	0	329	0
Maïs	5 952	0	0
Soja	0	0	197
Sorgho	0	0	197
Tournesol	662	0	197

2.4.3 Projections de soutien d'étiage

Le soutien d'étiage est modélisé conformément à la description qui en est faite dans la Section VI.3. Le seuil utilisé pour déclencher et quantifier le soutien d'étiage est le DOE, de 1,88 $m^3 s^{-1}$ à la station de la Seille à Metz (A7881010).

2.5 Paramétrisation des "nouvelles" cultures

Des cultures non encore présentes sur le bassin versant de la Seille et non incluses dans MAELIA sur la Seille doivent être modélisées dans GRcrop pour effectuer les projections :

- féverolle ;
- légumes (approximés par de la pomme de terre) ;
- soja ;
- sorgho.

Nous envisagions initialement de nous appuyer sur des projections des scénarios avec MAELIA sur la Seille pour construire les courbes de Kc selon la même méthodologie que les courbes de Kc construites sur le bassin versant de l'Aveyron (Chapitre V) et sur le bassin versant de la Seille pour la période actuelle (Section VI.4.2.5). Néanmoins, de telles projections n'ont finalement pas pu être réalisées sur la durée de la thèse. Nous choisissons alors de nous appuyer sur les paramètres indiqués dans le rapport 56 de la FAO (ALLEN et al., 1998). Tous les paramètres des cultures sont détaillés dans l'Annexe G.

2.6 Modélisation de la demande en eau d'irrigation selon les scénarios

Nous utilisons le même modèle que celui développé dans le Chapitre V. De plus, nous souhaitons également utiliser plusieurs simulations (i.e. paramétrisations) de l'irrigation pour prendre en compte les incertitudes liées à la modélisation de la demande en eau d'irrigation. Il est cependant nécessaire que les hypothèses d'irri-

gation soient cohérentes avec les cultures irriguées simulées et les scénarios, ce qui a nécessité d'élaborer des hypothèses différentes selon les scénarios (Tableau VIII.9).

Nous choisissons de reprendre les mêmes hypothèses de déclenchement et de dose d'irrigation que pour la modélisation sur l'Aveyron pour le scénario Intensification. Pour le scénario Repaysannisation, nous supposons que l'irrigation apportée aux légumes doit s'approcher d'une irrigation de précision, et nous ne simulons un apport d'eau journalier qu'aux unités de simulation, c'est-à-dire la modélisation "Conceptuelle" ("Conceptual"). Nous éliminons de plus l'irrigation déclenchée pour un seuil de déficit à $0,25 \times RFU$. En effet, il s'agit d'une sur-irrigation, or nous considérons que l'irrigation du maraîchage constituerait une irrigation de précision, et il paraît donc irréaliste de considérer pour ce cas une sur-irrigation. De plus, le scénario Repaysannisation a été pensé comme un scénario de sobriété. Enfin, pour le scénario Agroécologie industrielle, nous prévoyons de n'irriguer qu'en cas de consommation complète de la réserve facilement utilisable (RFU) ou "Readily Available Water" ("RAW"), car ce scénario prévoit une irrigation "de résilience". Dans la modélisation CropWat, c'est une fois que la RFU est consommée que les plantes commencent à subir un stress hydrique, avec des implications sur les rendements. De plus, nous laissons libres les périodes d'irrigation (IP = 0, avec IP : Irrigation period), de façon à laisser la modélisation de l'irrigation "s'adapter" au changement climatique et conformément aux préconisations formulées dans l'article présenté dans le Chapitre V (SOUTIF-BELLENGER et al., 2023).

TABLEAU VIII.9 – Paramétrisation de la modélisation de l'irrigation selon les scénarios. Modèle : soit Semi-parcellaire ("Semi-plot", S), soit Conceptuelle ("Conceptual", C) ; θ : seuil de déficit hydrique du sol pour déclencher l'irrigation, en mm ; IA ("irrigation amount") : dose d'irrigation unitaire à apporter, en mm ; RFU : réserve facilement utilisable, en mm ; Dr déficit hydrique du sol, en mm

Intensification			Repaysannisation			Agroécologie industrielle		
Modèle	θ (mm)	IA (mm)	Modèle	θ (mm)	IA (mm)	Modèle	θ (mm)	IA (mm)
S	$0,25 \times RFU$	$Dr - \theta$	C	$0,5 \times RFU$	$Dr - \theta$	S	RFU	$Dr - \theta$
S	$0,5 \times RFU$	$Dr - \theta$						
S	$0,5 \times RFU$	Dr	C	$0,75 \times RFU$	$Dr - \theta$	S	RFU	Dr
S	RFU	Dr						
C	$0,5 \times RFU$	$Dr - \theta$	C	RFU	$Dr - \theta$	C	RFU	$Dr - \theta$

3 Impacts du changement climatique à expliciter dans la modélisation intégrée

3.1 Impacts du changement climatique sur la phénologie des cultures

Nous avons mis en évidence dans l'Introduction que la phénologie des cultures était dépendante des températures, et qu'il était essentiel de prendre en compte cette évolution de la phénologie dans le cadre de projections climatiques (Section I.2.4.1). Or, le modèle CropWat ne permet pas de simuler la variation de la durée des cycles en fonction des températures, puisqu'il s'appuie sur une courbe de K_c préfixée. Nous prévoyions initialement de nous appuyer sur des projections de MAELIA, utilisant le modèle degré.jour AqYield, sur le bassin versant de la Seille pour simuler l'évolution des courbes de K_c. De telles simulations n'ont finalement pas pu être réalisées sur la durée de la thèse. Nous choisissons ainsi, avec l'appui du LAE, de garder les courbes de K_c "actuelles" pour nos projections de référence pour les trois scénarios, ainsi que la simulation avec usages constants. Nous appellerons ces expériences simulations avec "cycles longs". Nous complétons néanmoins ces simulations, pour chaque scénario et le cas "Usages constants", avec une nouvelle paramétrisation des cultures raccourcissant les cycles et s'appuyant sur les résultats des travaux du projet CLIMATOR (BRISSON et LEVRAULT, 2010). Nous appellerons ces expériences simulations avec "cycles courts". Nous faisons l'hypothèse pour cela que la durée des cycles sur notre période de référence (1989-2018) est relativement équivalente à celle utilisée par CLIMATOR (1970-1999). En réalité, les cycles se sont déjà raccourcis depuis la période 1970-1999, et nous surestimons donc le raccourcissement des cycles par rapport aux travaux de CLIMATOR entre notre période de référence et l'horizon de projection.

TABLEAU VIII.10 – Raccourcissements (en jours) par rapport à la période de référence (1970-2000) des cycles modélisés dans le cadre du projet CLIMATOR dans les stations les plus proches du bassin versant de la Seille pour cinq cultures représentatives de l'agriculture du bassin versant de la Seille. FP : Futur proche ; FL : Futur lointain. L'interpolation linéaire et le rapport des durées (durée raccourcie selon l'interpolation sur la durée actuelle) ont été calculés dans le cadre des travaux de thèse

	Blé (Mirecourt)	**Maïs** (Colmar)	**Colza** (Mons)	**Tournesol** (Colmar)	**Sorgho** (Colmar)
FP (2035)	-9,2	-25,8	-2,2	-14,4	-18,5
FL (2085)	-18,3	- 39,4	-10,8	-24,1	-30,6
Interpolation (2050)	-12	-30	-5	-17	-22
Rapport des durées (%)	96	80	98	90	82

Certaines cultures présentes sur le bassin versant ou bien inclues dans les scénarios ne sont pas modélisées dans le cadre du projet CLIMATOR :

- cultures d'hiver :
  - prairie ;
  - orge d'hiver ;
  - triticale ;
  - féverolle ;
- cultures de printemps :
  - pois ;
  - orge de printemps ;
  - soja ;
  - légumes (pommes de terre).

Pour ces cultures, on approxime le raccourcissement des cycles et multipliant par le rapport des durées du blé (96 %) pour les cultures d'hiver, et du tournesol (90 %) pour les cultures de printemps. Pour l'ensemble des cultures, on applique le rapport des durées à l'ensemble des phases de développement de la culture telles que modélisées par CropWat de façon homogène (L_{ini}, L_{dev}, L_{mid}, L_{end}).

3.2 Impacts de la concentration en CO_2 sur l'évapotranspiration

Nous avons vu dans les Sections I.2.2.1 et I.2.4.1 de l'Introduction que l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO_2 future pourrait réduire la demande évaporative de la végétation à température et surface foliaire égales, compensant l'impact des hausses des températures, mais que la potentielle augmentation de la surface foliaire résultant de l'effet fertilisant du CO_2 rend incertaine l'impact de l'augmentation de la concentration en CO_2 sur l'évapotranspiration. Les effets de l'augmentation de la concentration en CO_2 pourraient être pris en compte à la fois pour la simulation du bilan en eau des cultures et pour la simulation hydrologique dans la modélisation GRcrop. Néanmoins, devant les incertitudes liées aux impacts de cette évolution sur l'évapotranspiration, nous choisissons de ne pas intégrer ce facteur dans nos projections, et d'utiliser l'ETP PM ne prenant pas en compte la concentration du CO_2.

3.3 Impacts de la concentration en CO_2 sur les rendements agronomiques

Si l'on souhaite comparer le potentiel de rendement futur au rendement maximal sur la période historique, il est nécessaire de ne pas seulement prendre en compte l'évolution de l'impact du stress hydrique, mais aussi l'évolution de la concentration en CO_2 atmosphérique. On procède ainsi en deux étapes. On effectue tout

d'abord le calcul de R_w, le ratio entre le rendement futur $Y_{act_{futur}}$, limité par le stress hydrique, et le rendement maximal futur, $Y_{max_{futur}}$, détaillé dans l'Équation VIII.1 de la Section VIII.1.2. Puis on calcule R_{CO_2}, le ratio entre le rendement maximal de la période future $Y_{max_{futur}}$ et de la période passée $Y_{max_{historique}}$, dépendant de la concentration en CO_2,. Ainsi, on obtient l'Équation VIII.5, avec R_{w,CO_2}, le ratio de $Y_{act_{futur}}$ et $Y_{max_{historique}}$, permettant d'évaluer les rendements futurs au regard du rendement maximal historique :

$$\begin{aligned} R_{w,CO_2} = \frac{Y_{act_{futur}}}{Y_{max_{historique}}} &= \frac{Y_{act_{futur}}}{Y_{max_{futur}}} \times \frac{Y_{max_{futur}}}{Y_{max_{historique}}} \\ &= R_w \times R_{CO_2} \end{aligned} \tag{VIII.5}$$

AINSWORTH et al. (2008) indiquent dans leurs travaux un ratio de 1,08 d'augmentation de rendement entre des cultures soumises à une concentration de CO_2 de 583 ppm contre 367 ppm pour des cultures bien irriguées. Ce calcul propose donc une évolution du rendement pour des cultures qui ne dépendent ni du stress hydrique et ni de l'impact du CO_2 sur l'évapotranspiration, donc ne comprenant que l'effet fertilisant du CO_2. Le projet CLIMATOR (BRISSON et LEVRAULT, 2010) reprend cette valeur et propose d'interpoler l'effet fertilisant du CO_2 sur les rendements selon l'Équation VIII.6.

$$R_{CO_2} = 1 + 0,08 \times \frac{[CO_{2_{futur}}]_{atm} - 367}{583 - 367} \tag{VIII.6}$$

Nous modifions l'équation en remplaçant le "367" du numérateur par 379 ppm, représentatif de la concentration atmosphérique en CO_2 en 2005.

Les valeurs estimées pour les différents RCP en 2050 sont présentées dans le Tableau VIII.11.

	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
$[CO_2]_{atm}$	443	487	541
R_{CO_2}	1,02	1,04	1,06

TABLEAU VIII.11 – Calcul de l'évolution relative du rendement maximal en 2050 par rapport au rendement historique au regard de la concentration en CO_2

Les rendements peuvent donc être étudiés au regard de l'évolution du rendement relatif au regard du stress hydrique R_w selon la méthodologie présentée dans la Section VIII.1.2 et ajustés au regard de l'évolution de la concentration future en CO_2 pour prendre en compte l'effet fertilisant. Nous récapitulons ainsi le calcul du rendement dans l'équation en fusionnant les Équations VIII.1 et VIII.5 dans l'Équation VIII.7. R_{CO_2} est extrait du Tableau VIII.11.

$$R_{W,CO_2} = (1 - K_y\,(1 - \frac{ETR}{ETC})) \times R_{CO_2} \tag{VIII.7}$$

Pour rappel, le calcul du rendement relatif au regard du stress hydrique repose dans notre travail sur une hypothèse de conservation de l'évapotranspiration potentielle : nous n'avons pas pris en compte une éventuelle diminution de la demande évaporative liée à l'augmentation de la concentration en CO_2. La prise en compte de l'évolution de la demande évaporative pourrait conduire à une augmentation plus importante des rendements dans les projections, notamment pour les cultures non irriguées pour lesquelles le stress hydrique jouera plus fortement sur les rendements.

A retenir :

Des hypothèses ont été effectuées pour traduire les scénarios en assolements, volumes d'eau mobilisables, règles d'irrigation, règles de gestion de l'étang de Lindre. Des indicateurs ont été définis pour évaluer les impacts de ces scénarios. Nous allons maintenant pouvoir évaluer l'impact du changement climatique et des scénarios au regard de ces indicateurs.

Chapitre IX

Résultats des projections

Avant-propos :

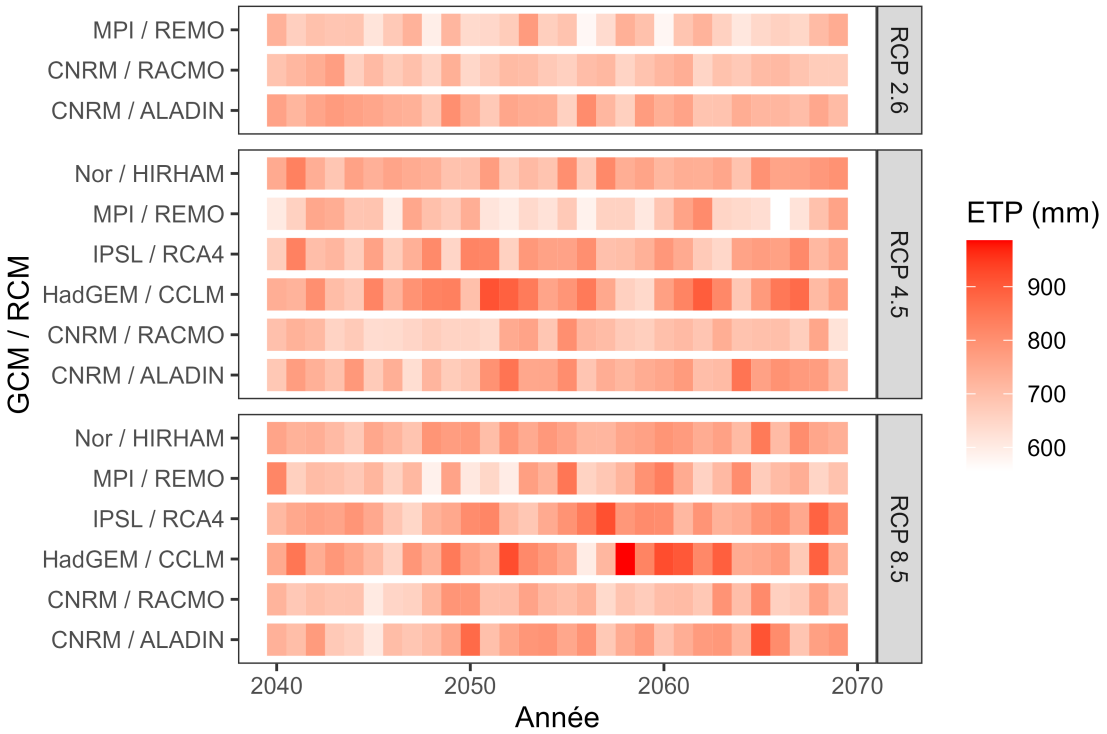
Dans ce chapitre, nous présentons les signaux climatiques projetés année par année ainsi que les résultats de projection des scénarios au regard des indicateurs préalablement définis en termes d'irrigation, d'étiage, de volumes stockés et de rendements, pour le bassin versant de la Seille. Nous discutons ensuite de la portée des résultats obtenus.

1 Projections climatiques annuelles

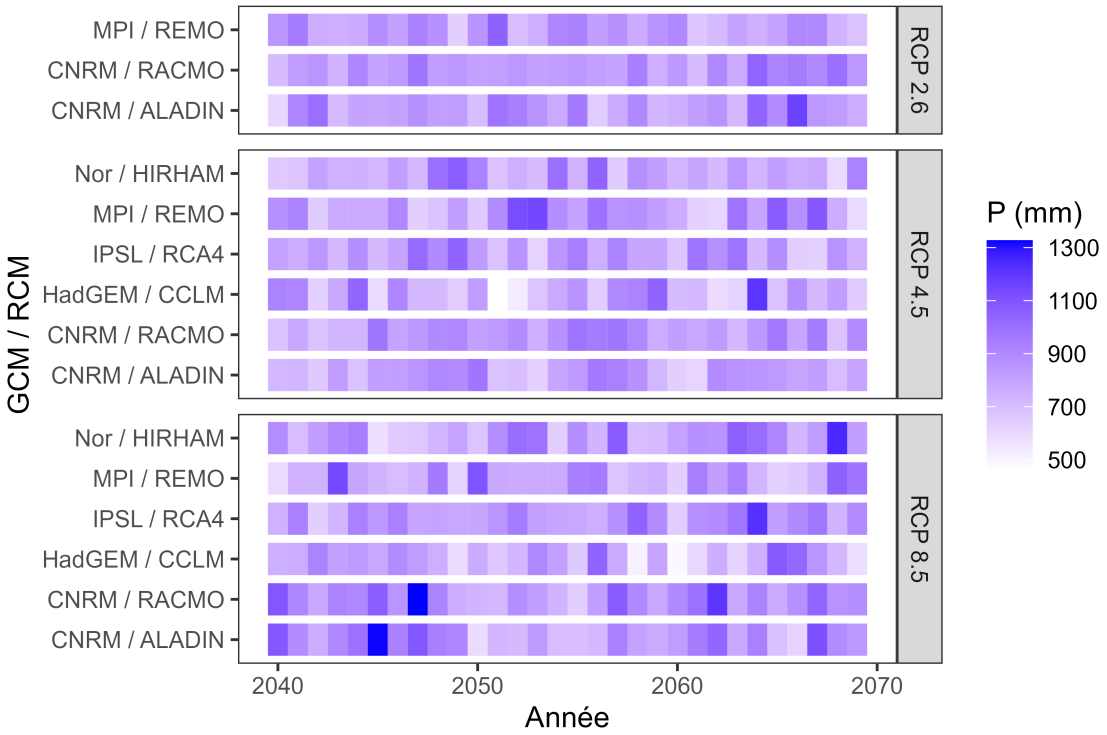
Nous complétons tout d'abord l'analyse des tendances moyennes et saisonnières des projections climatiques présentée en Annexe B par une analyse de la variabilité annuelle sur le bassin versant de la Seille. L'évapotranspiration potentielle (ETP), les précipitations annuelles, et le déficit annuel entre ces deux variables, sont présentées selon les différentes projections pour la période 2040-2069 dans la Figure IX.1, pour les trois RCP.

Conformément aux résultats précédemment montrés, les valeurs les plus élevées d'ETP annuelle sont atteintes pour le RCP 8.5 et le RCP 4.5 plutôt que le RCP 2.6 (Figure IX.1 (a)). Néanmoins, les couples de GCM/RCM atteignant les plus fortes valeurs d'ETP annuelle ne sont pas représentés dans les simulations du RCP 2.6. Les précipitations annuelles les plus extrêmes, qu'elles soient élevées ou basses, sont également plutôt atteintes pour les RCP 8.5 et 4.5 (Figure IX.1 (b)). Ainsi, la variabilité annuelle paraît plus marquée pour les projections des RCP 8.5 et 4.5. Cette variabilité annuelle est cependant dépendante du couple de GCM/RCM considéré. Des périodes de forte ETP concomitantes à de faibles précipitations sont notables dans les projections du couple HadGEM/CCLM, autour sur la période 2058-2061 pour le RCP 8.5 et autour de la période 2051-2053 pour le RCP 4.5 ((Figure IX.1 (c)).

La variabilité entre les couples de GCM/RCM n'est pas surprenante, puisqu'elle résulte de notre choix de sélectionner des GCM/RCM représentatifs de l'ensemble des possibles sur le bassin versant de la Seille. On rappelle que les couples sélectionnés se caractérisaient par une faible évolution des précipitations à l'échelle annuelle, avec plutôt une tendance à la hausse, mais par des évolutions des précipitations saisonnières divergentes. Les projections indiquent des hausses de températures, avec toutefois des différences en termes d'ordre de grandeur annuel ou saisonnier. Ainsi, le couple HadGEM/CCLM se concrétise en un réchauffement plus élevé que les autres projections, ainsi que par un assèchement estival marqué. Nous voyons également que ce modèle produit une variabilité interannuelle forte. Les projections CNRM/RACMO et MPI/REMO produisent quant à elles des tendances plus modérées concernant les évolutions de température et de précipitations, notamment estivales.

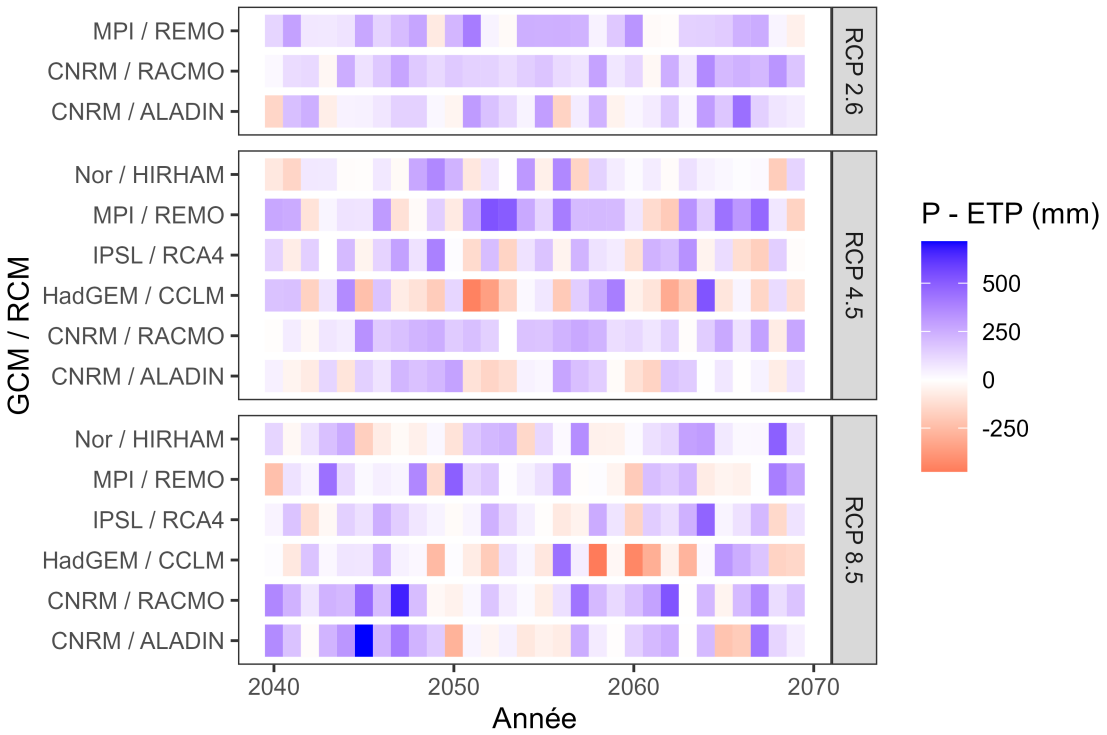


(a) Evapotranspiration potentielle annuelle Penman Monteith avec proxy du rayonnement Hargreaves



(b) Précipitations annuelles

FIGURE IX.1 – Projections climatiques futures annuelles sur le bassin versant de la Seille



(c) Déficit annuel entre évapotranspiration potentielle et précipitations

FIGURE IX.1 – Projections climatiques futures annuelles sur le bassin versant de la Seille (suite)

Ces évolutions climatiques pourront permettre d'éclairer les résultats obtenus en termes de projection des ressources en eau ou de satisfaction de la demande en eau d'irrigation.

2 Projections de l'irrigation

2.1 Projections de l'irrigation pour les cycles "longs"

Dans un premier temps, nous nous intéressons à des simulations réalisées en prenant en compte une phénologie des cultures non modifiée, dans le cadre des expériences dites avec "cycles longs".

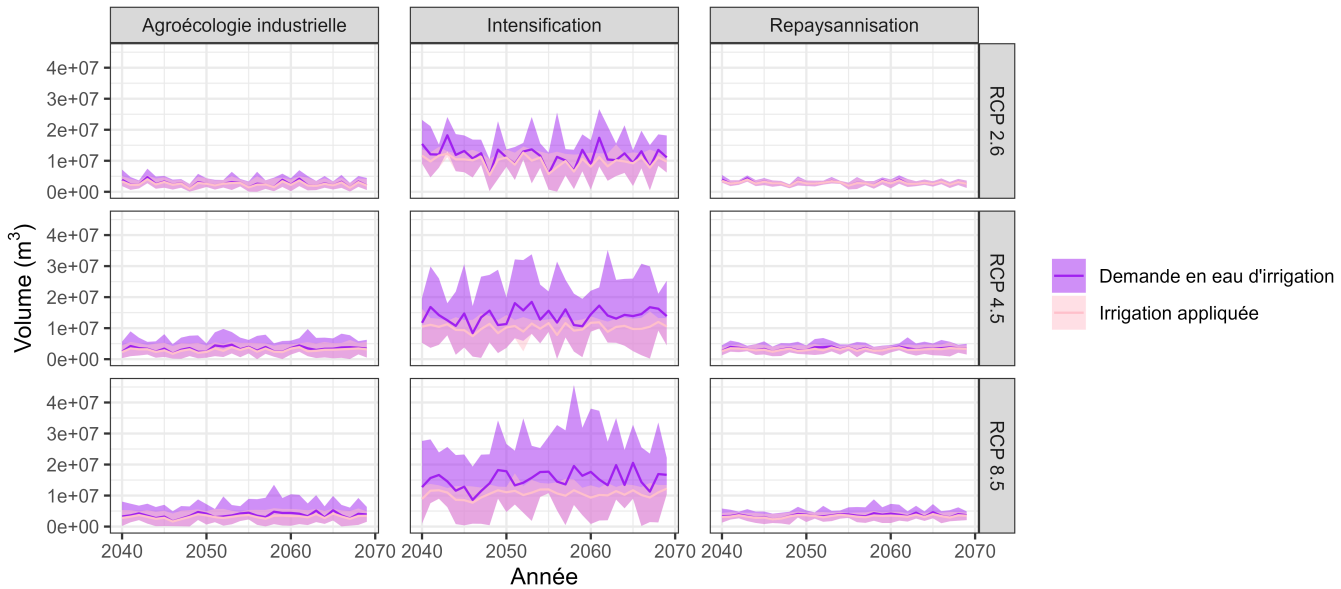
2.1.1 Demande en eau d'irrigation et irrigation effective

Les simulations de l'irrigation pour les différents scénarios sont présentées dans la Figure IX.2. On rappelle que, sur la période historique, aucune irrigation n'est considérée sur le bassin versant de la Seille, ce qui explique que celle-ci ne soit pas représentée ou discutée dans cette sous-section. De manière similaire, nous n'aborderons pas ici le scénario à Usages constants.

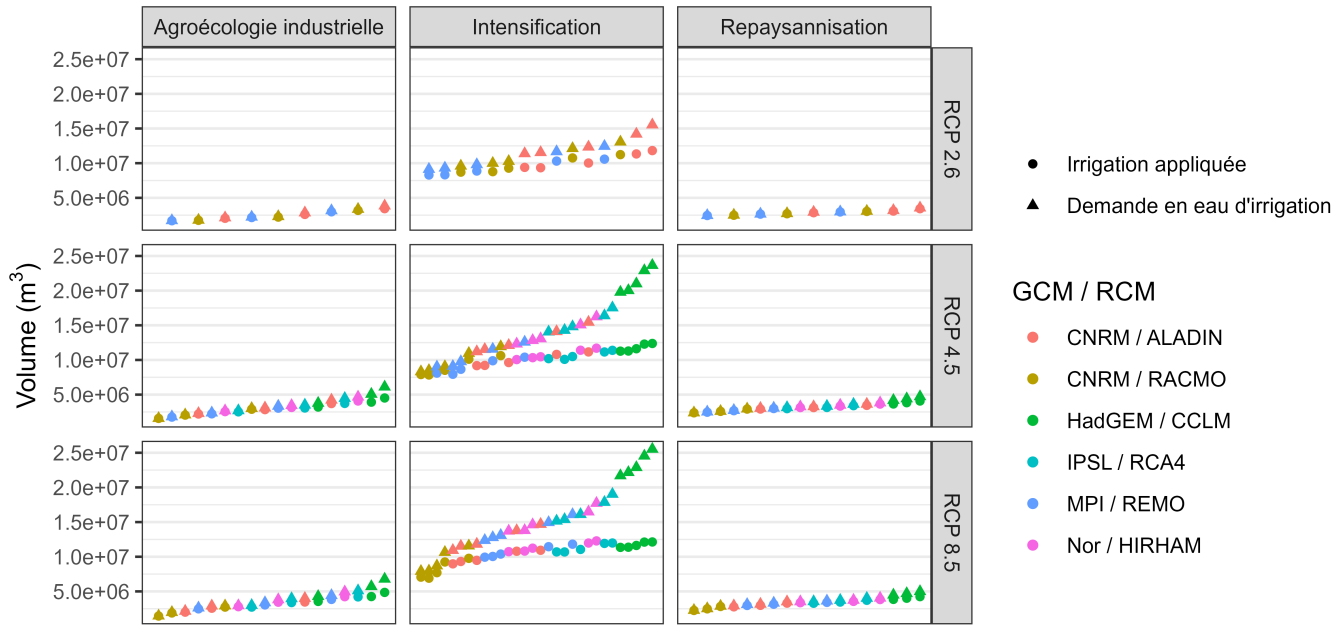
On observe une forte variabilité de la demande en eau d'irrigation et de l'irrigation effective (Figure IX.2 (a)). Cette variabilité est observée d'une projection à l'autre sur une même année, mais aussi d'une année sur l'autre. La variabilité d'une projection sur l'autre, décrite par la largeur de l'enveloppe des simulations, est la conséquence directe de la variété de projections climatiques et des paramétrisations de CropWat. La variabilité d'une année sur l'autre est la conséquence de la variabilité climatique naturelle, décrite dans la Section IX.1.

Le scénario local ainsi que le choix du GCM/RCM semblent être les premiers facteurs explicatifs de la variabilité de l'irrigation, devant la configuration de l'irrigation (Figure IX.2 (b)) et devant les RCP (Figure IX.2 (c)). En effet, le scénario Intensification présente une demande et une irrigation effective beaucoup

plus élevées que les deux autres scénarios, ce qui est cohérent avec les hypothèses d'assolement irrigué formulées (Section VIII.2.3). La demande en eau d'irrigation atteinte pour certaines projections, en particulier celles du couple HadGEM/CCLM, est beaucoup plus forte pour ce scénario que pour les deux autres (Figure IX.2 (b)). En effet, nous avons autorisé davantage d'irrigation par rapport aux volumes totaux disponibles que dans les autres scénarios. De plus, les assolements irrigués sont principalement constitués de maïs, dont la demande en eau d'irrigation est déterminée par le déficit entre précipitation et évapotranspiration dans le plein été, période davantage impactée par le changement climatique dans certaines projections sélectionnées (Figure B.1).

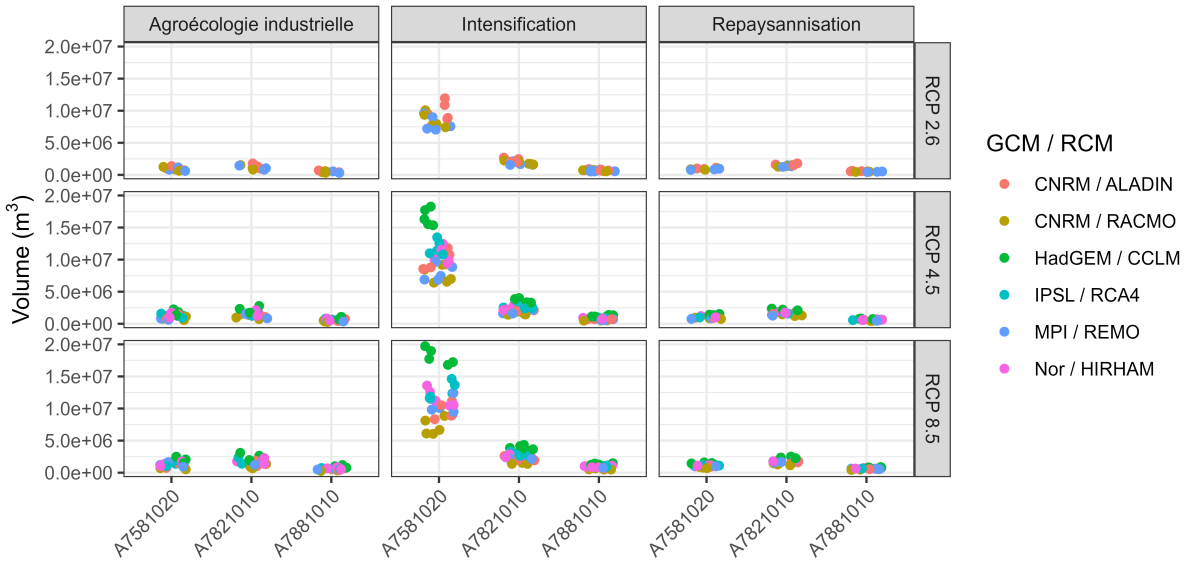


(a) Demande en eau d'irrigation annuelle et irrigation appliquée annuelle sur la totalité du bassin versant de la Seille. L'ensemble des combinaisons entre projections climatiques et paramétrisations de CropWat sont présentées via des enveloppes représentant le minimimum et le maximum des volumes obtenus



(b) Comparaison entre demande en eau d'irrigation et irrigation appliquée moyennes interannuelles pour l'ensemble des projections pour l'horizon futur sur la totalité du bassin versant de la Seille. Les points ont été classés par ordre de demande en eau d'irrigation croissante. Les différents points d'une même couleur correspondent aux valeurs obtenues grâce aux différentes configurations d'irrigation (i.e. paramétrisations de CropWat)

FIGURE IX.2 – Irrigation simulée pour les différents scénarios dans le cas des cycles "longs"



(c) Demande en eau d'irrigation moyenne interannuelle agrégée sur les trois SBGR

FIGURE IX.2 – Irrigation simulée pour les différents scénarios dans le cas des cycles "longs" (Suite)

La répartition spatiale de la demande en eau d'irrigation diverge selon les scénarios (Figure IX.2 (c)) : elle est principalement située en amont du bassin sur le SBGR de la Seille à Moyenvic (A7581020) pour le scénario Intensification, alors qu'elle est répartie plus équitablement entre les SBGR pour les autres scénarios. Cette forte irrigation sur l'amont du bassin s'explique par le fait que l'étang de Lindre est devenu entièrement destiné à l'irrigation pour le scénario Intensification, menant à d'importantes surfaces irriguées à l'amont du bassin. Pour les scénarios Repaysannisation et Agroécologie industrielle, la surface irriguée est plus importante sur le SBGR A7821010, puis A7581020, et enfin A7881010 (Tableau VIII.4 Section VIII.2.2), ce qui est cohérent avec la répartition spatiale de la demande en eau simulée.

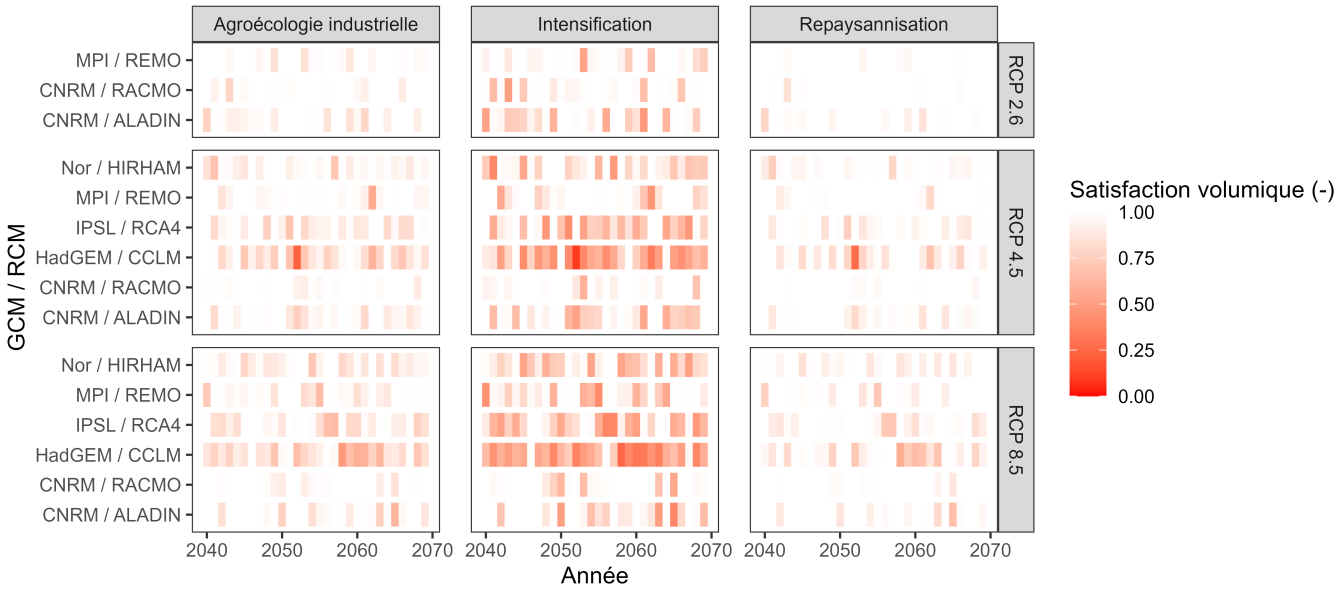
2.1.2 Satisfaction de la demande en eau d'irrigation

Après l'analyse de la demande en eau d'irrigation et de l'irrigation effective, nous nous intéressons à la satisfaction de la demande en eau d'irrigation (i.e. la différence entre demande en eau et irrigation effective). De manière similaire aux deux indicateurs précédemment cités, on observe une forte variabilité entre les projections, et d'une année sur l'autre, de la satisfaction (Figure IX.3).

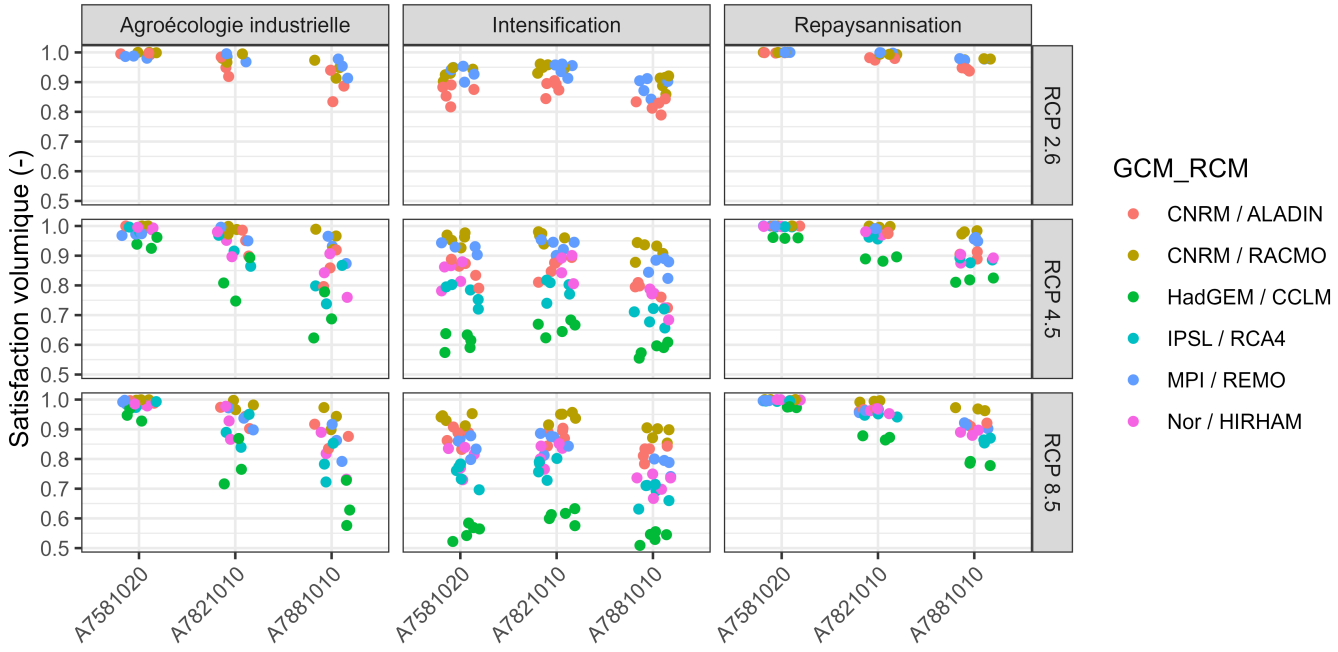
Par ailleurs, on peut noter que les occurrences de plus forte insatisfaction sont cohérentes avec les périodes de déficit entre évapotranspiration potentielle et précipitations mises en avant dans la Section IX.1, soit au début des années 2050 pour le RCP 4.5 et les années 2060 pour le RCP 8.5 du couple HadGEM/CCLM (Figure IX.3 (a)).

On observe une tendance à la hausse de l'insatisfaction vers l'aval du bassin de la Seille pour les scénarios Agroécologie industrielle et Repaysannisation (Figure IX.3 (b)). Pour le SBGR A7581020 amont, nous avons arbitrairement limité les surfaces irrigables pour les scénarios Agroécologie industrielle et Repaysannisation pour tenir compte des autres usages et objectifs de l'étang de Lindre. Aussi, l'eau est généralement "surabondante" par rapport aux besoins sur les unités de simulation agronomique irriguées à partir de l'étang de Lindre, ce qui explique la très bonne satisfaction sur ce SBGR. Pour les trois scénarios, on observe que le SBGR A7821010 présente une meilleure satisfaction que le SBGR A7881010 (et que le SBGR A7581020 pour le scénario Intensification). Cette plus forte insatisfaction vers l'aval peut s'expliquer de différentes manières :

- nous avons effectué un calcul grossier de la demande en eau des cultures pour approximer les surfaces irriguées de nos scénarios. Or cette demande est en réalité variable spatialement, selon les propriétés des sols (RU) et la variabilité climatique ;



(a) Satisfaction annuelle de la demande en eau d'irrigation. Les différentes satisfactions issues des configurations de l'irrigation sont agrégées via une moyenne et sur l'ensemble du bassin versant



(b) Satisfaction moyenne interannuelle de la demande en eau d'irrigation agrégée sur les trois SBGR

FIGURE IX.3 – Satisfaction volumique simulée pour les différents scénarios dans le cas des cycles "longs". Cette satisfaction est obtenue en divisant l'irrigation effectivement appliquée annuelle par l'irrigation demandée annuelle. Les disques d'une même couleur représentent les satisfactions obtenues via les différentes configurations de l'irrigation

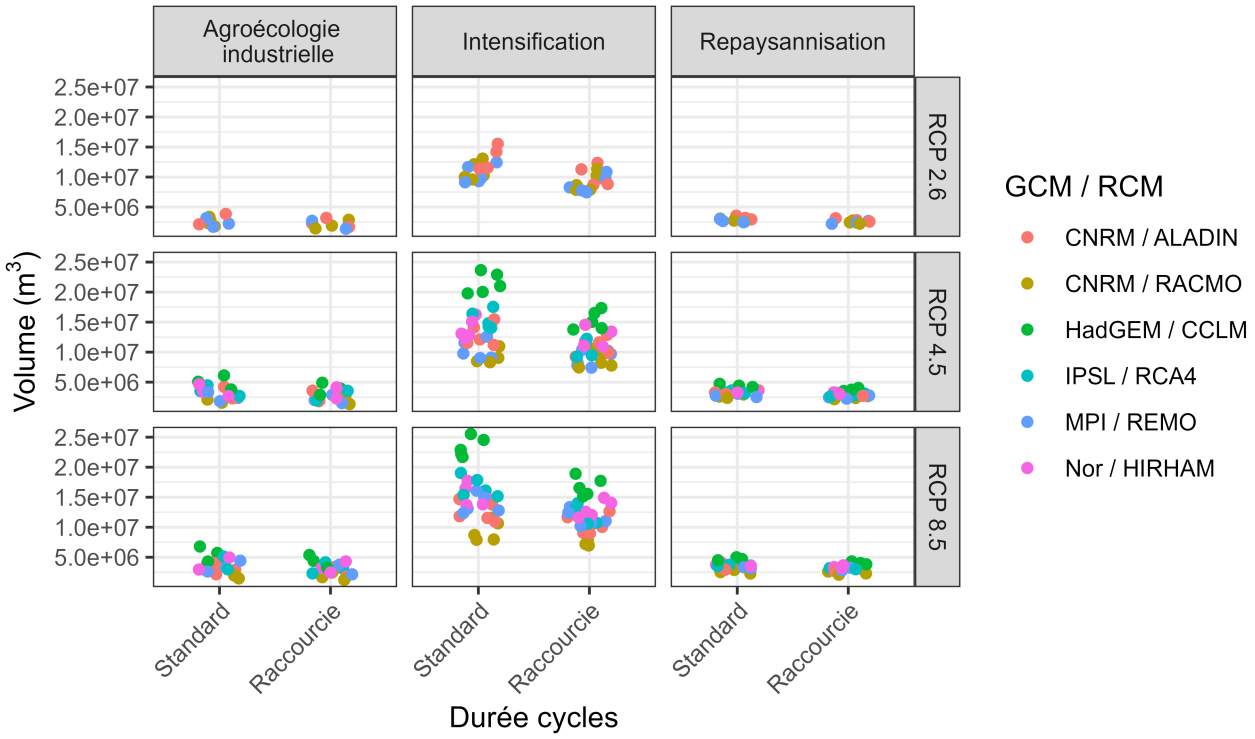
- nous avons réparti les surfaces irriguées en fonction de la surface maximale d'eau stockable par AWZ. Or le remplissage des retenues dépend de leur impluvium, du débit produit par le SBGR, qui est lui-même variable selon les paramètres et le climat.

2.2 Sensibilité au raccourcissement des cycles sur l'irrigation

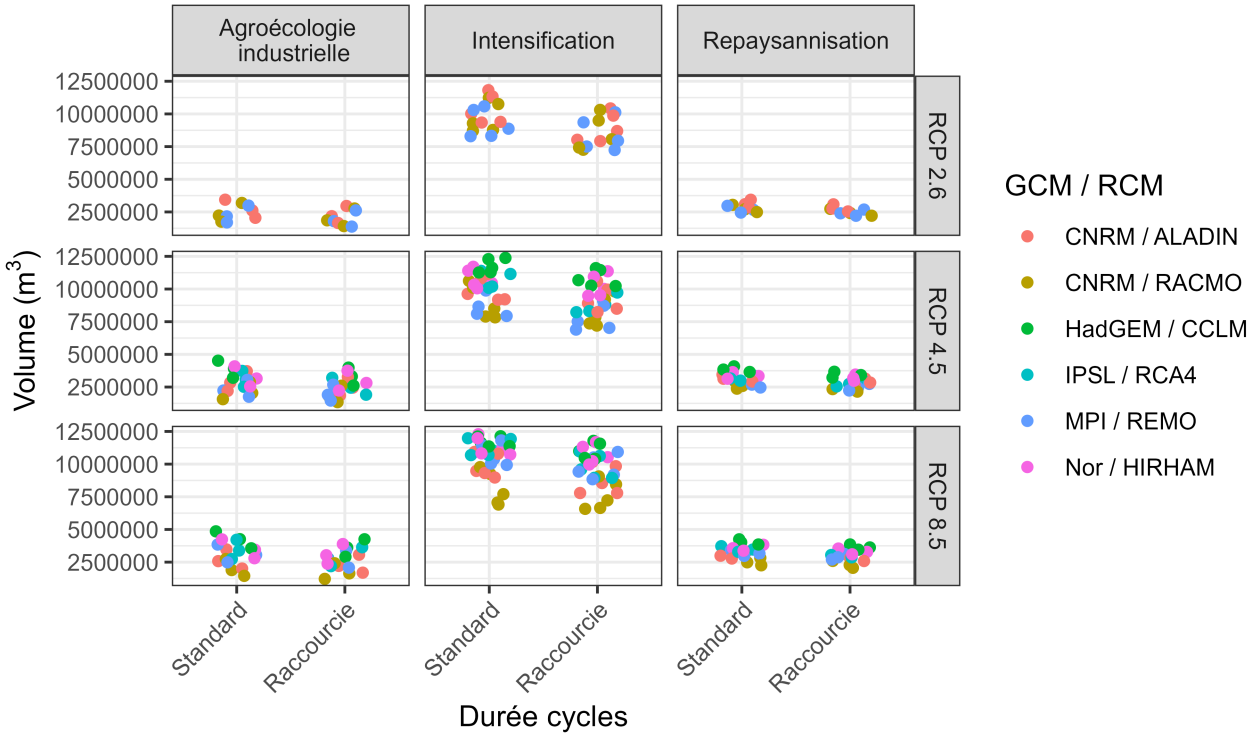
Nous comparons la demande en eau d'irrigation et l'irrigation effectivement appliquée entre les simulations avec les cycles standard ("cycles longs") et les cycles raccourcis ("cycles courts") dans la Figure IX.4.

Le raccourcissement des cycles entraîne une diminution plus importante de la demande en eau d'irrigation (Figure IX.4 (a)) pour le scénario Intensification que pour les autres scénarios, et en particulier pour les projections menant à une demande en eau d'irrigation la plus forte. C'est le plus visible pour le couple HadGEM/CCLM. Cela s'explique par le fort raccourcissement potentiel de la durée des cycles du maïs, principale culture irriguée pour ce scénario. Cette diminution des demandes en eau les plus fortes ne résulte pas forcément en une diminution de l'irrigation effective (Figure IX.4 (b)). On observe plutôt une augmentation de la satisfaction de la demande en eau (Figure IX.5).

En effet, les projections pour lesquelles la diminution de la demande en eau d'irrigation est la plus importante étaient également les projections pour lesquelles la demande est la moins satisfaite avec les cycles longs. Le raccourcissement des cycles a ainsi pour principal effet de mieux satisfaire la demande, sans pour autant entraîner de diminution importante de l'irrigation effectivement appliquée.



(a) Demande en eau d'irrigation



(b) Irrigation effectivement appliquée

FIGURE IX.4 – Comparaison de l'irrigation entre les simulations avec les cycles de durée standard et les cycles de durée raccourcie. Les disques d'une même couleur représentent les satisfactions obtenues via les différentes configurations de l'irrigation

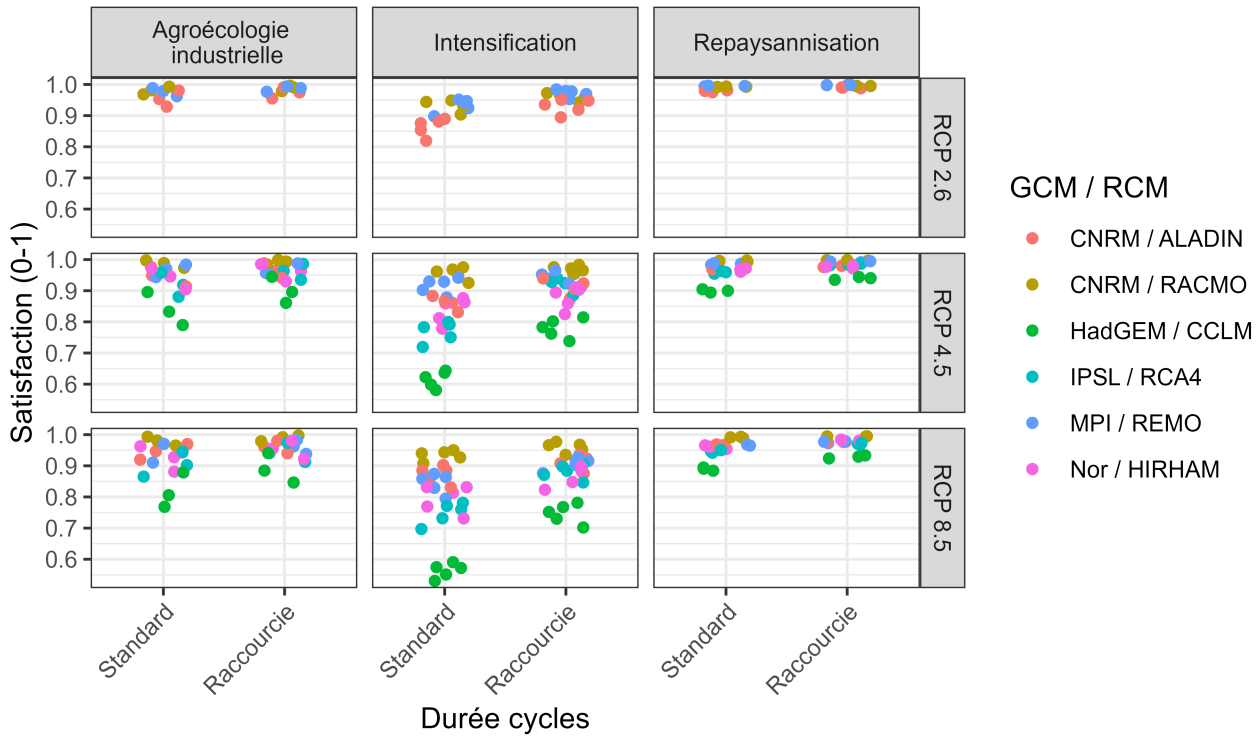


FIGURE IX.5 – Comparaison de la satisfaction de l'irrigation entre les simulations avec les cycles de durée standard et les cycles de durée raccourcie. Les disques d'une même couleur représentent les satisfactions obtenues via les différentes configurations de l'irrigation

3 Évolutions des indicateurs d'étiages

Nous venons d'étudier les évolutions futures de l'irrigation. Désormais, regardons les évolutions futures des étiages via l'analyse de divers indicateurs.

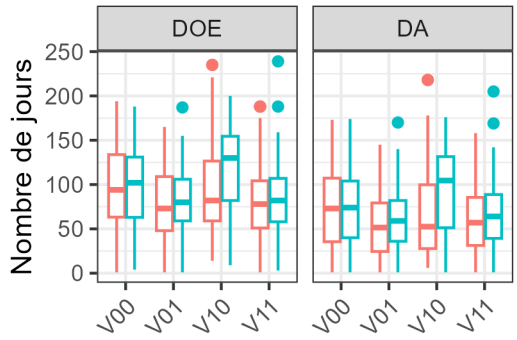
3.1 Impact spécifique du climat sur l'évolution des étiages

Nous souhaitons dans un premier temps étudier l'effet de l'évolution du climat seul sur les étiages. Nous étudions pour cela l'évolution d'indicateurs d'étiage pour les simulations avec les usages constants. Cependant, la chronique de vidange de l'étang de Lindre ne peut pas être identique entre la période de référence et la période de projection. Nous présentons ainsi dans la Figure IX.6 les évolutions des indicateurs d'étiage dans le cas des usages constants pour les différents types d'année selon l'occurrence des vidanges l'année considérée et/ou l'année précédente (voir classification présentée dans le Tableau VIII.6).

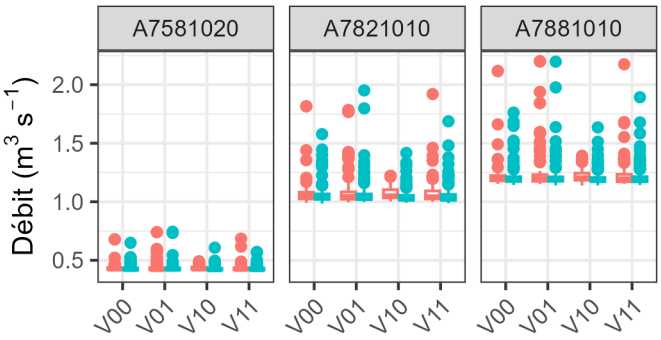
On observe que pour toutes les classes d'années (V00, ... V11), la distribution des indicateurs d'étiage est modifiée entre période historique et période future, montrant l'impact spécifique des projections climatiques indépendamment de la variabilité de la chronique de vidange entre l'horizon historique et l'horizon futur. Le jeu de projections climatiques sélectionné mène ainsi plutôt à une aggravation des indicateurs d'étiage dans le cas avec les usages constants, avec notamment un nombre de jours sous les seuils d'étiage qui augmente (Figure IX.6 (a)), des VCN3 qui diminuent (Figure IX.6 (b)) et des QMNA qui diminuent (Figure IX.6 (c)). On note cependant une très forte variabilité, d'un ordre de grandeur supérieur au signal. Cette variabilité traduit à la fois la variabilité entre les projections et la variabilité interannuelle. Pour la période historique comme pour la période future, on observe que la distribution de la majorité des VCN3 annuels et des QMNA paraît moins étalée devant les valeurs atteintes par les valeurs aberrantes : certaines années exceptionnelles de certaines

projections sortent du lot et représentent plutôt des VCN3 et QMNA anormalement élevés, soit des sécheresses moins intenses.

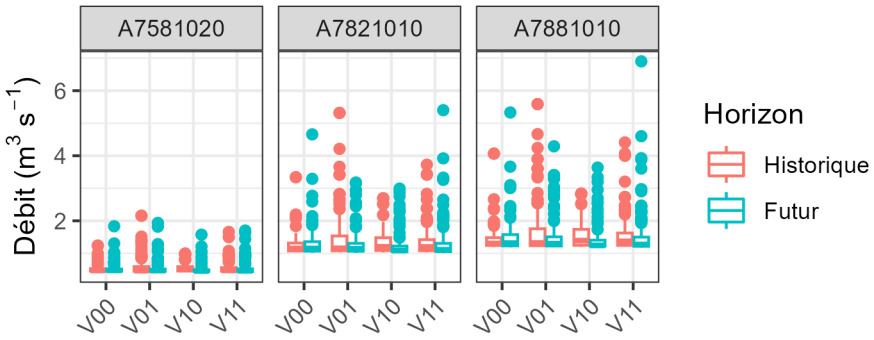
On observe toutefois une interaction entre le type d'année et les projections climatiques sur les indicateurs d'étiage : les étiages semblent particulièrement aggravés dans les projections des années suivant les vidanges et ne faisant pas elles-mêmes l'objet d'une vidange (V10), présageant une difficulté accrue pour remplir l'étang de Lindre après une vidange. Les années suivant une vidange et faisant elles-mêmes l'objet d'une vidange ne semblent pas faire l'objet d'une tendance aussi marquée pour le nombre de jours sous les seuils d'étiage, montrant que le débit de vidange de l'étang de Lindre, en fin d'été et en automne, semble atténuer l'impact du remplissage sur les débits. Néanmoins, les VCN3 et QMNA diminuent tout de même pour ce type d'année, montrant que le remplissage de l'étang de Lindre entraîne une aggravation des étiages lorsque celui-ci est maximal.



(a) Distribution du nombre de jours sous les seuils d'étiage annuels sur la Seille à Metz (A7881010). DOE = 1,88 $m^3 s^{-1}$, DA = 1,5 $m^3 s^{-1}$



(b) Comparaison des VCN3 annuels



(c) Comparaison des QMNA

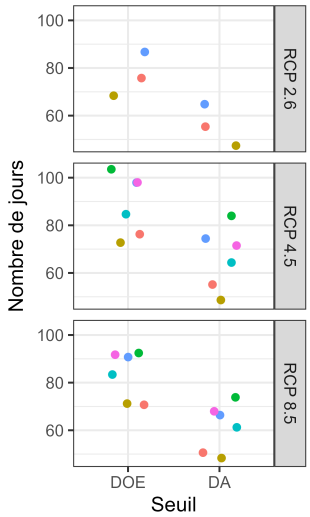
FIGURE IX.6 – Distribution des indicateurs d'étiage sur l'horizon historique et sur l'horizon futur classifiée selon l'occurrence des vidanges dans les projections pour le cas Usages constants. Les boîtes à moustaches sont constituées des valeurs des indicateurs calculées pour une année et un couple de GCM/RCM spécifiques. Il n'y a pas d'irrigation dans le cas des Usages constants

3.2 Impact des scénarios sur les étiages

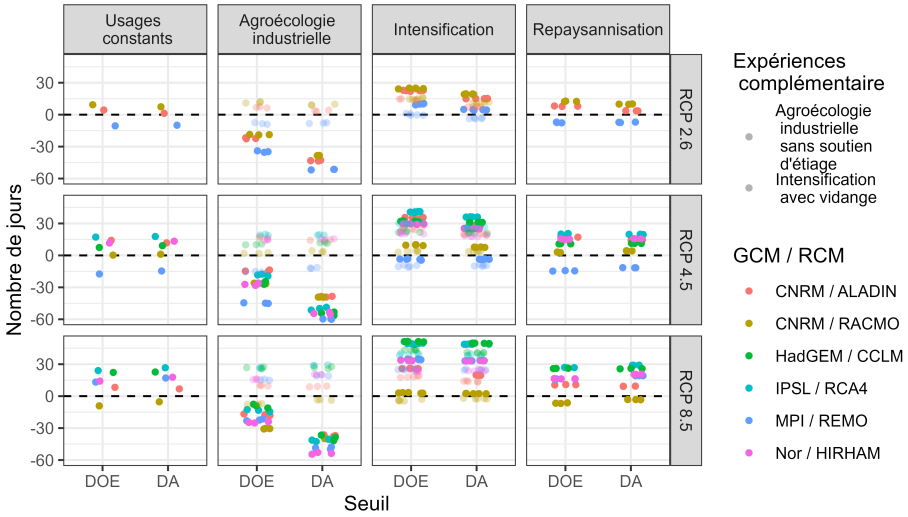
Plusieurs indicateurs d'étiage sont utilisés pour comparer l'impact des scénarios sur les étiages :

- le nombre de jours sous les seuils d'étiage pour la Seille à Metz (Figure IX.7) ;
- le VCN3 (Figure IX.8) : les VCN7 et 10 ont également été étudiés, et montrent des tendances similaires au VCN3 (résultats non montrés) ;
- les QMNA (Figure IX.9).

Nous étudions dans cette sous-section l'effet des scénarios Agroécologie industrielle, Intensification et Repaysannisation, mais aussi un scénario Usages constants. Par ailleurs, deux expériences complémentaires, à savoir le scénario Agroécologie industrielle sans soutien d'étiage, et Intensification avec vidanges, sont présentées.



(a) Moyenne annuelle du nombre de jours sous les seuils d'étiage sur la période de référence. Rappel : il n'y a pas d'irrigation sur la période de référence



(b) Évolution de la moyenne annuelle du nombre de jours sous les seuils d'étiage. Les expériences complémentaires sont figurées avec des disques de couleur plus fade. Chaque disque correspond à une configuration de la modélisation de l'irrigation

(c) Nombre annuel de jours sous le DA. Les différentes configurations de l'irrigation sont moyennées

FIGURE IX.7 – Projections des nombres de jours sous les seuils d'étiage sur la Seille à Metz (A7881010) : DOE = 1,88 $m^3 s^{-1}$, DA = 1,5 $m^3 s^{-1}$

On note tout d'abord (Figure IX.7 (a)) que, sur la période historique, donc sans scénario ni irrigation, le nombre de jours sous les seuils d'étiage peut déjà être élevé, si l'on considère les débits de la Seille à Metz. Concernant le DOE, on parle ainsi de 70 à 105 jours sous ce seuil selon le RCP et le couple de modèles climatiques, alors que pour le DA on se situe entre 45 et 85 jours. On n'observe cependant pas d'impact fort des RCP, si ce n'est que l'on peut noter des nombres de jours légèrement plus faibles pour le RCP 2.6. On

rappellera à toutes fins utiles que la période historique (1990-2019) ne correspond ni à la période pré-RCP dans notre cas, ni à la période utilisée pour le débiaisage via ADAMONT, ce qui explique ces différences entre RCP et entre modèles climatiques.

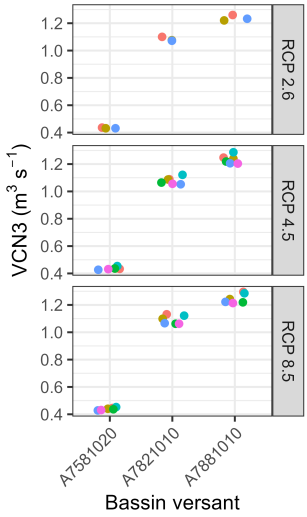
Le scénario à Usages constants indique une évolution incertaine du nombre de jours sous le DOE ou le DA (entre +15 et -15 jours par an selon le modèle climatique) pour les RCP 2.6 et 4.5 (Figure IX.7 (b)), mais indique une augmentation du nombre de jours sous ces seuils pour le RCP 8.5, à une exception près (entre +30 et -5 jours par an). La majeure partie des projections dans le scénario Usages constants entraîne ainsi une augmentation du nombre de jours sous les seuils d'étiage pour le RCP 8.5. Seuls les couples CNRM/RACMO et MPI/REMO peuvent entraîner une diminution ou une évolution modérée de cet indicateur. Il s'agit justement des couples pour lesquels nous avions souligné qu'ils entraîneraient une évolution limitée de l'évapotranspiration et des précipitations estivales. Le scénario Repaysannisation entraîne une aggravation à peine perceptible du nombre de jours sous le DOE et sous le DA par rapport aux simulations avec les usages constants. En revanche, le scénario Intensification entraîne une augmentation nettement plus forte du nombre de jours sous le DA ou sous le DOE par rapport au scénario avec usages constants. Une partie de l'aggravation du nombre de jours sous le DA ou sous le DOE s'explique cependant par la suppression des vidanges, jouant un rôle de soutien d'étiage automnal. Néanmoins, même avec le rétablissement des vidanges, le nombre de jours sous les seuils d'étiage est plus important pour ce scénario. Le scénario Agroécologie industrielle permet une diminution du nombre de jours sous les seuils d'étiage par rapport aux simulations avec les usages constants, et même par rapport à la situation de référence, grâce à la mise en place de soutien d'étiage. La suppression du soutien d'étiage entraîne cependant des valeurs d'indicateurs d'étiage semblables à celles des simulations pour les usages constants.

La variabilité annuelle du nombre de jours sous le DA est assez importante (Figure IX.7 (c)). Les années de fort déficit hydrique sont également les années avec le plus grand nombre de jours sous le DA pour les trois scénarios, avec des valeurs pouvant atteindre près de 200 jours sous le DA.

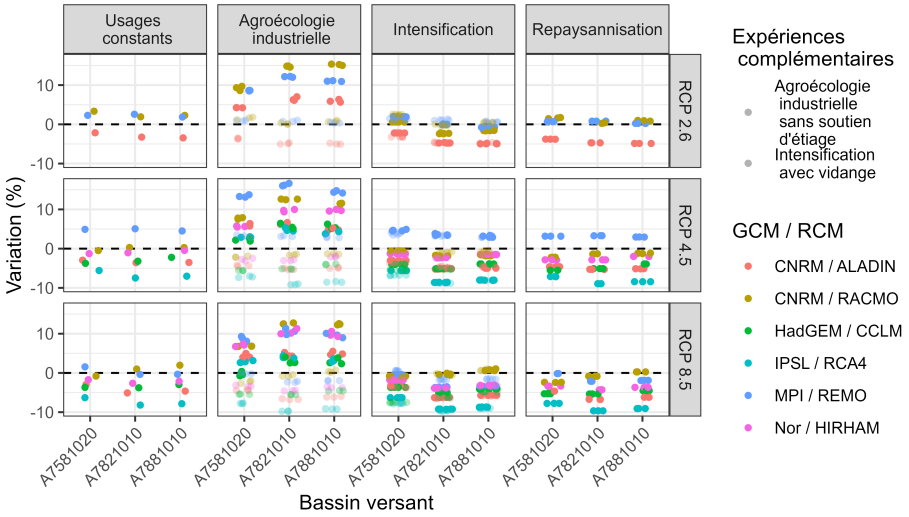
La Figure IX.8 (a) montre les valeurs de VCN3 sur la période de référence pour nos trois stations hydrométriques. On remarque une faible variabilité entre les couples de modèles climatiques. L'évolution du VCN3 sur la période future est indiquée sur la Figure IX.8 (b). On remarque qu'à une ou deux projections climatiques près, les VCN3 diminueront dans le futur à Usages constants. Ceci est plutôt cohérent avec l'augmentation du nombre de jours sous les seuils d'étiages généralement observée précédemment. De même que pour l'évolution du nombre de jours sous les seuils d'étiage, ce sont les couples CNRM/RACMO et MPI/REMO qui entraînent plutôt une moindre intensité des étiages. C'est également cohérent avec la distribution des VCN3 annuels tracée dans la Figure IX.6 (b). Ici aussi, sans surprise, le scénario Intensification entraîne une légère aggravation du VCN3, le scénario Agroécologie industrielle entraîne une amélioration de cet indicateur, et les autres scénarios mènent à des VCN3 très proches du scénario à Usages constants. Le VCN3 annuel (Figure IX.8 (c)) permet de confirmer que cet indicateur est moins variable annuellement que le nombre de jours sous les seuils d'étiage. Seules certaines années avec des VCN3 plus élevés semblent sortir du lot. Nous avions déjà effectué cette observation dans la Section IX.3.1. Néanmoins, on rappelle que l'évaluation du modèle avait montré des difficultés à bien simuler la variabilité interannuelle des VCNs (Section VII.3.2).

Les résultats sont présentés de manière similaire pour le QMNA5 (Figure IX.9). Dans l'ensemble, on retrouve les mêmes signaux et conclusions que pour le VCN3, nous ne les détaillerons donc pas. L'unique différence à noter est que les QMNA5 ne semblent que peu évoluer dans le futur, si ce n'est pour le scénario Agroécologie industrielle pour lequel une forte augmentation est visible.

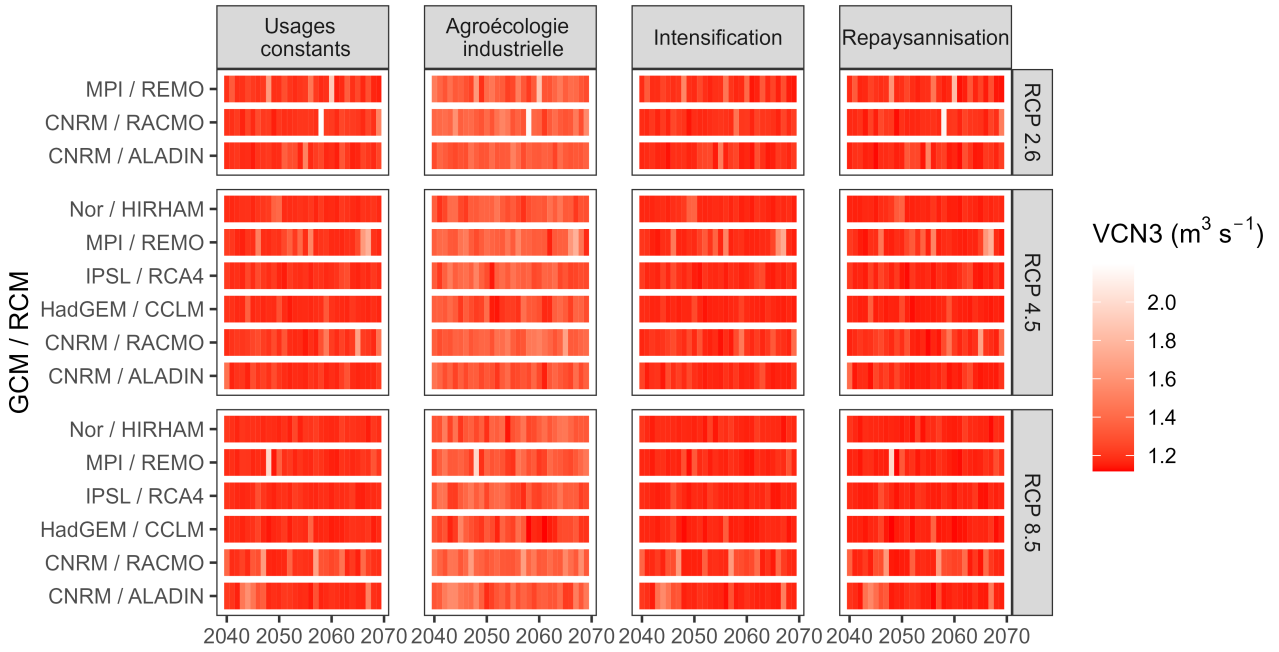
Ainsi, pour résumer ces résultats, les principaux facteurs explicatifs des étiages dans les projections sont le choix de la projection climatique et la mise en place ou non de soutien d'étiage, suivis des hypothèses d'irrigation (assolements irrigué et volumes disponibles pour l'irrigation) dans les scénarios locaux. La configuration de l'irrigation, dont l'effet était visible sur les résultats de modélisation de l'irrigation, est ici très négligeable.



(a) Moyenne interannuelle du VCN3 sur la période de référence. Rappel : il n'y a pas d'irrigation sur la période de référence

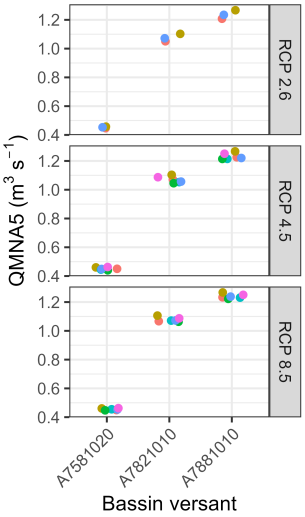


(b) Évolution future de la moyenne interannuelle du VCN3. Chaque disque correspond à une configutation de la modélisation de l'irrigation

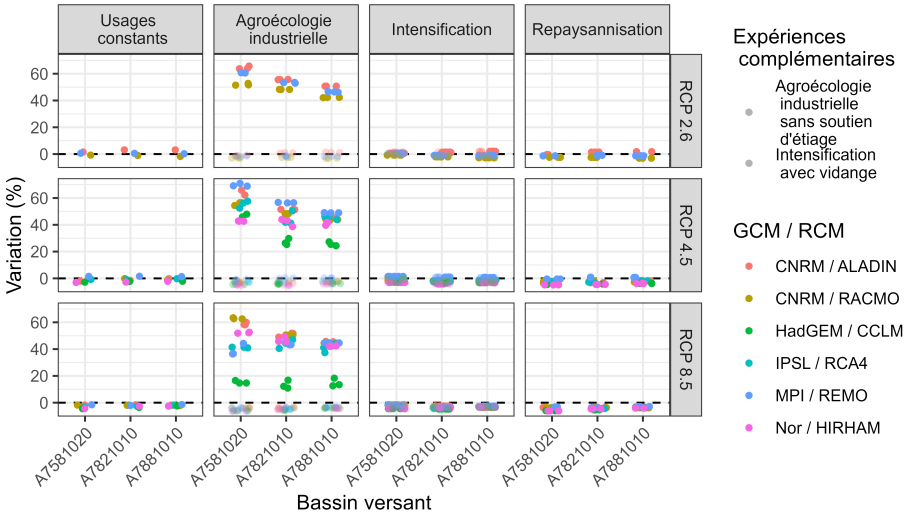


(c) VCN3 annuel

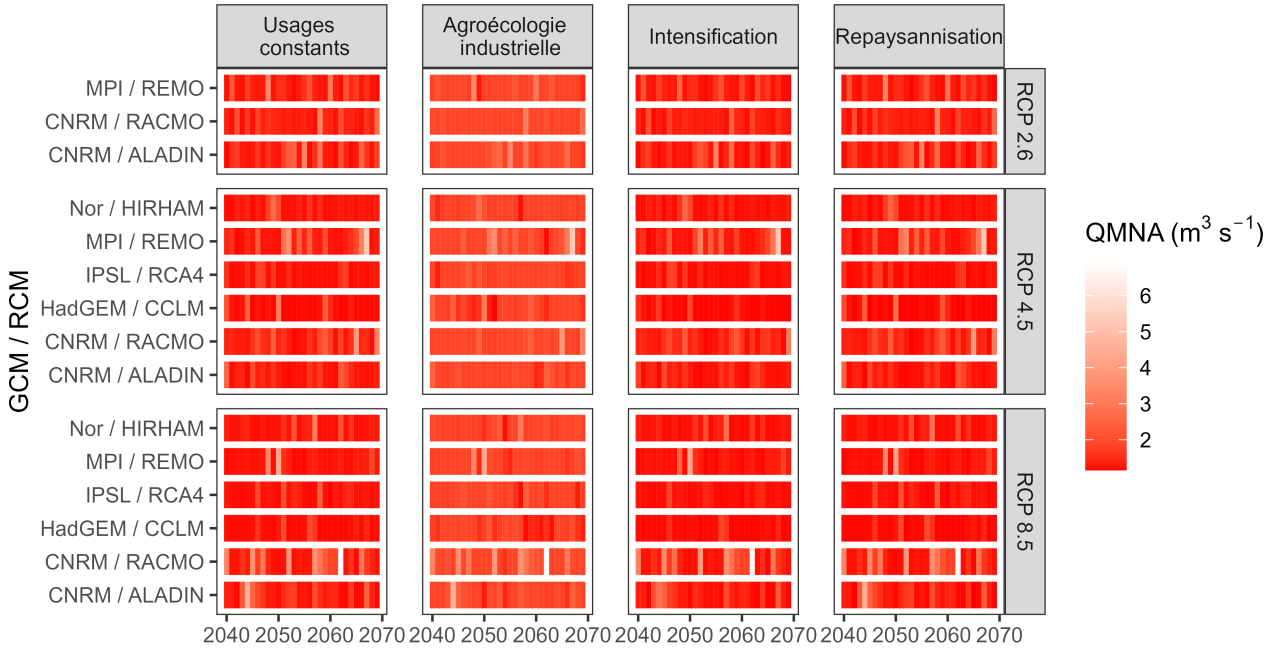
FIGURE IX.8 – Projections du VCN3 moyen interannuel



(a) QMNA5 sur la période de référence. Rappel : il n'y a pas d'irrigation sur la période de référence



(b) Évolution future du QMNA5. Chaque disque correspond à une configuration de la modélisation de l'irrigation



(c) QMNA

FIGURE IX.9 – Projections du QMNA

3.3 Sensibilité au raccourcissement des cycles sur les étiages

Nous comparons les indicateurs d'étiage (nombre de jours sous le DA, VCN3, QMNA5) des simulations prenant en compte une durée des cycles standard, aux indicateurs des simulations prenant en compte une durée des cycles raccourcie dans la Figure IX.10.

Si l'impact du raccourcissement des cycles était limité mais visible sur la demande en eau d'irrigation, il est très limité sur les indicateurs d'étiage. Cela est logique car l'irrigation effective n'était que peu modifiée par le raccourcissement des cycles. De plus, l'eau destinée à l'irrigation n'est prélevée qu'à partir de ressources stockées et non directement dans la rivière. Cela atténue ainsi les impacts de l'irrigation sur les étiages, car autant l'irrigation que les étiages ont lieu plutôt l'été, alors que les retenues sont principalement remplies en fin d'automne et en hiver (Section IX.4.2).

4 Évolutions des volumes stockés

Nous souhaitons quantifier l'évolution des volumes stockés selon les projections climatiques et les scénarios pour mieux comprendre les simulations de satisfaction de l'irrigation et d'évolution des indicateurs d'étiage précédemment présentées. Plus spécifiquement, cette analyse peut permettre de mieux estimer :

- la qualité écologique de l'étang de Lindre : si le niveau de l'étang de Lindre est bas plus longtemps dans l'année, la biodiversité est dégradée ;
- l'évolution de la pression du remplissage sur les débits de surface.

Les indicateurs calculés sont ainsi :

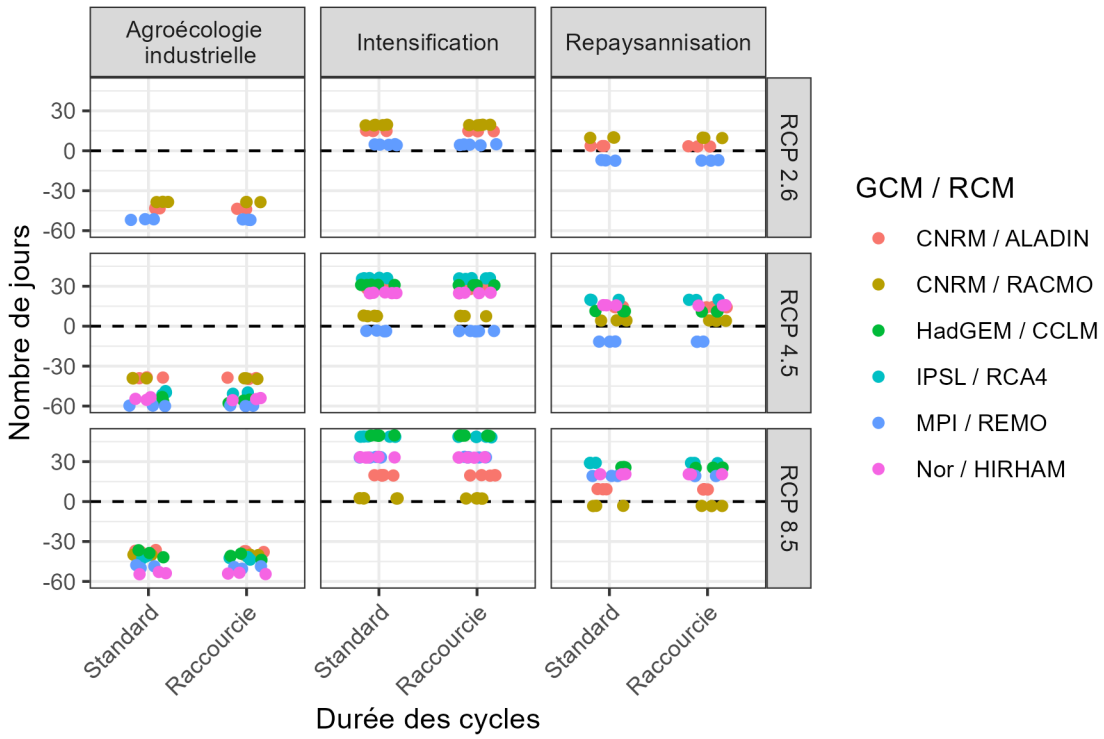
- les volumes stockés dans l'étang de Lindre ;
- les volumes stockés dans les retenues simples ;
- le nombre annuel de jours pour lesquels le volume de l'étang de Lindre est inférieur à 7.10^6 m^3, correspondant à une baisse de la hauteur d'eau d'environ 2 m ;
- les prélèvements nets de stockage. Nous appelons ainsi les volumes entrant dans les retenues et contributifs au remplissage de ces dernières, desquels on retire les volumes sortants contributifs au débit (vidange et soutien d'étiage) ;
- le ratio entre les prélèvements nets de stockage et les débits, appelée pression.

Les calculs des prélèvements nets et de la pression sont détaillés dans la Section VIII.1.2.

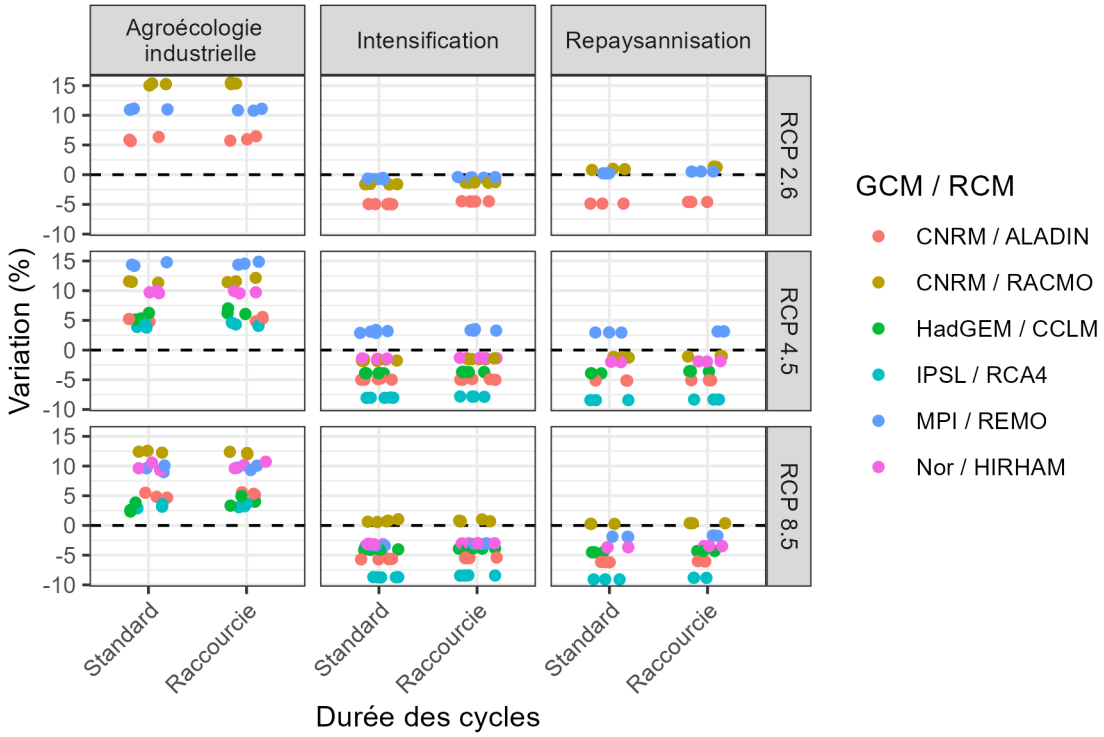
4.1 Impact spécifique du climat sur le stockage

De même que pour les étiages, nous souhaitons étudier dans un premier temps l'effet de l'évolution du climat seul sur l'évolution du stockage. Pour ce faire, nous étudions l'évolution du nombre annuel de jours pour lesquels le volume de l'étang de Lindre est inférieur à 7.10^6 m^3 dans le cas des Usages constants. Cependant, les volumes stockés dans l'étang de Lindre dépendent des vidanges, et la chronique de vidange n'est pas identique dans la période de référence et la période de projection. Nous distinguons donc comme précédemment les années selon l'occurrence des vidanges l'année considérée et/ou l'année précédente, telles que présentées dans le Tableau VIII.6.

On observe sur la Figure IX.11 que le nombre annuel de jours avec un volume de l'étang de Lindre situé sous 7.10^6 m^3 est logiquement plus élevé pour les années avec vidange (V01 et V11). De plus, cet indicateur semble peu différent entre les projections sur l'horizon historique et celles sur l'horizon futur, pour un même type d'année au regard de l'occurrence des vidanges. On observe néanmoins une très légère augmentation du nombre annuel de jours sous 7.10^6 m^3 dans le futur. Dans le cas des années sans vidange, le volume de l'étang de Lindre reste intégralement (V00) ou principalement (V10) au-dessus de 7.10^6 m^3.

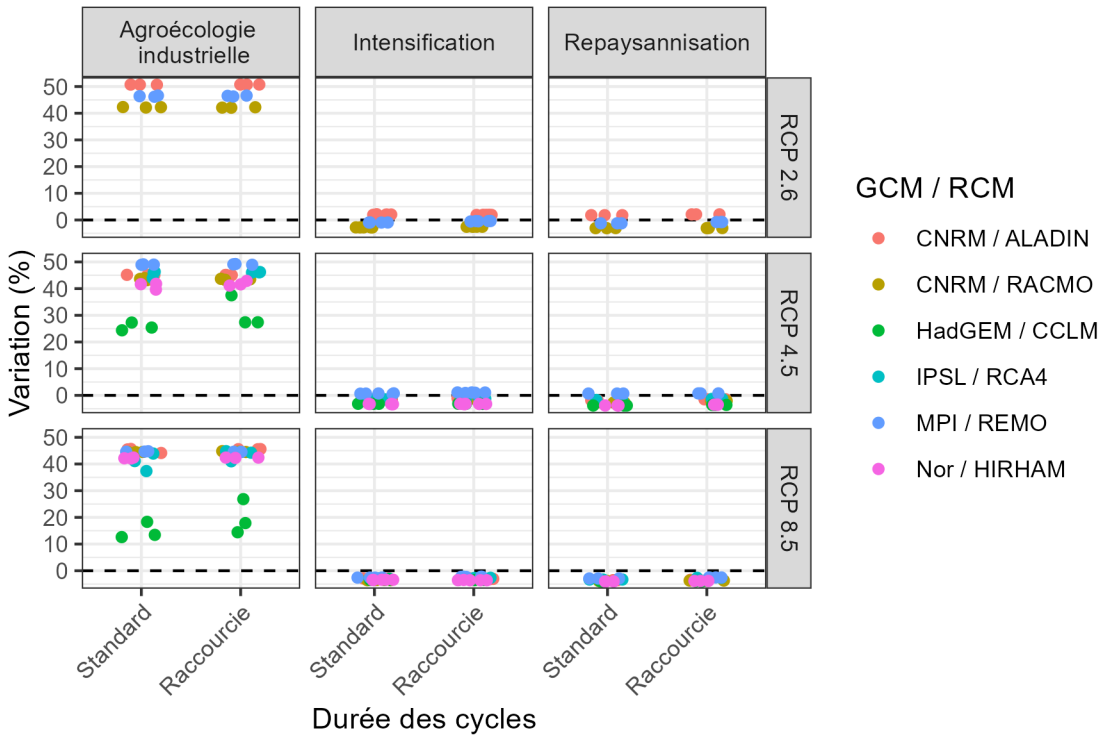


(a) Nombre de jours sous le DA = 1,5 m^3 s^{-1}



(b) VCN3

FIGURE IX.10 – Comparaison entre les indicateurs d'étiage des simulations avec les cycles de durée standard et les cycles de durée raccourcie pour la Seille à Metz. Chaque disque correspond à une configuration de l'irrigation



(c) QMNA5

FIGURE IX.10 – Comparaison entre les indicateurs d'étiage des simulations avec les cycles de durée standard et les cycles de durée raccourcie pour la Seille à Metz. Chaque disque correspond à une configuration de l'irrigation (Suite)

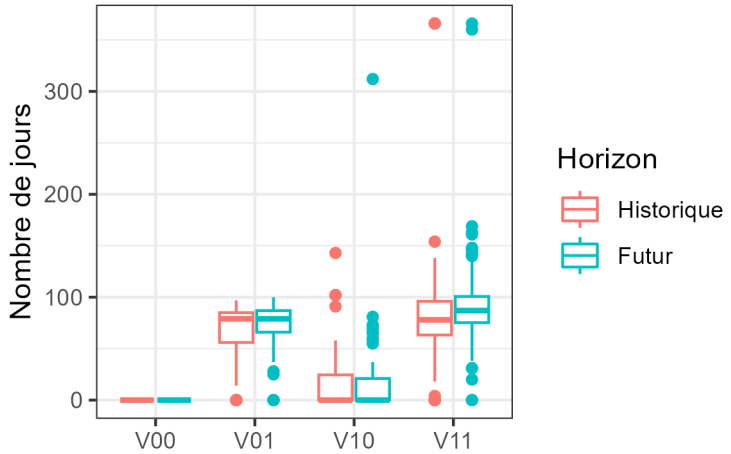
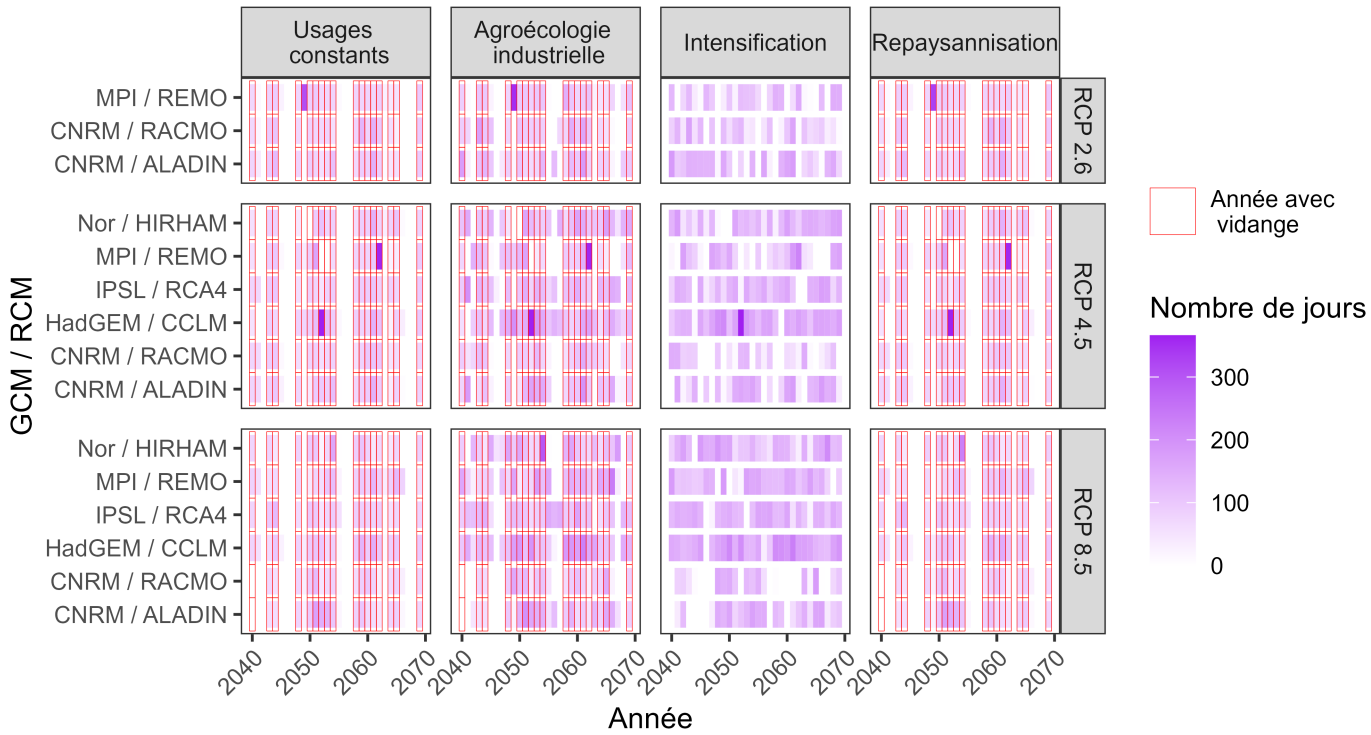


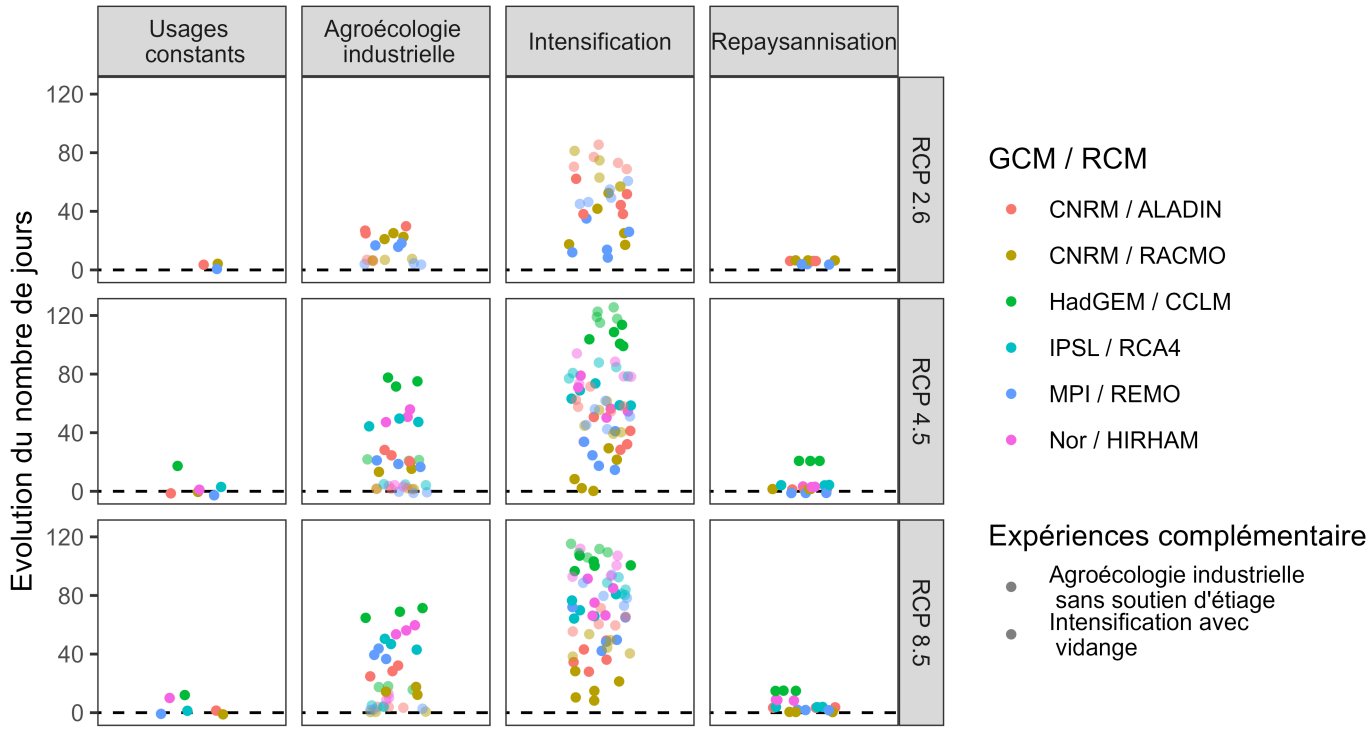
FIGURE IX.11 – Comparaison entre le nombre annuel de jours avec un volume inférieur à 7.10^6 m^3 dans l'étang de Lindre pour l'horizon de référence et celui pour l'horizon futur classifiée selon l'occurrence des vidanges dans les projections pour le cas Usages constants. Les boîtes à moustaches sont constituées des valeurs des indicateurs calculés pour une année, un couple de GCM/RCM. Il n'y a pas d'irrigation dans le cas des Usages constants

4.2 Impact des scénarios sur l'étang de Lindre

Nous comparons le nombre de jours sous 7.10^6 m^3 dans la Figure IX.12 pour les différents scénarios. De plus, nous comparons les courbes de régime de volume stocké dans l'étang de Lindre selon les scénarios (Figure IX.13).



(a) Nombre annuel de jours avec un volume de l'étang de Lindre inférieur à 7.10^6 m^3. Les nombres de jours des différentes configurations d'irrigation ont été agrégés par une moyenne



(b) Évolution de la moyenne interannuelle du nombre de jours entre l'horizon futur et l'horizon historique. Les différents points d'une même couleur correspondent aux différentes configurations de l'irrigation. Les couleurs fades correspondent aux expériences complémentaires : avec vidange pour le scénario Intensification ; sans soutien d'étiage pour le scénario Agroécologie industrielle

FIGURE IX.12 – Nombre de jours avec le volume de l'étang de Lindre inférieur à 7.10^6 m^3

Nous observons que le nombre de jours sous 7.10^6 m^3 dans l'étang de Lindre pour le scénario Repaysannisation est extrêmement proche des simulations avec les Usages constants, que ce soit en termes de variabilité

annuelle (Figure IX.12 (a)), ou de moyenne interannuelle (Figure IX.12 (b)). Cela montre que l'irrigation n'impacte que modérément le volume stocké dans l'étang de Lindre pour le scénario Repaysannisation. Pour ces projections (Usages constants et Repaysannisation), seules les années d'occurrence de vidange indiquent des nombres de jours de faible remplissage de l'étang de Lindre sur la Figure IX.12 (a), à de rares exceptions près. Sur la même Figure, le scénario Agroécologie industrielle en revanche mène à ce que d'autres années soient impactées. C'est la conséquence d'un volume important mobilisé pour le soutien d'étiage.

Néanmoins, c'est pour le scénario Intensification que le nombre de jours moyen sous 7.10^6 m^3 augmente le plus (Figure IX.12 (b)). C'est donc ce scénario qui génère le plus de jours sous 7.10^6 m^3 pour l'étang de Lindre, puisque la référence est la même pour toutes les projections. Ce scénario paraît ainsi entraîner une mobilisation régulière et importante de l'étang de Lindre du fait de son utilisation pour irriguer une grande surface de cultures dans ce scénario. Le scénario Agroécologie industrielle entraîne également une forte augmentation du nombre de jours moyen sous 7.10^6 m^3, du fait de son utilisation pour le soutien d'étiage.

On remarque que certaines années de certaines projections indiquent des nombres très importants de jours sous les seuils (plus de 300). C'est le cas pour les Usages constants et les scénarios Agroécologie industrielle et Repaysannisation (trois occurrences à chaque fois), mais moins pour le scénario Intensification (une seule occurrence). Cela indique probablement un effet conjugué des conditions climatiques extrêmes (on retrouve en effet les mêmes combinaisons années / projection) et d'occurrence des vidanges. On peut supposer que l'occurrence de vidanges vient aggraver l'effet d'un climat extrême. A l'opposé, l'utilisation de l'étang de Lindre pour l'irrigation (scénario intensification) vient faire peser un poids récurrent, mais moindre, sur le volume de l'étang.

Enfin, on note que la variabilité entre les projections climatiques est très importante, en particulier pour les scénarios Intensification et Agroécologie industrielle, montrant que le volume stocké dans l'étang de Lindre va être différemment mobilisé selon les projections climatiques (Figure IX.12 (b)).

Nous observons que les courbes de régime du volume dans l'étang de Lindre ne semblent que peu évoluer dans le cas des Usages constants, montrant un impact faible de l'évolution du climat sur le volume de l'étang de Lindre (Figure IX.13). Le régime du volume de l'étang de Lindre n'est que légèrement modifié pour les projections du scénario Repaysannisation, même si on note un léger abaissement de la courbe, en répercussion de l'irrigation de parcelles à partir de l'étang de Lindre. En revanche, les régimes sont très modifiés pour les scénarios Agroécologie industrielle et Intensification. Le volume moyen diminue davantage en été et en automne pour ces deux scénarios. Pour le scénario Agroécologie industrielle, cela montre notamment l'impact du soutien d'étiage. En effet, dans l'expérience complémentaire sans soutien d'étiage, les projections deviennent beaucoup plus proches des simulations avec les usages constants. Pour le scénario Intensification, le fort abaissement du volume stocké en été est lié à l'irrigation. On note cependant que les débits recommencent à augmenter précocement par rapport aux simulations avec les Usages constants, en lien avec l'absence de vidange dans ce scénario. Dans l'expérience complémentaire avec les vidanges, on note que le volume stocké reste bas jusque tard dans l'année.

Le volume stocké dans l'étang de Lindre, paraît ainsi déterminé en premier lieu par les usages futurs qui en seront faits, qui sont eux-mêmes sensibles aux projections climatiques, plus qu'à l'impact des projections climatiques et de leur évolution sur le remplissage de l'étang de Lindre.

Intéressons-nous désormais aux

- prélèvements nets (débits entrants dans les retenues, contributifs au remplissage des retenues et desquels on soustrait les débits sortant contributifs au débit en aval, soit les débits vidangés, réservés de soutien d'étiage, voir Section VIII.1.2 et Equation VIII.2)
- et aux régimes de pression sur les débits, c'est-à-dire les prélèvements nets supérieurs à 0 divisés par les débits aux exutoires des différents SBGR (voir Section VIII.1.2 et Equation VIII.3).

Pour l'étang de Lindre, ces indicateurs montrent des impacts hydrologiques de la gestion de l'étang de Lindre variés selon les scénarios (Figure IX.14). Pour les simulations avec vidange (i.e. toutes sauf celle de base du scénario Intensification), on observe un pic de débit net négatif en fin d'été et automne, liés principalement aux vidanges (Figure IX.14 (a)). On observe une forte similarité entre les séries pour le scénario

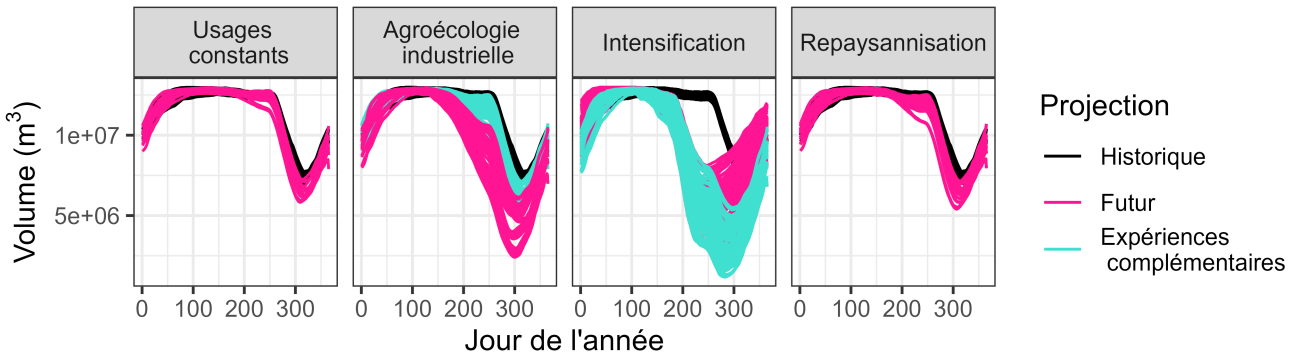
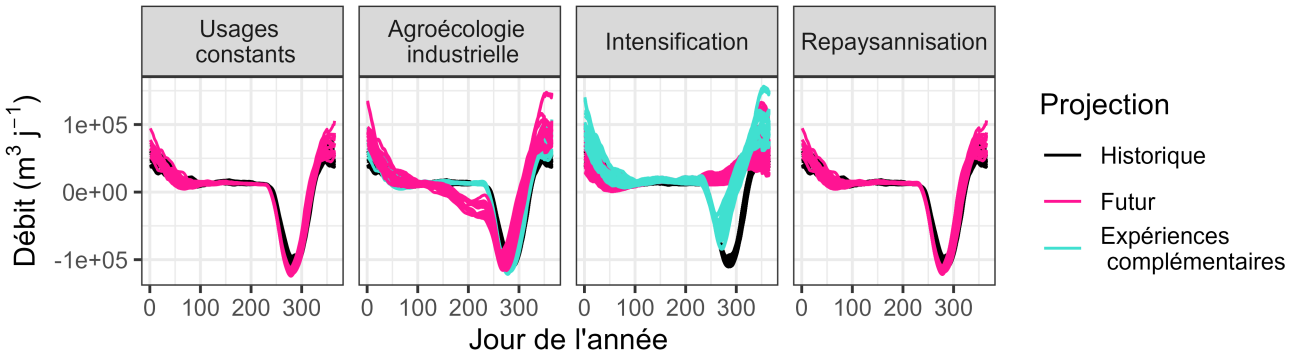
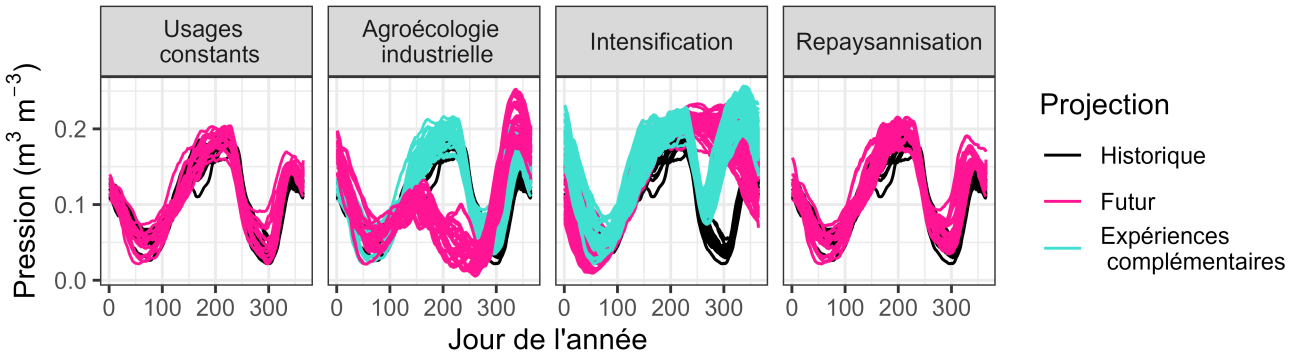


FIGURE IX.13 – Moyenne interannuelle do volume stocké journalier dans l'étang de Lindre. Les expériences complémentaires désignent les simulations sans soutien d'étiage pour le scénario Agroécologie industrielle et les simulations avec vidange pour le scénario Intensification. Les projections issues des différents RCP et GCM/RCM ont été superposées



(a) Prélèvements nets



(b) Pression sur les débits de la Seille à Moyenvic

FIGURE IX.14 – Moyenne interannuelle glissante sur 30 jours des prélèvements de l'étang de Lindre (a) et de la pression sur les débits de la Seille à Moyenvic en résultant (b). Les expériences complémentaires désignent les simulations sans soutien d'étiage pour le scénario Agroécologie industrielle, et les simulations avec vidange pour le scénario Intensification. Les projections issues des différents RCP et GCM/RCM ont été superposées

Usages constants et pour le scénario Repaysannisation, ce qui est cohérent avec les analyses précédentes. Par ailleurs, on détecte les flux de soutien d'étiage mis en place en été dans le futur pour le scénario Agroécologie industrielle, lors de la période située juste avant les importants débits sortants pour la vidange. Ces flux disparaissent dans l'expérience complémentaire, qui elle ne comprend pas de soutien d'étiage. Pour les simulations du scénario Intensification, il n'y a pas de flux sortant pour les vidanges, ce scénario n'en effectuant pas. Ces derniers réapparaissent cependant pour l'expérience complémentaire avec vidange de ce scénario. Les débits nets sortants en période de vidange sont néanmoins de moindre amplitude par rapport aux autres scénarios : le volume consommé pour l'irrigation n'a en effet pas besoin d'être vidangé. On observe également, dans une

moindre mesure, ces effets pour le scénario Agroécologie industrielle, et très légèrement pour le scénario Repaysannisation. Cela a aussi pour effet de déclencher le remplissage de l'étang de Lindre plus précocement. En effet, l'étang de Lindre, déjà davantage vidé pour l'irrigation et le soutien d'étiage, finalisera sa vidange plus tôt. Pour les scénarios Agroécologie industrielle et Intensification, on observe que certaines projections entraînent des débits nets entrants (positifs) hivernaux moyens supérieurs à ceux obtenus dans les simulations avec les Usages constants et Repaysannisation, montrant que ces scénarios peuvent vider davantage l'étang de Lindre en moyenne, qui est par conséquent davantage rempli en période hivernale.

On observe deux périodes de "pression" caractéristiques pour les simulations avec les Usages constants et la Repaysannisation (Figure IX.14 (b)). Il existe en effet une période d'augmentation et de réduction progressive de la pression avec un point culminant autour du 200e jour de l'année (c'est-à-dire pendant l'été), semblant coïncider avec la diminution saisonnière des débits. Cela s'explique par le fait que des prélèvements continuent d'être effectués par l'étang de Lindre malgré la diminution des débits en cette période de l'année, résultant en une plus forte pression. De plus, l'évaporation de l'étang de Lindre augmente conjointement, laissant davantage de volume à remplir dans l'étang et donc augmentant la pression. Une diminution de la pression s'opère ensuite, liée vraisemblablement aux vidanges, augmentant les débits à l'aval. On observe ensuite une nouvelle augmentation de la pression, coïncidant avec la fin des vidanges, puis à une diminution jusqu'à la fin de l'hiver. Cette nouvelle phase résulte de la fin du remplissage de l'étang de Lindre et de l'augmentation des débits.

Pour le scénario Agroécologie industrielle, la pression est moindre en période estivale. En effet, le soutien d'étiage augmente les débits en aval, maintenant la pression basse jusqu'à la période des vidanges. Le scénario Intensification maintient une pression forte jusqu'à l'automne.

Enfin, on observe une relative incertitude sur les prélèvements de remplissage de l'étang de Lindre et sur la pression sur les débits en résultant, liée à la projection climatique et à la configuration d'irrigation, caractérisée par la dispersion modérée des différentes courbe sur la Figure IX.14.

4.3 Impact des scénarios sur les retenues simples

Intéressons-nous désormais à l'impact des scénarios sur les volumes des autres retenues (i.e. hors étang de Lindre). Nous commençons par étudier les volumes projetés stockés dans les retenues. Nous présentons d'abord les volumes simulés annuellement pour l'ensemble des projections dans la Figure IX.15, puis les régimes des volumes stockés dans la Figure IX.16.

On rappelle que seule une fraction des volumes totaux de ces retenues est mobilisable pour l'irrigation (Section VIII.2.1). En représentant l'ensemble des couples GCM/RCM, on observe une forte variabilité des volumes potentiellement vidés annuellement entre les projections. Néanmoins, les volumes minimaux atteints par l'ensemble des projections évoluent peu d'une année sur l'autre (Figure IX.15). On observe toutefois que le volume minimal atteint correspond à l'année 2058, et donc à la projection du couple HadGEM/CCLM pour le RCP 8.5, pour laquelle nous avions pu observer un fort déficit entre précipitations et évapotranspiration cette année-là (Figure IX.1 Section IX.1). Pour la plupart des projections et la plupart des années, on observe que les retenues parviennent à se remplir chaque année, sauf pour les années 2051 et 2052 de certaines projections, ce qui correspond aux années à fort déficit pour le couple HadGEM/CCLM pour le RCP 4.5.

Ces années (couple HadGEM/CCLM, 2058 pour le RCP 8.5 ; 2051-2052 pour le RCP 4.5) correspondaient justement à des années de plus faible satisfaction de la demande en eau d'irrigation. Elles permettent d'observer différents mécanismes suscitant l'insatisfaction :

- pour le cas de l'année 2058 du RCP 8.5, il s'agit d'un très fort déficit entre précipitations et évapotranspiration l'année même de l'insatisfaction : la demande est alors trop importante, et les volumes stockés, pourtant à hauteur de la capacité des retenues, ne suffisent pas à satisfaire la demande ;
- pour le cas de l'année 2052 du RCP 4.5, il s'agit aussi d'un faible remplissage hivernal des retenues, ne permettant pas de satisfaire la demande

De plus, on note que pour tous les scénarios, les minima annuels atteints par l'ensemble de projection sont similaires, excepté en ce qui concerne le scénario à Usages constants qui par définition ne mobilise pas

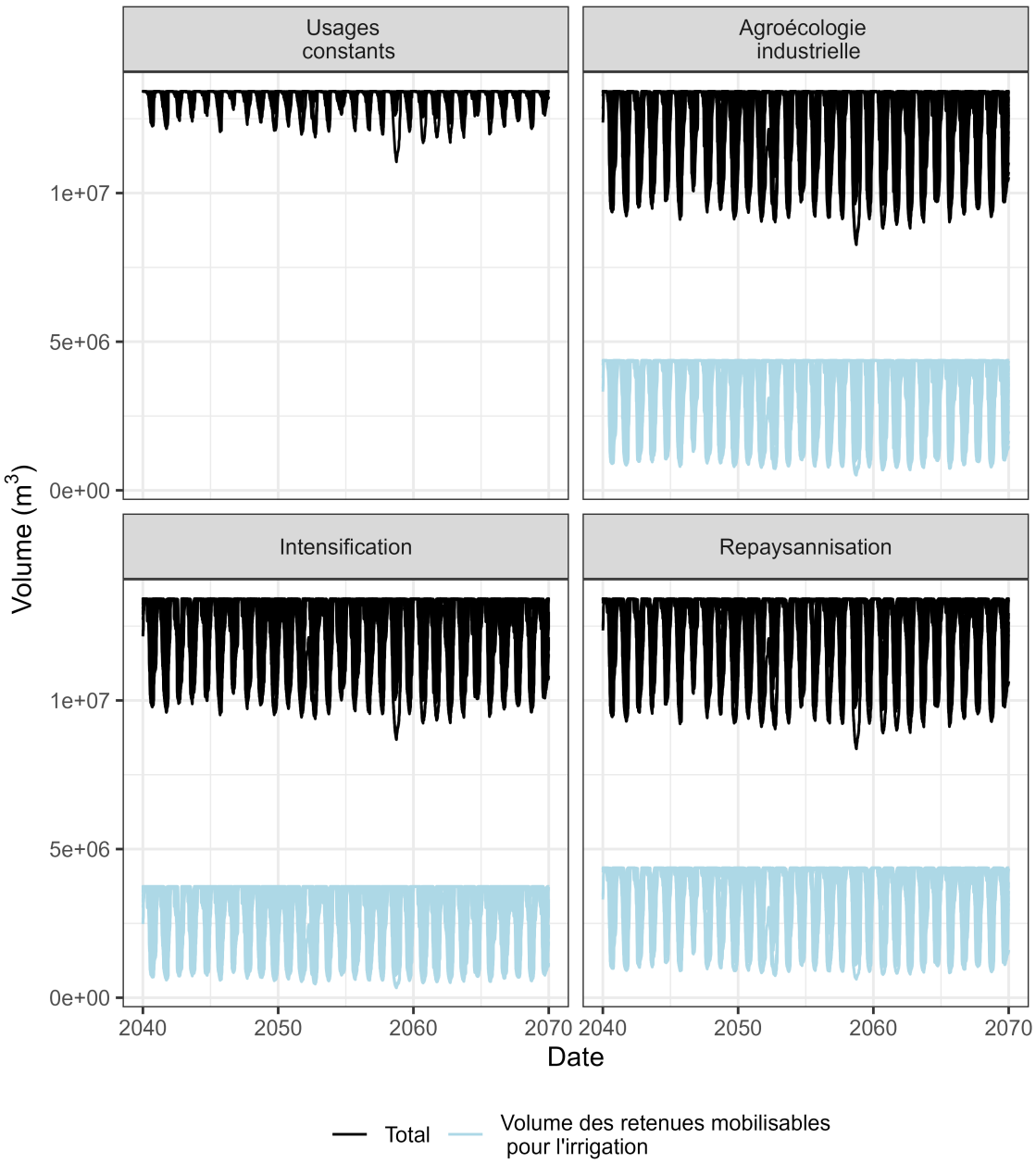


FIGURE IX.15 – Volume journalier stocké dans l'ensemble des retenues simples et volume des retenues mobilisables. Chaque courbe représente une projection

l'eau de ces retenues. En effet, logiquement, la mise en place d'irrigation (qui n'existe pas dans le scénario à Usages constants) entraîne une diminution des volumes stockés par rapport aux simulations avec des usages constants. Pour les scénarios, il existe ainsi, la majorité des années au moins une projection conduisant à une consommation totale des volumes disponibles dans les retenues simples. En effet, quand le niveau des retenues descend en dessous de 25 % de leur volume maximal, les prélèvements ne sont plus possibles. Ainsi, la mobilisation maximale des retenues est équivalente entre les scénarios. On remarque toutefois une mobilisation légèrement moindre des retenues simples pour le scénario Intensification par rapport aux scénarios Repaysannisation et Agroécologie industrielle, ce qui s'explique par le volume mobilisable des retenues simples légèrement moindre pour ce scénario par rapport aux deux autres scénarios (Section VIII.2.1). Il est toutefois à noter que les figures tracées ne permettent agrègent tous les couples de GCM/RCM et RCP, et que les conclusions peuvent donc diverger pour des projections climatiques données.

Les régimes des volumes stockés montrent l'impact de la mise en place d'irrigation, par rapport à la période historique et par rapport aux Usages constants (Figure IX.16). On note toutefois que le régime du volume des

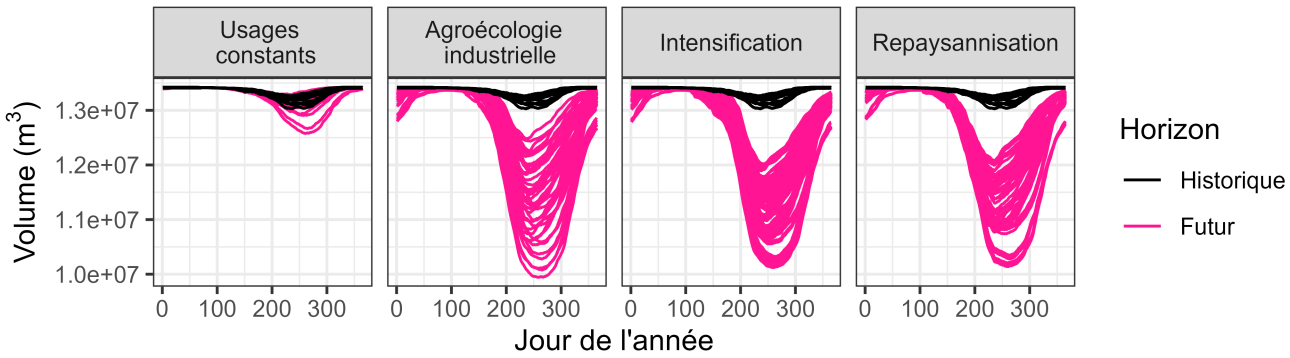


FIGURE IX.16 – Volume journalier moyen interannuel stocké dans l'ensemble des retenues simples. Chaque courbe représente une projection

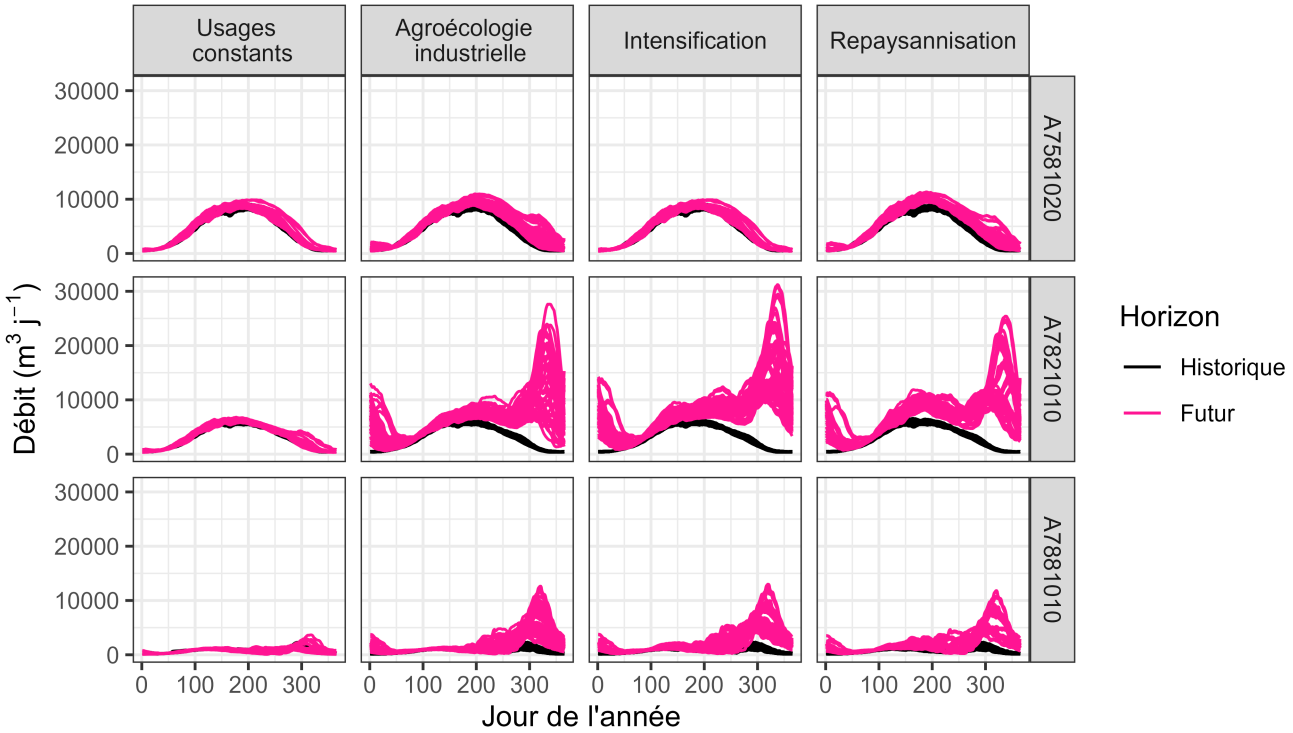
retenues montre un abaissement en été pour les Usages constants sur l'Horizon futur par rapport à l'Horizon historique pour certaines projections, illustrant l'impact du changement climatique, qui reste néanmoins modéré comparé à celui des scénarios. On observe que les prélèvements sont moins forts pour le scénario Agroécologie industrielle pour certaines projections générant le moins d'abaissement des volumes stockés par rapport aux scénarios Intensification et Repaysannisation, mettant en évidence l'effet des règles de déclenchement de l'irrigation ne permettant d'irriguer qu'à partir de seuils de déficit plus élevés pour ce scénario (Section VIII.2.6).

Nous traçons maintenant les régimes des prélèvements nets et de la pression pour les retenues simples (Figure IX.17). Les graphiques de pression ont été tracés en cumulant les prélèvements de l'ensemble des retenues sur les bassins entiers (prise en compte des prélèvements sur les bassins amont) sur les débits à l'exutoire des différents SBGR et en divisant ces prélèvements par le débit à l'exutoire du bassin. Pour rappel, contrairement à l'étang de Lindre, les retenues simples ne présentent pas de débit sortant à prendre en compte pour le calcul des prélèvements nets.

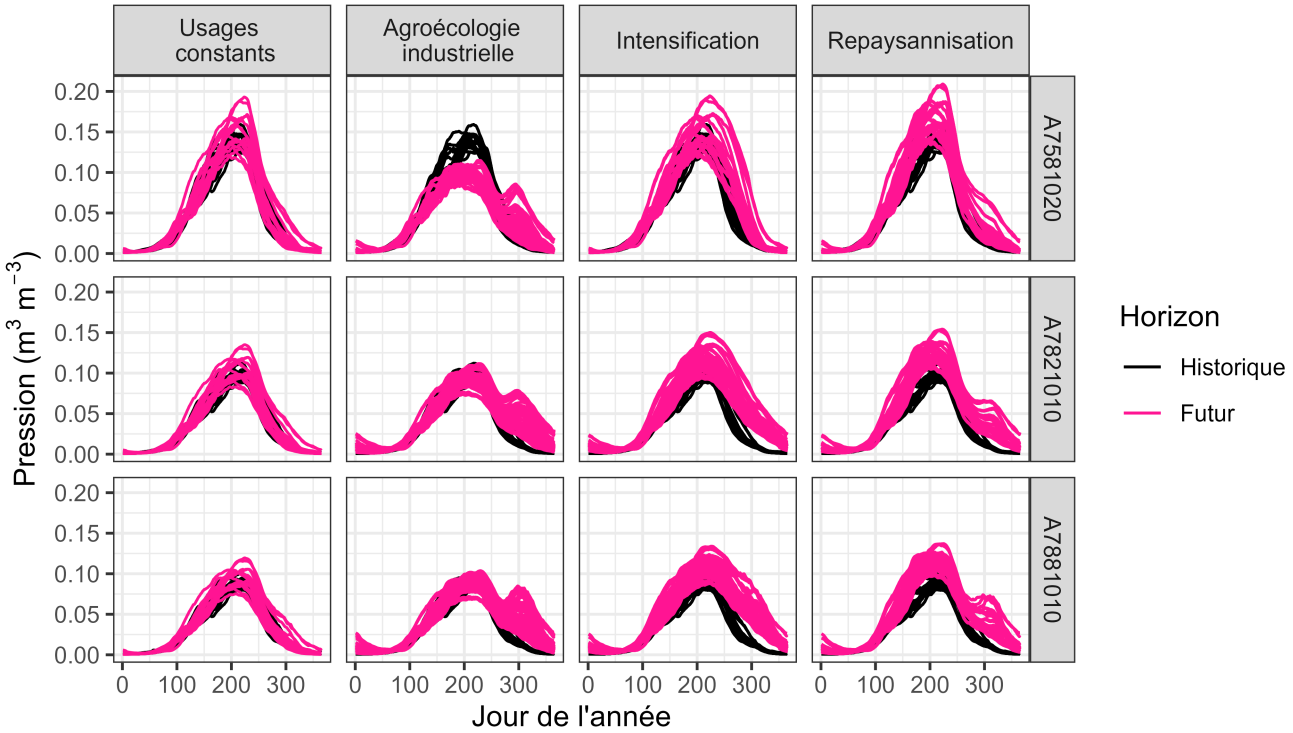
On observe des divergences importantes entre les scénarios et les simulations avec les Usages constants. En effet, pour les Usages constants, les prélèvements sont principalement effectués sur le SBGR de la Seille à Moyenvic (A7581020), alors qu'il sont plus élevés sur le SBGR de la Seille à Nomeny (A7821010) pour les scénarios. En effet, les retenues simples mobilisables pour l'irrigation sont principalement situées sur ce SBGR pour les trois scénarios (Section VIII.2.1)

Pour les scénarios avec irrigation, on observe que les prélèvements par les retenues ont principalement lieu en automne sur les SBGR A7821010 et A7881010 (Figure IX.17 (a)), période d'augmentation des débits permettant le remplissage des retenues vidés pour l'irrigation. Pour le cas des Usages constants, les prélèvements par les retenues sont plus importants sur la période estivale, en répercussion de la diminution des volumes stockés par l'évaporation. Globalement, les prélèvements les moins forts ont lieu pour les simulations avec les Usages constants, car les retenues ne sont alors pas vidées par les prélèvements d'irrigation.

En termes de pression sur les débits (Figure IX.17 (b)), on voit que la pression des retenues simples est moindre pour le scénario Agroécologie Industrielle pour la Seille à Moyenvic (A7581020) que pour les simulations historiques ou le scénario à Usages constants. Cela est dû au soutien d'étiage. Les prélèvements et la pression exercée par les retenues sont ainsi plus importants dans les scénarios que dans les simulations historiques et avec les Usages constants, à cause de la mise en place d'irrigation dans les scénarios. De plus, on observe un creux dans les simulations Agroécologie industrielle et Repaysannisation. Celui-ci est dû à l'augmentation des débits en période de vidange de l'étang de Lindre. Cette vidange entraîne une diminution de la pression calculée, qui augmente à nouveau ensuite car les prélèvements par les retenues ne sont pas terminés en fin de vidange de l'étang de Lindre. Outre les impacts du soutien d'étiage et des vidanges sur le calcul de la pression exercée par les retenues, les prélèvements et la pression exercée par les retenues simples est relativement homogène entre les scénarios. De même que pour l'étang de Lindre, on constate une forte incertitude liée à la projection climatique sur l'amplitude de la pression exercée par les retenues simples.



(a) Prélèvements sur chaque SBGR (pas de cumul)



(b) Pression cumulée des prélèvements dans les retenues sur les débits aux exutoires des SBGR

FIGURE IX.17 – Moyenne interannuelle glissante des prélèvements dans les retenues simples (a) et de la pression sur les débits aux stations modélisées sur le bassin versant de la Seille (b)

5 Évolutions des rendements

Rappel : Les indicateurs de rendement calculés sont des rendements relatifs :

- R_w *:* le rapport entre le rendement atteint et le rendement potentiel de la période correspondante, lié au stress hydrique. Le $\mathrm{R_w}$ historique est ainsi le rapport entre le rendement historique et le rendement historique maximal ; Le $\mathrm{R_w}$ futur est ainsi le rapport entre le rendement futur et le rendement futur maximal. Cette grandeur ne permet pas de prendre en compte une évolution du rendement maximal entre période historique et future, alors que le CO_2 a un effet fertilisant ;
- R_{w,CO_2} *:* le rapport entre le rendement futur atteint et le rendement potentiel historique, permettant de comparer le rendement futur au rendement potentiel historique, et donc d'intégrer l'évolution de la concentration en CO_2

Le détail des calculs du $\mathrm{R_w}$ et du $\mathrm{R_{w,CO_2}}$ sont donnés dans les Sections VIII.1.2 et VIII.3.3

Nous considérons dans ce chapitre le rendement dans le cas des durées de cycle "standard". L'impact du raccourcissement des cycles sur les rendements est abordé dans l'Annexe H. Les conclusions effectuées avec les cycles raccourcis ne remettent pas en question la teneur des résultats concernant l'impact du changement climatique sur les rendements, qui sont présentés ici.

5.1 Rendements des Usages constants

Nous commençons par présenter les projections d'évolution des rendements pour les simulations dans le cas des Usages constants (Figure IX.18), c'est-à-dire avec les mêmes assolements passés et futurs et sans irrigation.

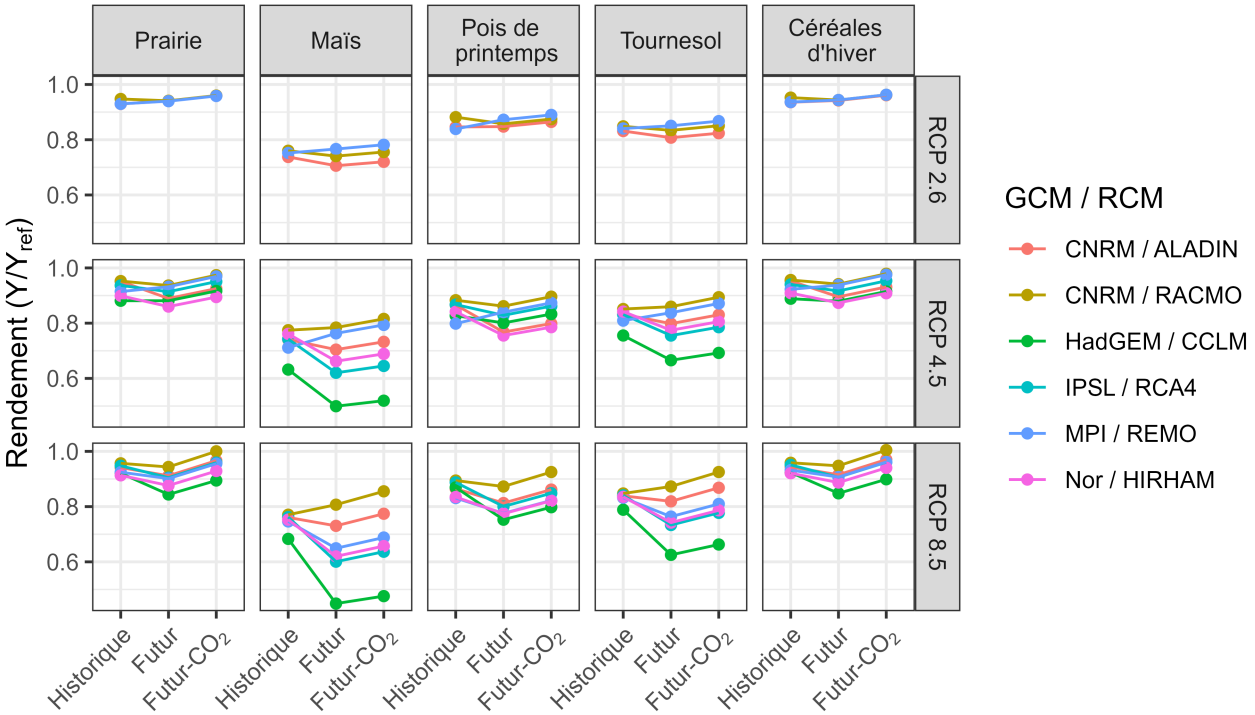


FIGURE IX.18 – Évolution des rendements pour le scénario à Usages constants. "Historique" correspond au rendement relatif lié au stress hydrique, $\mathrm{R_w}$, pour l'horizon historique ; "Futur" correspond au rendement relatif lié au stress hydrique, $\mathrm{R_w}$, pour l'horizon futur ; "Futur-CO_2" correspond au rendement relatif pour l'horizon futur corrigé pour prendre en compte l'effet fertilisant du CO_2, $\mathrm{R_{w,CO_2}}$

On observe que les rendements relatifs R_w et R_{W,CO_2} varient beaucoup selon la culture, avec des rendements plus élevés pour la prairie et les céréales d'hiver que pour les autres cultures. Par ailleurs, on observe, pour l'ensemble des cultures, une dispersion bien plus élevée d'une projection climatique à une autre pour le RCP 8.5 et le RCP 4.5 que pour le RCP 2.6. Cette observation est liée à une plus faible diversité des climats pour le RCP 2.6. En comparant les rendements pour "Historique" et "Futur", on note que certaines cultures pourraient davantage souffrir de pertes de rendement liées au stress hydrique (e.g. maïs), même si certaines projections climatiques semblent moins impactantes. Cependant, on note qu'en prenant en compte l'effet fertilisant du CO_2, les pertes de rendements pourraient être en partie compensées. Pour certaines cultures et projections, on pourrait même observer des rendements plus élevés que sur la période historique. Cependant, on peut là aussi noter que pour certaines projections, certaines cultures, telles que le maïs et le tournesol, semblent néanmoins particulièrement souffrir du stress hydrique, et l'effet fertilisant du CO_2 ne suffit alors pas à compenser les pertes de rendement induites. On note en particulier que le couple HadGEM/CCLM, générant des projections plus chaudes et sèches en période estivale (Annexe B), génère les plus fortes pertes de rendement du maïs et du tournesol.

La visualisation des rendements annuels des simulations avec les Usages constants (Figure IX.19 (a)) montre que certaines années génèrent des pertes de rendement particulièrement aiguës. On note en particulier que l'année 2058 du couple HadGEM/CCLM pour le RCP 8.5 paraît particulièrement problématique. Nous avions vu que cette année correspond en effet un déficit important entre précipitations et évapotranspiration (Section IX.1). Le maïs paraît particulièrement souffrir certaines années pour certaines projections, et en particulier pour le couple HadGEM/CCLM du RCP 8.5, qui génère globalement des étés plus chauds et secs (Annexe B).

Le croisement avec les surfaces (Figure IX.19 (b)) montre que les surfaces de maïs ne sont pas les surfaces majoritaires, mais qu'elles ne sont pas pour autant négligeables. Ces résultats mettent en avant le fait que des adaptations paraissent souhaitables, en particulier pour le maïs sur le bassin versant de la Seille. Ces résultats indiquent aussi que d'autres cultures, telles que le pois de printemps et le tournesol, pourraient ne pas être épargnées pour certains avenirs climatiques, même si ce serait dans une moindre mesure.

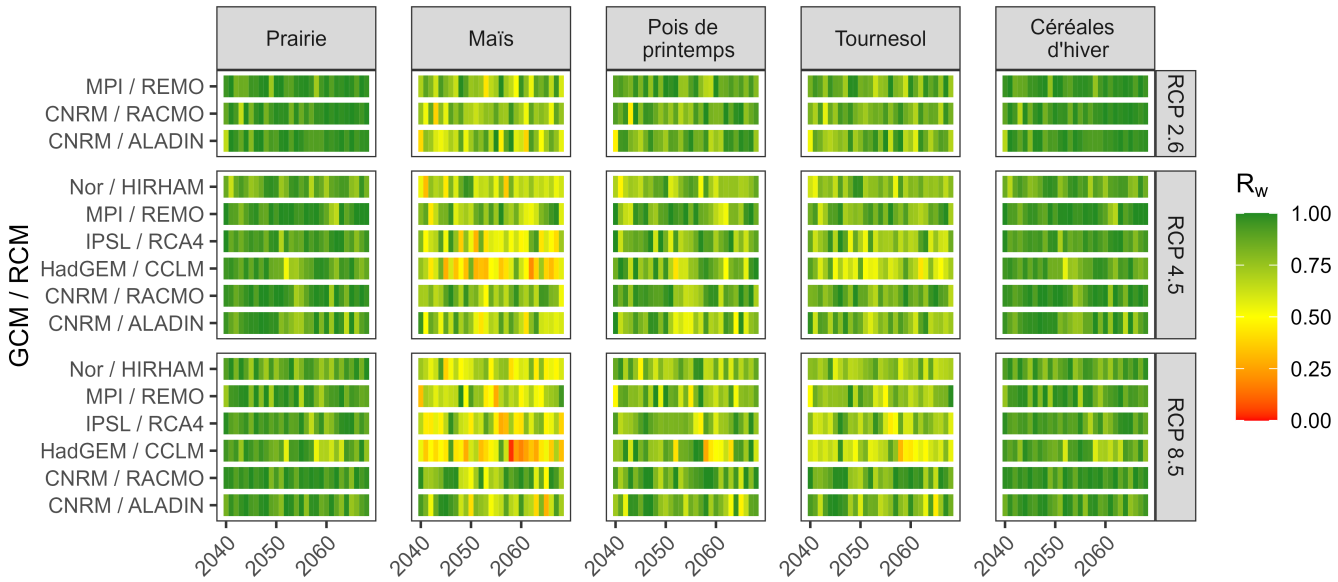
Nous visualisons ensuite les résultats des rendements pour les différents scénarios.

5.2 Rendements du scénario Agroécologie industrielle

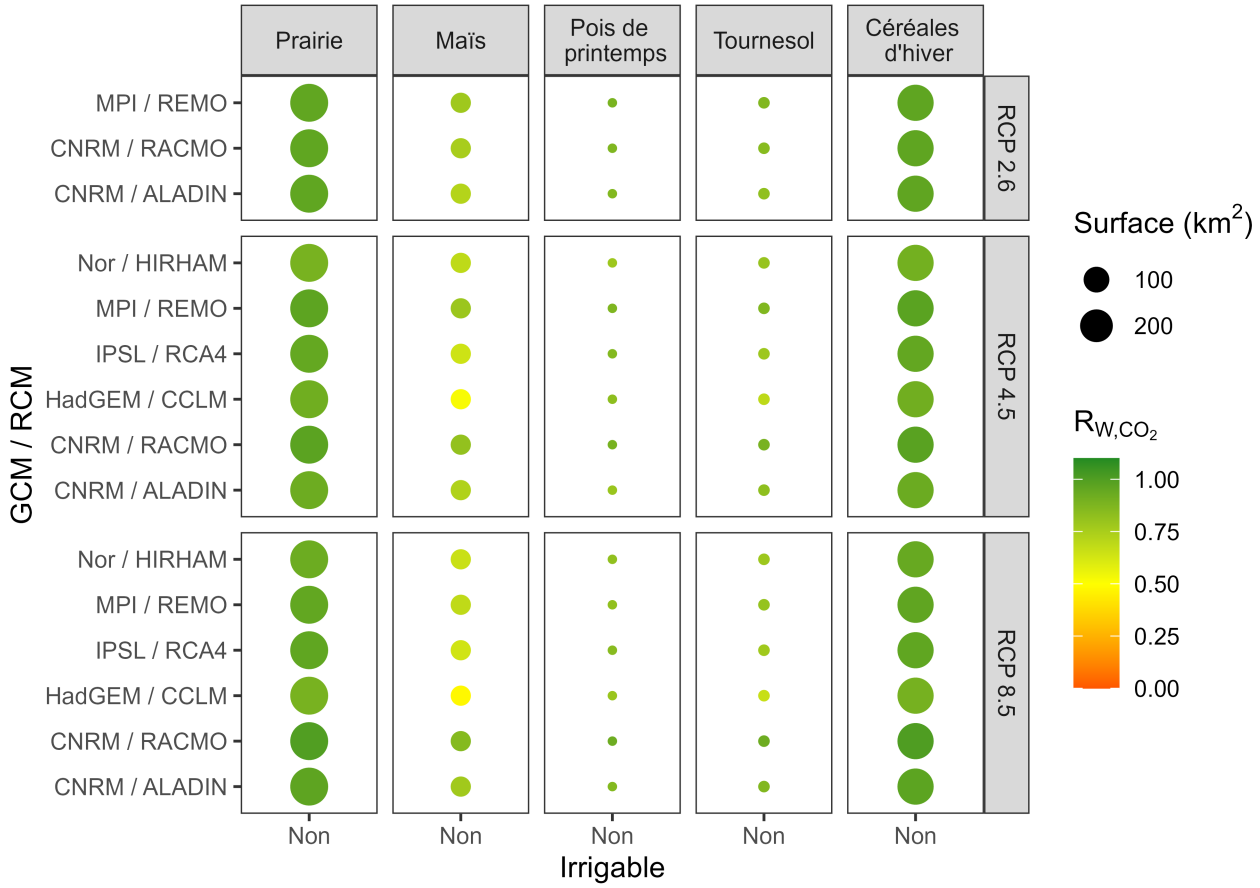
Nous commençons par analyser les rendements du scénario Agroécologie industrielle (Figure IX.20). Nous observons que les rendements des cultures irriguées paraissent très bons (Figure IX.20 (a), (c)), avec peu de variabilité annuelle (Figure IX.20 (a)), et ce pour l'ensemble des projections. Les cultures non irriguées souffrent davantage, en particulier pour les projections du couple HadGEM/CCLM (Figure IX.20 (b), (c)) et certaines années (Figure IX.20 (b)). Les cultures de printemps, telles que le sorgho, le soja, le tournesol, souffrent davantage que les cultures d'hiver. Néanmoins, aucune culture ne souffre autant que le maïs non irrigué présent dans le cas des Usages constants. On note en particulier que les simulations du sorgho non irrigué montrent de meilleurs rendements relatifs que les simulations de maïs.

Pour rappel, les règles de déclenchement de l'irrigation étaient définies pour le scénario Agroécologie de façon à éviter la "surirrigation" (Section VIII.2.6). On observe ainsi qu'avec ces règles d'irrigation, plus limitantes que dans le scénario Intensification notamment, on parvient tout de même à obtenir de très bons rendements.

On note cependant que les surfaces de cultures non irriguées sont très majoritaires. Ainsi, les très bons rendements relevés pour les cultures irriguées ne concernent qu'une fraction des surfaces du bassin versant.

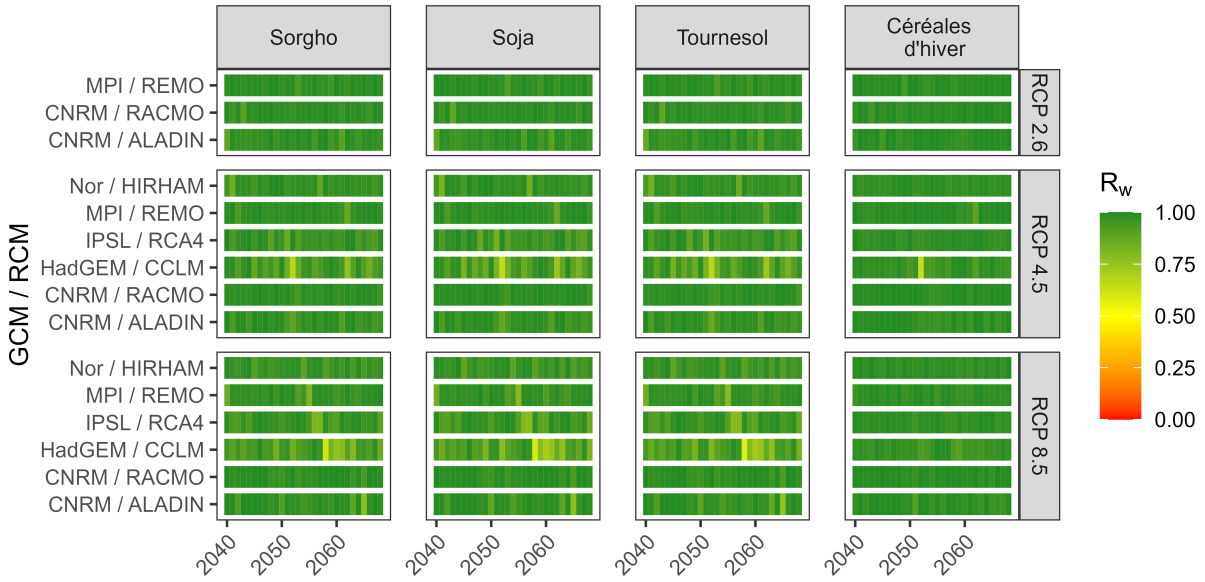


(a) Rendements relatifs annuels R_w, non ajustés par le CO_2

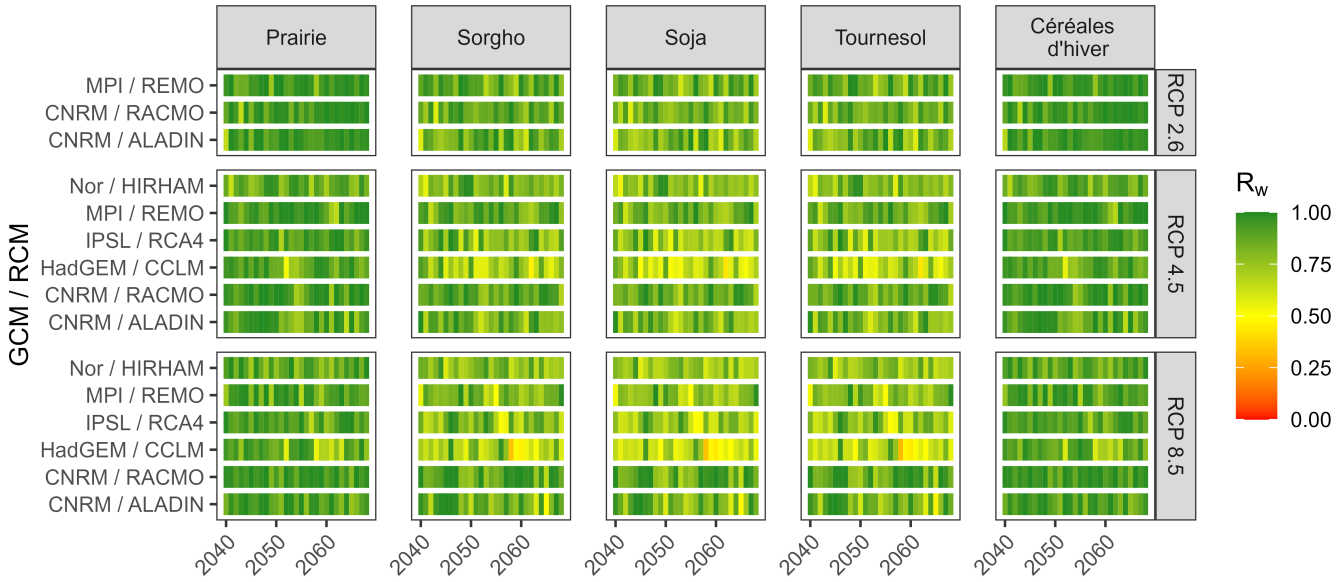


(b) Rendements relatifs moyens interannuels avec prise en compte de l'effet fertilisant du CO_2, R_{w,CO_2} et surfaces cultivées correspondantes

FIGURE IX.19 – Projection des rendements pour les simulations avec les Usages constants

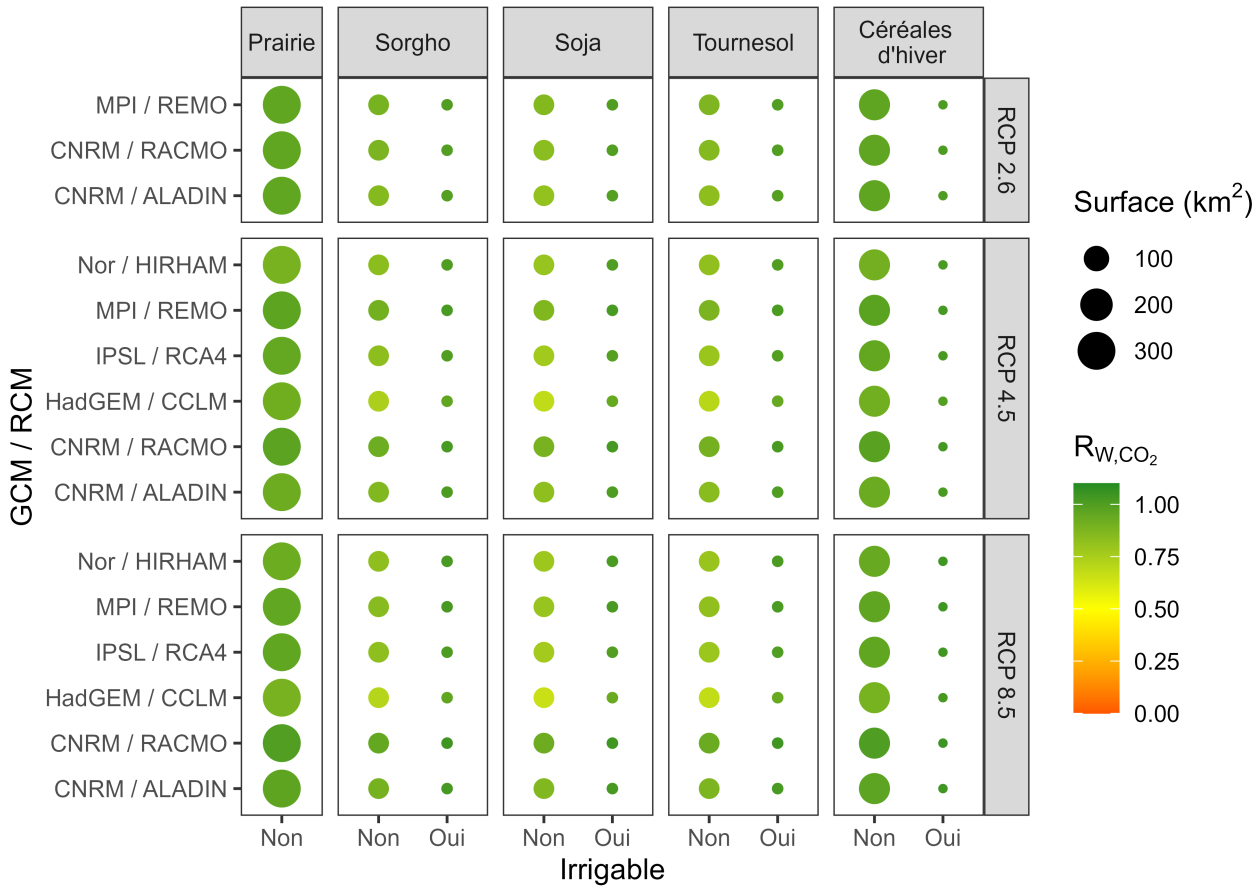


(a) Rendements relatifs annuels R_w des cultures irriguées, non ajustés par le CO_2



(b) Rendements relatifs annuels R_w des cultures non irriguées, non ajustés par le CO_2

FIGURE IX.20 – Projection des rendements pour les simulations avec le scénario Agroécologie industrielle

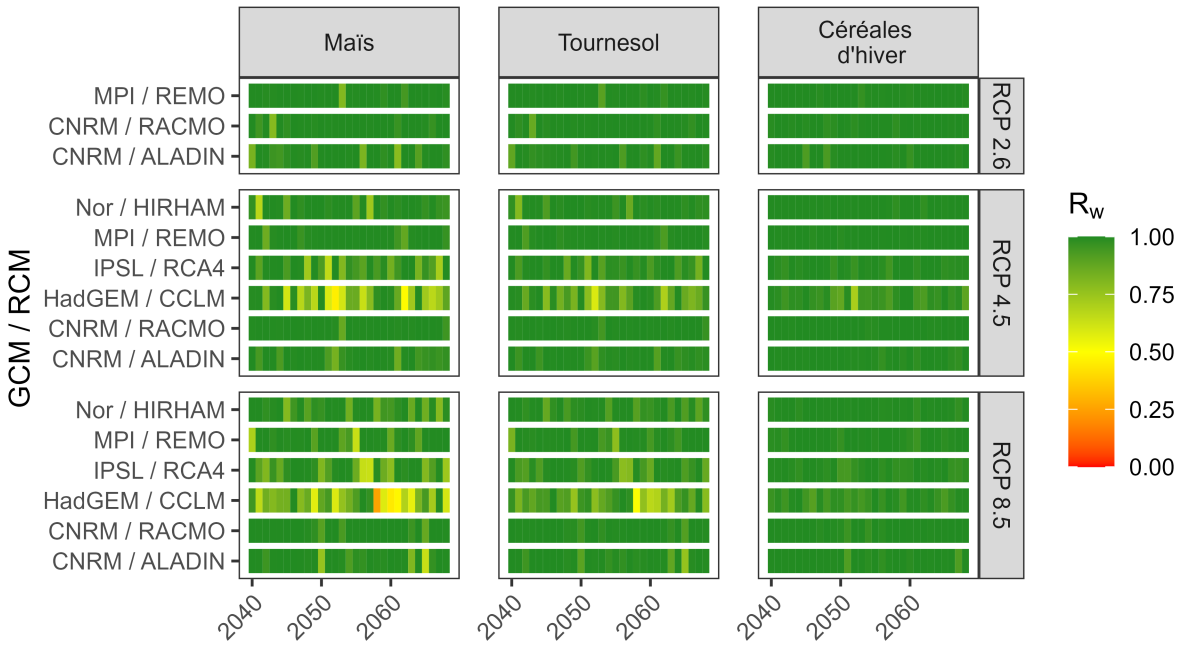


(c) Rendements relatifs moyens interannuels avec prise en compte de l'effet fertilisant du CO_2, R_{w,CO_2}, et surfaces cultivées correspondantes

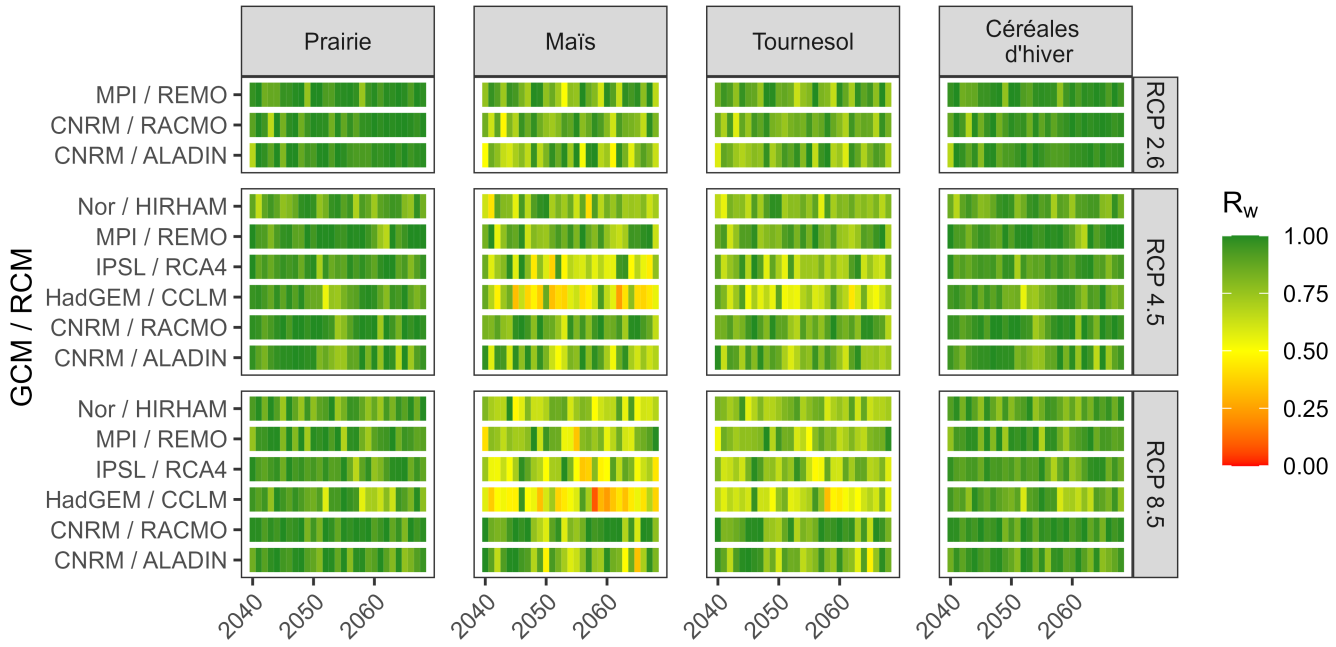
FIGURE IX.20 – Projection des rendements pour les simulations avec le scénario Agroécologie industrielle (Suite)

5.3 Rendements du scénario Intensification

Nous analysons ensuite les rendements du scénario Intensification (Figure IX.21).

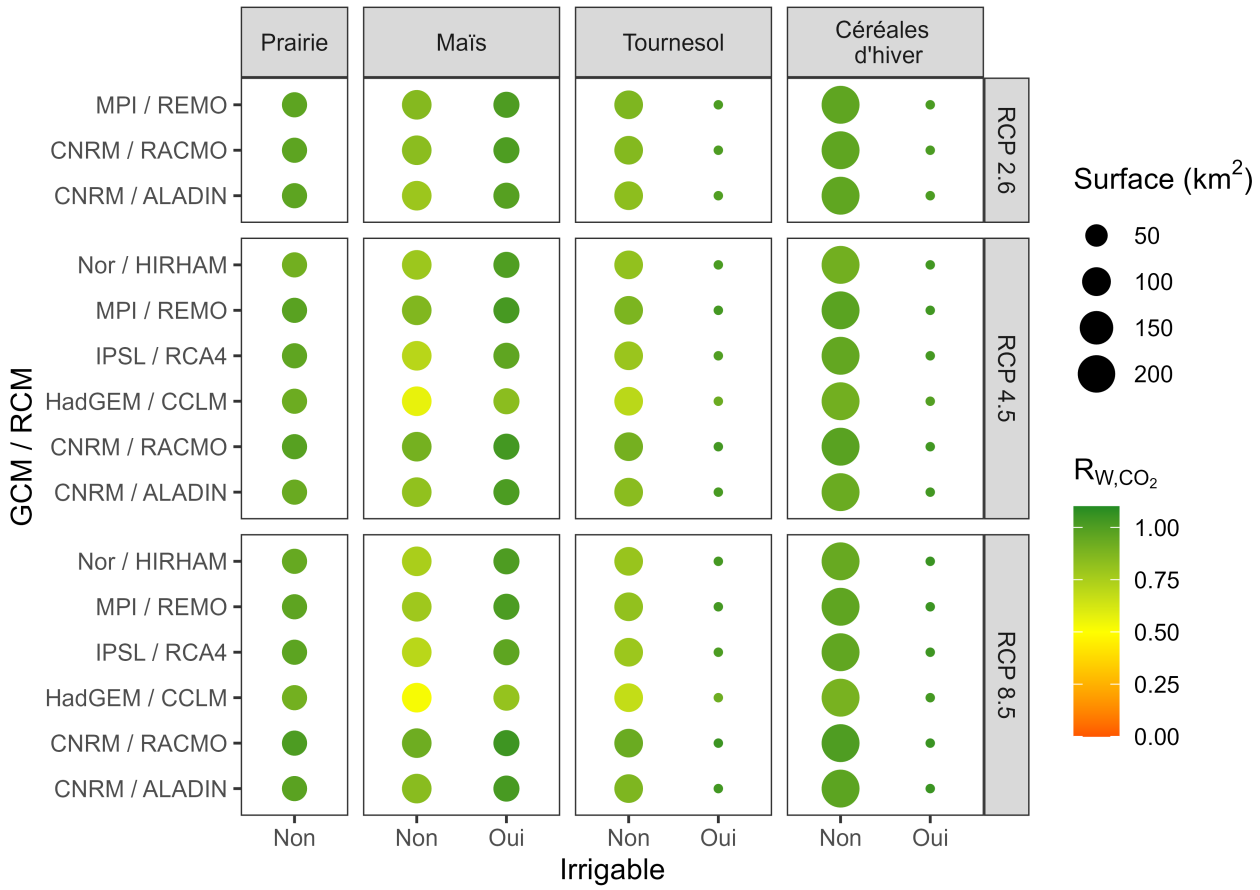


(a) Rendements relatifs annuels des cultures irriguées, non ajustés par le CO_2



(b) Rendements relatifs annuels des cultures non irriguées, non ajustés par le CO_2

FIGURE IX.21 – Projection des rendements pour les simulations avec le scénario Intensification



(c) Rendements relatifs moyens interannuels avec prise en compte de l'effet fertilisant du CO_2 et surfaces cultivées correspondantes

FIGURE IX.21 – Projection des rendements pour les simulations avec le scénario Intensification (Suite)

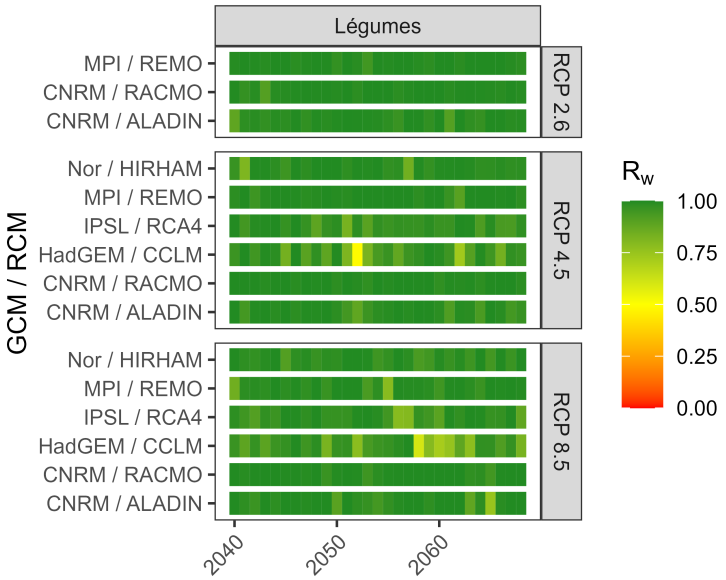
De même que pour le scénario Agroécologie industrielle, Nous observons que les rendements des cultures irrigués paraissent très bons (Figure IX.21 (a), (c)), avec peu de variabilité annuelle (Figure IX.21 (a)), pour la majeure partie des projections. On observe cependant que le maïs, même irrigué, connaît des pertes importantes certaines années pour les projections du couple HadGEM/CCLM. Les périodes de moindre rendement du maïs irrigué correspondent aux périodes de fort déficit entre précipitations et évapotranspiration relevées dans la Section IX.1 (i.e. 2058-2061 pour le RCP 8.5 et autour de la période 2051-2053 pour le RCP 4.5). Cela montre que la ressource stockée a été insuffisante pour irriguer suffisamment les surfaces irrigables de maïs ces années-là. En effet, ces faibles rendements du maïs sont cohérents avec les faibles satisfactions de la demande en eau d'irrigation décrites dans la Figure IX.3 de la Section IX.2.1.

De même que pour le scénario Agroécologie industrielle, les cultures non irriguées souffrent davantage, en particulier pour les projections du couple HadGEM/CCLM (Figure IX.20 (b), (c)) et certaines années (Figure IX.20 (b)). Les cultures de printemps, c'est-à-dire le maïs et le tournesol, souffrent davantage que les cultures d'hiver. De même que pour le cas Usages constants, le maïs non irrigué paraît particulièrement souffrir certaines années, et notamment pour les projections du couple HadGEM/CCLM.

Enfin, de même que pour le scénario Agroécologie industrielle, les surfaces de culture non irriguées sont très majoritaires. Ainsi, les bons ou très bons rendements relevés pour les cultures irriguées ne concernent qu'une fraction des surfaces du bassin versant. Cette observation est encore plus critique dans le scénario Intensification pour certaines projections, car on observe pour le maïs une très grande différence de rendement entre les cas irrigué et non irrigué.

5.4 Rendements du scénario Repaysannisation

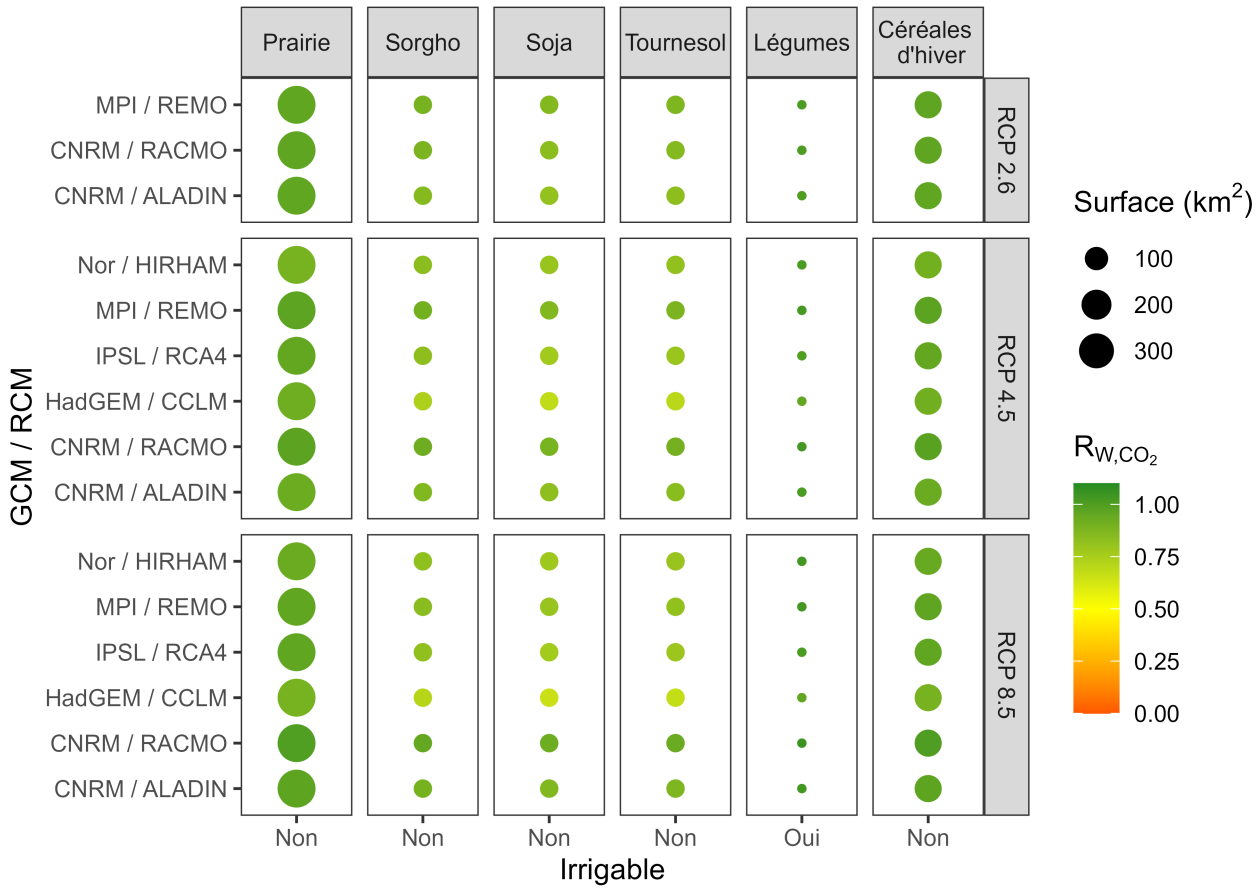
On analyse finalement les projections de rendement pour le scénario Repaysannisation (Figure IX.22).



(a) Rendements relatifs annuels R_w des cultures irriguées, non ajustés par le CO_2

(b) Rendements relatifs annuels R_w des cultures non irriguées, non ajustés par le CO_2

FIGURE IX.22 – Projection des rendements pour les simulations avec le scénario Repaysannisation



(c) Rendements relatifs moyens interannuels avec prise en compte de l'effet fertilisant du CO_2, R_{W,CO_2} et surfaces cultivées correspondantes

FIGURE IX.22 – Projection des rendements pour les simulations avec le scénario Repaysannisation (Suite)

Les analyses sont globalement similaires à celles effectuées pour les scénarios précédents : les légumes, qui constituent l'ensemble des cultures irriguées, présentent de très bons rendements quand les cultures non irriguées, notamment de printemps, présentent potentiellement davantage de difficultés (Figure IX.22). De même que pour le scénario Agroécologie industrielle, ce scénario ne présente pas de maïs, et donc pas de maïs non irrigué, évitant les simulations de pertes de rendement très importantes pour le maïs non irrigué.

De plus, ce scénario se distingue par le fait que l'entièreté des légumes sont irrigables : il n'y a pas de culture pour laquelle on a en partie des surfaces irrigables et des surfaces non irrigables. On ne relève pas ainsi tant d'"inégalité" entre surfaces irriguées et non irriguées au sein d'une même culture. Cependant, devant les difficultés, certes modérées, de certaines cultures non irriguées, nous pourrions envisager d'étendre l'irrigation à d'autres cultures.

5.5 Synthèse des trois scénarios

Ainsi, pour les trois scénarios, les rendements des cultures irriguées sont très bons, avec peu de variabilité annuelle, et ce pour l'ensemble des projections. Les cultures non irriguées souffrent davantage, en particulier pour les projections du couple HadGEM/CCLM. On note que le maïs est la culture qui perd le plus de rendement parmi les cultures irriguées et parmi les cultures non irriguées. Néanmoins, en condition irriguée, les pertes de rendement demeurent modérées, montrant que de l'eau a tout de même pu être apportée pour limiter les pertes de rendement, mais que la ressource stockée n'a pas suffi à satisfaire entièrement la demande évaporative du maïs.

Les scénarios Agroécologie industrielle et Repaysannisation, ne présentant pas de maïs, ne montrent pas de pertes de rendement aussi importantes que le scénario Intensification. Pour les trois simulations, les années de forte perte de rendement coïncident avec les années de fort déficit hydrique relevées dans la Section IX.1. Les rendements relatifs sont néanmoins améliorés lorsque l'on applique les cycles raccourcis (Annexe H).

6 Discussion sur les projections

Nous avons réalisé de nombreuses analyses des projections sous différents scénarios sur le bassin versant de la Seille. Il convient à ce stade d'extraire des résultats obtenus des conclusions plus générales, via :

- une évaluation multi-critère des scénarios ;
- une analyse des limitations des scénarios et propositions d'améliorations ;
- une analyse des avantages et limites de la modélisation développée

6.1 Évaluation multi-critère des scénarios

Les simulations réalisées grâce aux projections climatiques et aux scénarios ont permis de montrer que :

- la demande en eau d'irrigation n'est pas forcément satisfaite, et que cette satisfaction varie selon les années, les couples de modèles climatiques, et le scénario local. En particulier, le scénario Intensification mène à la satisfaction de la demande la plus faible. Néanmoins, malgré une demande parfois non satisfaite, les cultures irriguées parviennent à avoir généralement des rendements très satisfaisants. C'est en particulier le cas lorsque l'effet fertilisant du CO_2 est pris en compte ;
- l'analyse des rendements montre que le maïs non irrigué souffre beaucoup pour certaines données d'entrée climatiques, questionnant la viabilité de cette culture sans irrigation ;
- les étiages seront plus intenses dans le futur d'après de nombreuses projections pour le RCP 4.5 et le RCP 8.5. On note cependant une très forte incertitude : l'aggravation des étiages est très différente selon le couple de GCM/RCM, et certains couples de GCM/RCM montrent plutôt une amélioration des indicateurs d'étiage. Cependant, il ne faut pas oublier que la projection la plus humide a été écartée récemment lors du projet Explore2, car elle semblait improbable au vu des connaissances actuelles ;
- la mise en place d'une irrigation intensifie les étiages (i.e. les débits d'étiage sont à la baisse), mais de façon relativement modérée. Cela est notamment dû à l'hypothèse de prélèvements d'irrigation uniquement à partir d'eau stockée, ce qui limite l'impact des prélèvements. Néanmoins, la pression exercée par l'étang de Lindre et les retenues en période d'étiage est augmentée. Le scénario Intensification est ainsi le scénario générant les plus fortes aggravations des étiages ;
- le soutien d'étiage permet logiquement une amélioration des indicateurs d'étiage ;
- les vidanges de l'étang de Lindre diminuent le nombre de jours sous les seuils d'étiage, mais accentuent les indicateurs d'étiage ponctuels (VCNs, QMNA5) ;
- la mise en place d'irrigation importante ou de débit de soutien d'étiage à partir de l'étang de Lindre pourrait entraîner une dégradation importante de sa qualité écologique, en faisant baisser son niveau de remplissage de manière importante. Néanmoins, la mise en place d'une irrigation modérée, ciblée sur les cultures maraîchères comme dans le scénario Repaysannisation, ne pourrait impacter que peu l'étang de Lindre.

Les indicateurs montrent ainsi un certain nombre d'antagonismes au sein des scénarios. Le soutien d'étiage du scénario Agroécologie industrielle permet d'améliorer les étiages, mais il entraîne une baisse de volume de l'étang de Lindre, et donc une dégradation de la biodiversité. Le scénario Intensification permet d'assurer la viabilité du maïs irrigué, mais il entraîne une dégradation de la qualité écologique de l'étang de Lindre, et l'arrêt de son utilisation à des fins piscicoles, et une aggravation des étiages.

Il est cependant important de souligner qu'il est délicat de comparer les scénarios au regard des rendements agronomiques, car les cultures sont hétérogènes selon les scénarios. Ainsi, ces cultures génèrent des nutriments

ou des rendements économiques différents. Néanmoins, nous pouvons évaluer chaque scénario sur le caractère plausible des rendements obtenus : si un scénario obtient de très mauvais rendements pour une culture, il paraîtrait logique que cette culture ne soit pas demeurée identique, qu'il y ait eu adaptation. Nous pouvons ainsi dire que les scénarios Agroécologie industrielle et Repaysannisation ne semblent pas présenter de grandes implausibilités au regard des rendements : les cultures non irriguées présentent des rendements relativement acceptables, et les cultures irriguées présentent de très bons rendements. Le scénario Intensification et la modélisation à Usages constants montrent de fortes difficultés pour le maïs non irrigué, questionnant la plausibilité du maitien de cette culture avec le même itinéraire technique.

6.2 Mise en évidence d'améliorations potentielles des scénarios

Nous avons vu que l'insatisfaction de l'irrigation semblait augmenter de l'amont vers l'aval pour les scénarios Agroécologie industrielle et Repaysannisation. On peut en déduire que concentrer davantage l'irrigation sur l'amont du bassin versant, et plus généralement sur les AWZ avec la satisfaction la plus forte, serait alors plus efficace. Nous avons aussi vu que le scénario Repaysannisation n'aggravait que légèrement les indicateurs d'étiage. Il serait donc envisageable d'irriguer d'autres cultures pour ce scénario, par exemple celles montrant les plus fortes pertes de rendement. Pour le scénario Intensification, on pourrait : soit substituer le maïs non irrigué par une culture moins sensible au stress hydrique, soit mieux partager la ressource en eau entre les parcelles de maïs.

Des améliorations paraissent envisageables, comme la mise en place des règles d'irrigation évitant la surirrigation, voire relevant de l'irrigation déficitaire [1]. Cela pourrait correspondre à la mise en place d'une irrigation plus contrôlée par les gestionnaires de l'eau, ou au recours à des OAD [2]. Il pourrait également être envisageable d'augmenter le stockage de la ressource en eau, mais cela pourrait entraîner une dégradation des indicateurs d'étiage. Cette dégradation serait d'autant plus forte si la création de ressource stockée augmentait la surface cumulée des impluvia contribuant au remplissage des retenues. Pour l'ensemble des scénarios, un partage de l'eau plus homogène entre les cultures les plus sensibles au stress hydrique paraîtrait plus bénéfique.

De plus, nous avons vu que le soutien d'étiage permettait une forte amélioration des indicateurs d'étiage, mais pouvait mettre en difficulté la qualité écologique de l'étang de Lindre. Nous pourrions ainsi envisager un soutien d'étiage moins ambitieux.

6.3 Apports d'une modélisation intégrée en contexte de changement climatique

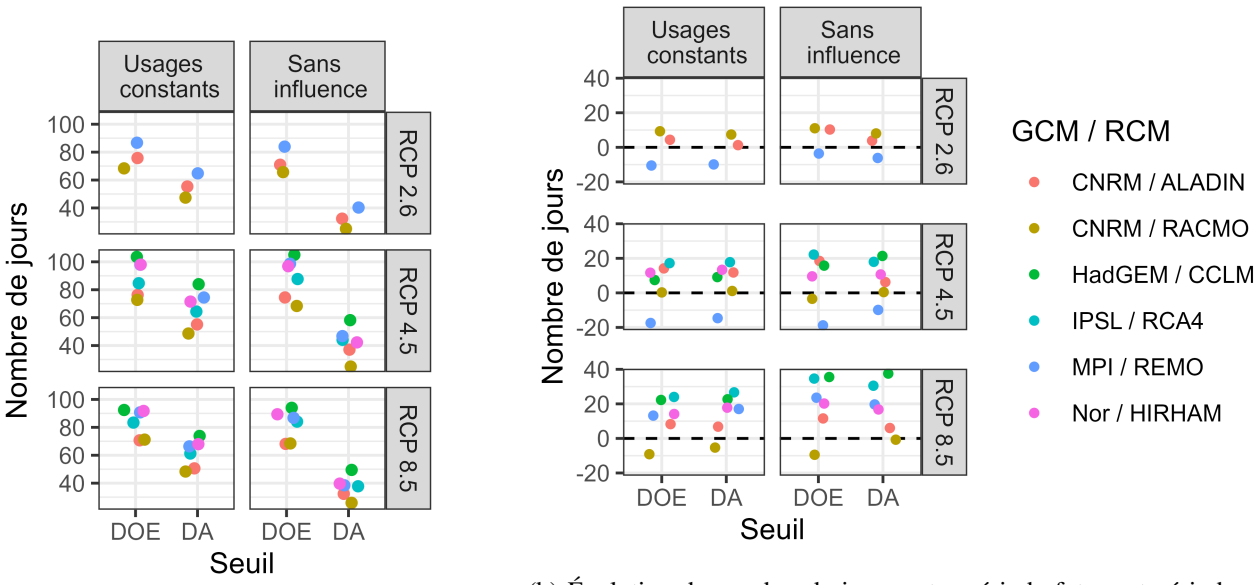
Les travaux de référence cherchant à quantifier les impacts du changement climatique sur l'hydrologie en France métropolitaine ne prennent pas en compte explicitement les influences humaines, ou encore des éléments du paysage tels que les plans d'eau (CARROGET, 2017). Or, même en supposant une absence d'évolution des sociétés humaines et du paysage, l'impact sur l'hydrologie de ces éléments peut varier en fonction du climat, mettant en péril l'hypothèse de stationnarité des modèles. Ainsi, nous souhaitons comparer les résultats que nous obtenons en simulant les usages constants, à une modélisation purement hydrologique, telles que celles mobilisées habituellement dans les études d'impact du climat sur l'hydrologie (Figure IX.23). Cette deuxième modélisation correspond à un modèle purement hydrologique (sans prise en compte des influences) calé sur les observations. Les paramètres prennent donc en compte les influences implicitement, même s'il peut être difficile de bien parvenir à reproduire les influences seulement par les paramètres de la modélisation hydrologique. On observe ainsi des différences notables pour les différents indicateurs calculés :

- le nombre de jours passé sous les seuils d'étiage augmente davantage pour certains couples GCM/RCM lorsque l'on ne prend pas en compte les influences, en particulier pour le RCP 8.5 (Figure IX.23 (b)). Toutefois, le nombre de jours initial sous les seuils d'étiage était plutôt plus faible pour la modélisation sans les influences (Figure IX.23 (a)) ;

1. Irrigation volontairement faible, induisant une perte de rendement contrôlée, mais permettant des économies d'eau et éventuellement sans perte économique
2. Outils d'aide à la décision

- les amplitudes de variation du VCN3 (Figure IX.24 (b)) et du QMNA5 (Figure IX.25 (b)) sont moindres pour les simulations sans les influences que pour les simulations avec les Usages constants. On note en particulier une moins forte diminution de ces indicateurs pour les simulations avec les RCP 4.5 et RCP 8.5. Toutefois encore, les indicateurs montraient des valeurs plus élevées sur l'horizon historique pour les simulations sans les influences (Figure IX.24 (a), Figure IX.25 (a))

Il n'est pas aisé d'interpréter directement ces résultats, car il faudrait comprendre comment le modèle s'efforce, via ses paramètres, à reproduire les influences. Nous pouvons cependant supposer que le modèle ne prenant pas en compte les influences ne prend pas suffisamment en compte la plus forte évaporation future des plans d'eau, et donc la diminution des indicateurs d'étiage tels que le VCN3 et le QMNA5. On peut également supposer que le modèle ne permet pas de prendre en compte le fait que le maintien des vidanges atténuera l'évolution du nombre de jours sous les seuils d'étiage. Les simulations avec la prise en compte des influences apportent donc une réponse qui diffère de manière non négligeable sur les projections des indicateurs d'étiage.



(a) Nombre de jours sur la période historique

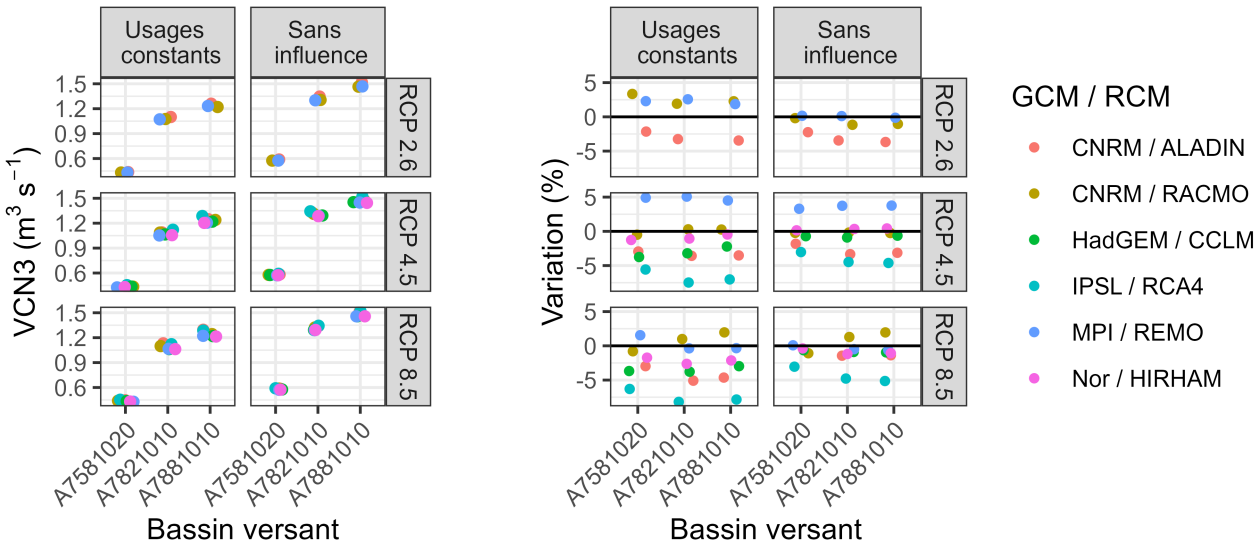
(b) Évolution du nombre de jours entre période future et période historique

FIGURE IX.23 – Évolution du nombre de jours sous les seuils d'étiage pour la Seille à Metz (A7881010) pour la simulation avec les Usages constants et la modélisation ne prenant pas en compte les influences

Néanmoins, il convient de garder en mémoire que les écarts entre la modélisation prenant en compte les influences de manière explicite et la modélisation sans prise en compte des influences sont empreints d'incertitudes liées aux hypothèses de modélisation de ces influences. De plus, la modélisation hydrologique sans les influences ne permet de quantifier les impacts du changement climatique que sur des indicateurs hydrologiques. Cela implique par conséquent de laisser de côté d'autres facteurs d'analyse qui viennent en fait impacter la décision politique ou les pratiques. Par exemple, nous avons pu observer l'importance de la prise en compte de la disponibilité de la ressource en eau pour modéliser l'irrigation et la gestion future de l'étang de Lindre : par exemple, l'irrigation peut ne pas toujours être satisfaite, et l'étang de Lindre peut avoir davantage de difficultés à se remplir que dans la situation actuelle. Ces évolutions, non modélisées le plus souvent, sont cependant elles aussi très importantes pour éclairer la décision pour l'adaptation de l'agriculture au changement climatique au regard de la ressource en eau.

Enfin, une modélisation intégrée est nécessaire pour prendre en compte des hypothèses spécifiques d'évolution des pressions humaines et des stratégies d'adaptation. Une modélisation ne prenant pas en compte les influences humaines ne permet de simuler l'impact que de facteurs peu ou pas maîtrisables à l'échelle locale (par exemple l'impact des émissions de gaz à effet de serre, via la prise en compte des RCP dans les GCM et RCM). La modélisation intégrée agro-hydrologique permet ainsi d'inclure des facteurs relevant du champ de l'action locale.

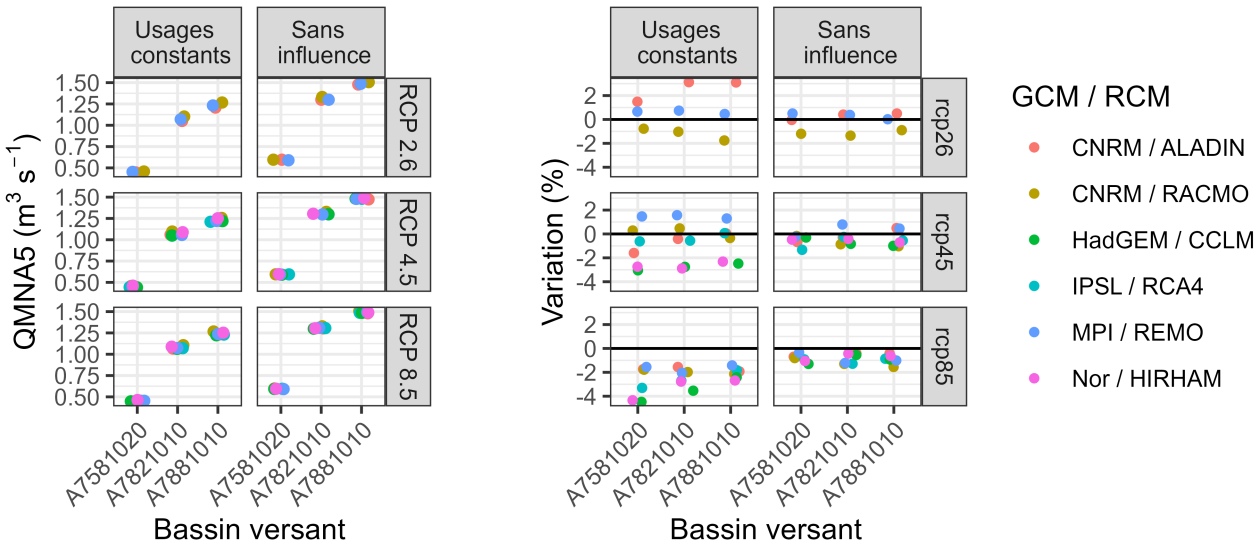
La modélisation intégrée agro-hydrologique permet ainsi :



(a) VCN3 moyen sur la période historique

(b) Evolution du VCN3 moyen

FIGURE IX.24 – Évolution du VCN3 moyen pour la simulation avec les Usages constants et la modélisation ne prenant pas en compte les influences



(a) QMNA5 sur la période historique

(b) Evolution du QMNA5

FIGURE IX.25 – Évolution du QMNA5 pour la simulation avec les Usages constants et la modélisation ne prenant pas en compte les influences

- de rendre l'hypothèse de stationnarité des modèles plus plausible, en rendant indépendante la modélisation de la réponse hydrologique, de la modélisation d'usages dépendant du climat et de décisions humaines ;
- de mettre à profit la modélisation hydrologique pour modéliser la vulnérabilité des usages de l'eau par rapport à l'évolution de la ressource en eau en contexte de changement climatique.

A retenir :

Les indicateurs calculés présentent une forte variabilité au regard des projections climatiques et des scénarios, permettant de mettre en avant une hétérogénéité des impacts selon les scénarios. Notamment, les scénarios se répercutent en valeurs très différentes atteintes pour l'irrigation. Pourtant, les répercussions de cette irrigation différenciée sont relativement modérées sur les étiages. Les indicateurs d'étiage sont cependant sensibles à la mise en place de soutien d'étiage.

Discussion et conclusion

Chapitre X

Discussion générale

Avant-propos :

Ce manuscrit de thèse s'achève bientôt. Le but de ce chapitre est désormais de discuter de la portée et des limites des travaux menés dans le cadre de la thèse, mais aussi de proposer des travaux supplémentaires qu'il serait intéressant de mener dans le futur, au regard des résultats obtenus.

1 Apports des travaux de thèse

1.1 Rappel des objectifs de la thèse

L'objectif général de la thèse était de développer une démarche complète de **construction** et **d'évaluation** de **stratégies d'adaptation locales** de **l'agriculture** au **changement climatique** au regard de la **ressource en eau** prenant en compte les **incertitudes** et mobilisant une **modélisation parcimonieuse**. Les sous-objectifs associés à cet objectif général consistaient à :

- Développer un modèle intégré agro-hydrologique parcimonieux ;
- Questionner les impacts de la prise en compte d'une modélisation simplifiée ;
- Construire des scénarios d'évolution locale de l'agriculture et de la gestion de l'eau par une approche qualitative ;
- Traduire et projeter ces scénarios via la modélisation et un ensemble de données de forçage climatiques ;
- Évaluer les impacts du changement climatique selon les différents scénarios.

Cette thèse s'est ainsi attachée à mettre en œuvre une démarche de bout en bout, plutôt qu'à approfondir un aspect précis de la modélisation hydrologique par exemple.

1.2 Une méthode d'enquête de prospective originale et efficiente

Dans notre quête d'interdisciplinarité et d'exhaustivité de la démarche, les travaux de thèse ont nécessité de mettre en place une méthode de prospective. L'objectif de cette démarche était de pouvoir prendre en compte les incertitudes de l'évolution de l'agriculture et de la gestion de l'eau au niveau local de façon efficiente. Nous avons souhaité nous appuyer sur des parties prenantes, afin d'ancrer les scénarios dans la réalité locale et qu'ils soient concrets, réalistes, et intéressants pour les personnes concernées (LOUBIER et al., 2019). De plus, un effort particulier a été conduit pour prendre en compte la diversité des contraintes pouvant s'exercer sur l'agriculture sur le territoire du bassin versant de la Seille. Nous avons ainsi identifié des antagonismes entre objectifs de protection du patrimoine et de la biodiversité, et objectifs de développement économique et social

par la diminution de l'élevage ou le développement de la méthanisation. Pour toutes ces raisons, nous avons mis au point une méthode d'enquête, s'appuyant sur des entretiens avec réalisation d'une grille d'entretien (Annexe C) et ciblage des personnes à interroger. La finalisation des scénarios, étape qui nécessite d'être formé à la prospective et qui demande de réaliser des arbitrages, a elle été réalisée sans les acteurs mais au sein d'un petit corpus de chercheurs de disciplines différentes (modélisation agronomique, modélisation hydrologique, sociologie). Il en a été de même pour la traduction des scénarios en données d'entrée de la modélisation, qui aurait nécessité que les acteurs plongent dans la connaissance et la compréhension du modèle, ce qui n'était donc pas envisageable dans la durée de la thèse.

Cette construction des scénarios et la traduction de ces scénarios en données d'entrée de la modélisation s'est néanmoins fortement appuyée sur les éléments recueillis au cours des entretiens. En effet, nous avons souhaité rendre ces scénarios réalistes et concrets (définition de nouvelles rotations culturales, prise en compte de la salinité et des secteurs inondables, etc.). De plus, nous avons souhaité les rendre pertinents au regard des enjeux actuellement perçus par les acteurs (questionnements autour de la relocalisation, de l'élevage et des prairies, etc.) et au regard de notre objectif de questionner l'adaptation au changement climatique (mise en place d'irrigation, choix de cultures plus ou moins sensibles au stress hydrique, etc.).

En cela, nous pouvons considérer que nous avons mené une approche hybride, s'appuyant fortement sur les parties prenantes locales, mais se dispensant de leur participation pour construire les scénarios finaux. Notre approche se distingue donc des approches purement participatives (GODET, 1991 ; SAUQUET, 2014 ; LABBOUZ et al., 2017). Les parties prenantes et leurs témoignages constituent dans notre approche un objet d'étude qui nous permet, à nous chercheurs, de caractériser le territoire selon l'analyse que nous avons faite des entretiens, et d'imaginer en conséquence des scénarios plausibles et intéressants pour les parties prenantes en se dispensant d'une démarche participative totale.

Notre approche se distingue également d'autres travaux par le choix de ne pas s'appuyer sur un scénario tendanciel, c'est-à-dire qui prolonge les tendances passées et prenant en compte les éventuels changements prévisibles. La construction d'un scénario tendanciel est en effet souvent présentée comme un incontournable de la méthode des scénarios, constituant une forme de "témoin" plausible (GODET, 1991). Si un tel scénario nous paraissait assez intuitif jusque récemment, il paraît, dans les temps actuels, difficile à définir, notamment sur le bassin versant de la Seille sur lequel nous avons mis en évidence des tendances contradictoires. Nous avons ainsi préféré prendre comme référence la situation actuelle, par une modélisation des Usages constants. Cette référence nous a ainsi paru nécessaire et objective, même si elle n'est pas réaliste. Elle constitue un intermédiaire pertinent entre les différents scénarios envisagés.

Les scénarios et certains résultats préliminaires de projections ont été présentés à des partenaires de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse. Ces derniers ont apprécié les scénarios définis et ont montré un intérêt et des questionnements sur les choix de modélisation. Cela met en évidence l'éventuel apport d'une approche participative a posteriori de notre travail pour améliorer la modélisation. Cela annonce également une potentielle bonne acceptation des travaux par les parties prenantes. Ces partenaires sont néanmoins relativement éloignés du contexte précis du bassin versant de la Seille, et ne sont pas représentatifs de la diversité des opinions. Il sera ainsi intéressant de présenter les scénarios et les résultats des projections à une plus grande diversité d'acteurs, afin d'analyser la réaction de ces derniers. En effet, les méthodes davantage participatives, s'appuyant sur une co-construction des hypothèses de modélisation, permettent en théorie de se prémunir d'éventuelles contestations vis-à-vis des méthodes déployées (LOUBIER et al., 2019). Il serait donc intéressant d'étudier comment notre approche hybride peut être acceptée par les acteurs sur ce territoire. Cependant, le contexte du bassin versant de la Seille est assez différent des contextes habituels de réalisation d'études de gestion quantitative de l'eau (SAUQUET, 2014 ; AEAG, 2014). En effet, le contexte de tension liée à la gestion quantitative de l'eau est à l'heure actuelle assez limité. Outre la variabilité inévitable entre les secteurs d'étude, limitant la transférabilité, les acteurs du bassin versant de la Seille sont sans doute ainsi moins informés et moins partisans que sur d'autres secteurs. La réaction des acteurs du bassin versant de la Seille n'est ainsi pas forcément transférable sur d'autres secteurs.

1.3 Une modélisation intégrée agro-hydrologique simple, modulable et performante

Tout au long de la thèse, nous nous sommes efforcés de rechercher les hypothèses de modélisation permettant de gagner en parcimonie. Cependant, pour pouvoir prendre en compte les influences humaines, il n'est pas possible de pouvoir s'affranchir de toute complexité. Nous avons toutefois souhaité la limiter le plus possible. Nous avons ainsi choisi de distribuer spatialement la ressource stockée et les prélèvements d'irrigation par AWZ, de résolution plus fine que les sous-bassins versants modélisés. Cela permet de prendre en compte la variabilité spatiale de la disponibilité de la ressource en eau et la répercussion des prélèvements (ALLAIN et PLUMECOCQ, 2019). Ainsi, notre approche est potentiellement spatialement plus explicite que les approches agrégeant complètement les retenues et les usages y afférant de façon globale ou par sous-bassin versant, correspondant à la représentation globale des retenues décrites par HABETS et al. (2018) et LEBON (2021), selon la taille des bassins versants modélisés par les modélisateurs utilisant cette approche. Néanmoins, notre approche se dispense d'une modélisation totalement distribuée des retenues et des prélèvements, telle que la modélisation mise en place par LEBON et al. (2022). De plus, notre représentation des retenues et de l'irrigation est spatialement simplifiée par rapport à MAELIA (THEROND et al., 2014).

Si les retenues et les prélèvements sont distribués spatialement, nous avons utilisé une modélisation hydrologique semi-distribuée, sur des mailles de plusieurs centaines de kilomètres carrés. On n'a ainsi simulé les débits qu'à un certain nombre de stations hydrométriques, stations représentant des intérêts particuliers, ou étant utilisées comme stations indicatrices pour mettre en œuvre des restrictions. De plus, nous avons simulé les débits à l'aide du modèle GR5J, qui est un modèle hydrologique parcimonieux. Notre approche se distingue ainsi de modélisations hydrologiques distribuées, ou semi-distribuées, sur des mailles plus fines ou des HRU (Hydrological response units) (THEROND et al., 2014 ; LEBON et al., 2022).

De même, nous avons choisi une modélisation de la demande en eau que nous considérons comme relativement parcimonieuse, tout en permettant de moduler la demande en eau en fonction du climat et de distribuer spatialement et temporellement cette demande (SOUTIF-BELLENGER et al., 2023). Nous avons notamment comparé le modèle développé aux modélisations de la demande en eau obtenues par MAELIA (THEROND et al., 2014) dans le secteur de l'Aveyron aval. Le modèle choisi permet de faire varier les paramètres culturaux pour représenter de nouvelles variétés et l'impact d'autres facteurs, tels que la température de l'air. Ces paramètres, préfixés et non simulés par le modèle, nécessitent néanmoins de faire des hypothèses fortes, ou bien de connaître par ailleurs les impacts des facteurs externes sur ces paramètres. D'autres modèles, plus complexes, permettent d'internaliser les impacts de ces facteurs dans les processus modélisés (CONSTANTIN et al., 2015 ; BRISSON et al., 2003 ; DECHARME et al., 2019 ; GASSMAN et al., 2007).

L'intégration de l'hydrologie, de l'irrigation, du stockage et de la gestion a également été effectuée de façon simple mais robuste. Nous avons en effet limité cette intégration à un dialogue ressource-demande, en nous reposant sur l'hypothèse qu'il s'agit de facteurs de premier ordre sur les débits. En prenant en compte ces influences, nous sommes parvenus à obtenir des simulations satisfaisantes. Les impacts de la prise en compte des influences demeurent relativement limités sur les valeurs des paramètres du modèle hydrologique, voire sur les indicateurs de performance. D'autres approches, telles que MAELIA (THEROND et al., 2014) ou J2000 (BRANGER et al., 2016), prennent en compte les retours d'eau de l'irrigation comme entrée de la modélisation hydrologique, ou encore la nature de la végétation sur le calcul de l'évapotranspiration.

Ainsi, nous avons pu sur le temps de la thèse (3 ans), en plus de la démarche de prospective, développer une modélisation, l'implémenter sur deux bassins, et simuler sur l'un d'eux (le bassin versant de la Seille) des projections avec les Usages constants, avec trois scénarios concrets ainsi qu'avec deux expériences complémentaires (Intensification avec vidange, Agroécologie industrielle sans soutien d'étiage). Cela illustre la simplicité et la modulabilité de l'approche développée. Par comparaison, nous projetions dans le temps de la thèse d'utiliser également la plateforme MAELIA dans sa version complète, c'est-à-dire modélisant l'irrigation, l'hydrologie, et la gestion à l'interface entre ces deux compartiments, sur l'Aveyron et sur la Seille. Les simulations de la version de MAELIA sur l'Aveyron ont montré des dysfonctionnements, et la complexité du modèle a rendu difficile de corriger ces derniers sur le temps de la thèse. La mise en place de MAELIA sur la Seille n'a donc pas pu être finalisée sur le temps de la thèse.

Le modèle intégré développé permet de simuler simplement et de façon satisfaisante les débits et des variables complémentaires (volumes stockés, irrigation, etc.). La simulation des débits à un pas de temps journalier permet de calculer des indicateurs qui ont un sens très concret auprès des acteurs des territoires. Cela n'aurait pas été possible avec un modèle qui se limiterait à une "comptabilité" de la ressource modélisée et de la consommation, tel que WEAP (SIEBER et PURKEY, 2015), ou en effectuant un couplage avec un modèle GR à un pas de temps mensuel par exemple. Les variables complémentaires permettent de prendre en compte d'autres impacts que les impacts purement hydrologiques de scénarios, démarche nécessaire pour quantifier d'éventuelles synergies ou compétitions générées par les stratégies d'adaptation. Le modèle intégré permet notamment de simuler la temporalité du stockage de l'eau en fonction du climat, de l'hydrologie et de l'irrigation. Notre modèle permet ainsi de questionner la viabilité de l'irrigation au regard de la probabilité de remplissage des ouvrages de stockage. D'autres travaux utilisent parfois des modèles purement hydrologiques, ne permettant pas de modéliser de variables complémentaires (CHAUVEAU et al., 2013 ; THIREL et al., 2021). Au contraire, d'autres travaux se focalisent uniquement sur la demande en eau d'irrigation, sans effectuer un couplage fin avec la ressource disponible (RINAUDO et al., 2013). La modélisation intégrée que nous avons ainsi développée s'inscrit ainsi dans la réponse faite aux travaux exhortant à mieux faire dialoguer ressource et demande, plutôt qu'à ne modéliser qu'un seul de ces deux compartiments (WINTER et al., 2017 ; ABBOTT et al., 2019).

Au-delà du potentiel d'utilisation d'un tel modèle pour évaluer des scénarios de gestion, la prise en compte des influences humaines permet de rendre moins forte l'hypothèse de stationnarité. On rappelle que cette hypothèse, faite lors de n'importe quelle étude d'impact du changement climatique lorsqu'un modèle est utilisé, revient à considérer que les équations et paramétrisations, mises en place sur une période passée connue, seront toujours valables dans le futur. En effet, ici, l'évolution des influences humaines est explicitement prise en compte, ce qui permet de faire porter sur le modèle hydrologique la relation pluie-débit, et sur la modélisation des usages, le fait que ces influences évoluent en réaction à divers facteurs dont le changement climatique. Les modèles hydrologiques classiques ne sont, quant à eux, généralement pas en mesure de prendre en compte l'évolution des influences humaines dans le cadre de projections. On trouve généralement trois cas de figure :

- les influences sont considérées de manière implicite. Par exemple, le calage des paramètres vise à reproduire des débits influencés, sans modéliser ces usages explicitement. Il n'est alors pas possible de prendre en compte l'évolution des usages car ces derniers ne peuvent pas distingués via les paramètres et processus modélisés ;
- les modèles simulent les débits naturels, par exemple le modèle SIM (HABETS et al., 2008). Il faudrait donc inclure une modélisation des usages pour prendre en compte l'évolution des pressions humaines sur les débits futurs ;
- les modèles prennent en compte explicitement les usages. Cependant, ces modèles sont souvent complexes, par exemple MAELIA (THEROND et al., 2014) et ne sont donc pas forcément mobilisables pour effectuer des projections climatiques selon de multiples paramétrisations, scénarios d'usages et chroniques climatiques.

1.4 Une démarche complète mobilisable pour d'autres territoires

L'association de la démarche de prospective à la modélisation n'est pas une démarche nouvelle. En plus de l'originalité de la démarche prospective et de la modélisation développée par rapport aux travaux précédents, la démarche dans sa globalité se distingue par le fait qu'elle ait été conduite à échelle relativement restreinte. Ce choix a été fait au regard des retours d'expérience d'Explore 2070 (CHATEL, 2019) ou encore des Assises de l'Eau. Cela a permis de construire et d'évaluer des scénarios concrets et spatialement définis, mais aussi d'utiliser de nombreuses projections climatiques et de mettre en place une modélisation relativement explicite et parcimonieuse. Notre travail se distingue d'approches similaires, mais effectuées à plus grande échelle (CHAUVEAU et al., 2013 ; AEAG, 2014).

Les entretiens auront notamment permis ici de s'assurer d'un certain réalisme des hypothèses à modéliser par rapport aux contraintes du territoire, et d'ancrer les scénarios dans la réalité du territoire. Les scénarios construits conjugués à la modélisation permettent ainsi de visualiser l'avenir de l'hydrologie et de l'agriculture

pour une diversité des possibles pertinents aux yeux des acteurs, contrastés et même relativement extrêmes pour les scénarios Intensification et Repaysannisation notamment. La présentation des résultats de la thèse aux acteurs du territoire, effectuée seulement partiellement à cette date, sera alors un moyen d'évaluer la capacité d'une telle démarche, associant méthode de prospective basée sur des entretiens et modélisation simplifiée, à convaincre et intéresser les acteurs. Suite à cette présentation, ces travaux pourraient être repris en remobilisant le modèle et/ou la démarche de prospective développée pour tester de nouveaux scénarios.

Une telle démarche peut être une façon de construire rapidement des projections intégrant la diversité des possibles sur d'autres territoires. En effet, notre démarche, qui n'a pas été participative de bout en bout, est peut-être à privilégier sur des territoires non sujets à des tensions importantes sur la gestion quantitative de l'eau, pour des travaux utiles à certains acteurs n'ayant pas forcément vocation à être partagés à tous les acteurs (certains acteurs peuvent avoir besoin de construire leurs propres scénarios au regard de problématiques intéressantes pour eux, mais tout en souhaitant s'appuyer sur les témoignages des parties prenantes pour mieux prendre en compte les contraintes locales), ou encore à condition de faire un travail de communication important pour bien expliquer les limites des résultats obtenus.

La méthodologie développée, associant prospective et modélisation, permet notamment de quantifier les incertitudes liées :

- à l'évolution locale de l'agriculture et de la gestion de l'eau ;
- à la paramétrisation de la modélisation de l'irrigation ;
- aux émissions de gaz à effet de serre, traduites à travers les RCP ;
- à l'impact de l'évolution des gaz à effet de serre sur le climat, et à la modélisation climatique, traduites par les couples de GCM/RCM.

De plus, nous prévoyions initialement dans les travaux de thèse d'effectuer des projections sur le bassin versant de la Seille avec MAELIA (THEROND et al., 2014), ce qui aurait permis d'évaluer les incertitudes liées au choix de la modélisation agro-hydrologique intégrée. Certains travaux montrent ainsi que le choix du modèle hydrologique ne représente qu'une faible part des incertitudes dans les projections, notamment pour les indicateurs relatifs aux crues (LEMAITRE-BASSET et al., 2021 ; THIREL et al., 2021). Cependant, d'autres travaux montrent que cette part d'incertitude liée à la modélisation hydrologique est plus forte en ce qui concerne des indicateurs liés aux étiages (VIDAL et al., 2016). Elles restent néanmoins dans tous les cas moins forte que la part d'incertitude liée aux modèles climatiques et aux RCP. Néanmoins, ces travaux ne prenaient pas en compte les influences humaines. Il paraît donc non trivial de transposer ces conclusions à une modélisation intégrée, et nous recommandons une mise en œuvre d'une analyse d'incertitude exhaustive. Cela pourrait être mis en place grâce à une méthodologie d'analyse des variances (cf méthode QUALYPSO, EVIN et al., 2019), pour laquelle il est nécessaire de disposer de différentes réalisations de chaque composante de la chaîne de modélisation. Cela n'a cependant pas pu être réalisé dans le cadre de cette thèse. En effet, la réalisation de projections sur le bassin versant de la Seille avec MAELIA n'a malheureusement pas été possible sur la durée de la thèse.

La mise au point d'un modèle relativement simple a ainsi rendu possible la simulation d'une diversité d'hypothèses et de plusieurs projections climatiques, permettant de quantifier et de comparer les sources d'incertitude. Au vu de l'importance de ces incertitudes, il paraît absolument nécessaire de confronter les acteurs et décisionnaires à ces dernières, bien qu'elles rendent plus difficile la prise de décision liée aux stratégies d'adaptation.

La démarche développée nous a ainsi permis d'obtenir de nombreux résultats intéressants pour les acteurs du bassin versant de la Seille, les gestionnaires de l'eau sur d'autres secteurs, et la communauté scientifique :

- les scénarios locaux impactent fortement l'irrigation et sa satisfaction sur le bassin versant de la Seille, ainsi que sur les indicateurs d'étiage pour certaines hypothèses de gestion locale, notamment la mise en place de soutien d'étiage ;
- l'impact sur les étiages de la mise en place de l'irrigation à partir de l'eau stockée est visible mais assez limité sur le bassin versant de la Seille ;
- la variabilité des projections d'étiage est largement dominée par la sélection de la chronique climatique, et plus particulièrement par le choix du couple de GCM/RCM. Ces résultats sont cohérents avec d'autres

travaux, mettant en avant les fortes incertitudes liées au choix du modèle climatique dans le même secteur (THIREL et al., 2021 ; LEMAITRE-BASSET, 2023) ;

- on observe une forte asymétrie entre les cultures irriguées et non irriguées, questionnant la viabilité de certaines cultures non irriguées et le partage de la ressource à mettre en place ;
- le remplissage des retenues semble relativement peu mis en péril dans les projections avec les hypothèses de modélisation retenues. Néanmoins, l'impact du stockage sur les débits futurs est aggravé dans le climat futur par rapport au climat passé, et l'est d'autant plus dans les scénarios avec irrigation.

Certains éléments peuvent limiter la transférabilité de ces résultats à d'autres zones. Notamment, l'évolution climatique attendue peut mener à des précipitations en plus forte baisse et à des températures en plus forte hausse, que dans le Nord Est de la France. C'est notamment le cas dans un large quart Sud Ouest de la France (MÉTÉO-FRANCE, 2020). Ainsi, il n'est pas du tout assuré que le remplissage de retenues dans ces zones reste relativement peu mis en péril. Par ailleurs, ces conditions climatiques peuvent mener à une diversité plus importante de cultures dont la viabilité ne serait plus assurée, qu'elles soient irriguées ou non. Il convient donc de rappeler qu'il est nécessaire de mener des études similaires sur d'autres zones pour aider à la prise de décision, et que les stratégies d'adaptation doivent être déclinées au niveau local.

2 Limite des méthodes mobilisées et développées dans cette thèse

2.1 Limites de la démarche prospective

L'originalité de notre démarche prospective, par sa recherche d'efficacité, explique ses principales limites : nos scénarios sont-ils suffisamment réalistes, intéressants, et utiles ?

Plus précisément, nous avons souhaité dans cette thèse croiser étude des incertitudes et construction de stratégies d'adaptation. Il est vrai que la méthodologie de prospective choisie a surtout eu pour effet de générer des scénarios contrastés, permettant d'explorer une partie des incertitudes liées à l'évolution locale de l'agriculture et de la gestion de l'eau. Finalement, les scénarios construits mobilisent principalement des stratégies s'appuyant sur le stockage, couplées à des changements de cultures. Or, le stockage est en réalité souvent présenté comme une "maladaptation" par les acteurs interrogés. Les scénarios développés permettent ainsi de quantifier les impacts, positifs et négatifs, de scénarios reposant plus ou moins sur l'irrigation pour les productions agricoles, et d'envisager d'éventuelles améliorations par rapport à ces derniers. Ils ont l'avantage de prendre en compte d'autres facteurs influençant l'avenir de l'agriculture. Les résultats produits serviront ainsi à tirer des enseignements pour orienter les choix d'adaptation, mais ne constituent pas une évaluation de stratégies d'adaptation réellement envisagées de façon opérationnelle par des acteurs. Ils ne constituent donc pas un moyen permettant de recommander à ce stade des mesures d'adaptation concrètes. Une autre approche aurait pu être de définir des scénarios purement centrés sur l'adaptation au changement climatique, mais ces derniers n'auraient alors pas permis d'intégrer les autres contraintes s'exerçant sur l'agriculture, telles que les objectifs de développement économique et social, ou de protection du patrimoine et de la biodiversité.

Par le choix de s'intéresser à l'adaptation de l'agriculture au regard de la ressource en eau via un modèle intégré agro-hydrologique, nous n'avons développé que des scénarios avec irrigation, en comparaison avec un scénario sans irrigation. Néanmoins, des scénarios diversifiés ne mobilisant pas d'irrigation nous paraissent tout aussi envisageables pour ce territoire.

Le fait de travailler sur un territoire ne souffrant historiquement que peu, jusqu'à présent, du changement climatique, a été une source de difficultés. En effet, l'adaptation au changement climatique ne constitue finalement pas la préoccupation première de ce territoire. Il n'a pas été une tâche aisée, pour les acteurs, d'envisager des stratégies d'adaptation opérationnelles et pragmatiques, même si on peut noter que les années récentes tendent à faire évoluer les esprits. Cela explique que nos scénarios traduisent finalement surtout les débats en jeu actuellement sur le bassin, plutôt que les solutions d'adaptation au changement climatique : quelle place à l'agroécologie, aux prairies, à l'élevage, à la méthanisation ? Quelle évolution du métier d'agriculteur ? Quelle autonomie alimentaire pour l'agriculture du bassin versant de la Seille ? Nous aurions pu notamment envisa-

ger des solutions d'adaptation très pragmatiques, telles que le semis plus précoce des cultures. Nous notons également que les acteurs ont relativement peu évoqué le développement de systèmes d'irrigation plus efficients. Cela peut également s'expliquer par le contexte du bassin versant, sans irrigation, pour lequel le gain en efficacité ne constituerait pas en lui-même une diminution de la pression sur la ressource, puisqu'il s'accompagnerait nécessairement de la mise en place d'irrigation. Néanmoins, la modélisation de systèmes d'irrigation plus efficients aurait alors soulevé des questionnements sur leur prise en compte dans la modélisation CropWat auxquels nous n'aurions sans doute pas pu répondre dans le temps de la thèse.

De plus, nous avons défini certaines contraintes sur la construction des scénarios. Par exemple, nous avons décidé de garder une surface agricole utile constante. Cette hypothèse était assez justifiée par l'enquête qui a plutôt mis en avant une recherche d'agrandissement des agriculteurs. Néanmoins, dans un contexte de diminution du nombre d'agriculteurs, de difficultés face notamment au changement climatique, et d'augmentation de la demande pour le bois, il aurait été possible de concevoir des scénarios reposant sur une augmentation de la surface forestière. Nous n'aurions cependant pas été en mesure de simuler les impacts de l'augmentation de la surface forestière sur l'hydrologie avec le modèle mis au point.

2.2 Limites de la modélisation et potentiels développements

De même que pour la démarche prospective mise au point, et malgré ses avantages indéniables, la modélisation peut pâtir de notre quête de parcimonie. Les choix de modélisation effectués peuvent être questionnables, et pourraient bénéficier de davantage d'investigations et d'évaluations. La méthodologie initiale envisagée pour la thèse prévoyait d'effectuer également des simulations intégrées avec MAELIA sur le bassin versant de l'Aveyron aval et sur le bassin versant de la Seille. MAELIA étant beaucoup plus explicite dans les processus décrits, la comparaison aurait alors permis d'évaluer les éventuelles divergences entre les modèles liées notamment à l'absence de prise en compte de certains processus dans les modèles GR. Une telle comparaison demeure néanmoins envisageable et pourrait être conduite après les travaux de thèse. Nous décrivons ainsi ci-après certaines des faiblesses de notre modélisation dont l'impact pourraient être davantage étudié au regard des simulations effectuées par MAELIA.

2.2.1 Amélioration de certaines hypothèses de modélisation

Globalement, le modèle de bilan en eau des cultures développé, CropWat, est un modèle empirique simplifié. Il a donc nécessité de définir de nombreuses hypothèses.

Si la modélisation des cultures sur le bassin versant de l'Aveyron a permis une évaluation au regard de l'irrigation simulée par MAELIA, celle-ci n'a pas été possible sur le bassin versant de la Seille. Les cultures ont tout de même été paramétrées à partir des sorties de modélisation d'AqYield, inclus dans MAELIA. Néanmoins, pour les cultures non actuellement présentes sur le bassin versant de la Seille, nous avons simplement extrait des données du rapport 56 de la FAO (ALLEN et al., 1998). Même si les paramètres de ce rapport sont issus d'observations, ces paramètres pourraient être ajustés pour mieux correspondre au bassin versant de la Seille. De plus, une méthode d'estimation grossière des rendements a été mise au point, et pourrait certainement être améliorée. Globalement, la calibration et l'évaluation du modèle CropWat par comparaison avec MAELIA ont été effectuées au regard de la courbe de coefficient cultural et pour la modélisation de l'irrigation, qui est très sensible aux hypothèses de déclenchement de l'irrigation telles que testées dans l'article SOUTIF-BELLENGER et al., 2023. Néanmoins, une calibration plus poussée du facteur de puisement p (valeur que nous avons extraite du rapport 56 de la FAO ALLEN et al. (1998)), aurait pu être menée. Cette valeur pourrait notamment fortement influencer la simulation des cultures non irriguées et du rendement.

Par ailleurs, le modèle CropWat n'intègre pas l'impact des températures de l'air sur la phénologie des cultures. Nous envisagions initialement de nous appuyer sur les projections de MAELIA sur le bassin versant de la Seille pour réajuster les paramètres culturaux. Néanmoins, de telles projections n'ont finalement pas pu être produites sur la durée de la thèse. Nous avons donc finalement abordé ce problème en effectuant une analyse de la sensibilité à une réduction de la durée des cycles de développement. Une réestimation de la variabilité de la

durée des cycles en fonction de la température, par exemple en fonction des simulations d'AqYield, permettrait de consolider cette analyse de sensibilité.

De plus, le modèle agronomique choisi, s'appuyant sur CropWat, ne modélise que l'horizon racinaire. Cela ne permet pas de prendre en compte la mémoire de la totalité du sol, et donc réduit la portée de l'initialisation prenant en compte les déficits hydriques des cultures précédentes, et notamment des intercultures. Un modèle agronomique légèrement plus complexe, modélisant à la fois l'horizon exploré par les racines à chaque instant, et l'horizon maximal qui sera exploré par les racines sur une unité de simulation, serait une amélioration pertinente. On note également que la simulation du bilan en eau des sols en période d'interculture a peu été investiguée. Il serait intéressant d'évaluer comment la valeur initiale du déficit au début du cycle d'une culture influence la simulation de l'irrigation et du rendement.

Ces différentes simplifications n'ont pas paru pénalisantes pour obtenir des simulations de l'irrigation satisfaisantes sur la période historique sur le bassin versant de l'Aveyron aval. Néanmoins, elles pourraient l'être beaucoup plus pour des projections dans le climat futur. Une comparaison avec un modèle plus complexe, comme MAELIA, serait particulièrement pertinente pour identifier d'éventuelles simplifications problématiques, même s'il nous faudrait garder en tête que MAELIA lui-même reste une approximation du système réel.

Des hypothèses fortes ont également été réalisées sur la résolution spatiale et sur certains processus jouant sur le remplissage et la mobilisation des retenues. Par exemple, sur l'Aveyron, nous nous sommes notamment appuyés sur MAELIA pour calculer la fraction de la surface irriguée à partir des retenues. Or, MAELIA peut autoriser les îlots à être irrigués à partir d'une retenue en dehors de son BVe, tandis que GRcrop contraint l'irrigation des îlots par la ressource agrégée à l'échelle du BVe. Il est ainsi possible que l'eau stockée ait été sur-mobilisée ou sous-mobilisée sur certains BVe par rapport à MAELIA. Des règles de volumes disponibles par AWZ différentes pourraient être mises au point, pour éviter des irrégularités telles que des AWZ avec de grandes surfaces irriguées à partir de peu de volume stocké, si l'AWZ voisine présente la situation inverse. De plus, le modèle développé n'intègre pas de modélisation de la ressource souterraine. Sur le bassin versant de l'Aveyron, nous avons supprimé les retenues sur nappe sur le bassin versant de l'Aveyron, puisque le modèle ne permet pas de modéliser l'eau souterraine. La suppression des retenues sur nappe explique peut-être en partie les imperfections du modèle. Cette simplification entraîne en effet vraisemblablement une sur-sollicitation des eaux de surface en période de basses eaux. Il aurait pu être intéressant de modéliser les retenues sur nappe comme des retenues connectées, ces dernières étant remplies par la nappe d'accompagnement de l'Aveyron.

Nous pouvons considérer que notre modélisation du remplissage des retenues fait l'objet d'hypothèses fortes de simplification. Pour autant, nous aurions également pu tester des hypothèses encore plus simplificatrices pour coupler spatialement la modélisation hydrologique et les prélèvements. Il aurait ainsi été intéressant de comparer notre modèle à une approche agrégeant tous les prélèvements à l'échelle du sous-bassin versant (SBGR) sans distinguer les AWZ selon leur distance à l'exutoire, ni même sans prendre en compte l'hétérogénéité spatiale de la ressource stockée disponible. Nous aurions également pu agréger les prélèvements et/ou la ressource stockée à l'échelle du bassin entier. Cette dernière possibilité ne nous aurait néanmoins pas permis de modéliser les débits à des stations intermédiaires. D'autres simplifications spatiales auraient pu être envisagées, par exemple une agrégation spatiale des paramètres des sols pour la modélisation des cultures.

Nous notons également que le modèle n'intègre pas les retours d'eau au sol par l'irrigation dans la modélisation hydrologique. Cela peut conduire à une surestimation de l'impact de l'irrigation dans la modélisation hydrologique. Certains travaux s'intéressent aux impacts de l'irrigation sur l'hydrologie, et montrent que cette dernière peut contribuer significativement au débit (McInerney et al., 2018). En effet, les entrées d'eau dans la fonction de production du modèle GR devraient limiter la diminution du niveau de réservoir de production, et donc des débits. Il paraît important cependant, pour un tel phénomène, de distinguer la modélisation des unités de simulation agronomiques, pour bien prendre en compte l'effet des évènements d'irrigation au même titre que les évènements de pluie, et prendre en compte la variabilité spatiale de l'irrigation. Modéliser l'irrigation comme un apport moyenné par la surface du bassin versant conduirait certainement à un impact à peine perceptible de cette dernière, mais une irrigation concentrée sur certaines unités spatiales, les parcelles irriguées, pourraient suffire à soutenir légèrement les débits.

Afin de nous pencher sur cette limite de la modélisation, nous avons ainsi réalisé l'expérience suivante : nous avons extrait l'irrigation sur une unité de simulation de maïs irrigué sur le bassin versant de l'Aveyron pour l'année 2009. Nous avons modifié la chronique de précipitations du bassin versant de la Lère à Réalville (O5854010) pour y ajouter l'apport d'irrigation en millimètres, tout en gardant la même paramétrisation que celle obtenue par calage dans la Section VII.2. Le modèle hydrologique représente ainsi les bilans en eau en mm j^{-1} des surfaces de maïs irrigué. Il correspond à une sorte de HRU "maïs irrigué". On obtient une différence très visible à partir du premier apport d'irrigation (début juillet 2009 sur la Figure X.1), qui se poursuit même au-delà de la période d'irrigation. La différence est de l'ordre de 1 mm j^{-1} en période d'irrigation. Considérant que la surface de maïs sur le bassin versant 05854010 atteint 546 ha sur le bassin de la Lère à Réalville, cela reviendrait à un surplus de débit de 0,06 m^3s^{-1}, ce qui est loin d'être négligeable sur ce bassin, considérant que le DAR est de 0,05 m^3s^{-1}. Les modèles GR ne sont cependant pas appliqués via des HRU, ce que nous cherchons à faire via cette expérience. De plus, le modèle a été calé sans prendre en compte les apports par irrigation. Il n'est donc pas possible à ce stade de prendre en compte l'impact des apports d'irrigation dans la modélisation hydrologique GR sans développements complémentaires. Cette expérience permet cependant d'illustrer que le modèle mis en place tend peut-être à surestimer l'impact de l'irrigation, en prélevant dans les débits, sans répercuter les apports par l'irrigation dans la modélisation hydrologique.

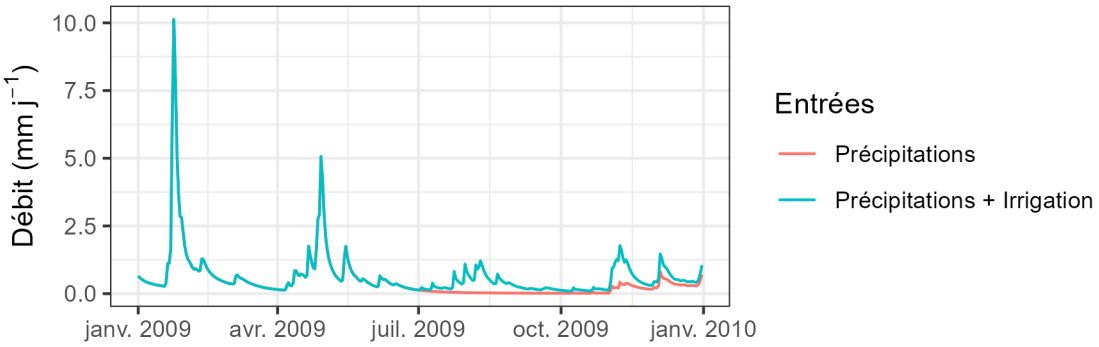


FIGURE X.1 – Comparaison des simulations hydrologiques pour l'année 2009 avec les paramètres du bassin O5854010 obtenus pour une configuration de l'irrigation, avec (turquoise) et sans (rouge) prise en compte de l'irrigation en entrée du modèle GR à l'échelle de l'unité de simulation agronomique

Nous pouvons espérer que, sur l'Aveyron et la Seille, le calage du modèle hydrologique intégrant la modélisation du remplissage des retenues ait permis de corriger les éventuelles erreurs liées aux hypothèses de modélisation. Néanmoins, sur la Seille, le calage ne permettait pas de prendre en compte l'irrigation, car elle n'existait pas sur la période passée utilisée, et les éventuels défauts de modélisation de l'irrigation n'ont donc pas pu être corrigés par ce biais.

Enfin, le modèle ne représente pas les rétroactions de l'hydrologie et des influences humaines sur l'atmosphère et le climat. La simulation des scénarios avec un modèle capable de prendre en compte ces rétroactions pourrait être informative. En effet, la nature de la végétation, ou encore l'irrigation, influencent le bilan radiatif (ARBOLEDA-OBANDO, 2023). Par exemple, l'irrigation de certaines parcelles pourrait influencer la température à plus grande échelle, influençant le stress hydrique de parcelles voisines. Nous touchons cependant là à un autre front de recherche, qui se situe bien au-delà de cette simple thèse.

2.2.2 Du choix de caler en prenant en compte des influences que l'on sait imparfaitement connues

Nous avons fait le choix de procéder à un calage automatique de la modélisation hydrologique prenant en compte les influences simulées. Or, nous avons mis en place une modélisation simplifiée qui mène nécessairement à des écarts entre simulations et observations (cf. les comparaisons entre irrigation simulée et observée, et entre volumes dans les barrages simulés et observés). Il aurait pu être envisagé de construire une chronique d'influence s'appuyant davantage sur les données observées disponibles pour caler la modélisation hydrologique. Cependant, les observations des influences utilisées souffrent elles-mêmes de limites : bases de données

incomplète, sous-déclaration. On note donc que cette alternative pourrait ne mener qu'à un déplacement du problème, sans le résoudre tout à fait.

2.2.3 Hypothèse de stationnarité

La prise en compte des influences humaines permet de rendre moins prégnante l'hypothèse de stationnarité qui aurait prévalu en ne les prenant en compte qu'implicitement (i.e. en optimisant un modèle GR par rapport à des débits observés, donc influencés). D'autres processus non stationnaires demeurent néanmoins ignorés dans la modélisation intégrée développée. Ces processus pourraient pourtant impacter également l'hydrologie locale.

En particulier, nous avons effectué des hypothèses de modification des assolements, qui devraient vraisemblablement modifier le fonctionnement hydrologique du bassin versant. En effet, toutes les cultures n'ont pas la même capacité à évapotranspirer. Il aurait pu être intéressant de coupler l'évapotranspiration de la modélisation agronomique à celle de la modélisation hydrologique, afin de ne pas représenter ce processus de manière parallèle dans les deux composantes du modèle intégré. Cependant, cet objectif soulève de nombreuses questions méthodologiques dans un modèle type GR. En effet, la taille du réservoir de production est représentative d'une aggrégation des processus sur un sous-bassin versant dans un modèle GR. Il n'y a donc pas de correspondance directe avec la profondeur de sol modélisée dans le bilan en eau du sol. De plus, le réservoir de production fait l'objet d'autres flux que simplement le flux entre précipitations et évapotranspiration. Ainsi, la quantité d'eau disponible pour être évapotranspirée est hétérogène entre la modélisation hydrologique et la modélisation agronomique.

De plus, nous avons négligé l'impact de la concentration atmosphérique en CO_2 sur l'évapotranspiration potentielle (ETP) prise en compte dans la modélisation hydrologique. L'évapotranspiration potentielle pourrait à la fois diminuer à l'échelle du stomate, et augmenter du fait du développement de la végétation par effet fertilisant, rendant très incertaine l'évolution de cette dernière. On notera à ce propos les efforts de LEMAITRE-BASSET et al., 2022 pour prendre en compte le premier effet du CO_2 sur l'ETP calculée par la formulation de Penman-Monteith.

On peut également noter l'absence de modélisation des nappes. Or, les nappes ont un impact sur la mémoire des bassins versants, et donc la modélisation de tendances à long terme. Le bassin versant de la Seille est imperméable, et on peut ainsi supposer que l'influence de la recharge des nappes y est faible. Sur d'autres bassins versants, négliger l'influence des nappes pourrait être plus problématique.

Concernant plus spécifiquement la modélisation de la demande en eau, les paramètres sont préfixés. L'approche développée ne permet donc pas de prendre en compte directement tous les impacts du changement climatique sur les cultures, notamment l'effet fertilisant du CO_2 ou l'impact de l'augmentation des températures sur la phénologie des cultures. Il est néanmoins possible de modifier ces paramètres manuellement pour prendre en compte ces facteurs.

2.2.4 De la difficulté de modéliser toutes les pistes d'adaptation

Le modèle intégré développé est parcimonieux et ne représente pas tous les processus qui pourraient être mobilisés pour construire ou évaluer des stratégies d'adaptation. Notamment, certaines adaptations, suggérées ou non par les acteurs, nécessitent une représentation explicite de certains phénomènes, ou des retours d'expériences de terrain pour traduire les effets de ces stratégies par des paramètres empiriques.

Nous relevons plusieurs pistes d'adaptation majeures que nous n'avons pas pu évaluer en raison de notre incapacité à les modéliser dans le temps imparti de la thèse :

- l'irrigation à partir de la ressource souterraine ;
- le gain en efficacité d'irrigation ;
- les "solutions fondées sur la nature".

En effet, bien que les interactions nappe-rivière soient faibles sur le bassin versant de la Seille du fait de l'imperméabilité du sol, de l'eau souterraine pourrait être mobilisable pour l'irrigation. Ainsi, les usages hors irrigation mobilisent d'ailleurs de l'eau souterraine sur le bassin versant de la Seille (Section III.3.3). Cette alternative pourrait d'autant plus être envisagée par les acteurs que l'eau souterraine est non salée sur le bassin versant de la Seille, en opposition à l'eau en rivière en plusieurs endroits.

La modélisation du gain en efficacité d'irrigation sur la demande en eau est délicate. Le calcul de cette dernière est réparti en différentes composantes, s'appuyant notamment sur SERRA-WITTLING et MOLLE (2017) :

- l'eau perdue par fuite et évaporation sur le trajet menant jusqu'aux parcelles ;
- l'eau qui est évaporée plutôt que transpirée.

Nous avons considéré que la première composante pouvait être négligée, l'eau perdue étant restituée au milieu. Pour la deuxième composante, il paraîtrait plus opportun d'utiliser un modèle séparant l'évaporation de la transpiration. Des options mobilisant notre modèle ont pu être envisagées en cours de thèse, même si elles n'ont finalement pas été mobilisées faute de temps :

- réduction des surfaces irriguées, pour en retirer les inter-rangs (i.e. la zone située entre deux rangées d'une culture dans un champ) dans le cas d'une irrigation goutte-à-goutte ;
- modification des courbes de Kc pour en réduire la composante liée à l'évaporation.

Néanmoins, une irrigation plus efficiente sur le deuxième volet, qui consisterait donc en une moindre évapotranspiration, mènerait à un moindre rafraîchissement atmosphérique dans les parcelles. Par conséquent, cela pourrait mener à une plus forte demande de transpiration, réduisant ainsi la portée d'une telle solution et nécessitant des ajustements complémentaires. De plus, le gain d'efficacité permettrait certainement une moindre irrigation à la parcelle, mais entraînerait assez spontanément une augmentation de la surface irriguée par effet rebond (SERRA-WITTLING et MOLLE, 2017 ; LAURENCEAU, 2021). Ainsi, le principal effet du gain d'efficacité pourrait être de partager davantage la ressource (i.e. la répartir sur des surfaces plus étendues et éventuellement entre un plus grand nombre d'agriculteurs) plutôt que de réduire l'irrigation à l'échelle d'un bassin versant.

Nous abordons les solutions fondées sur la nature dans la Section suivante.

3 De l'évaluation de l'efficacité des stratégies d'adaptation agro-écologiques ou "fondées sur la nature"

L'enquête, couplée à l'objectif de modélisation, a mis en évidence ce qui nous semble être un décalage important entre souhaits des acteurs de l'environnement et connaissances scientifiques sur la gestion quantitative de l'eau. En effet, de nombreux acteurs ont mis en avant les solutions fondées sur la nature comme levier d'adaptation de l'agriculture au changement climatique au regard de la ressource en eau : non labour, agroforesterie, paillage [1], etc. Ces actions peuvent avoir de nombreux effets démontrés pour la biodiversité, la qualité de l'eau, la protection contre les inondations, l'atténuation du changement climatique, etc. Les impacts de telles solutions sur l'hydrologie des sols agricoles et des bassins versants paraîssent néanmoins complexes à prendre en compte dans une modélisation parcimonieuse. De plus, de nombreuses solutions fondées sur la nature mises en avant n'ont en réalité pas fait l'objet d'études suffisamment poussées ou bien n'ont pas été testées sur des terrains suffisamment diversifiés pour que l'on puisse en connaître les réels impacts sur la gestion quantitative de l'eau. Les expériences de terrain, à ce stade, ne permettent pas de quantifier avec précision les impacts de ces solutions et de décrire exhaustivement les processus en jeu. Il paraît alors d'autant plus délicat de les prendre en compte dans un modèle, à moins de faire des hypothèses très fortes sur les effets de ces solutions. Différentes propositions de modélisation avaient néanmoins été construites au cours de la thèse, bien qu'il ait été finalement décidé de les laisser de côté.

1. Application d'une couche de matériau protecteur sur le sol. Cette technique permettrait notamment de réduire l'évaporation.

3.1 Les solutions fondées sur la nature pour réduire la demande en eau

3.1.1 Agriculture de conservation

L'absence de labour et le maintien d'un couvert végétal, mis en œuvre dans l'agriculture de conservation, permettent de stocker davantage de carbone dans les sols, de lutter contre le ruissellement en favorisant l'infiltration et de lutter contre l'érosion des sols. L'enrichissement du sol en matière organique permettrait d'augmenter la réserve utile du sol en en augmentant la porosité et la capacité de rétention par des complexes argilo-humiques notamment. Des expérimentations dans le cadre du projet BAG'AGES (2021) ont notamment montré une augmentation de la réserve utile de 10 à 15 % sur les horizons de surface de deux sols après 10 ou 20 ans en agriculture de conservation. Une étude (CUEFF et al., 2021) a été menée sur une plus grande base de données et montre une variabilité de la réserve utile selon les opérations techniques menées (labour, couverture culturale). Concernant le travail du sol, les résultats semblent surtout montrer que l'absence de labour entraîne une plus forte dispersion des valeurs de réserve utile par rapport à des sols labourés. Les sols ayant adopté un couvert végétal ont une plus grande réserve utile.

La lutte contre l'érosion permet de lutter contre la réduction de la profondeur du sol, et donc contre la réduction totale (en mm) de la réserve utile. La plus forte infiltration est également souvent mise en avant comme un moyen de remplir davantage le réservoir du sol et donc de disposer d'un stock d'eau plus important pour la culture.

Néanmoins, la réserve utile, si elle permet de montrer la quantité d'eau maximale stockable par le sol accessible pour les cultures, ne suffit pas à prédire la demande en eau des cultures. Il en est de même pour l'infiltration en période hivernale. D'autres expériences menées dans le cadre du projet BAG'AGES montrent ainsi sur un site d'étude argilo-calcaire dans le Gers que l'agriculture de conservation mènerait à un plus fort stress hydrique que l'agriculture conventionnelle. Sur le site concerné, les racines parviennent moins à se développer dans les sols en agriculture de conservation (hydromorphie, sols trop compacts), limitant la réserve utile totale.

Ainsi, nous considérons que les effets positifs de l'agriculture de conservation, s'ils sont démontrés pour certains objectifs environnementaux, sont encore mal connus sur les flux et sur le stockage d'eau dans le sol. Il est donc délicat d'émettre des hypothèses sur l'impact de telles pratiques sur la demande en eau d'irrigation. De surcroît, il paraît délicat de traduire les impacts de la mise en place de l'agriculture du conservation sur l'hydrologie à l'échelle d'un bassin versant.

Pour la modélisation de la demande en eau, à condition de connaître plus précisément les impacts de la mise en place de l'agriculture de conservation, une modélisation parcimonieuse de cette dernière à l'aide de CropWat par exemple pourrait simplement passer par une augmentation de la réserve utile du sol, mais couplée à une des hypothèses pertinentes d'évolution de la courbe de Kc et de profondeur racinaire maximale.

3.1.2 Agroforesterie

L'agroforesterie (Figure X.2) est présentée par ses défenseurs comme un moyen de réduire la demande en eau des cultures. Les acteurs défendant l'utilisation des arbres pour cet objectif s'appuient généralement sur :

- l'augmentation de l'infiltration (au même titre que la mise en place d'une couverture végétale) ;
- les effets microclimatiques.

Cependant, les arbres interviennent sur de nombreux processus, certains étant au contraire défavorables au stockage d'eau dans le sol, comme le décrivent LUEDELING et al. (2016) dans leur revue de littérature :

- Compétition pour l'eau, car les arbres transpirent et contribuent à diminuer le déficit en eau du sol. Cet effet pourrait être réduit, si le sol permet aux arbres d'aller pomper en profondeur. Néanmoins, des études ont montré que les arbres consommaient préférentiellement de l'eau de surface (BROOKSBANK et al., 2011) ;
- Interception des précipitations par la canopée ;

FIGURE X.2 – Agroforesterie intraparcellaire (Source : https://leshorizons.net/agroforesterie/)

- Augmentation de l'infiltration, et donc de la rétention d'eau dans les sols notamment à la suite de pluies extrêmes ;
- Mise à disposition d'eau par remontée de nappe souterraine, exsudats racinaires (FERNÁNDEZ et al., 2008) ;
- Augmentation des précipitations à macro-échelle par humidification de l'atmosphère (ZHUANG et al., 2017) ;
- Différents facteurs influençant la demande évaporative instantanée des cultures :
  - Diminution de l'énergie lumineuse disponible pour les cultures à cause de l'ombre des arbres (MOBBS et al., 1998 ; NOORDWIJK et LUSIANA, 1999) ;
  - Diminution de la température des cultures en journée grâce à l'ombre et à la transpiration des arbres (KANZLER et al., 2019 ; MOBBS et al., 1998). Les diminutions de température observées peuvent ainsi atteindre jusqu'à plusieurs degrés Celsius. De plus, cette diminution de la température influe également sur les effets de stress thermiques ;
  - Diminution de la vitesse du vent grâce à l'effet brise-vent, permettant de réduire l'évapotranspiration, mais aussi de tamponner les diminutions de température nocturnes (et aussi en journée, mais l'effet est compensé par les facteurs décrits au point précédent).

De façon cumulative, les arbres influencent également le stade de développement des cultures, notamment par leur effet d'abaissement de température. De plus, en dehors de l'effet du stress hydrique sur les rendements, ils influencent ces derniers par la compétition lumineuse qu'ils créent. On observe ainsi des effets contradictoires, les arbres pouvant à la fois entrer en compétition pour la ressource en eau, mais pouvant également diminuer la demande évaporative des cultures ou même augmenter la ressource disponible (remontée de la nappe, augmentation de la pluviométrie). De plus, ces interactions semblent très complexes à prendre en compte, car elles s'exercent à des échelles spatiales et temporelles variées (LUEDELING et al., 2016), et sont très sensibles aux conditions climatiques, pédologiques, culturales, et même aux itinéraires techniques.

Les modèles d'agroforesterie disponibles actuellement permettent généralement de prendre en compte la compétition pour l'eau souterraine et pour la lumière, et parfois l'interception de la pluie. La compétition pour l'eau souterraine et l'interception de la pluie diminuent la ressource en eau disponible pour les cultures. La compétition pour la lumière diminue la demande en eau des cultures, mais avec pour conséquence une diminution des rendements. Globalement, dans les modèles actuels, l'agroforesterie **aura ainsi plutôt un bilan négatif pour les cultures** (LUEDELING et al., 2016). En particulier, la meilleure capacité d'infiltration, souvent mise en avant lorsqu'on encourage la plantation d'arbres pour augmenter le stockage d'eau dans les sols, est annulée par la plus forte évapotranspiration (VIAUD et al., 2005). Cette meilleure infiltration permet toutefois une lutte efficace contre les inondations par ruissellement.

Néanmoins, même sous ces hypothèses pénalisantes pour l'agroforesterie, le bilan économique global ne l'est pas forcément, puisque les arbres sont également valorisables par la production de bois et de fruits.

Les auteurs supposent ainsi que la compétition pour la ressource lumineuse et pour l'eau sont les facteurs de premier ordre résumant les interactions entre les arbres et les cultures. Les effets d'abaissements de température et de brise-vent ne sont donc généralement pas pris en compte. Ces deux derniers effets sont souvent rassemblés sous le concept d'effets micro-climatiques des arbres. Cependant, les acteurs interrogés sur la Seille, dont des agriculteurs, évoquent l'utilité des arbres pour leurs impacts microclimatiques, en réduisant la demande évaporative des cultures et en réduisant le stress thermique. Il est vraisemblable qu'en les négligeant dans une modélisation de systèmes agroforestiers les acteurs adhèrent moins aux analyses qui pourraient être réalisées. De plus, certains auteurs insistent sur l'importance de prendre en compte ces effets dans les modèles (MOBBS et al., 1998 ; KANZLER et al., 2019). Ces derniers pourraient en effet revêtir une réelle importance pour l'adaptation au changement climatique, car l'effet de rafraîchissement est d'autant plus significatif que la température est élevée.

Dans les scénarios que nous avons construits, il paraîtrait vraisemblable que les scénarios Agroécologie industrielle et Repaysannisation aient également été l'objet d'un développement de l'agroforesterie. Néanmoins, les impacts de la mise en place d'arbres n'ont pas pu être pris en compte dans notre modèle. Cela revient à considérer que l'effet des arbres sur les variables simulées (demande en eau d'irrigation, stress hydrique et/ou rendement) est mineur, les effets de compétition et de mutualisme se compensant plus ou moins. Ce choix se justifie par le fait que nous ne disposons pas de la connaissance nécessaire pour les prendre en compte.

D'autres options de modélisation parcimonieuse auraient pu être envisagées :

- Nous aurions pu utiliser un modèle déjà développé pour calibrer un modèle simplifié d'agroforesterie reprenant les formalismes de CropWat. Nous pourrions appliquer ce modèle pour représenter le bilan en eau des sols accessibles aux racines des arbres. Au cours de la thèse, nous avions envisagé deux options, qui pourraient faire l'objet de discussions et de tests supplémentaires :
  - La première consisterait à séparer la modélisation de l'évapotranspiration des arbres de celle des cultures. Néanmoins, les réservoirs de sol devraient interagir pour refléter la compétition. On pourrait alors distinguer un réservoir profond exclusivement accessible pour l'arbre d'un réservoir accessible pour l'arbre et la culture.
  - La deuxième option, plus proche encore des formalismes de CropWat, serait de globaliser l'évapotranspiration des arbres et de la culture. Il faudrait alors également ajuster les effets sur les rendements de façon à séparer les effets du stress hydrique sur la culture et sur les arbres.

  Pour les deux options, nous pourrions donc nous appuyer sur les résultats de modèles d'agroforesterie plus détaillés, tels que ceux de Yield-SAFE (WERF et al., 2007), qui demeure un modèle relativement simple, pour caler les paramètres de notre modèle simplifié.
- Une autre possibilité reprend les hypothèses de la seconde option présentée ci-dessus, mais la valeur d'ETP serait ajustée pour prendre en compte les effets microclimatiques des arbres. La prise en compte des effets microclimatiques ne pourrait alors pas s'appuyer sur des modèles d'agroforesterie existants qui les négligent. Dans le cas d'une séparation du calcul de l'évapotranspiration des cultures et des arbres, on pourrait par exemple calculer une ETP pour les cultures en prenant une hypothèse de diminution de température moyenne journalière. Nous devrions alors appuyer nos hypothèses sur des résultats trouvés dans la littérature.

3.1.3 Paillage

Le paillage (Figure X.3) consiste à couvrir le sol et donc permet d'en limiter l'évaporation. Le paillage pourrait donc se traduire par une diminution des Kc, traduisant la plus faible demande évaporative du sol. De plus, si ce paillage est organique, il permet d'enrichir le sol en matière organique lors de sa dégradation. La mobilisation d'une telle technique en grandes cultures paraît cependant difficile à mettre en œuvre, mais il aurait pu être pertinent d'émettre des hypothèses sur sa mise en place pour le scénario Repaysannisation. Néanmoins,

nous ne disposions pas de connaissances suffisantes pour émettre des hypothèses sur les impacts sur les courbes de Kc d'une telle pratique.

FIGURE X.3 – Paillage des cultures (Source : https://magazine.laruchequiditoui.fr/maraichers-sur-la-paille/)

3.2 Les solutions fondées sur la nature pour soutenir les débits d'étiage

3.2.1 La végétalisation

Comme évoqué plus haut, les acteurs interrogés ont beaucoup insisté sur les vertus de la végétalisation (arbres, herbe) pour infiltrer et retenir l'eau. Au-delà des vertus à l'échelle de la parcelle (agroforesterie et couverture végétale) qui permettraient potentiellement de limiter la demande en eau en rechargeant les sols par infiltration et en en augmentant la capacité de rétention, de telles pratiques sont également évoquées pour permettre d'augmenter les débits en périodes d'étiage, mais ne font pas consensus. En effet, les sols, qui auront infiltré davantage d'eau en hiver, pourraient permettre de davantage recharger les nappes et de stocker l'eau dans les horizons superficiels, soutenant ensuite les débits d'étiage. Cependant, si l'infiltration est bien augmentée, l'évapotranspiration peut l'être autant voire davantage par cette végétalisation. La mise en place de couverture végétale et d'arbres pourrait ainsi au contraire conduire à un appauvrissement du sol en eau, à une diminution de la recharge des nappes et à une diminution des débits (ANDRÉASSIAN, 2004 ; MEYER et al., 2018 ; VIAUD et al., 2005).

De plus, de nombreux acteurs défendent la plantation d'arbres qui permettrait, en augmentant l'évapotranspiration, d'augmenter l'humidité atmosphérique et donc les précipitations. Néanmoins, encore une fois, les connaissances sur l'impact de la végétalisation sur les précipitations ne paraissent pas suffisamment avancées pour émettre des hypothèses d'adaptation à modéliser s'appuyant sur ce levier (ANDRÉASSIAN, 2004). Par ailleurs, les circulations atmosphériques pourraient mener à ce qu'un tel impact sur les précipitations, s'il existe, ne soit pas situé au même endroit que l'évaporation supplémentaire.

3.2.2 Restauration des cours d'eau et des zones humides

Les acteurs ont également souvent évoqué la renaturation des cours d'eau, c'est-à-dire la remise de cours d'eau dans un état supposé naturel. Cette action permet de "ralentir" l'hydrologie, notamment via le reméandrage. Les acteurs ont aussi évoqué la conservation et la restauration des zones humides pour soutenir les débits d'étiage et le remplissage des nappes. La restauration des zones humides passerait notamment par la suppression du drainage agricole et le maintien ou le retour à des prairies dans les parcelles anciennement drainées. Pour d'autres acteurs, considérer que la suppression du drainage constituerait une solution d'adaptation potentielle pour soutenir les débits d'étiage ou réduire la demande en eau des cultures constituerait un non sens. Pour ces derniers, le drainage n'évacue que l'eau en excès du sol arrivant à saturation, et n'entraîne donc pas d'assèchement de ce dernier. Il paraît cependant logique que, pour un sol qui serait maintenu à saturation plutôt qu'à capacité au champ, la teneur en eau initiale lors du démarrage du cycle cultural soit plus élevée. Le drainage

entraîne par ailleurs très vraisemblablement une diminution de la recharge des nappes, l'eau étant détournée vers les rivières plutôt que percolée. Là encore, il n'est pas aisé de collecter des connaissances quantifiées sur la capacités de tels aménagements sur la recharge des nappes et la contribution aux débits d'étiage. On peut toutefois noter les travaux de thèse de Jeantet (2022), qui a étudié l'impact du changement climatique sur le drainage agricole en France avec des projections climatiques issues du jeu de données Drias 2020 (MÉTÉO-FRANCE, 2020). Il a noté, en termes de débits en sortie des réseaux de drainage, une "intensification de la période sèche, plus longue à mesure que l'on se rapprochera de 2100 et que le RCP est pessimiste. Cette intensification suggère que les cultures en place auront un accès de plus en plus limité à l'eau, spécifiquement en été. Dès lors, un déficit hydrique sera croissant sur la période estivale, de même que le potentiel besoin en irrigation [...]". L'impact du drainage sur les ressources en eau et les cultures, en contexte de changement climatique, n'a cependant pas été évalué.

4 De la nécessité d'expérimentations en amont de la modélisation

Le modèle développé ne permet pas de modéliser la complexité des processus dans une parcelle, et nécessite des données d'entrée empiriques. Des modèles plus complexes, s'ils sont plus autonomes pour anticiper l'évolution du comportement des cultures, présentent eux-mêmes de fortes incertitudes. Ils sont donc encore souvent peu capables de modéliser certaines pratiques complexes, et doivent tout de même être paramétrés pour représenter les éventuelles évolutions variétales. Ainsi, on note un fort enjeu à continuer les efforts d'expérimentations de plein champ, voire à échelle territoriale, pour mieux comprendre les processus mobilisant de nouvelles pratiques et de nouvelles variétés, potentiellement adaptées au changement climatique, et leurs conséquences sur les filières. Ce n'est qu'en aval de ce type de recherches sur l'adaptation au changement climatique que l'utilisation d'un modèle intégré agro-hydrologique pourra pertinemment évaluer ce type de stratégie d'adaptation. Le rôle de la modélisation sera alors de quantifier à quel point ce type de stratégie peut suffire à atténuer les effets du changement global sur l'hydrologie sur de nouveaux territoires, à de nouvelles échelles, et à préciser les objectifs concrets, et à anticiper les interactions avec le changement climatique futur.

Face à l'urgence de l'adaptation au changement climatique et aux débats toujours en cours qui ne permettent pas de cibler une "solution miracle", il me paraîtrait sage, à l'image des organismes multipliant les mutations face au stress [2], de multiplier les expérimentations, de capitaliser les connaissances recueillies et d'accélérer le partage de connaissances auprès des agriculteurs, gestionnaires de l'eau, acteurs des filières et consommateurs. Pour que ces expérimentations permettent de prendre en compte les interactions avec les sociétés, elles pourraient être menées à de grandes échelles, même si cela constituerait alors un risque important. Ces expérimentations paraissent particulièrement nécessaires pour mieux comprendre et quantifier l'impact des stratégies d'adaptation en particulier les moins bien comprises telles que celles fondées sur la nature (agroforesterie, etc.).

5 Circularité de la quantification des incertitudes

Face aux incertitudes du futur, il est nécessaire de prendre en compte une diversité des possibles, diversité des modèles qui permet de prendre en compte la diversité des répercutions possibles du forçage radiatif sur le climat local. Nous avons ainsi mis au point une méthodologie permettant de quantifier ces incertitudes. Néanmoins, la quantification des incertitudes dépend de la diversité des possibles que nous avons été prêts à envisager. Nous avons notamment restreint le nombre de configurations de modélisation de l'irrigation. Nous avons également contraint nos hypothèses de surfaces irriguées et de volumes disponibles irrigués par les volumes stockés dans les plans d'eau actuels sur le bassin versant de la Seille. Nous avons sélectionné un échantillon de projections climatiques représentatives d'une diversité de modèles, mais nous ne pouvons être certains que la réalité se situera bien dans cet ensemble. Ces modèles ont d'ailleurs eux-mêmes été contraints pour correspondre à des observations et à la conception de la réalité par le modélisateur. Autrement dit, les modèles sont imparfaits, et leur imperfection est d'autant plus questionnable dans le cadre de projections de long terme

2. https://www.pourlascience.fr/sd/genetique/sos-genome-reparation-et-evolution-2993.php

dans un environnement fortement perturbé. La quantification des incertitudes constitue elle-même un modèle imparfait, et la plus grande prudence doit être respectée lors de la communication de résultats. L'existence de ces incertitudes est d'ailleurs bien présente dans l'esprit des modélisateurs mettant en œuvre de telles études. Cela a notamment été relevé par Myriam Bupto lors d'un stage encadré par Sara Fernandez (UMR GESTE) et effectué dans le cadre du projet ESACC-Agro (financement méta-programme CLIMAE), auquel j'ai participé. Ainsi, via une dizaine d'entretiens de modélisateurs d'horizons divers, dont je faisais partie, BUPTO (2023) a montré que les incertitudes étaient au cœur des préoccupations des modélisateurs, et que cet état de fait ne devrait pas disparaître dans les années futures.

6 Au-delà des incertitudes : amélioration des modèles par l'exploration d'approches de modélisation très différentes

Nous n'avons pas pu aller aussi loin qu'espéré dans notre démarche multi-modèle. Il était initialement envisagé qu'une comparaison soit réalisée entre GRcrop et MAELIA sur le bassin versant de l'Aveyron sur la période historique, et pour les projections sur le bassin versant de la Seille.

A vrai dire, une partie des délais non anticipés s'explique par l'enrichissement mutuel des modélisateurs et modèles mobilisés. Les limites respectives des approches ont été soulignées par les modélisateurs, conduisant à des améliorations des deux approches via de multiples allers-retours. La modélisation intégrée simplifiée s'est ainsi fortement appuyée sur MAELIA (paramétrisation des cultures, prise en compte de la dispersion spatiale de la ressource en eau stockée).

Si la modélisation de la demande en eau par MAELIA constitue un benchmark sur le bassin versant de l'Aveyron aval, les comparaisons effectuées entre la modélisation développée et MAELIA sur les variables hydrologiques ont permis de mettre en avant des corrections nécessaires sur la modélisation des débits et sur la modélisation du remplissage des grands barrages. En effet, la complexité de MAELIA peut rendre l'identification de ces limitations difficile, étant données les interactions parfois complexes entre les différentes composantes de ce type de modèle. Au moment de l'écriture de ces lignes, des modifications sont encore en cours dans la modélisation MAELIA, notamment suite aux comparaisons effectuées entre GRcrop et MAELIA dans le cadre de la thèse. Cependant, ces travaux n'étant pas au cœur de ces travaux de thèse, ils n'ont pas été détaillés ici.

A retenir :

Les travaux de cette thèse ont permis de montrer la possibilité et l'importance de la prise en compte des influences et contraintes humaines dans les projections hydrologiques sur les bassins versants agricoles, et réciproquement. Ils montrent de plus des résultats très encourageants pour l'utilisation de la modélisation parcimonieuse développée. Néanmoins, de nombreuses simplifications pourraient bénéficier d'évaluations complémentaires, dans la modélisation et dans la construction des scénarios.

De plus, la démarche développée n'a finalement pas permis d'évaluer toutes les stratégies d'adaptation évoquées par les acteurs, notamment les solutions fondées sur la nature.

Conclusion

Avant-propos :

Il est désormais temps de conclure ces travaux de thèse. Les apports et limites des résultats ont déjà été largement abordés dans la Discussion. Cette conclusion vise donc simplement à rappeler les questions de recherche, les travaux menés pour y répondre, et les réponses apportées. Nous résumerons également les principaux apports et limites des travaux, puis nous donnerons quelques perspectives.

1 Synthèse des travaux

1.1 Questions de recherche

Face à l'urgence de l'adaptation au changement climatique, il est nécessaire de disposer d'outils pour construire et évaluer des stratégies d'adaptation concrètes au changement climatique. L'intensification des sécheresses impactera particulièrement l'agriculture. La prospective et la modélisation sont des pistes méthologiques pour construire et évaluer des stratégies d'adaptation de l'agriculture au changement climatique au regard de la ressource en eau. Au cours de cette thèse, nous avons ainsi cherché à répondre aux questions suivantes :

1. Comment modéliser l'hydrologie et l'agronomie des bassins versants agricoles de façon parcimonieuse ? Plus précisément, comment prendre en compte les **influences agricoles** dans un **modèle hydrologique conceptuel** et quel impact de la prise en compte des influences agricoles dans les projections hydrologiques en contexte de changement climatique ?
2. Quelle utilisation d'une approche intégrée **parcimonieuse** pour construire et évaluer des stratégies d'adaptation ? Quel impact de l'utilisation de méthodes simplifiées ?
3. Quelles sont les principales **sources d'incertitude** gouvernant les projections hydrologiques et agronomiques en contexte de changement climatique ?

1.2 Travaux menés pour y répondre

Les travaux répondant à la première question de recherche ont permis de proposer, de développer et d'évaluer une approche de modélisation intégrée, c'est-à-dire prenant en compte les interactions entre compartiments physiques et anthropiques influencés par l'adaptation de l'agriculture au changement climatique au regard de la ressource en eau, à l'aide du cas d'étude du bassin versant de l'Aveyron aval. Ce secteur est irrigué et est déjà sujet à des tensions sur la ressource en eau. L'approche développé, qui s'appuie sur une modélisation simple de la demande en eau, grâce au modèle CropWat, a montré son potentiel par rapport à une approche établie plus complexe, MAELIA. CropWat repose sur le calcul d'une demande évaporative des cultures à l'aide d'une courbe de coefficient cultural empirique. MAELIA repose sur un modèle des cultures plus complexe, mais surtout sur une modélisation explicite du comportement des agriculteurs. L'approche développée dans

cette thèse peut néanmoins présenter de fortes incertitudes liées à la modélisation des règles de déclenchement et de dosage de l'irrigation. Nous avons ensuite fait dialoguer cette modélisation de la demande en eau avec le modèle GR5J semi-distribué à l'aide du package R airGRiwrm. Le modèle intégré ainsi développé permet notamment de limiter les prélèvements en fonction de la ressource en eau disponible et de répercuter cette limitation sur l'évapotranspiration des cultures. Il permet également de prendre en compte l'eau stockée dans les retenues, et de modéliser plus spécifiquement certains réservoirs au regard d'objectifs de gestion tels que le soutien d'étiage. Le modèle développé a été évalué au regard des débits observés, avec un effort particulier pour évaluer la bonne représentation d'indicateurs d'étiage. La modélisation des autres compartiments modélisés, comme des volumes stockés dans les retenues, a de plus été évaluée de façon plus qualitative.

Afin de répondre aux deux autres questions de recherche, nous avons ensuite utilisé la modélisation développée dans le cadre d'un exercice prospectif sur le bassin versant de la Seille, affluent de la Moselle. Il s'agit ici d'un bassin versant non irrigué, sur lequel la gestion quantitative de l'eau commence à peine à soulever des inquiétudes. L'hydrologie du bassin versant est fortement influencée par la gestion de l'étang de Lindre, situé en amont du bassin et ayant une utilisation piscicole à l'heure actuelle. De même que pour le bassin versant de l'Aveyron aval, le modèle intégré présenté plus haut a ainsi été implémenté et évalué sur le bassin versant de la Seille, notamment au regard des débits observés. L'exercice prospectif a consisté à développer et mettre en œuvre une méthode d'enquête s'appuyant sur des entretiens afin de construire des scénarios contrastés de l'évolution de l'agriculture et de la gestion de l'eau sur le bassin versant de la Seille. Ces scénarios : "Agroécologie industrielle", "Intensification", "Repaysannisation", ont permis de prendre en compte les incertitudes liées à ces évolutions sociétales. Ils se distinguent notamment par l'évolution des assolements, des surfaces irriguées et du recours aux volumes d'eau mobilisables sur le bassin versant. Nous avons ensuite traduit les scénarios construits en données d'entrée de la modélisation et effectué des simulations avec des données d'entrée climatiques projetées, issues du projet Explore2. Ainsi, ces travaux ont permis de développer une méthode de construction de scénarios pouvant permettre d'intégrer et d'évaluer des stratégies d'adaptation, afin de répondre à la deuxième question de recherche. De plus, la méthode a mobilisé plusieurs scénarios d'évolution de l'agriculture et de la gestion de l'eau, plusieurs paramétrisations de la demande en eau, plusieurs RCP, plusieurs modèles climatiques, permettant de prendre en compte les incertitudes liées à la modélisation et aux évolutions sociétales et donc de répondre à la troisième question de recherche.

2 Éléments de réponse aux questions de recherche

2.1 Réponse à la première question de recherche

Comment modéliser l'hydrologie et l'agronomie des bassins versants agricoles de façon parcimonieuse ? Plus précisément, comment prendre en compte les ***influences agricoles*** *dans un* ***modèle hydrologique conceptuel*** *et quel impact de la prise en compte des influences agricoles dans les projections hydrologiques en contexte de changement climatique ?*

Au regard de nos résultats, nous pensons avoir proposé un cadre de modélisation intégrée performant, généralisable, rigoureux et parcimonieux. L'étude des différentes options de modélisation envisageables nous a conduits à choisir :

- une modélisation hydrologique conceptuelle semi-distribuée ;
- un modèle de cultures semi-empirique ;
- une modélisation du remplissage des retenues par fraction du débit modélisé sur une maille hydrologique englobant les retenues ;
- un décalage de résolution spatiale entre mailles de la modélisation hydrologique, relativement larges, par rapport à la résolution spatiale de la modélisation agronomique et de la disponibilité de la ressource en eau stockée.

Les simulations des débits, des volumes stockés dans les retenues et de l'irrigation sur le bassin versant aval de l'Aveyron nous paraissent ainsi satisfaisantes et informatives. Les résultats de la modélisation sur le bassin

versant de la Seille ne permettent pas de questionner la performance de la prise en compte de l'irrigation, cette dernière n'étant pas présente sur le bassin versant. Néanmoins, la prise en compte des autres influences, notamment la gestion de l'étang de Lindre, a permis d'améliorer les simulations. Ainsi, nous pensons qu'un compromis, voire un optimum, peut être trouvé entre modélisation parcimonieuse et modélisation explicite pour disposer d'une modélisation simple mais en mesure de tester des scénarios d'adaptation concrets. Ce compromis repose à la fois sur les choix de modélisation des processus, plus ou moins explicite, et sur la résolution spatiale, plus ou moins fine selon les compartiments modélisés. Il nous paraît ainsi possible, voire souhaitable, de ne pas chercher à modéliser explicitement tous les processus anthropiques et naturels sur un bassin versant pour disposer d'un outil mobilisable pour tester des stratégies d'adaptation à échelle locale.

2.2 Réponse à la deuxième question de recherche

*Quelle utilisation d'une approche intégrée **parcimonieuse** pour construire et évaluer des stratégies d'adaptation ? Quel impact de l'utilisation de méthodes simplifiées ? Quelles sont les principales **sources d'incertitude** gouvernant les projections hydrologiques et agronomiques en contexte de changement climatique ?*

En plus du modèle développé, nous avons mis au point une méthode de construction de scénarios s'appuyant sur des entretiens. Cette dernière permet de construire des scénarios contrastés d'évolution de l'agriculture et de la gestion de l'eau sur d'autres territoires. Les scénarios ont ensuite pu être traduits en données d'entrée de la modélisation au regard des assolements et des volumes d'irrigation mobilisables notamment. Les simulations effectuées avec notre modèle ont ainsi permis de quantifier les impacts des scénarios.

Nous pensons ainsi que notre modélisation est pertinente pour être utilisée dans le cadre d'évaluation de scénarios d'adaptation de l'agriculture au regard de la ressource en eau, en particulier pour évaluer l'équilibre hydrique suite à des changements de cultures, l'évolution de surfaces irriguées ou à l'implémentation/mobilisation de retenues et de cours d'eau. Un tel modèle permet notamment de tester de nombreux scénarios, avec de nombreux jeux de données d'entrée climatiques.

Nous pensons donc que l'approche intégrée simplifiée est bien mobilisable pour construire et évaluer des stratégies d'adaptation de l'agriculture au regard de la ressource en eau. Néanmoins, une évaluation ultérieure par les acteurs des scénarios et des résultats de ces derniers sera nécessaire pour s'assurer de la pertinence des scénarios construits pour les acteurs.

2.3 Réponse à la troisième question de recherche

*Quelles sont les principales **sources d'incertitude** gouvernant les projections hydrologiques et agronomiques en contexte de changement climatique ?*

Les travaux de thèse ont permis de mettre en avant, pour le bassin versant de la Seille, une hétérogénéité de l'impact des sources de variabilité selon les indicateurs simulés. Ainsi, l'effet des règles de déclenchement de l'irrigation et des scénarios était éventuellement très fort pour les indicateurs d'irrigation et de satisfaction de l'irrigation. Néanmoins, la variabilité liée à la projection climatique et à la mise en place ou non de soutien d'étiage paraît prédominante pour les indicateurs d'étiage. Cependant, les scénarios formulés ont supposé que les prélèvements étaient exclusivement effectués dans de l'eau stockée, limitant probablement l'impact de l'irrigation sur les étiages. Ces résultats sont cohérents avec ceux de Thibault Lemaître (2023), qui a mis en évidence une influence faible des variations des prélèvements sur l'intensité des étiages par rapport à l'effet des projections climatiques sur le bassin versant de la Moselle. Les travaux sur la Meuse dans le cadre du projet CHIMERE 21 avaient également mis en évidence de fortes incertitudes liées au choix du modèle climatique (THIREL et al., 2021) sur un bassin versant voisin.

Ainsi, le secteur semble être particulièrement soumis aux incertitudes des modèles climatiques. Cela traduit l'incertitude de la concrétisation des impacts du réchauffement climatique, pour un niveau donné de forçage radiatif, dans le secteur entre le Sud et le Nord de l'Europe, notamment en termes de précipitations.

3 Apports de la thèse

Les travaux menés ont permis de développer une approche originale de modélisation. Elle est à la fois parcimonieuse, reposant notamment sur l'utilisation d'un modèle hydrologique conceptuel, mais a mobilisé des modèles plus explicites pour pouvoir prendre en compte les influences humaines et modéliser des scénarios concrets et contrastés. Notre approche se distingue ainsi à la fois des approches modélisant très explicitement les comportements humaines, telles que MAELIA (THEROND et al., 2014), ou reposant sur des modèles hydrologiques à base physique discrétisés ou organisés en HRU, telles qu'ORCHIDEE (ARBOLEDA-OBANDO, 2023) ou J2000 (BRANGER et al., 2016). Notre approche se distingue également des modèles n'effectuant qu'une comptabilité de l'eau, tels que WEAP (SIEBER et PURKEY, 2015), car elle est capable de modéliser de façon performante les débits journaliers. Elle se distingue également de travaux déjà menés avec des modèles GR, tels que les travaux de thèse de Lila Collet (COLLET, 2013), qui n'avaient pas comporté de modélisation journalière, et n'avaient pas modélisé à forte résolution spatiale les interactions entre prélèvements et ressource, ni effectué autant de projections contrastées de scénarios et du climat. De plus, nous avons utilisé un outil, airGRiwrm (DORCHIES et al., 2021), plutôt conçu pour exécuter des simulations relativement simples de gestion, dans lequel nous avons intégré une modélisation de cultures. Nous pensons qu'une telle modélisation est pertinente, car elle permet de simplifier l'exercice de modélisation et ainsi de rendre l'approche mobilisable pour de nombreux utilisateurs, tout en intégrant une modélisation nécessairement explicite de certains processus pour pouvoir évaluer des scénarios agricoles et de gestion de l'eau.

De plus, nous avons développé un cadre intégrant un exercice prospectif et la modélisation des scénarios obtenus. Notre approche est originale par son caractère hybride, s'appuyant sur des entretiens avec les acteurs, mais finalisant et traduisant les scénarios d'entrée de façon non participative. Une telle approche a notamment permis de mettre au point ces scénarios dans le temps de la thèse.

4 Principales limites

Les principales limites des travaux de thèse sont la cause directe du parti pris de développer une approche simplifiée. La construction des scénarios et traduction des scénarios en données d'entrée a ainsi été réalisée a posteriori des entretiens, à partir des informations recueillies au cours de ces derniers. Ainsi, les scénarios n'ont pas été construits avec les acteurs, et il est donc possible que ces derniers ne soient pas tout à fait réalistes ni pertinents par rapport à des méthodes totalement participatives. De plus, nous pensons que la méthode de prospective développée a beaucoup mis l'accent sur la prise en compte des incertitudes déterminant l'évolution de l'agriculture et de la gestion de l'eau sur le bassin versant de la Seille, et moins sur l'identification de stratégies d'adaptation concrètes et quantifiées directement avec les acteurs. De plus, la thématique de la gestion quantitative de l'eau et de l'adaptation de l'agriculture au changement climatique au regard de la ressource en eau était relativement nouvelle sur le bassin versant de la Seille. Ainsi, les acteurs interrogés n'avaient que peu de stratégies concrètes à proposer sur le bassin versant de la Seille.

Par ailleurs, le modèle développé n'est pas en mesure d'évaluer toutes les stratégies d'adaptation évoquées par les acteurs, dont les solutions fondées sur la nature. Par exemple, le modèle hydrologique choisi ne représente pas les nappes, qui peuvent servir de ressource pour l'irrigation et dont les impacts sur les débits dans un contexte de changement climatique pourraient nécessiter d'être étudiés. Enfin, le modèle développé ne consiste qu'en un dialogue ressource-demande, et il pourrait être intéressant de mieux coupler la fonction de production de la modélisation hydrologique avec la modélisation des cultures.

Enfin, il serait nécessaire d'introduire d'autres modèles d'irrigation et hydrologique pour pouvoir prendre également en compte les incertitudes liées à ces compartiments modélisés dans l'étude des incertitudes.

5 Perspectives

Les travaux de thèse ont mis en avant d'intéressants questionnements et pistes de recherche. Il paraît nécessaire d'informer les décideurs sur les stratégies d'adaptation fondées sur la nature, qui sont au cœur des préoccupations actuelles. Il est ainsi nécessaire de mener des expérimentations et de proposer des méthodes pour les prendre en compte dans des modèles, éventuellement parcimonieux, afin de quantifier l'impact de telles stratégies.

Par ailleurs, il paraîtrait utile de poursuivre la démarche de comparaison du modèle développé avec MAELIA, afin de disposer d'un recul suffisant sur le modèle développé et de mieux connaître les incertitudes liées au choix de modélisation intégrée. D'autres approches intégrées pourraient être utilisées pour effectuer cette comparaison.

Les scénarios et conclusions obtenues devraient prochainement être présentées aux acteurs du bassin versant de la Seille, ce qui permettra d'évaluer l'intérêt des acteurs pour les scénarios construits et les résultats de modélisation. Cela pourrait conduire à ajuster les scénarios et les hypothèses de modélisation définies.

De plus, il paraîtrait intéressant de remobiliser les démarches développées : prospective, modélisation sur la période historique, modélisation de projections, sur de nouveaux territoires, pour mieux questionner leur généralisabilité et la généralisabilité des conclusions partagées dans ce manuscrit.

Liste des acronymes, abréviations, et dénominations

Nous listons et détaillons dans cette section les acronymes, abréviations, dénominations utilisées dans le manuscrit de thèse. Nous ne définissons cependant pas les concepts auxquels ils font référence, ces définitions ayant déjà été données dans le manuscrit, ou bien n'étant a priori pas indispensables à la compréhension des travaux de thèse. Nous faisons cependant apparaître la page de la première occurrence du terme, afin de permettre aux lecteurs de se référer à une éventuelle définition ou mise en contexte du terme.

ADAMONT :	Projet "Impacts du changement climatique et **ADA**ptation en territoire de **MONT**agne" à l'origine de la méthode de descente d'échelle et de correction de biais des projections climatiques du même nom	36
ADEME :	**A**gence De l'**E**nvironnement et de la **M**aîtrise de l'**É**nergie	77
AELB :	**A**gence de l'**E**au **L**oire-**B**retagne	6
AEP :	**A**limentation en **E**au **P**otable	19
AERM :	**A**gence de l'**E**au **R**hin-**M**euse	51
AFTERRES :	Scénario **A**griculture **A**limentation **F**orêt **Terre** développé par l'association Solagro	5
airGR :	Package R permettant d'utiliser les modèles du **G**énie **R**ural (GR)	143
airGRiwrm :	Package R dérivé de airGR avec le suffixe : **i**ntegrated **w**ater **r**esources **m**anagement.	31
AISH :	**A**ssociation **I**nternationale des **S**ciences **H**ydrologiques	28
AMAP :	**A**ssociation pour le **M**aintien de l'**A**griculture **P**aysanne	85
AqYield :	Modèle de cultures dont le nom est issu de l'association de **Aq**ua (eau) et **Yield** (Rendement)	40
AR5 :	5th **A**ssessment **R**eport : 5e rapport du GIEC	34
AR6 :	6th **A**ssessment **R**eport : 6e rapport du GIEC	35
ARS :	**A**gence **R**égionale de **S**anté	90
ASA :	**A**ssociation **S**yndicale **A**utorisée	102
AWZ :	**A**vailable **W**ater **Z**one	145
AZI :	**A**tlas des **Z**ones **I**nondables	81
BD CARTHAGE :	**B**ase de **D**onnées sur la **CAR**tographie **TH**ématique des **AG**ences de l'eau et du ministère chargé de l'**E**nvironnement	57

BD TOPO :	**B**ase de **D**onnées **TOPO**graphique	60
BNPE :	**B**anque **N**ationale des **P**rélèvements quantitatifs en **E**au	19
BRGM :	**B**ureau des **R**echerches **G**éologiques et **M**inières	62
BV :	**B**assin **V**ersant	15
BVe :	**B**assin **V**ersant **é**lémentaire	46
CC :	**C**apacité au **C**hamp	
CCS :	**C**ommunauté de **C**ommunes du **S**aulnois	92
CEQUEAU :	Modèle du **Ce**ntre **QU**ébecois sciences de l'**EAU**. Le centre est devenu le centre Eau Terre Environnement avec la fusion avec d'autres structures.	38
CGAAER :	**C**onseil **G**énéral de l'**A**limentation, de l'**A**griculture et des **E**spaces **R**uraux	4
CGEDD :	**C**onseil **G**énéral de l'**E**nvironnement et du **D**éveloppement **D**urable, devenu l'IGEDD (Inspection Générale de l'Environnement et du Développement Durable) le 1er septembre 2022	5
CLC :	**C**orine **L**and **C**over	65
CLIMAE :		**??**
CLIMATOR :	Projet sur les impacts du changement climatique sur l'agriculture	23
CMIP5 :	**C**oupled **M**odel **I**ntercomparison **P**roject phase **5**	34
CNRS :	**C**entre **N**ational de la **R**echerche **S**cientifique	12
CO_2 :	Dioxyde de carbone	14
CONT :	Eau **CONT**inentale (de surface)	66
COVID :	**Co**rona **vi**rus **d**isease	4
CropWat :	Modèle de la FAO dont le nom est issu de l'association de **Crop** (culture) et **Wat**er (eau)	40
DA :	**D**ébit d'**A**lerte	158
DAR :	**D**ébit d'**A**lerte **R**enforcée	158
DCR :	**D**ébit de **C**rise **R**enforcée	158
DDT :	**D**irection **D**épartementale des **T**erritoires	22
DEPHY :	**D**émonstration, **E**xpérimentation et production de références sur les systèmes économes en **PHY**tosanitaires	89
DREAL :	**D**irection **R**égionale de l'**E**nvironnement, de l'**A**ménagement et du **L**ogement	22
DOE :	**D**ébit **O**bjectif d'**É**tiage	158
DRAAF :	**D**irection **R**égionale de l'**A**limentation, de l'**A**griculture et de la **F**orêt	77
DRIAS 2020 :	**D**onner accès aux scénarios climatiques **R**égionalisés français pour l'**I**mpact et l'**A**daptation de nos **S**ociétés et environnements	3
Ecozept :	Bureau d'étude	83
EGalim :	Loi pour l'équilibre des relations commerciales dans le secteur agricole et une alimentation saine et durable, faisant suite aux **E**tats **G**énéraux de l'**alim**entation	92

ENE :	Eau pour la production d'**ENE**rgie	71
EPAGE :	**E**tablissement **P**ublic d'**A**ménagement et de **G**estion de l'**E**au	22
EPCI :	**E**tablissement **P**ublic de **C**oopération **I**ntercommunale	22
EPTB :	**E**tablissement **P**ublic **T**erritorial de **B**assin	22
Eq-CO_2 :	**Eq**uivalent CO_2	34
ESACC-Agro :		**??**
ET :	**É**vapo**T**ranspiration	8
ETC :	**É**vapo**T**ranspiration **C**ulturale	40
ETP :	**É**vapo**T**ranspiration **P**otentielle	40
ETR :	**É**vapo**T**ranspiration **R**éelle	40
Euro-CORDEX :	**Euro**pean branch of the international **Co**ordinated **R**egional Climate **D**ownscaling **Ex**periment initiative	36
Explore 2070 :	Projet de projections hydrologiques en France métropolitaine	5
Explore2 :	Nouvelle version d'Explore 2070	34
FAO :	**F**ood and **A**griculture **O**rganization	113
FP :	**F**utur **P**roche	23
FL :	**F**utur **L**ointain	23
GCM :	**G**eneral **C**irculation **M**odel ou **G**lobal **C**limate **M**odel	36
GEMAPI :	**G**estion de l'**E**au et des **M**ilieux **A**quatiques et **P**révention des **I**nondations	90
GES :	**G**az à **E**ffet de **S**erre	23
GIEC :	**G**roupe d'experts **I**ntergourvernemental sur l'**E**volution du **C**limat (IPCC en anglais)	34
GR :	Modèles hydrologiques du **G**énie **R**ural	31
GR4J :	Modèle hydrologique du **G**énie **R**ural **J**ournalier à **4** paramètres	38
GR5J :	Modèle hydrologique du **G**énie **R**ural **J**ournalier à **5** paramètres	37
GRcrop :	Modèle agro-hydrologique développé au cours de la thèse, nom formé à partir de **GR** et du suffixe **crop**	141
GRSD :	Modèle hydrologique du **G**énie **R**ural **S**emi-**D**istribué	38
HMUC :	Etude **H**ydrologie/**M**ilieux/**U**sages/**C**limat	6
HRU :	**H**ydrological **R**esponse **U**nit	38
HVE :	Label **H**aute **V**aleur **E**nvironnementale	88
IFT :	**I**ndicateur de **F**réquence de **T**raitements phytosanitaires	90
IND :	Eau pour la production **IND**ustrielle	66
INRAE :	**I**nstitut **N**ational de **R**echerche pour l'**A**griculture, l'alimentation et l'**E**nvironnement	6
IPCC :	**I**ntergovernemental **P**anel on **C**limate **C**hange	3
IRR :	**IRR**igation	66

J2000 :	Modèle hydrologique	31
J.C. :	**J**ésus-**C**hrist	15
KGE :	**K**ling-**G**upta **E**fficiency	155
LACCAVE :	Projet **L**ong term **A**daptation to **C**limate **C**h**A**nge in **V**iticulture and **E**nology	94
LAE :	**L**aboratoire **A**gronomie et **E**nvironnement (INRAE Colmar)	
LIFE :	Programme **L'I**nstrument **F**inancier pour l'**E**nvironnement	86
LIFE Biodiv'Est :	Projet **LIFE Biodiv**ersité **Est**	94
LIFE ARTISAN :	Projet **LIFE A**ccroître la **R**ésilience des **T**erritoires aux changements climatiques par l'**I**ncitation aux **S**olutions d'**A**daptation fondées sur la **N**ature	86
LORCA :	Coopérative **LOR**raine **C**éréales **A**pprovisionnement	77
MABIA :	Modèle **MA**îtrise des **B**esoins d'**I**rrigation en **A**griculture, implémenté dans WEAP	40
MAELIA :	**M**odelling of socio-**A**gro-**E**cological system for **L**andscape **I**ntegrated **A**ssessment	31
MAPTAM :	Loi de **M**odernisation de l'**A**ction **P**ublique **T**erritoriale et d'**A**ffirmation des **M**étropoles	91
MEDAD :	**M**inistère de l'**E**cologie, du **D**éveloppement et de l'**A**ménagement **D**urables. Devenu le ministère de la Transition écologique (MTE)	39
MEDDTL :	**M**inistère de l'**E**cologie, du **D**éveloppement **D**urable, des **T**ransports et du **L**ogement. Devenu le ministère de la Transition écologique (MTE)	4
MHYDAS-small-reservoirs :	**M**odélisation **HY**drologique **D**istribuée des **A**groSytèmes avec modélisation des petites retenues	31
MISEN :	**M**ission **I**nter-**S**ervices de l'**E**au et de la **N**ature	81
MODIC :	**MO**dèle de **D**emande en eau d'**I**rrigation des **C**ultures	40
MODIC_CF :	MODIC avec **C**oefficients culturaux pré**F**ixés et donc sans prise en compte de l'impact de la température sur la phénologie des cultures	40
MODIC_DJ :	MODIC avec **D**egrés-**J**ours, et donc avec prise en compte de température sur la phénologie des cultures	40
MTE :	**M**inistère de la **T**ransition **E**cologique	4
NOTRe :	Loi portant sur la **N**ouvelle **O**rganisation **T**erritoriale de la **Ré**publique	91
OAD :		**??**
OFB :	**O**ffice **F**rançais de la **B**iodiversité	6
ONERC :	**O**bservatoire **N**ational sur les **E**ffets du **R**échauffement **C**limatique	4
ORCHIDEE :	Modèle **OR**ganising **C**arbon and **H**ydrology **I**n **D**ynamic **E**cosyst**E**ms	31
OUGC :	**O**rganismes **U**niques de **G**estion **C**ollective	39
PAC :	**P**olitique **A**gricole **C**ommune	58
PAOT :	**P**lan d'**A**ction **O**pérationnel **T**erritorialisé	90
PARCEL :	Outil **P**our une **A**limentation **R**ésiliente, **C**itoyenne **E**t **L**ocale	104
PAT :	**P**rojet **A**limentaire **T**erritorial	93

PF :	**P**oint de **F**létrissement	42
PGM :	**P**lant **G**rowth **M**odel, implémenté dans WEAP	40
PLUi :	**P**lan **L**ocal d'**U**rbanisme **i**ntercommunal	22
PNACC :	**P**lan **N**ational d'**A**daptation au **C**hangement **C**limatique	4
PNACC2 :	**2**e **P**lan **N**ational d'**A**daptation au **C**hangement **C**limatique	5
PNRL :	**P**arc **N**aturel **R**égional de **L**orraine	83
ppm :	**p**arties **p**ar **m**illion	205
PTGE :	**P**rojet de **T**erritoire pour la **G**estion de l'**E**au	6
QMNA :	Débit (**Q**) **M**ensuel mi**N**imal **A**nnuel	164
QMNA5 :	**QMNA** de période de retour **5** ans	163
RAMSAR :	Convention du nom de la ville de **Ramsar** dans laquelle elle été écrite	84
RAND corporation :	Think tank **R**esearch **AN**d **D**eveloppement corporation	32
RAW :	**R**eadily **A**vailable **W**ater (anglais pour RFU)	42
RCM :	**R**egional **C**limate **M**odel	36
RCP :	**R**epresentative **C**oncentration **P**athway	23
R^2D^2 :	Projet **R**isque, **R**essource en eau et gestion **D**urable de la **D**urance	5
RFU :	**R**éserve **F**acilement **U**tilisable	42
RPG :	**R**egistre **P**arcellaire **G**raphique	58
RU :	**R**éserve **U**tile	42
SAFER :	**S**ociétés d'**A**ménagement **F**oncier et d'**E**tablissement **R**ural	98
SAGE :	**S**chéma d'**A**ménagement et de **G**estion des **E**aux	21
SAR :	**S**odium **A**dsorption **R**atio	307
SAU :	**S**urface **A**gricole **U**tile	16
SBGR :	**S**ous-**B**assin **GR**	145
SCoT :	**S**chéma de **Co**hérence **T**erritoriale	22
SCoTAM :	**SCoT** de l'**A**gglomération **M**essine	77
SDAGE :	**S**chéma **D**irecteur d'**A**ménagement et de **G**estion des **E**aux	21
SECHIBA :	**S**chématisation des **EC**hanges **H**ydriques à l'**I**nterface entre la **B**iosphère et l'**A**tmosphère, implémenté dans ORCHIDEE	40
SIAHS :	**S**yndicat **I**ntercommunal d'**A**ménagement **H**ydraulique de la **S**eille	84
SiSPAT :	**Si**mple **S**oil **P**lant **AT**mosphere Model	40
SOLAGRO :	Association ayant produit le scénario AFTERRES	5
SOUT :	Eau **SOUT**erraine	66
SRADDET :	**S**chéma **R**égional d'**A**ménagement, de **D**éveloppement **D**urable et d'**É**galité des **T**erritoires	21
SSP :	**S**hared **S**ocioeconomic **P**athways	35

SWAT :	**S**oil and **W**ater **A**ssessment **T**ool	31
BD TOPAGE :	Fusion entre BD **TOP**O et BD CARTH**AGE**	81
TYFA :	Scénario **T**en **Y**ears **F**or **A**groecology in Europe	5
UM :	**U**nité de **M**odélisation	43
UPH :	**U**nsolved **P**roblems in **H**ydrology	28
USDA :	**U**nited **S**tates **D**epartment of **A**griculture	198
USGS :	**U**nited **S**tates **G**eological **S**urvey	10
VCN3 :	**V**olume **C**onsécutif mi**N**imal sur **3** jours	21
WEAP :	**W**ater **E**valuation **A**nd **P**lanning	31
WWF :	**W**orld **W**ildlife **F**und	42
ZICO :	**Z**ones **I**mportantes pour la **C**onservation des **O**iseaux	84
ZNIEFF :	**Z**one **N**aturelle d'**I**ntérêt **É**cologique, **F**aunistique et **F**loristique	84

Bibliographie

ABBOTT, B. W., K. BISHOP, J. P. ZARNETSKE, C. MINAUDO, F. S. CHAPIN, S. KRAUSE, D. M. HANNAH, L. CONNER, D. ELLISON, S. E. GODSEY, S. PLONT, J. MARÇAIS, T. KOLBE, A. HUEBNER, R. J. FREI, T. HAMPTON, S. GU, M. BUHMAN, S. SARA SAYEDI, O. URSACHE, M. CHAPIN, K. D. HENDERSON et G. PINAY (2019). "Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions". In : *Nature Geoscience* 12.7, p. 533-540. DOI : 10.1038/s41561-019-0374-y.

ABRAHÃO, T. (2022). "Modélisation hydrologique prenant en compte la gestion pour l'évaluation de la vulnérabilité et de l'adaptation au changement climatique sur le bassin versant de la Seille". Mém. de mast. Grenoble : École nationale supérieure de l'énergie, l'eau et l'environnement. 33 p. URL : https://webgr.inrae.fr/wp-content/uploads/2022/11/msreport_AbrahaoThais_FR.pdf.

AEAG (2014). *Garonne 2050 - Etude prospective sur les besoins et les ressources en eau, à l'échelle du bassin de la Garonne - Rapport final*. Rapp. tech. Agence de l'eau Adour-Garonne. 68 p. URL : https://www.eaufrance.fr/node/6632.

AELB (2022). *Analyse Hydrologie - Milieux - Usages - Climat (HMUC). Guide et recommandations méthodologiques*. Rapp. tech. Agence de l'eau Loire-Bretagne. 64 p. URL : https://www.gesteau.fr/sites/default/files/gesteau/content_files/document/Guide%20HMUC_VF4.pdf.

AGRESTE (2010). *Recensement général agricole*.

AGRESTE et FRANCEAGRIMER (2022). *Synthèses conjoncturelles - La consommation de viande en France en 2021*. Rapp. tech. 394. Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire. 9 p. URL : https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/SynCsm22394/consyn394202207-ConsoViande.pdf.

AINSWORTH, E. A., A. D. B. LEAKEY, D. R. ORT et S. P. LONG (2008). "FACE-ing the facts: inconsistencies and interdependence among field, chamber and modeling studies of elevated [CO2] impacts on crop yield and food supply". In : *New Phytologist* 179.1, p. 5-9. DOI : 10.1111/j.1469-8137.2008.02500.x.

ALLAIN, S. et G. PLUMECOCQ (2019). "Résoudre les déséquilibres en eau des territoires agricoles : l'efficacité et l'acceptabilité sociale de quatre scénarios à l'épreuve d'un cas d'étude". In : *Sciences Eaux & Territoires - Article hors série* 56, p. 1-8. DOI : 10.14758/SET-REVUE.2019.hs.05.

ALLEN, R. G., L. S. PEREIRA, D. RAES et M. SMITH (1998). *FAO Irrigation and drainage paper No. 56*. Rapp. tech. Rome : Food et Agriculture Organization of the United Nations. 333 p. URL : https://www.fao.org/3/X0490E/x0490e00.htm.

ALLEN JR., L. H. (1990). "Plant Responses to Rising Carbon Dioxide and Potential Interactions with Air Pollutants". In : *Journal of Environmental Quality* 19.1, p. 15-34. DOI : 10.2134/jeq1990.00472425001900010002x.

ANDRÉASSIAN, V., J. MARGAT, G. THIREL et P. HUBERT (2015). "What part of natural flow can be considered a "water resource"?" In : *Proceedings of IAHS*. T. 366. IAHS 2014. Paris, p. 86-92. DOI : 10.5194/piahs-366-86-2015. URL : https://piahs.copernicus.org/articles/366/86/2015/piahs-366-86-2015.html.

ANDRÉASSIAN, V. (2004). "Waters and forests: from historical controversy to scientific debate". In : *Journal of Hydrology* 291.1-2, p. 1-27. DOI : 10.1016/j.jhydrol.2003.12.015.

ARBOLEDA-OBANDO, P. F. (2023). “Feedback from groundwater and irrigation on past and future climate simulated by the IPSL climate model”. Thèse de doct. Paris : Sorbonne Université. 220 p. URL : https://theses.hal.science/tel-04079831.

ARTELIA (2015). *Organisme unique des sous-bassins Aveyron et Lemboulas - Demande d’autorisation unique pluriannuelle - Rapport*. Rapp. tech. Artelia. 282 p. URL : https://www.lot.gouv.fr/IMG/pdf/docu_20151129_ougc82_aup-v6part1.pdf.

ASPAR, J. (2019). “Pratiques et systèmes agricoles résilients en condition de sécheresse”. Mém. de mast. AgroParisTech. 66 p. URL : https://www.eau-seine-normandie.fr/sites/public_file/inline-files/Rapport-final-Pratiques-et-systemes-agricoles-resilients-en-conditions-de-secheresse.pdf.

BAG’AGES (2021). *BAG’AGES - Bassin Adour Garonne : quelles performances des pratiques AGroécologiquES ? Synthèse finale des travaux du Groupe de Tâches 1 : Pratiques agroécologiques et impacts sur la gestion quantitative et qualitative de l’eau à l’échelle de la parcelle agricole : Caractérisation des processus par expérimentations au champ et modélisation 2016-2021*. Rapp. tech. INRAE. 44 p. URL : https://rmt-agroforesteries.fr/wp-content/uploads/documents/cr-final-gt1_bagages.pdf.

BANAS, D. (2001). “Flux de matière en étangs piscicoles extensifs: Rétention, Sédimentation, Exportation.” Thèse de doct. Metz : Université de Metz. 262 p. URL : http://docnum.univ-lorraine.fr/public/UPV-M/Theses/2001/Banas.Damien.SMZ0130.pdf.

BARATGIN, L., J. POLCHER, P. QUIRION et P. DUMAS (2023). *Simulating French hydropower operations in a land surface model*. Poster. EGU 2023. Vienne. DOI : 10.5194/egusphere-egu23-3396.

BLÖSCHL, G. et al. (2019). “Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) – a community perspective”. In : *Hydrological Sciences Journal* 64.10, p. 1141-1158. DOI : 10.1080/02626667.2019.1620507.

BNPE (2023). *Banque Nationale des Prélèvements en Eau*.

BOURAS, E., L. JARLAN, S. KHABBA, S. ER-RAKI, A. DEZETTER, F. SGHIR et Y. TRAMBLAY (2019). “Assessing the impact of global climate changes on irrigated wheat yields and water requirements in a semi-arid environment of Morocco”. In : *Sci Rep* 9.19142, p. 1-14. DOI : 10.1038/s41598-019-55251-2.

BOURGIN, F. (2014). “Comment quantifier l’incertitude prédictive en modélisation hydrologique?: Travail exploratoire sur un grand échantillon de bassins versants”. Thèse de doct. Paris : AgroParisTech. 231 p. URL : https://pastel.hal.science/tel-01130084v2/document.

BOÉ, J. (2007). “Changement global et cycle hydrologique: Une étude de régionalisation sur la France”. Physique du Climat. Toulouse, France : Université Toulouse III - Paul Sabatier. 278 p. URL : http://thesesups.ups-tlse.fr/227/1/Boe_Julien.pdf.

BRANGER, F., I. GOUTTEVIN, F. TILMANT, T. CIPRIANI, C. BARACHET, M. MONTGINOUL, C. LE GROS, E. SAUQUET, I. BRAUD et E. LEBLOIS (2016). *Modélisation hydrologique distribuée du Rhône - Rapport final*. Rapp. tech. INRAE. 118 p. URL : https://hal.inrae.fr/hal-02605058/file/pub00051555.pdf.

BRAUD, I., A. C. DANTAS-ANTONINO, M. VAUCLIN, J. L. THONY et P. RUELLE (1995). “A simple soil-plant-atmosphere transfer model (SiSPAT) development and field verification”. In : *Journal of Hydrology*. Atmospheric and Hydrological Processes at the Soil-Vegetation-Atmosphere Interface 166.3, p. 213-250. DOI : 10.1016/0022-1694(94)05085-C.

BRAUDEL, F. (1979). *Civilisation matérielle, économie et capitalisme, XVe-XVIIIe siècle. Le temps du monde*. T. 3. 608 p. ISBN : 9782200633424. URL : https://www.cairn.info/civilisation-materielle-economie-et-capitalisme--9782200633424.htm?contenu=presentation.

BRGM (2016). *Gestion des aquifères alluviaux dans le bassin Adour-Garonne - Résultats de la modélisation et outil de gestion des prélèvements dans le Tarn-et-Garonne - Rapport final*. Rapp. tech. RP-65583-FR. BRGM. 360 p. URL : http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-65583-FR.pdf.

BRISSON, N, C GARY, E JUSTES, R ROCHE, B MARY, D RIPOCHE, D ZIMMER, J SIERRA, P BERTUZZI, P BURGER, F BUSSIÈRE, Y. CABIDOCHE, P CELLIER, P DEBAEKE, J. GAUDILLÈRE, C HÉNAULT, F

MARAUX, B SEGUIN et H SINOQUET (2003). "An overview of the crop model stics". In : *European Journal of Agronomy* 18.3-4, p. 309-332. DOI : 10.1016/S1161-0301(02)00110-7.

BRISSON, N. et F. LEVRAULT (2010). *Livre vert du projet Climator 2007-2010. Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces*. ADEME Editions. 334 p. ISBN : 978-2-35838-128-4. URL : https://hal.inrae.fr/hal-02823650.

BROOKSBANK, K., E. J. VENEKLAAS, D. A. WHITE et J. L. CARTER (2011). "Water availability determines hydrological impact of tree belts in dryland cropping systems". In : *Agricultural Water Management* 100.1, p. 76-83. DOI : 10.1016/j.agwat.2011.08.016.

BUPTO, M. (2023). "Représentation, prise en charge et communication des incertitudes de la modélisation". Mém. de mast. ENGEES. 49 p.

BÉLIÈRES, J.-F., P. BONNAL, P.-M. BOSC, B. LOSCH, J. MARZIN et J.-M. SOURISSEAU (2013). *Les agricultures familiales du monde - Définitions, contributions et politiques publiques*. Rapp. tech. Montpellier : Cirad. 306 p. URL : https://www.alimenterre.org/system/files/ressources/pdf/728_rapport_final_maaf_mae_afd_af_ciradbis_31_mai_complet_cle0197b5.pdf.

CALIANNO, M., E. REYNARD, M. MILANO et A. BUCHS (2017). "Quantifier les usages de l'eau : une clarification terminologique et conceptuelle pour lever les confusions". In : *vertigo* 17.1. DOI : 10.4000/vertigo.18442.

CAMPBELL, N. et J. REECE (2004). *Biologie*. Bruxelles : De Boeck Université. ISBN : 2-8041-4478-X.

CARLUER, N., J. BELLIARD, I. BERNEZ, D. BURGER-LEENHARDT, J. DORIOZ, O. DOUEZ, S. DUFOUR, C. GRIMALDI, F. HABETS, Y. LE BISSONNAIS, J. MOLÉNAT, A. ROLLET, V. ROSSET, S. SAUVAGE, P. USSEGLIO-POLATERA et B. LEBLANC (2016). *Expertise scientifique collective sur l'impact cumulé des retenues*. Rapp. tech. IRSTEA. 82 p. URL : https://expertise-impact-cumule-retenues.inrae.fr/wp-content/uploads/2016/05/Rapport-de-synth%C3%A8se_27-05.pdf.

CARROGET, A. (2017). "Explore 2070 : quelle utilisation d'un exercice prospectif sur les impacts des changements climatiques à l'échelle nationale pour définir des stratégies d'adaptation ?" In : *Sciences Eaux & Territoires* 22, p. 4-11.

CASTANY, G. et J. MARGAT (1977). *Dictionnaire français d'hydrogéologie*. Orléans : Bureau de Recherches Géologiques et Minières. 249 p.

CGAAER (2015). *Synthèse Eau et Agriculture - Tome 1 : Aspects quantitatifs*. Rapp. tech. 14061. Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt. 32 p. URL : https://agriculture.gouv.fr/synthese-eau-et-agriculture-tome-1-aspects-quantitatifs.

CGAAER (2019). *Les « ZONES INTERMÉDIAIRES »*. Rapp. tech. 18065. Ministère de l'agriculture et de l'alimentation. 172 p. URL : https://agriculture.gouv.fr/les-zones-intermediaires-0.

CGAAER et CGEDD (2020). *Changement climatique, eau, agriculture - Quelles trajectoires d'ici 2050 ?* Rapp. tech. CGEDD n°012819-01, CGAAER n°19056. Ministère de l'agriculture et de l'alimentation / Ministère de la transition écologique. 333 p. URL : https://agriculture.gouv.fr/rapport-du-cgaaer-cgedd-changement-climatique-eau-et-agriculture-dici-2050.

CGEDD et CGAAER (2020). *Bilan du dispositif des organismes uniques de gestion collective (OUGC) des prélèvements d'eau pour l'irrigation*. Rapp. tech. Mission CGEDD n° 13017-01 - CGAAER n° 19089. Ministère de la transition écologique / Ministère de l'agriculture et de l'alimentation. 88 p. URL : https://cgedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/documents/Affaires-0011683/013017-01_rapport_publie.pdf.

CHALLINOR, A. J., C. MÜLLER, S. ASSENG, C. DEVA, K. J. NICKLIN, D. WALLACH, E. VANUYTRECHT, S. WHITFIELD, J. RAMIREZ-VILLEGAS et A.-K. KOEHLER (2018). "Improving the use of crop models for risk assessment and climate change adaptation". In : *Agricultural Systems* 159, p. 296-306. DOI : 10.1016/j.agsy.2017.07.010.

CHARDON, O., Y. JAUNEAU et J. VIDALENC (2020). *Les agriculteurs : de moins en moins nombreux et de plus en plus d'hommes*. insee.fr. URL : https://www.insee.fr/fr/statistiques/4806717#consulter.

CHATEL, T. (2019). "Quels bilans pour les exercices prospectifs nationaux et territoriaux sur l'impact du changement global et les stratégies d'adaptation dans le domaine des ressources en eau ?" Mém. de mast. Montpellier : AgroParisTech. URL : https://hal.inrae.fr/hal-02609672/document.

CHAUVEAU, M., S. CHAZOT, C. PERRIN, P.-Y. BOURGIN, E. SAUQUET, J.-P. VIDAL, N. ROUCHY, E. MARTIN, J. DAVID, T. NOROTTE, P. MAUGIS et X. DE LACAZE (2013). "Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ?" In : *La Houille Blanche* 4, p. 5-15. DOI : 10.1051/lhb/2013027.

CLARK, M. P. (2020). *Fidelious! An age-old adjective that has a rightful place in the hydrological vernacular*. URL : https://uofs-comphyd.github.io/blog/fidelious.

CNRS (2022). *Usages : eau dans plantes*. cnrs.fr. URL : https://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/usages/eauPlant.html.

COLLET, L. (2013). "Capacité à satisfaire la demande en eau sous contraintes climatique et anthropique sur un bassin méditerranéen". Thèse de doct. Montpellier : Université Montpellier 2. 270 p. URL : https://www.theses.fr/2013MON20129.

COLLET, L., D. RUELLAND, V. BORRELL-ESTUPINA, A. DEZETTER et E. SERVAT (2013). "Integrated modelling to assess long-term water supply capacity of a meso-scale Mediterranean catchment". In : *Science of The Total Environment* 461-462, p. 528-540. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2013.05.036.

COMITÉ FRANÇAIS DES BARRAGES ET RÉSERVOIRS (2013). *L'histoire des barrages*. Rapp. tech. Comité Français des Barrages et Réservoirs. 29 p. URL : https://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/histoirebarrages.pdf.

CONSEIL D'ETAT (2010). *Rapport public 2010 – Volume 2 : L'eau et son droit*. Rapp. tech. Études et documents du Conseil d'État. 580 p. URL : https://www.vie-publique.fr/rapport/31106-conseil-detat-rapport-public-2010-volume-2-leau-et-son-droit.

CONSTANTIN, J., M. WILLAUME, C. MURGUE, B. LACROIX et O. THEROND (2015). "The soil-crop models STICS and AqYield predict yield and soil water content for irrigated crops equally well with limited data". In : *Agricultural and Forest Meteorology* 206, p. 55-68. DOI : 10.1016/j.agrformet.2015.02.011.

COPERNICUS (2023). *July 2023 sees multiple global temperature records broken*. URL : https://climate.copernicus.eu/july-2023-sees-multiple-global-temperature-records-broken.

CORSON-DOSCH, H., C. NELL, R. VOLENTINE, A. ARCHER, E. BECHTEL, J. BRUCE, N. FELTS, T. GROSS, D. LOPEZ-TRUJILLO, C. RIGGS et E. READ (2022). *The Water Cycle*. URL : https://www.usgs.gov/media/images/water-cycle-png.

COULEAUD, N., F. LENSEIGNE et G. MOREAU (2021). *La France et ses territoires- Edition 2021*. Montrouge. URL : https://www.insee.fr/fr/statistiques/5039859?sommaire=5040030#:~:text=En%20France%2C%20en%202019%2C%20la,cultures%20permanentes%20(figure%201)..

COUR DES COMPTES, (2023). *Rapport public annuel 2023 - Seconde partie : analyses sectorielles*. Rapp. tech. Cour des comptes. 44 p. URL : https://www.ccomptes.fr/fr/documents/63651.

CUEFF, S., Y. COQUET, J.-N. AUBERTOT, L. BEL, V. POT et L. ALLETTO (2021). "Estimation of soil water retention in conservation agriculture using published and new pedotransfer functions". In : *Soil and Tillage Research* 209, p. 104967. DOI : 10.1016/j.still.2021.104967.

DANTEC, R. et J.-Y. ROUX (2019). *Rapport d'information fait au nom de la délégation sénatoriale à la prospective sur l'adaptation de la France aux dérèglements climatiques à l'horizon 2050*. Rapp. tech. 511. Sénat. 190 p. URL : https://www.senat.fr/rap/r18-511/r18-5111.pdf.

DECHARME, B., C. DELIRE, M. MINVIELLE, J. COLIN, J.-P. VERGNES, A. ALIAS, D. SAINT-MARTIN, R. SÉFÉRIAN, S. SENESI et A. VOLDOIRE (2019). "Recent Changes in the ISBA-CTRIP Land Surface System

for Use in the CNRM-CM6 Climate Model and in Global Off-Line Hydrological Applications". In : *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 11. DOI : 10.1029/2018MS001545.

DELAIGUE, O. (2020). *Base de données d'observations hydroclimatiques à l'échelle de bassins versants français. Université Paris-Saclay, INRAE, UR HYCAR, Équipe Hydrologie des bassins versants, Antony.* URL : https://webgr.inrae.fr/base-de-donnees.

DI PAOLA, A., R. VALENTINI et M. SANTINI (2016). "An overview of available crop growth and yield models for studies and assessments in agriculture: Overview of crop models for agriculture". In : *J. Sci. Food Agric.* 96.3, p. 709-714. DOI : 10.1002/jsfa.7359.

DOORENBOS, J., A. H. KASSAM et C. I. M. BENTVELSEN (1979). *Yield response to water*. Rapp. tech. Rome : Food et Agriculture Organization of the United Nations. 505 p. URL : https://www.fao.org/3/i2800e/i2800e.pdf.

DORCHIES, D. (2022). *airGRiwrm: 'airGR' Integrated Water Resource Management*. URL : https://airgriwrm.g-eau.fr/,https://github.com/inrae/airGRiwrm#readme.

DORCHIES, D., O. DELAIGUE et G. THIREL (2021). *airGRiwrm: an extension of the airGR R-package for handling Integrated Water Resources Management modeling*. pico. EGU 2021. DOI : 10.5194/egusphere-egu21-2190.

DUBOST-EBERSVEILLER, N. E. (1996). "Voies de diversification de l'élevage de la carpe Cyprinus carpio L. en Lorraine: avantages, contraintes et limites". Doctorat. Metz : Université de Lorraine.

DUMONT, B, P. DUPRAZ, J. AUBIN, M. BENOIT, Z. BOUAMRA-MECHEMACHE, V. CHATELLIER, L. DELABY, C. DELFOSSE, J. DOURMAD, M. DURU, L. FRAPPIER, M. FRIANT-PERROT, C. GAIGNÉ, A. GIRARD, J. GUICHET, P. HAVLIK, N. HOSTIOU, O. HUGUENIN-ELIE, K. KLUMPP, A. LANGLAIS, S. LEMAUVIEL-LAVENANT, S. LE PERCHEC, O. LEPILLER, B. MÉDA, J. RYSCHAWY, R. SABATIER, I. VEISSIER, E. VERRIER, D. VOLLET, I. SAVINI, J. HERCULE et C. DONNARS (2016). *Rôles, impacts et services issus des élevages en Europe - Synthèse du rapport d'expertise scientifique collective*. Rapp. tech. INRA. 136 p. URL : https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/esco-elevage-eu-synthese-en-francais-30-nov-maj-5-janv-2017.doc.pdf.

DURAND, J. H. (1973). *Utilisation des eaux salines pour l'irrigation*. Cours. INRA. URL : https://cda-omvs.org/wp-content/uploads/attachments/04040_ocr.pdf.

EDIJATNO et C. MICHEL (1989). "Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres". In : *La Houille Blanche* 75.2, p. 113-122. DOI : 10.1051/lhb/1989007.

EEA (2017). *Uncertainty guidance - Topic 1 : What is meant by uncertainty ?* URL : https://climate-adapt.eea.europa.eu/knowledge/tools/uncertainty-guidance/topic1/index_html/.

EL GHACHI, M. (2007). "La Seille : Un système fluvial anthropisé". Thèse de doct. Université de Lorraine. 393 p. URL : http://docnum.univ-lorraine.fr/public/UPV-M/Theses/2007/El_Ghachi.Mohamed.LMZ0715.pdf.

ERFURTH, S., M. WILDEMEERSCH, J. BAGGIO, R. K. SAHU et D. GARRICK (2023). *Governing Common Pool Resources in Fragile Political Systems: Modelling Behaviour, Institutions, and Social-Ecological Dynamics*. EGU 2023. DOI : 10.5194/egusphere-egu23-10277.

EVIN, G., B. HINGRAY, J. BLANCHET, N. ECKERT, S. MORIN et D. VERFAILLIE (2019). "Partitioning Uncertainty Components of an Incomplete Ensemble of Climate Projections Using Data Augmentation". In : *Journal of Climate* 32.8, p. 2423-2440. DOI : 10.1175/JCLI-D-18-0606.1.

FERNANDEZ, S., R. BARBIER, C. ANTOINE et S. LIZIARD (2022). *When the exception becomes the rule: learning how to govern water scarcity in the French Grand Est Region. Analysis of the regulatory work of State services.* oral. AISH 2022. DOI : 10.5194/iahs2022-537.

FERNÁNDEZ, M. E., J. GYENGE, J. LICATA, T. SCHLICHTER et B. J. BOND (2008). "Belowground interactions for water between trees and grasses in a temperate semiarid agroforestry system". In : *Agroforest Syst* 74.2, p. 185-197. DOI : 10.1007/s10457-008-9119-4.

FINCH, J. W. et R. L. HALL (2001). *Estimation of Open Water Evaporation A Review of Methods*. Rapp. tech. W6-043/TR. Environment Agency. 155 p. URL : https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/290578/sw6-043-tr-e-e.pdf.

FUNES, I., R. SAVÉ, F. de HERRALDE, C. BIEL, E. PLA, D. PASCUAL, J. ZABALZA, G. CANTOS, G. BORRÀS, J. VAYREDA et X. ARANDA (2021). "Modeling impacts of climate change on the water needs and growing cycle of crops in three Mediterranean basins". In : *Agricultural Water Management* 249.106797, p. 1-14. DOI : 10.1016/j.agwat.2021.106797.

GASSMAN, P. W., M. R. REYES, C. H. GREEN et J. G. ARNOLD (2007). "The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions". In : *Transactions of the ASABE* 50.4, p. 1211-1250. DOI : 10.13031/2013.23637.

GODET, M. (1991). *Manuel de prospective stratégique – Tome 2 – L'Art et la méthode*. Dunod. 441 p. URL : http://www.laprospective.fr/dyn/francais/ouvrages/la_prospective_strategique/t2--manuel-de-prospective-strategique-dunod-2007.pdf.

GORGUNER, M. et M. L. KAVVAS (2020). "Modeling impacts of future climate change on reservoir storages and irrigation water demands in a Mediterranean basin". In : *Science of The Total Environment* 748.141246, p. 1-20. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2020.141246.

GOUVERNEMENT (2022). *Dossier de presse - Conclusions du Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique*. Rapp. tech. Gouvernement. 25 p. URL : https://agriculture.gouv.fr/conclusions-du-varenne-agricole-de-leau-et-de-ladaptation-au-changement-climatique.

— (2023). *Dossier de presse - 53 mesures pour l'eau - Plan d'action pour une gestion résiliente et concertée de l'eau*. Rapp. tech. Gouvernement. 12 p. URL : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/MAR2023_DP-PLAN%20EAU__BAT%20%281%29.pdf.

GUILLEMOT, H. (2014). "Les désaccords sur le changement climatique en France : au-delà d'un climat bipolaire". In : *Natures Sciences Sociétés* 22.4, p. 340-350. DOI : 10.1051/nss/2014047.

GUO, D., R. ZHAO, X. XING et X. MA (2020). "Global sensitivity and uncertainty analysis of the AquaCrop model for maize under different irrigation and fertilizer management conditions". In : *Archives of Agronomy and Soil Science* 66.8, p. 1115-1133. DOI : 10.1080/03650340.2019.1657845.

GUPTA, H. V., H. KLING, K. K. YILMAZ et G. F. MARTINEZ (2009). "Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling". In : *Journal of Hydrology* 377.1-2, p. 80-91. DOI : 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003.

HABETS, F., A. BOONE, J. L. CHAMPEAUX, P. ETCHEVERS, L. FRANCHISTÉGUY, E. LEBLOIS, E. LEDOUX, P. LE MOIGNE, E. MARTIN, S. MOREL, J. NOILHAN, P. QUINTANA SEGUÍ, F. ROUSSET-REGIMBEAU et P. VIENNOT (2008). "The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France". In : *J. Geophys. Res.* 113.D06113, p. 1-18. DOI : 10.1029/2007JD008548.

HABETS, F., J. MOLÉNAT, N. CARLUER, O. DOUEZ et D. LEENHARDT (2018). "The cumulative impacts of small reservoirs on hydrology: A review". In : *Science of The Total Environment* 643, p. 850-867. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2018.06.188.

HARTICK, C., C. FURUSHO-PERCOT, M. P. CLARK et S. KOLLET (2022). "An Interannual Drought Feedback Loop Affects the Surface Energy Balance and Cloud Properties". In : *Geophysical Research Letters* 49.22, p. 1-9. DOI : 10.1029/2022GL100924.

HAWKINS, E. et R. SUTTON (2009). "The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions". In : *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 90.8, p. 1095-1108. DOI : 10.1175/2009BAMS2607.1.

HEILEMANN, J., M. NAGPAL, C. KLASSERT, M. PEICHL, B. KLAUER et E. GAWEL (2023). *From rain-fed to irrigated agriculture? Projecting the future irrigation water demand in Germany using a hydro-economic multi-agent system model*. oral. EGU 2023. DOI : 10.5194/egusphere-egu23-6034.

HORI, T., T. SUGIMOTO, M. NAKAYAMA, Y. ICHIKAWA et M. SHIIBA (2008). "Estimation of field irrigation water demand based on lumped kinematic wave model considering soil moisture balance". In : *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 33.5, p. 376-381. DOI : 10.1016/j.pce.2008.02.013.

HRACHOWITZ, M. et M. P. CLARK (2017). "HESS Opinions: The complementary merits of competing modelling philosophies in hydrology". In : *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21.8, p. 3953-3973. DOI : 10.5194/hess-21-3953-2017.

HU, C., Q. WU, H. LI, S. JIAN, N. LI et Z. LOU (2018). "Deep Learning with a Long Short-Term Memory Networks Approach for Rainfall-Runoff Simulation". In : *Water* 10.11, p. 1-16. DOI : 10.3390/w10111543.

IPCC (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. Geneva, Switzerland : IPCC. URL : https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_spm.pdf.

— (2014). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White. Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA : Cambridge University Press. URL : https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar5_wgII_spm_en.pdf.

— (2021). "Summary for Policymakers". In : *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou. URL : https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf.

JACOB, D., J. PETERSEN, B. EGGERT, A. ALIAS, O. B. CHRISTENSEN, L. M. BOUWER, A. BRAUN, A. COLETTE, M. DÉQUÉ, G. GEORGIEVSKI, E. GEORGOPOULOU, A. GOBIET, L. MENUT, G. NIKULIN, A. HAENSLER, N. HEMPELMANN, C. JONES, K. KEULER, S. KOVATS, N. KRÖNER, S. KOTLARSKI, A. KRIEGSMANN, E. MARTIN, E. van MEIJGAARD, C. MOSELEY, S. PFEIFER, S. PREUSCHMANN, C. RADERMACHER, K. RADTKE, D. RECHID, M. ROUNSEVELL, P. SAMUELSSON, S. SOMOT, J.-F. SOUSSANA, C. TEICHMANN, R. VALENTINI, R. VAUTARD, B. WEBER et P. YIOU (2014). "EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research". In : *Reg Environ Change* 14.2, p. 563-578. DOI : 10.1007/s10113-013-0499-2.

JAUBERT DE PASSA, F. (1846). *Recherche sur les arrosages chez les peuples anciens*. T. 1-6. Paris : Imprimerie et librairie de Mme veuve Bouchard-Huzard. URL : https://play.google.com/store/books/details?id=ubE-AAAAcAAJ&rdid=book-ubE-AAAAcAAJ&rdot=1.

JEAN, T. (2018). *Schéma bilan - Les Angiospermes, organismes autotrophes à vie fixée. Schéma de synthèse*. URL : https://www.svt-tanguy-jean.com/uploads/1/2/0/4/120408978/tb-11-schema-bilan.pdf.

— (2020). *Les angiospermes, organismes autotrophes à vie fixée*. Cours. La Madeleine : Lycée Valentine Labbé, p. 58. 58 p. URL : https://www.svt-tanguy-jean.com/uploads/1/2/0/4/120408978/tb-11-angiospermes-vie-fixee.pdf.

JEANTET, A. (2022). "Durabilité du drainage agricole français sous contrainte de changement climatique". Thèse de doct. Antony : Sorbonne Université. 310 p. URL : http://www.theses.fr/2022SORUS347/document.

KANZLER, M., C. BÖHM, J. MIRCK, D. SCHMITT et M. VESTE (2019). “Microclimate effects on evaporation and winter wheat (Triticum aestivum L.) yield within a temperate agroforestry system”. In : *Agroforest Syst* 93.5, p. 1821-1841. DOI : 10.1007/s10457-018-0289-4.

KAY, A. L., H. N. DAVIES, V. A. BELL et R. G. JONES (2009). “Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: flood frequency in England”. In : *Climatic Change* 92.1-2, p. 41-63. DOI : 10.1007/s10584-008-9471-4.

KLEMEŠ, V. (1986). “Operational testing of hydrological simulation models”. In : *Hydrological Sciences Journal* 31.1, p. 13-24. DOI : 10.1080/02626668609491024.

KONZMANN, M., D. GERTEN et J. HEINKE (2013). “Climate impacts on global irrigation requirements under 19 GCMs, simulated with a vegetation and hydrology model”. In : *Hydrological Sciences Journal* 58.1, p. 88-105. DOI : 10.1080/02626667.2013.746495.

KREIBICH, H., T. KRUEGER, A. VAN LOON, A. MEJIA, J. LIU, H. MCMILLAN et A. CASTELLARIN (2016). “Scientific debate of Panta Rhei research – how to advance our knowledge of changes in hydrology and society?” In : *Hydrological Sciences Journal* 62.3, p. 331-333. DOI : 10.1080/02626667.2016.1209929.

LABBOUZ, B., D. SALLES et P. VALETTE (2017). “Les territoires garonnais face aux changements globaux : quatre adaptations possibles en 2050”. In : *Sud-Ouest européen* 44, p. 71-82. DOI : 10.4000/soe.3342.

LAURENCEAU, M. (2021). “"Où sont passées les économies d’eau ?" Paradigmes, instruments et territorialisations des politiques d’économie et réallocation d’eau dans le bassin de la Durance (France)”. Thèse de doct. AgroParisTech. URL : https://pastel.hal.science/tel-03637002.

LE MOINE, N. (2008). “Le bassin versant de surface vu par le souterrain : une voie d’amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit ?” Thèse de doct. Paris : Université Pierre et Marie Curie. 348 p. URL : https://webgr.irstea.fr/wp-content/uploads/2012/07/2008-LE_MOINE-THESE.pdf.

LEBON, N. (2021). “Modéliser et analyser l’effet cumulé agro-hydrologique des retenues d’eau dans les bassins versants agricoles”. Thèse de doct. Montpellier : Montpellier Supagro. 311 p. URL : https://www.supagro.fr/theses/extranet/21-0048_Lebon.pdf.

LEBON, N., C. DAGÈS, D. BURGER-LEENHARDT et J. MOLÉNAT (2022). “A new agro-hydrological catchment model to assess the cumulative impact of small reservoirs”. In : *Environmental Modelling & Software* 153.105409, p. 1-17. DOI : 10.1016/j.envsoft.2022.105409.

LEENHARDT, D., J.-L. TROUVAT, G. GONZALÈS, V. PÉRARNAUD, S. PRATS et J.-E. BERGEZ (2004). “Estimating irrigation demand for water management on a regional scale”. In : *Agricultural Water Management* 68.3, p. 207-232. DOI : 10.1016/j.agwat.2004.04.004.

LELEU, I., I. TONNELIER, R. PUECHBERTY, P. GOUIN, I. VIQUENDI, L. COBOS, A. FORAY, M. BAILLON et P.-O. NDIMA (2014). “La refonte du système d’information national pour la gestion et la mise à disposition des données hydrométriques”. In : *La Houille Blanche* 100.1, p. 25-32. DOI : 10.1051/lhb/2014004.

LEMAITRE-BASSET, T. (2019). “Climate change impact and uncertainty analysis on streamflow projections”. Mém. de mast. Paris : Sorbonne Université. 35 p. URL : https://webgr.inrae.fr/wp-content/uploads/2021/09/MSreport_Basset-Thibault_Lemaitre_EN.pdf.

— (2020). *Impact du changement climatique sur l’hydrologie et adaptation : Incertitudes liées à l’évapotranspiration potentielle*. oral. Comité de thèse de première année. Paris.

— (2023). “Importance de la demande en eau atmosphérique et anthropique en contexte de changement climatique sur la durabilité de la gestion de la ressource Cas d’étude du bassin versant de la Moselle en France”. Thèse de doct. Paris : Sorbonne Université. 211 p. URL : https://theses.hal.science/tel-04155520v1/document.

LEMAITRE-BASSET, T., L. COLLET, G. THIREL, J. PARAJKA, G. EVIN et B. HINGRAY (2021). “Climate change impact and uncertainty analysis on hydrological extremes in a French Mediterranean catchment”. In : *Hydrological Sciences Journal* 66.5, p. 888-903. DOI : 10.1080/02626667.2021.1895437.

LEMAITRE-BASSET, T., L. OUDIN et G. THIREL (2022). "Evapotranspiration in hydrological models under rising CO2: a jump into the unknown". In : *Climatic Change* 172.36, p. 1-19. DOI : 10.1007/s10584-022-03384-1.

LEUSSIER, H. (2022). "« Guerre de l'eau » : la carte des bassines contestées en France". In : *Reporterre*. URL : https://reporterre.net/Guerre-de-l-eau-la-carte-des-bassines-contestees-en-France.

L'HÔTE, Y. (1967). "La Seille - Etude hydrologique". Thèse de doct. Paris : Université de Paris - Faculté des Sciences.

LOBLIGEOIS, F., V. ANDRÉASSIAN, C. PERRIN, P. TABARY et C. LOUMAGNE (2014). "When does higher spatial resolution rainfall information improve streamflow simulation? An evaluation using 3620 flood events". In : *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18.2, p. 575-594. DOI : 10.5194/hess-18-575-2014.

LOUBIER, S., P. GARIN, E. HASSENFORDER et C. LEJARS (2019). *Analyse économique et financière des Projets de Territoire pour la Gestion de l'Eau (PTGE) à composante agricole*. Rapp. tech. IRSTEA. 129 p. URL : https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/Guide-approche-%C3%A9conomique_version%20finale%281%29.pdf.

LUEDELING, E., P. J. SMETHURST, F. BAUDRON, J. BAYALA, N. I. HUTH, M. van NOORDWIJK, C. K. ONG, R. MULIA, B. LUSIANA, C. MUTHURI et F. L. SINCLAIR (2016). "Field-scale modeling of tree–crop interactions: Challenges and development needs". In : *Agricultural Systems* 142, p. 51-69. DOI : 10.1016/j.agsy.2015.11.005.

LÉGIFRANCE (2007). *Décret no 2007-1381 du 24 septembre 2007 relatif à l'organisme unique chargé de la gestion collective des prélèvements d'eau pour l'irrigation et modifiant le code de l'environnement*. URL : https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000824713?datePublication=26%2F09%2F2007&dateSignature=&init=true&page=1&query=&searchField=ALL&tab_selection=jorf.

— (2023). *Article L214-18 - Code de l'environnement*. URL : https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000006833152.

MCINERNEY, D., M. THYER, D. KAVETSKI, F. GITHUI, T. THAYALAKUMARAN, M. LIU et G. KUCZERA (2018). "The Importance of Spatiotemporal Variability in Irrigation Inputs for Hydrological Modeling of Irrigated Catchments". In : *Water Resources Research* 54.9, p. 6792-6821. DOI : 10.1029/2017WR022049.

MEDDTL, (2011). *Plan national d'adaptation de la France aux effets du changement climatique*. Rapp. tech. Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement. 188 p. URL : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ONERC_PNACC_1_complet.pdf.

MENDOZA, P. A., M. P. CLARK, M. BARLAGE, B. RAJAGOPALAN, L. SAMANIEGO, G. ABRAMOWITZ et H. GUPTA (2015). "Are we unnecessarily constraining the agility of complex process-based models?" In : *Water Resources Research* 51.1, p. 716-728. DOI : https://doi.org/10.1002/2014WR015820.

MENSINK, C. (2007). "Integrated modelling and applications (working group 2)". In : *Air, Water and Soil Quality Modelling for Risk and Impact Assessment*. Sous la dir. d'A. EBEL et T. DAVITASHVILI. NATO Security Through Science Series C. Environmental Security. Dordrecht : Springer Netherlands, p. 343-350. ISBN : 978-1-4020-5875-2. DOI : 10.1007/978-1-4020-5877-6_32.

MEYER, N., J.-E. BERGEZ, J. CONSTANTIN et E. JUSTES (2018). "Cover crops reduce water drainage in temperate climates: A meta-analysis". In : *Agronomy for Sustainable Development* 39.3, p. 1-11. DOI : 10.1007/s13593-018-0546-y.

MILANO, M. (2012). "Changements globaux en Méditerranée : Impacts sur le stress hydrique et la capacité à satisfaire les demandes en eau". Thèse de doct. Montpellier : Université de Montpellier 2. 258 p. URL : https://planbleu.org/wp-content/uploads/2018/01/Th%C3%A8se_Marianne_Milano_finale.pdf.

MINACAPILLI, M., M. IOVINO et G. D'URSO (2008). "A distributed agro-hydrological model for irrigation water demand assessment". In : *Agricultural Water Management* 95.2, p. 123-132. DOI : 10.1016/j.agwat.2007.09.008.

MIRA DE ORDUÑA, R. (2010). “Climate change associated effects on grape and wine quality and production”. In : *Food Research International*. Climate Change and Food Science 43.7, p. 1844-1855. DOI : 10.1016/j.foodres.2010.05.001.

MISEN-57 (2020a). *Enjeux territoriaux – Thèmes Eau et Nature Communauté de communes de Sarrebourg Moselle Sud*. Rapp. tech. 9. Préfecture de la Moselle. 21 p.

— (2020b). *Enjeux territoriaux – Thèmes Eau et Nature Communauté de communes du Saulnois*. Rapp. tech. 13. Préfecture de la Moselle.

— (2020c). *Enjeux territoriaux – Thèmes Eau et Nature Communauté de communes du Sud messin*. Rapp. tech. 22. Préfecture de la Moselle. 19 p.

— (2020d). *Enjeux territoriaux – Thèmes Eau et Nature Metz Métropole*. Rapp. tech. 1. Préfecture de la Moselle. 20 p.

MITCHELL, T. D. et M. HULME (1999). “Predicting regional climate change: living with uncertainty”. In : *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 23.1, p. 57-78. DOI : 10.1177/030913339902300103.

MOBBS, D. C, M. G. R CANNELL, N. M. J CROUT, G. J LAWSON, A. D FRIEND et J ARAH (1998). “Complementarity of light and water use in tropical agroforests: I. Theoretical model outline, performance and sensitivity”. In : *Forest Ecology and Management* 102.2, p. 259-274. DOI : 10.1016/S0378-1127(97)00167-9.

MONDACA-DUARTE, F. D., M. HEINEN et S. van MOURIK (2020). “Performance analysis method for model-based irrigation strategies under uncertainty”. In : *MethodsX* 7.101075, p. 1-12. DOI : 10.1016/j.mex.2020.101075.

MORIN, G. et P. PAQUET (2007). *Modèle hydrologique CEQUEAU*. Rapp. tech. R000926. INRS-ETE. 458 p. URL : https://espace.inrs.ca/id/eprint/1098/1/R000926.pdf.

MOULLOT, P. et F. LEBOUCQ (2023). “Affrontements Bassines de Sainte-Soline : des dizaines de blessés, 5 personnes en «urgence absolue»”. In : *Libération*. URL : https://www.liberation.fr/environnement/les-antibassines-marchent-vers-sainte-soline-gouvernement-et-prefecture-multiplient-les-mises-en-garde-20230325_3VO6TW5ROJFUNOOSSX5IPT7LHY/.

MTE (2019). *Assises de l’eau - Un nouveau pacte pour faire face au changement climatique*. Rapp. tech. Ministère de la Transition Ecologique. 28 p. URL : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20210126_Assises-Eau_MTE_Feuille%20de%20route.pdf.

MTES, (2022). *Propluvia*. URL : http://propluvia.developpement-durable.gouv.fr/propluvia/faces/index.jsp.

MTES (2018). *Plan national d’adaptation de la France aux effets du changement climatique 2*. Rapp. tech. Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire. 26 p. URL : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2018.12.20_PNACC2.pdf.

MULTSCH, S., J.-F. EXBRAYAT, M. KIRBY, N. R. VINEY, H.-G. FREDE et L. BREUER (2015). “Reduction of predictive uncertainty in estimating irrigation water requirement through multi-model ensembles and ensemble averaging”. In : *Geosci. Model Dev.* 8.4, p. 1233-1244. DOI : 10.5194/gmd-8-1233-2015.

MURGUE, C. (2014). “Quelles distributions spatiales des systèmes de culture pour limiter l’occurence des crises de gestion quantitative de l’eau ? Une démarche de conception évaluation sur le territoire irrigué de l’Aveyron aval”. Thèse de doct. Toulouse : INP Toulouse. 211 p. URL : https://oatao.univ-toulouse.fr/13961/1/murgue.pdf.

MÉTÉO-FRANCE (2020). *Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole*. Rapp. tech. Météo-France, p. 98. URL : http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf.

— (2022a). *Juillet 2022 : Extrêmement sec et chaud - Bilan définitif au 2 août 2022*. URL : https://meteofrance.fr/sites/meteofrance.fr/files/files/editorial/Bilan_juillet_2022_02082022.pdf.

— (2022b). *Juin 2022 : Remarquablement chaud et orageux - Bilan définitif au 4 juillet 2022*. URL : https://meteofrance.fr/sites/meteofrance.fr/files/files/editorial/Bilan%20juin_0.pdf.

— (2023). *Sécheresse : 32 jours sans pluie en France, record battu*. URL : https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/climat/secheresse-32-jours-sans-pluie-en-france-record-battu.

NASH, J. et J. SUTCLIFFE (1970). "River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles". In : *Journal of Hydrology* 10.3, p. 282-290. DOI : 10.1016/0022-1694(70)90255-6.

NAZEMI, A. et H. S. WHEATER (2015). "On inclusion of water resource management in Earth system models – Part 1: Problem definition and representation of water demand". In : *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19.1, p. 33-61. DOI : 10.5194/hess-19-33-2015.

NEILSEN, D., M. BAKKER, T. Van der GULIK, S. SMITH, A. CANNON, I. LOSSO et A. WARWICK SEARS (2018). "Landscape Based Agricultural Water Demand Modeling—A Tool for Water Management Decision Making in British Columbia, Canada". In : *Front. Environ. Sci.* 6.74, p. 1-18. DOI : 10.3389/fenvs.2018.00074.

NOORDWIJK, M. van et B. LUSIANA (1999). "WaNuLCAS, a model of water, nutrient and light capture in agroforestry systems". In : *Agroforestry for Sustainable Land-Use Fundamental Research and Modelling with Emphasis on Temperate and Mediterranean Applications*. Sous la dir. de D. AUCLAIR et C. DUPRAZ. T. 60. Dordrecht : Springer Netherlands, p. 217-242. ISBN : 978-90-481-5258-2, 978-94-017-0679-7. DOI : 10.1007/978-94-017-0679-7_14.

ONERC (2007). *Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique*. Rapp. tech. Ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables. 97 p. URL : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ONERC_Rapport_2006_Strategie_Nationale_WEB.pdf.

OUDIN, L. (2004). "Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle plui-débit global". Thèse de doct. Paris : Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts. 495 p. URL : https://webgr.inrae.fr/wp-content/uploads/2012/07/2004-OUDIN-THESE.pdf.

PARRILLA, T. G. et F. BARATAUD (2020). *Une Seille, des Seilles*. Rapp. tech. INRAE. 67 p. URL : https://hal.inrae.fr/hal-03198353/document.

PENMAN, H. (1956). "Evaporation: an introductory survey." In : *NJAS* 4.1, p. 9-29. DOI : 10.18174/njas.v4i1.17768.

PERLMAN, H. et J. EVANS (2019). *Le cycle de l'eau*. URL : https://www.usgs.gov/media/images/le-cycle-de-leau-water-cycle-french.

PLOEG, J. D. Van der (2014). *Les paysans du XXIe siècle Mouvements de repaysannisation dans l'Europe d'aujourd'hui*. Paris : Editions Charles Léopold Mayer. ISBN : 978-2-84377-183-5. URL : https://docs.eclm.fr/pdf_livre/369LesPaysansDuXXIeSiecle.pdf.

POSTEL, S. (1999). "Egypt's Nile Valley Basin Irrigation". In : *Pillar of Sand: Can the Irrigation Miracle Last?* New-York : W.W. Norton Company (A Worldwatch Book), p. 30-35. URL : http://www.waterhistory.org/histories/nile/nile.pdf.

POUCH, T. (2015). "Pierre Feillet - Quel futur pour notre alimentation ?: Versailles, Quae, coll. « Enjeux sciences », 2014, 165 p." In : *Économie rurale* 348, p. 81-83. DOI : 10.4000/economierurale.4670.

POURNELLE, J. (2013). "Physical Geography of th Sumerian World". In : *The Sumerian world*. Sous la dir. de H. E. W. CRAWFORD. The Routledge worlds. London ; New York : Routledge, p. 13-32. ISBN : 978-0-415-56967-5 978-0-203-09660-4. URL : https://www.researchgate.net/publication/260826444_Physical_Geography_of_the_Sumerian_World.

POUX, X. et P.-M. AUBERT (2018). *Une Europe agroécologique en 2050 : une agriculture multifonctionnelle pour une alimentation saine*. Rapp. tech. 9. IDDRI. 78 p. URL : https://www.iddri.org/fr/publications-et-evenements/etude/une-europe-agroecologique-en-2050-une-agriculture.

RAUSCHER, S. A., E. COPPOLA, C. PIANI et F. GIORGI (2010). “Resolution effects on regional climate model simulations of seasonal precipitation over Europe”. In : *Clim Dyn* 35.4, p. 685-711. DOI : 10.1007/s00382-009-0607-7.

RICHARDS, L. A. (1954). *Diagnosis and improvement of Saline and Alkali Soils*. United States Department of Agriculture. Agriculture Handbook 60. Washington DC : Richards, L A. URL : https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/20360500/hb60_pdf/hb60complete.pdf.

RINAUDO, J.-D., L. MATON, I. TERRASON, S. CHAZOT, A. RICHARD-FERROUDJI et Y. CABALLERO (2013). “Combining scenario workshops with modeling to assess future irrigation water demands”. In : *Agricultural Water Management* 130, p. 103-112. DOI : 10.1016/j.agwat.2013.08.016.

ROBIN, Y., L. CORRE, P. MARSON, S. BERNUS, M. VRAC et S. THAO (2023). *Projections climatiques régionalisées : correction de biais et changements futurs*. Rapp. tech. 62 p. DOI : 10.57745/99X4CD.

ROLLO, N., G. LEVESQUE, E. CHAUVEAU et M. ROBIN (2008). “Mise en œuvre du modèle agro-hydrologique SWAT sur la partie amont du bassin versant du Loch : vers une modélisation du transfert des nutriments”. In : *Cahiers Nantais* 1. URL : https://cahiers-nantais.fr/index.php?id=599#tocto2n2, p. 17-26.

ROUHI RAD, M., A. ARAYA et Z. T. ZAMBRESKI (2020). “Downside risk of aquifer depletion”. In : *Irrigation Science* 38.5-6, p. 577-591. DOI : 10.1007/s00271-020-00688-x.

SANTOS, L., G. THIREL et C. PERRIN (2018). “Technical note: Pitfalls in using log-transformed flows within the KGE criterion”. In : *Hydrology and Earth System Sciences* 22.8, p. 4583-4591. DOI : 10.5194/hess-22-4583-2018.

SANTOS, L., G. THIREL et C. PERRIN (2022). *Impact of water withdrawals and releases on the parameters of a bucket-type rainfall-runoff model*. poster. Montpellier. DOI : 10.5194/iahs2022-421. URL : https://meetingorganizer.copernicus.org/IAHS2022/IAHS2022-421.html.

SAUQUET, E. (2014). *Projet R2D2 2050 - Risque, Ressource en eau et gestion Durable de la Durance en 2050 - Rapport de fin de contrat*. Rapp. tech. IRSTEA. 243 p. URL : https://hal.inrae.fr/hal-02601503v1/document.

SAVENIJE, H. H. G. et M. HRACHOWITZ (2017). “HESS Opinions Catchments as meta-organisms – a new blueprint for hydrological modelling”. In : *Hydrology and Earth System Sciences* 21.2, p. 1107-1116. DOI : 10.5194/hess-21-1107-2017.

SCRANTON, K. et P. AMARASEKARE (2017). “Predicting phenological shifts in a changing climate”. In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114.50, p. 13212-13217. DOI : 10.1073/pnas.1711221114.

SERRA-WITTLING, C. et B. MOLLE (2017). *Evaluation des économies d’eau à la parcelle réalisables par la modernisation des systèmes d’irrigation*. Rapp. tech. IRSTEA. 150 p. URL : https://hal.inrae.fr/hal-02608073v1/document.

SHMUELI, G. (2010). “To Explain or to Predict?” In : *Statist. Sci.* 25.3, p. 289-310. DOI : 10.1214/10-STS330.

SHUTTLEWORTH, W. J. (2007). “Putting the "vap" into evaporation”. In : *Hydrology and Earth System Sciences* 11.1, p. 210-244. DOI : 10.5194/hess-11-210-2007.

SIAHS, SIBVAS, SIACS et V. de METZ (2012). *3ème programme de renaturation de la Seille aval - Etude globale des ouvrages hydrauliques de la Seille*. Rapp. tech. TOME 1 (Diagnostic). non public. SIAHS. 201 p.

SIEBER, J. et D. PURKEY (2015). *WEAP - Water Evaluation And Planning System - User guide - for WEP 2015*. Rapp. tech. Stockholm Environment Institute. 400 p. URL : https://www.weap21.org/downloads/WEAP_User_Guide.pdf.

SILVESTRO, P. C., S. PIGNATTI, H. YANG, G. YANG, S. PASCUCCI, F. CASTALDI et R. CASA (2017). “Sensitivity analysis of the Aquacrop and SAFYE crop models for the assessment of water limited winter wheat yield in regional scale applications”. In : *PloS one* 12.11:e0187485, p. 1-30. DOI : 10.1371/journal.pone.0187485.

SMITH, C., J. C. A. BAKER et D. V. SPRACKLEN (2023). “Tropical deforestation causes large reductions in observed precipitation”. In : *Nature* 615.7951, p. 270-275. DOI : 10.1038/s41586-022-05690-1.

SMITH, P., P. CALANCA et J. FUHRER (2012). “A Simple Scheme for Modeling Irrigation Water Requirements at the Regional Scale Applied to an Alpine River Catchment”. In : *Water* 4.4, p. 869-886. DOI : 10.3390/w4040869.

SOLAGRO (2016). *AFTERRES2050 - Le scénario AFterres2050 version 2016*. Rapp. tech. Solagro. 96 p. URL : https://afterres2050.solagro.org/wp-content/uploads/2015/11/solagro_afterres2050_version2016.pdf.

SOUTIF-BELLENGER, M., G. THIREL, O. THEROND et J. VILLERD (2023). “As simple as possible but not simpler?: the case of irrigation modeling at catchment scale in southwestern France”. In : *Irrigation Science*. Online. DOI : 10.1007/s00271-023-00846-x.

STEPHENS, C., L. MARSHALL et F. JOHNSON (2019). “Investigating strategies to improve hydrologic model performance in a changing climate”. In : *Journal of Hydrology* 579.124219, p. 1-12. DOI : 10.1016/j.jhydrol.2019.124219.

TERRIER, M., C. PERRIN, A. de LAVENNE, V. ANDRÉASSIAN, J. LERAT et J. VAZE (2020). “Streamflow naturalization methods: a review”. In : *Hydrological Sciences Journal*, p. 1-25. DOI : 10.1080/02626667.2020.1839080.

THEROND, O., C. SIBERTIN-BLANC, R. LARDY, B. GAUDOU, M. BALESTRAT, Y. HONG, T. LOUAIL, V. B. NGUYEN, D. PANZOLI, J.-M. SANCHEZ-PÉREZ, S. SAUVAGE, P. TAILLANDIER, M. VAVASSEUR et P. MAZZEGA (2014). “Integrated modelling of social-ecological systems: The MAELIA high-resolution multi-agent platform to deal with water scarcity problems”. In : *International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs)*. San Diego, CA, USA : Daniel P. Ames, Nigel W.T. Quinn et Andrea E. Rizzoli, p. 1833-1840. URL : https://scholarsarchive.byu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1251&context=iemssconference.

THIREL, G., L. COLLET, F. ROUSSET, O. DELAIGUE, D. FRANCOIS, J. GAILHARD, M. LELAY, C. PERRIN, M. REVERDY, R. SAMACOITS, M. TERRIER, J.-P. VIDAL et J.-P. WAGNER (2021). *The CHIMERE 21 project*. oral. Online. URL : https://hal.inrae.fr/hal-03279464v1/document.

TIAN, F., J. WEI, M. SIVAPALAN et G. BLOESCHL (2021). *Coevolution and Prediction of Coupled Human-Water Systems: A Synthesis of Change in Hydrology and Society*. Pico. EGU 2021. DOI : 10.5194/egusphere-egu21-7670.

TOLLEFSON, J. (2021). “Top climate scientists are sceptical that nations will rein in global warming”. In : *Nature* 599.7883, p. 22-24. DOI : 10.1038/d41586-021-02990-w.

UNIYAL, B. et J. DIETRICH (2019). “Modifying Automatic Irrigation in SWAT for Plant Water Stress scheduling”. In : *Agricultural Water Management* 223.105714, p. 1-12. DOI : 10.1016/j.agwat.2019.105714.

VARGAS DE OLIVEIRA, L., A. DUCHARNE et P. ARBOLEDA (2022). “Irrigation in the ORCHIDEE model: Evaluating inputs and results in metropolitan France”. Mém. de mast. Paris : ENS. 38 p. URL : https://www.metis.upmc.fr/~ducharne/documents/rapport_m2_luiza_vargas_2022.pdf.

VERFAILLIE, D., M. DÉQUÉ, S. MORIN et M. LAFAYSSE (2017). “The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models”. In : *Geosci. Model Dev.* 10.11, p. 4257-4283. DOI : 10.5194/gmd-10-4257-2017.

VIAUD, V., P. DURAND, P. MEROT, E. SAUBOUA et Z. SAADI (2005). “Modeling the impact of the spatial structure of a hedge network on the hydrology of a small catchment in a temperate climate”. In : *Agricultural Water Management* 74.2, p. 135-163. DOI : 10.1016/j.agwat.2004.11.010.

VIDAL, J.-P. (2019). “Ecrire l’hydrologie de l’Anthropocène”. Habilitation à diriger les recherches. Communauté Université Grenoble-Alpes. 185 p. URL : https://hal.science/tel-02919032.

VIDAL, J.-P., B. HINGRAY, C. MAGAND, E. SAUQUET et A. DUCHARNE (2016). "Hierarchy of climate and hydrological uncertainties in transient low-flow projections". In : *Hydrology and Earth System Sciences* 20.9, p. 3651-3672. DOI : 10.5194/hess-20-3651-2016.

VIDAL, J.-P., E. MARTIN, L. FRANCHISTÉGUY, M. BAILLON et J.-M. SOUBEYROUX (2010). "A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system". In : *Int. J. Climatol.* 30.11, p. 1627-1644. DOI : 10.1002/joc.2003.

VITASSE, Y., F. BAUMGARTEN, C. M. ZOHNER, T. RUTISHAUSER, B. PIETRAGALLA, R. GEHRIG, J. DAI, H. WANG, Y. AONO et T. H. SPARKS (2022). "The great acceleration of plant phenological shifts". In : *Nature Climate Change* 12.4, p. 300-302. DOI : 10.1038/s41558-022-01283-y.

WADA, Y., D. WISSER, S. EISNER, M. FLÖRKE, D. GERTEN, I. HADDELAND, N. HANASAKI, Y. MASAKI, F. T. PORTMANN, T. STACKE, Z. TESSLER et J. SCHEWE (2013). "Multimodel projections and uncertainties of irrigation water demand under climate change: irrigation demand under climate change". In : *Geophys. Res. Lett.* 40.17, p. 4626-4632. DOI : 10.1002/grl.50686.

WAN, W., J. ZHAO, H.-Y. LI, A. MISHRA, M. HEJAZI, H. LU, Y. DEMISSIE et H. WANG (2018). "A Holistic View of Water Management Impacts on Future Droughts: A Global Multimodel Analysis". In : *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 123.11, p. 5947-5972. DOI : 10.1029/2017JD027825.

WERF, W. van der, K. KEESMAN, P. BURGESS, A. GRAVES, D. PILBEAM, L. INCOLL, K. METSELAAR, M. MAYUS, R. STAPPERS, H. van KEULEN, J. PALMA et C. DUPRAZ (2007). "Yield-SAFE: A parameter-sparse, process-based dynamic model for predicting resource capture, growth, and production in agroforestry systems". In : *Ecological Engineering* 29.4, p. 419-433. DOI : 10.1016/j.ecoleng.2006.09.017.

WINTER, J. M., C. A. YOUNG, V. K. MEHTA, A. C. RUANE, M. AZARDERAKHSH, A. DAVITT, K. MCDONALD, V. R. HADEN et C. ROSENZWEIG (2017). "Integrating water supply constraints into irrigated agricultural simulations of California". In : *Environmental Modelling & Software* 96, p. 335-346. DOI : 10.1016/j.envsoft.2017.06.048.

WOOD, A. (2015). *Advancing streamflow forecast science to support water management*. oral. NCAR networking day. Boulder. URL : https://slideplayer.com/slide/4891428/.

WRIEDT, G., M. van der VELDE, A. ALOE et F. BOURAOUI (2009). "Estimating irrigation water requirements in Europe". In : *Journal of Hydrology* 373.3-4, p. 527-544. DOI : 10.1016/j.jhydrol.2009.05.018.

WWF (2003). *WWF's Water and Wetland Index. Critical issues in water policy across Europe*. Rapp. tech. Madrid, Spain : WWF. 72 p. URL : https://wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/wwireport.pdf.

ZACCARIA, D., N. LAMADDALENA, C. M. U. NEALE, G. P. MERKLEY, N. PALMISANO et G. PASSARELLA (2013). "Simulation of peak-demand hydrographs in pressurized irrigation delivery systems using a deterministic–stochastic combined model. Part I: model development". In : *Irrigation Science* 31.3, p. 209-224. DOI : 10.1007/s00271-011-0317-x.

ZHOU, X., J. POLCHER et P. DUMAS (2021). "Representing Human Water Management in a Land Surface Model Using a Supply/Demand Approach". In : *Water Res* 57.4:e2020WR028133, p. 1-33. DOI : 10.1029/2020WR028133.

ZHUANG, J.-Y., J.-C. ZHANG, Y. YANG, B. ZHANG et J. LI (2017). "Effect of forest shelter-belt as a regional climate improver along the old course of the Yellow River, China". In : *Agroforest Syst* 91.3, p. 393-401. DOI : 10.1007/s10457-016-9928-9.

Annexes

Annexe A

Calcul de l'évapotranspiration potentielle Penman

Plutôt qu'utiliser l'évapotranspiration Penman-Monteith, qui tient compte de la résistance stomatique et donc de la présence de végétation, nous utilisons pour calculer l'évaporation des plans d'eau, sans couverture végétale, une évaporation Penman, qui ne prend pas en compte de résistance stomatique.

Nous calculons l'évapotranspiration Penman à l'aide de l'équation de Penman modifiée par Shuttleworth (Equation A.1, SHUTTLEWORTH, 2007) donnant l'ETP en mm j^{-1}, avec :

— Δ : la pente de la courbe de pression de vapeur saturante en fonction de la température de l'air en kPa K^{-1} (voir équation ALLEN et al., 1998) ;

— Rn : le rayonnement net en MJ m^{-2} j^{-1}, dont le calcul est expliqué dans l'Equation A.2, avec :

•Rs : le rayonnement à courtes longueurs d'onde en MJ m^{-2} j^{-1} (Chapitre III.2.1, Section III.1.3, Equation III.2) ;

•α : l'albedo, sans unité, est estimé à 0,23 (-) (OUDIN, 2004) ;

•Rl : le rayonnement à longues longueurs d'onde en MJ m^{-2} j^{-1} (voir équation ALLEN et al., 1998) ;

— γ : la constante psychrométrique, estimée à 0,065 kPa K^{-1} (OUDIN, 2004) ;

— u_2 : la vitesse du vent à 2 m, estimée à partir de la vitesse du vent à 10 m (voir équation ALLEN et al., 1998) fournie par la base de données Explore2 ;

— e_s : la pression de vapeur à saturation moyenne à la température de l'air en kPa (voir équation ALLEN et al., 1998) ;

— e_a : la pression de vapeur effective de l'air, atteinte à la température du point de rosée, en kPa. Par définition de l'humidité relative Hr en kg kg^{-1}, e_a peut être estimée par l'Equation A.3. Hr peut également être définie selon l'Equation A.4, avec :

•e_{part} la pression partielle de vapeur d'eau en kPa (Equation A.5 [1], avec $Patm$ la pression atmosphérique à l'altitude considérée en kPa, Hs l'humidité spécifique en kg kg^{-1}, fournie par la base de données Explore2) ;

•e_w : la pression de vapeur à saturation de l'eau en kPa, calculée selon l'Equation de Tetens [2].

— λ : la chaleur latente de vaporisation en MJ kg^{-1}

La température moyenne journalière de l'air intervenant dans les équations est calculée comme la moyenne entre la température maximale journalière et la température minimale journalière, fournies par la base de données DRIAS.

$$ETP_{Penman} = \frac{\Delta \times Rn + \gamma \times 6,43 \times (1 + 0,536 \times u_2) \times (e_s - e_a)}{\lambda \times (\Delta + \lambda)} \tag{A.1}$$

1. https://fr.wikipedia.org/wiki/Humidit%C3%A9_sp%C3%A9cifique
2. https://en.wikipedia.org/wiki/Tetens_equation

$$Rn = Rs \times (1 - \alpha) + Rl \tag{A.2}$$

$$e_a = e_s \times Hr \tag{A.3}$$

$$Hr = \frac{e_{part}}{e_w} \tag{A.4}$$

$$e_{part} = \frac{Patm \times Hs}{0.622 + Hs \times 0.378} \tag{A.5}$$

Annexe B

Sélection et évaluation d'un ensemble de projections climatiques

1 Méthodologie de sélection et d'évaluation des projections climatiques

Pour prendre en compte les incertitudes liées à l'évolution de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère et aux conséquences de ces concentrations sur le climat du bassin versant de la Seille, il est nécessaire d'utiliser un ensemble de projections climatiques sur le bassin versant de la Seille.

Nous disposons de 42 projections climatiques disponibles (Section III.1.3). Nous souhaitons sélectionner un échantillon de ces projections, pour simplifier le plan de simulation ainsi que les analyses réalisées.

La sélection de sous-ensembles de projections climatiques parmi l'ensemble Explore2 est un exercice qui est, à l'heure de la rédaction de ce manuscrit, mis en place dans le projet Explore2 lui-même. Des sélections seront en effet à terme suggérées sur le portail DRIAS-Eau (https://www.drias-eau.fr/) et discutées dans les livrables du projet (https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1244). L'objectif est de permettre aux personnes utilisant les projections climatiques ou hydrologiques produites dans Explore2 de s'affranchir du téléchargement et de l'utilisation de l'ensemble des projections disponibles et de disposer de projections adaptées à l'objectif des études mises en œuvre.

A l'heure de la mise en œuvre de cette partie des travaux de thèse, la sélection n'était pas achevée par les scientifiques d'Explore2. Il a donc été décidé d'effectuer une sélection adaptée au territoire de la Seille. L'objectif principal retenu a été de sélectionner six projections représentant la diversité des possibles des projections d'Explore2 au regard de l'évolution des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle entre la période future (2040-2069) et la période historique (1990-2019). Ainsi, les projections sélectionnées permettent d'appréhender des futurs possibles et contrastés, afin d'identifier les interactions entre les adaptations envisagées et les projections climatiques. Cette sélection a été effectuée de manière qualitative, à l'aide de graphiques permettant de visualiser la dispersion des projections climatiques selon l'évolution des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle Penman-Monteith (avec rayonnement Hargreaves, voir Section III.1.3) moyennes, aux pas de temps annuel et saisonnier.

Enfin, depuis que ce travail de sélection a été fait dans le cadre de la thèse, deux projections ont été écartées par les scientifiques d'Explore2 : la combinaison IPSL-IPSL-CM5A-MR/IPSL-WRF381P (IPSL/WRF), et la combinaison CNRM-CERFACS-CNRM-CM5/KNMI-RACMO22E (CNRM/RACMO). En effet, au vu des connaissances les plus récentes, notamment résumées dans le dernier rapport du GIEC, ces deux projections semblent irréalistes l'été car elles indiquent des augmentations importantes de précipitations et des augmentations de températures (ici représentées par l'ETP) trop basses (communications personnelles auprès de membres du projet Explore2 en attendant la publication du rapport final du projet). La première avait été écartée de notre sélection. La seconde avait cependant été sélectionnée, et constitue donc une projection très (trop ?) optimiste sur l'évolution des débits estivaux futurs.

La qualité de ces projections est finalement évaluée par comparaison avec les données climatiques historiques (Section III.1.2) au regard des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle Penman-Monteith (avec rayonnement Hargreaves, voir Section III.1.3).

De plus, nous comparons les projections hydrologiques avec les Usages actuels obtenues aux débits observés et simulations sur la période 1990-2019 (1990-2015 pour la Seille à Metz).

2 Analyse de la sélection de projections climatiques

La Figure B.1 présente la dispersion de l'évolution des précipitations et ETP futures pour l'ensemble Explore2 sur le territoire de la Seille. Cette figure montre que l'ensemble Explore2 dessine un futur pour lequel la précipitation annuelle évoluera de manière modérée (de -5 à +10 %, sauf pour la projection IPSL/WRF). En comparant les différents RCP entre eux, on observe une dispersion plus forte avec le RCP 8.5 qu'avec le RCP 4.5, lui-même montrant une dispersion plus forte qu'avec le RCP 2.6. Par ailleurs, le réchauffement est bien plus fort avec le RCP 8.5 qu'avec le RCP 4.5 et le RCP 2.6, ce qui est conforme à la manière dont ils ont été construits. Les évolutions de précipitations sont pour certaines saisons très incertaines, notamment l'été (juillet, août, septembre) et le printemps (avril, mai, juin). Ainsi, la plupart des projections indiquent pour ces saisons des évolutions situées entre -20 et +20 %. Concernant l'automne et l'hiver, la quasi-totalité des projections indiquent des évolutions de précipitations entre 0 et +20 %.

L'objectif de la sélection est de disposer de projections contrastées. On choisit donc de retenir six associations de GCM/RCM, récapitulées dans le Tableau B.1. Cette sélection semble présenter des caractéristiques proches de celles de l'ensemble total Explore2 décrit dans le paragraphe précédent. On notera que certaines projections ne sont pas disponibles pour le RCP 2.6. En effet, sélectionner des projections contrastées et disponibles pour les trois RCP s'est avéré impossible.

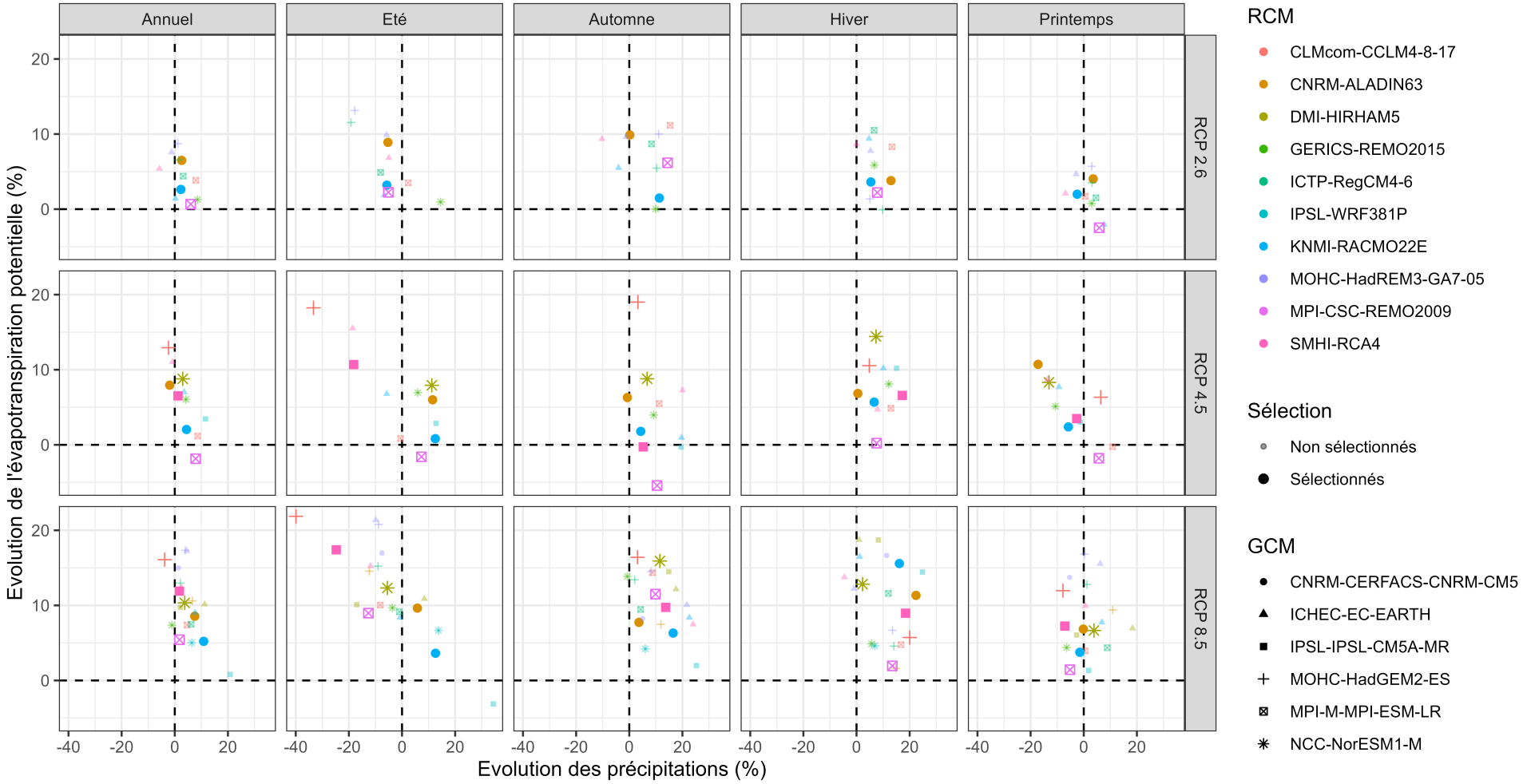


FIGURE B.1 – Sélection des projections climatiques. Les évolutions futures de l'ETP-PM (avec proxy Hargreaves du rayonnement) et des précipitations sont calculées par comparaison entre la période historique 1990-2019 et l'horizon de projection 2040-2069 agrégées sur le territoire de la Seille. Eté : juillet, août, septembre ; Automne : octobre, novembre, décembre ; Hiver : janvier, février, mars ; Printemps : avril, mai, juin. Les projections sélectionnées pour cette thèse figurent en symboles de plus grande taille alors que les projections non-sélectionnées sont de plus petite taille et estompées

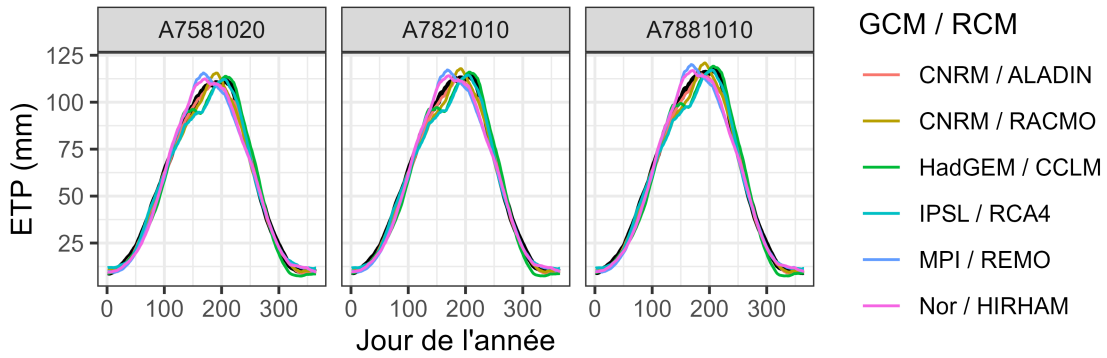
GCM	RCM	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	Nom simplifié
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CNRM-ALADIN63	✓	✓	✓	CNRM / ALADIN
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	KNMI-RACMO22E	✓	✓	✓	CNRM / RACMO
MOHC-HadGEM2-ES	CLMcom-CCLM4-8-17		✓	✓	HadGEM / CCLM
IPSL-IPSL-CM5A-MR	SMHI-RCA4		✓	✓	IPSL / RCA4
MPI-M-MPI-ESM-LR	MPI-CSC-REMO2009	✓	✓	✓	MPI / REMO
NCC-NorESM1-M	DMI-HIRHAM5		✓	✓	Nor / HIRHAM

TABLEAU B.1 – Couples de GCM/RCM sélectionnés pour effectuer les projections climatiques sur le bassin versant de la Seille

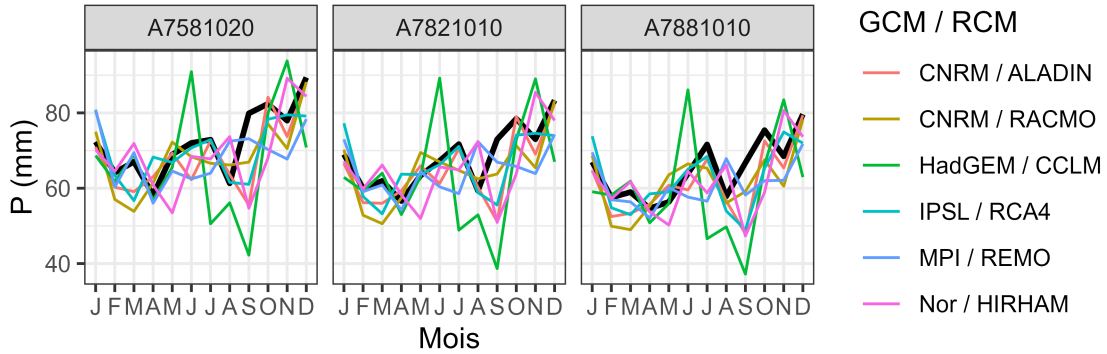
Par acquis de conscience, nous vérifions la cohérence des projections climatiques sélectionnées avec les observations SAFRAN sur la période 1976-2005, qui est une période pour laquelle les concentrations de gaz à effet de serre sont des valeurs observées et sont donc identiques pour les différents RCP.

On observe que les projections parviennent assez bien à reproduire les régimes d'évapotranspiration potentielle (Figure B.2 (a)), avec néanmoins des divergences sur les valeurs maximales atteintes et leurs dates. Les projections "MPI / REMO" et "Nor / HIRHAM" ont ainsi un pic d'évapotranspiration potentielle plutôt en avance et amorcent une diminution de l'évapotranspiration potentielle plutôt précoce. Concernant les précipitations (Figure B.2 (b)), on observe des divergences importantes entre les projections et les observations. Les variations autour des précipitations observées (SAFRAN) sont fortes à l'échelle mensuelle. Le modèle "HadGEM / CCLM" en particulier génère des projections trop sèches en été, et toutes les projections paraissent trop sèches au mois de septembre.

Si ces différences sur la période historique peuvent paraître perturbantes pour des projections climatiques corrigées, elles sont tout à fait explicables. Tout d'abord, les corrections sont effectuées à l'échelle de la saison. Cela signifie que le biais est proche de 0 sur une saison, mais peut varier sur les trois mois de cette saison. C'est ce qu'on observe notamment sur les précipitations. Par ailleurs, comme expliqué dans ce même rapport du projet Explore2 spécifique à la mise en place des méthodes de débiaisage, "les biais résiduels liés au conditionnement par régime de temps apparaissent car les fréquences de régimes ne sont pas identiques entre modèles et observations. Pour les variables avec une forte tendance (par exemple la température), le décalage des périodes de référence" de la correction ADAMONT (1974-2005 vs 1980-2011) "peut aussi induire un biais."(ROBIN et al., 2023)



(a) ETP Penman Monteith moyenne interannuelle sommée sur 30 jours glissants calculée avec la formule du rayonnement Hargreaves pour les observations (noir) et les projections sélectionnées (couleurs) sur la période 1976-2005. Données agrégées pour trois stations du bassin de la Seille



(b) Précipitations mensuelles moyennes pour les observations (noir) et les projections sélectionnées (couleurs) sur la période 1976-2005. Données agrégées pour trois stations du bassin de la Seille

FIGURE B.2 – Comparaison entre les données climatiques des projections sélectionnées et les données climatiques issues de la réanalyse SAFRAN sur la période 1976-2005

3 Analyse des projections de débits sur la période historique

Nous réalisons enfin une comparaison entre les débits observés, simulés avec SAFRAN et projetés avec GRcrop et les projections climatiques Explore2 pour les usages actuels (gestion de l'étang de Lindre et présence de retenues) sur la période 1990-2019 (1990-2015 pour la Seille à Metz A7881010), présentée dans la Figure B.3. Les débits projetés présentent une assez bonne cohérence avec les débits observés et simulés. On note toutefois que les débits projetés obtenus paraissent trop élevés en automne, et que certaines projections génèrent des débits beaucoup trop élevés en fin de printemps et en début d'été.

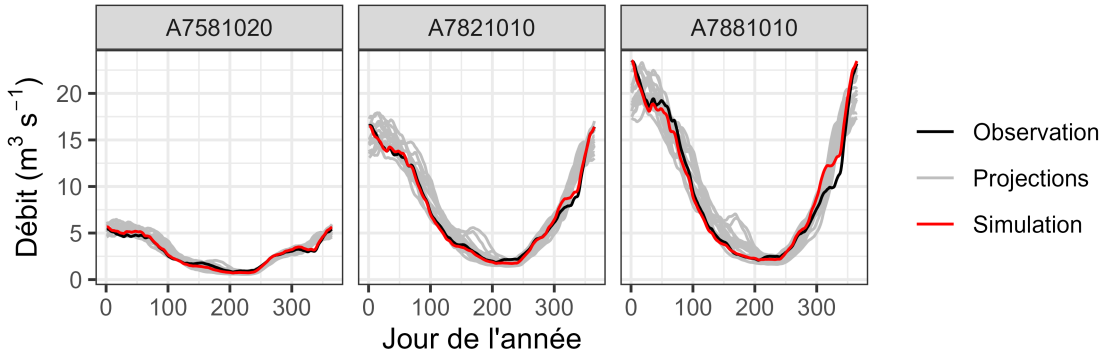


FIGURE B.3 – Régime des débits projetés avec usages actuels (i.e. modèle GRcrop forcé par les projections climatiques, en gris), simulés (i.e. modèle GRcrop avec usages actuels forcé par SAFRAN, en rouge), et observés (en noir) sur la période 1990-2019 (1990-2015 pour la Seille à Metz)

Annexe C

Grille d'entretien pour la construction de scénarios

Une grille d'entretien a été mise au point pour interroger les acteurs de façon semi-directive en vue de la construction de scénarios sur le bassin versant de la Seille. Pour chaque acteur interrogé, la grille a été remplie, et a constitué la donnée de base de construction des scénarios, présentés dans la Section IV.2. Cette grille est présentée dans cette annexe.

Grille d'entretien

Colonne de gauche : axes généraux	Colonne de droite : aides à la discussion, si besoin	*Commentaires*

1. Contexte venant des sondés	**20 minutes**	
Pouvez-vous vous présenter, vous et vos missions ? Les missions de votre institution ?	*Habitez-vous sur le territoire ? Dans le voisinage du territoire ?* *Poser des questions plus en détail pour bien comprendre les missions de l'interlocuteur, en quoi elles influencent l'agriculture et/ou la gestion de l'eau sur le territoire.* *Comment votre travail/vos missions ont-ils évolués ces dernières années ? Pourquoi ?* *Quel est le rayon d'influence de votre travail/de vos missions ? (< BV Seille, BV Seille, département, région…)* *Comment votre travail/vos missions devraient encore changer prochainement ?*	
Quels changements percevez-vous dans les systèmes agricoles/ dans la gestion de l'eau sur le territoire dans les années récentes ?		
Avez-vous connaissance de changements qui devraient prochainement être observés dans les systèmes agricoles/ dans la gestion de l'eau sur votre territoire ?	*PAC, projets de collectivités, implantation d'une usine de transformation agro-alimentaire, etc.*	
2. Identification des forces motrices de l'agriculture hors ressource en eau (verte ou bleue)	**20 minutes**	
Qu'est-ce qui influe et/ou va influer sur le paysage agricole, les pratiques agricoles ?	*Quelle influence des réglementations ou objectifs par les pouvoirs publics (par exemple biodiversité, énergie, plan régional de l'alimentation, atténuation, limitation des engrais et pesticides…) ?* *Quelle influence des secteurs économiques (demande*	

	pour certaines productions, développement de certaines filières, concurrence internationale pour les matières premières, l'énergie…) ? *Quelle influence de la société (exode rural vs exode urbain, nombre d'agriculteurs, diminution de consommation de produits animaux, internationalisation de la consommation alimentaire, place des produits animaux, place des produits bio…) ?* *Phénomènes/catastrophes « naturel(le)s » : canicules, tempêtes, ruissellement, érosion des sols, maladies/ravageurs des cultures, pandémies*	
3. Identification des forces motrices de la gestion de l'eau hors agriculture	**5 minutes**	*Il ne faudra passer que très peu de temps sur cette partie, car ces aspects ne pourront de toute façon pas être modélisés dans le cadre de la thèse ! ça peut être toutefois intéressant de relever ces informations, pour identifier les limites de mes scénarios ZAPPER CETTE PARTIE SI MANQUE DE TEMPS*
Qu'est-ce qui influe et/ou va influer la gestion de l'eau sur le bassin versant ?	*Demande en eau pour le secteur énergie ?* *Pour l'eau potable ?* *Pour les usages récréatifs ?*	
4. Identification de leviers d'adaptation	**30 minutes**	
Quels sont les leviers d'adaptation que vous identifiez sur le territoire, de façon la plus exhaustive possible, même si vous ne recommanderiez pas certains de ces leviers ?		
Quels sont les éventuels effets négatifs/positifs de ces leviers pour d'autres enjeux ?		
5. Construction de scénarios	**20 minutes**	
	Réflexion libre au regard des éléments déjà échangés	

Annexe D

Conséquences des zones inondables et hydromorphes sur les assolements

Les acteurs interrogés ont mis en avant un aléa inondation important le long de la Seille, ainsi que de l'hydromorphie [1]. La Seille déborde régulièrement sur les parcelles à proximité, lors de crues ou de manœuvres de vannes de l'étang de Lindre, et les sols à proximité des cours d'eau peuvent être saturés en eau. Nous devons donc considérer ces facteurs comme des contraintes à l'implantation de cultures sensibles sur les zones concernées. Il s'agira de maintenir les prairies en place dans les zones identifiées, voire d'en ajouter dans les éventuels scénarios prévoyant l'implantation de nouvelles prairies. Nous faisons l'hypothèse que les zones hydromorphes et inondables se recouvrent.

Nous souhaitons caractériser agronomiquement les zones inondables. Pour cela, nous souhaitons croiser les zones inondables et les parcelles de la base de données de MAELIA, permettant de connaître les rotations culturales sur ces dernières. Les parcelles de la base de données MAELIA (Section III.3.4) sont identifiées de façon à intersecter ou à être incluses dans l'emprise inondable. Les parcelles ainsi identifiées sont présentées en Figure D.1.

1. Saturation en eau du sol sur une période plus ou moins longue au cours d'une année, avec des conséquences sur la végétation et sur la production agricole : la saturation entraîne une anoxie et donc une asphyxie racinaire

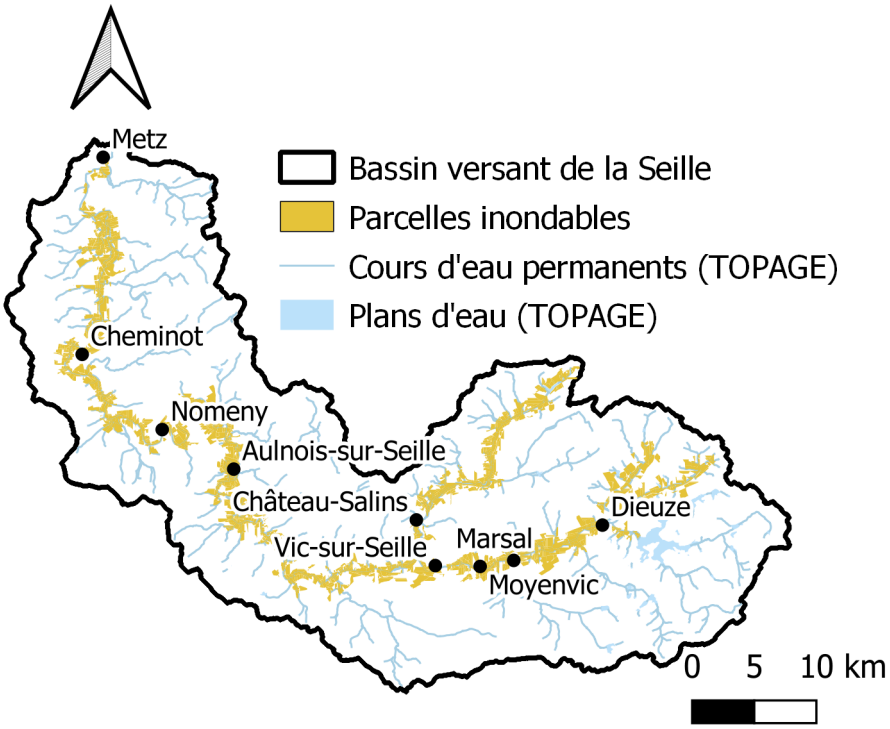


FIGURE D.1 – Parcelles MAELIA inondables

La base de données MAELIA permet également de connaître les successions culturales du registre parcellaire graphique. L'assolement des parcelles inondables est ainsi présenté dans le Tableau D.1. On observe que le secteur identifié comme inondable est majoritairement composé de prairies permanentes, ce qui est cohérent avec l'aléa inondation et l'hydromorphie. Néanmoins, sur la période de disponibilité des données, des prairies de ce secteur ont été converties en grandes cultures. Quelques parcelles, initialement en prairies, ont été semées de grandes cultures une ou quelques années, puis ont été de nouveau mises en prairies, pouvant indiquer un échec de la mise en place de grandes cultures. Ainsi, les surfaces du secteur potentiellement inondable en prairie permanente, ou en retour à la prairie après l'implantation d'autres cultures, seront considérées dans l'ensemble de nos scénarios comme des surfaces de prairies permanentes.

Type de parcelles	**Surface (ha)**	**Proportion (%)**
Prairies uniquement (prairie permanente)	6 645	54,0
Surfaces qui n'ont plus été en prairie de façon ponctuelle	61	0,5
Anciennes prairies converties en grandes cultures	403	3,3
Autres surfaces présentant ponctuellement de la prairie	123	1,0
Uniquement grandes cultures	5 070	41,2
Total	12 302	100

TABLEAU D.1 – Profil des parcelles identifiées comme potentiellement inondables. Les profils sont déterminés à partir des données d'entrée de MAELIA.

Annexe E

Exploitabilité de l'eau de la Seille pour l'irrigation au regard de la salinité

De nombreux acteurs ont fait part de leur scepticisme quant à la qualité des eaux du bassin versant de la Seille pour l'irrigation. En effet, pour être utilisable pour l'irrigation, une eau doit respecter un certain nombre de critères physico-chimiques. L'HÔTE (1967) avait évalué l'eau de la Seille comme globalement impropre à l'irrigation en raison de sa forte concentration en sels minéraux, et en particulier en chlorure de sodium (NaCl), de la station la plus en amont jusqu'à la station la plus en aval. Néanmoins, un certain nombre d'affluents ont révélé une composition chimique satisfaisante, notamment les affluents situés en amont de l'étang de Lindre ou se jetant dans la Seille immédiatement en aval de l'étang de Lindre (Verbach et Spin). De plus, L'Hôte a étudié les variations saisonnières de concentration en sels minéraux, et a montré que les propriétés physico-chimiques de la Seille sont très variables saisonnièrement. Il indique ainsi que : "

- Les eaux de la Seille, à Cheminot, peuvent être considérées comme « inutilisables », pour les débits voisins et inférieurs à 2 m^3 s^{-1}.
- Elles sont, en général, « bonnes à admissibles » pour des débits supérieurs à 5 m^3 s^{-1}.

Dans ces conditions, l'eau nécessaire à l'irrigation devrait être celle d'un réservoir [...]".

Une irrigation semble ainsi envisageable sur le bassin versant de la Seille, à condition que les prélèvements directs se fassent depuis des affluents propices, ou bien à partir de réservoirs remplis par de l'eau de surface qui n'aura pas été au contact des espaces de contamination en sels, ou bien remplis lors de périodes de faibles concentrations en minéraux, c'est-à-dire les mois de hautes eaux. L'étude menée par L'Hôte n'a cependant pas porté sur les eaux de l'étang de Lindre elles-mêmes. De plus, l'affluent le plus en aval considéré, la Petite Seille, est en réalité encore situé plutôt en amont au regard de l'ensemble du bassin versant de la Seille. Enfin, les travaux menés remontent à 1967. Il semble important de confirmer les résultats obtenus avec des données plus récentes.

La composition chimique de l'étang de Lindre a quant à elle été analysée dans la thèse de DUBOST-EBERSVEILLER (1996), reprenant des mesures de 1991 à 1992. Les résultats ont néanmoins été utilisés dans l'optique d'étudier les relations eau – pisciculture, et non dans l'optique d'évaluer la possibilité d'utiliser l'eau de l'étang de Lindre pour l'irrigation.

Pour pouvoir construire des stratégies réalistes d'irrigation à partir des eaux de surface, un diagnostic complémentaire des eaux de surface et une évaluation de leurs propriétés pour l'irrigation au regard de la salinité est donc nécessaire. Ce diagnostic a été réalisé en combinant des bases de données existantes à des mesures sur le terrain effectuées dans le cadre de la thèse. Un cadre d'analyse classique pour évaluer les eaux salines repose sur l'étude conjointe (RICHARDS, 1954) :

- de la conductivité : elle permet d'évaluer le risque de salinisation des sols ;
- de la teneur relative en sodium par rapport aux autres ions minéraux, par exemple via le calcul du SAR (Sodium Absorption Ratio) : il permet d'évaluer le risque d'alcalnisation des sols selon le ratio de concen-

tration en ions sodium (Na^+) sur sa concentration en ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) en milliéquivalents (meq, Equation E.1) :

$$SAR = \frac{[Na^+]_{meq}}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}]_{meq}+[Mg^{2+}]_{meq}}{2}}} \tag{E.1}$$

1 Données physico-chimiques des eaux de surface de la Seille

Plusieurs sources de données disponibles, de format hétérogène, ont été utilisées pour l'analyse de l'exploitabilité des eaux de surface pour l'irrigation.

- **La base de données Naïades :** La base de données Naïades [1] compile les chroniques d'observations physico-chimiques de l'eau à des stations. Cette base de données vise à collecter et à mettre à disposition sous un format standardisé des données produites dans différents contextes et pour différents objectifs. Les stations peuvent donc disposer de mesures sur des périodes plus ou moins longues, pour des pas de temps et des variables mesurées hétérogènes. Sur la période 2015 à 2020, des données de concentrations en ions sodium, chlorures, calcium et magnésium et conductivité sont disponibles sur sept stations sur le bassin versant de la Seille, dont cinq stations sur la Seille, de l'amont vers l'aval :
  - Assenoncourt ;
  - Mulcey ;
  - Nomeny ;
  - Cheminot ;
  - Metz.

  Néanmoins, un seul affluent du bassin versant de la Seille, la Petite Seille, y fait l'objet d'analyses, sur deux stations, de l'amont vers l'aval :
  - Haboudange ;
  - Salonnes.
- **Thèse de DUBOST-EBERSVEILLER (1996) :** Dans le cadre des travaux de thèse de DUBOST-EBERSVEILLER (1996) sur la pisciculture, des mesures de conductivité, de concentration en Cl^-, Na^+, Mg^{2+}, Ca^{2+} ont été réalisées pour l'étang de Lindre. Cette thèse présente des intervalles de valeurs sous forme de graphiques et sous forme écrite, et établit précisément les valeurs moyennes pour ces paramètres sur 1991 et 1992.
- **Thèse de L'HÔTE (1967) :** Dans le cadre de sa thèse, L'HÔTE (1967) avait déjà évalué le potentiel des eaux de surface du bassin versant de la Seille pour l'irrigation. Celui-ci a effectué et analysé des prélèvements sur treize stations de 1964 à 1966 en période de hautes eaux et en période de basses eau : sept sur la Seille, la plus en amont située en amont de Dieuze et la plus en aval à Magny ; huit sur divers affluents, dont trois en amont de l'étang de Lindre :
  - le Ruisseau de la Boule ;
  - le Ruisseau de l'Etang de Norweiher ;
  - le Speck ; et cinq en aval de l'Etang de Lindre, de l'amont vers l'aval :
  - le Verbach (rive droite) ;
  - le Spin (rive droite) ;
  - le Ruisseau de Videlange (rive gauche) ;
  - le Canal de Flottage des Salines (rive gauche) ;
  - la Petite Seille (rive droite).
- **Mesures complémentaires en juin 2022 :** Pour compléter ces données, j'ai réalisé le 14 juin 2022 des mesures complémentaires de conductivité sur des affluents de la Seille listés ci-dessous de l'amont vers l'aval :
  - la Petite Seille (rive droite) ;

1. https://www.naiades.eaufrance.fr/

- le Verbach (rive droite) ;
- le Ruisseau la Loutre noire (rive gauche) ;
- le Ruisseau des Ossons (rive droite) ;
- le Ruisseau de Saint-Jean (rive droite) ;
- le Ruisseau de Grève (rive gauche) ;
- le Ruisseau de Moince (rive droite) ;
- le Ruisseau de Saint-Pierre (rive droite).

De plus, une mesure de conductivité a pu être réalisée directement dans l'étang de Lindre à cette même date. Ces données permettent ainsi de compléter les autres bases pour évaluer la variabilité spatiale de la salinité de l'eau sur le bassin versant de la Seille, en s'intéressant particulièrement à la charge en sel des affluents.

Nous récapitulons les localisations analysées et la provenance des données dans le Tableau E.1. Les localisations sont numérotées de l'amont vers l'aval, d'abord pour la Seille (1 à 10) puis pour les affluents (11 à 26), en incluant l'étang de Lindre dans la succession d'affluents pour l'identifiant 14. Ces stations sont de plus localisées sur la Figure E.1.

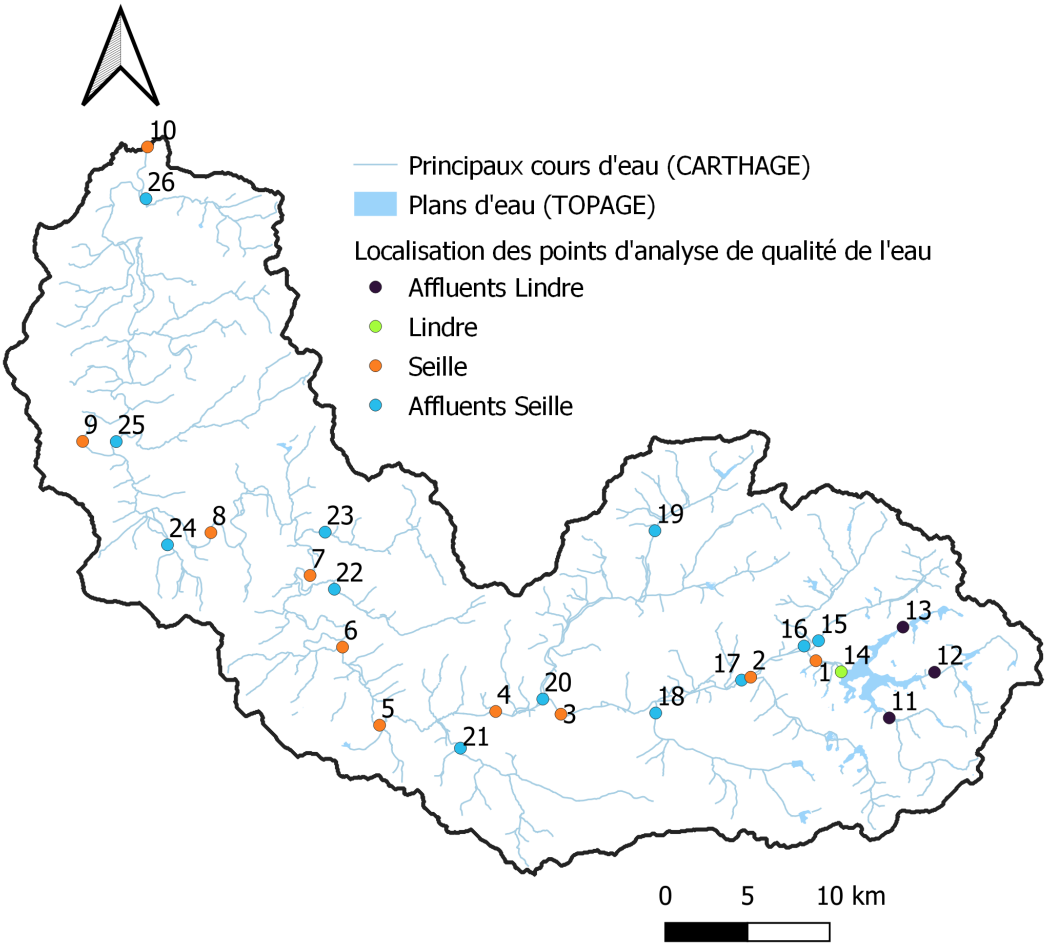


FIGURE E.1 – Localisations des analyses physico-chimiques du bassin versant de la Seille. Les identifiants correspondent à ceux définis pour les localisations dans le Tableau E.1

2 Traitement des données de qualité des eaux de surface pour l'irrigation

Les stations étudiées et les données utilisées ont été présentées dans dans la Section E.1. **La numérotation des stations est ainsi donnée dans le Tableau E.1 et leur localisation dans la Figure E.1.** Les données sont mises en forme pour en permettre l'analyse selon la procédure décrite dans les sections ci-après.

Nom	Id	Naïades (2015-2020)	L'HÔTE (1967)	DUBOST-EBERSVEILLER (1996)	Soutif-Bellenger (2022)
LA SEILLE À DIEUZE - AMONT	1		X		
LA SEILLE À MULCEY	2	X	X		
LA SEILLE À VIC-SUR-SEILLE	3		X		
LA SEILLE À CHAMBREY	4	X			
LA SEILLE À BIONCOURT	5		X		
LA SEILLE À LANFROICOURT	6	X			
LA SEILLE À AULNOIS-SUR-SEILLE	7		X		
LA SEILLE À NOMENY	8	X			
LA SEILLE À CHEMINOT	9	X	X		
LA SEILLE À METZ	10	X	X		
LE RUISSEAU DE BOULE	11	X	X		
LE RUISSEAU DE L'ETANG DE NOLWEIHER	12		X		
LE SPECK	13		X		
ETANG DE LINDRE	14			X	X
LE VERBACH	15		X		X
LE SPIN	16		X		
LE VIDELANGE	17		X		
LE CANAL DES SALINES	18		X		
LA PETITE SEILLE À HABOUDANGE	19	X			
LA PETITE SEILLE À SALONNES	20	X	X		X
LE RUISSEAU DE LA LOUTRE NOIRE	21				X
LE RUISSEAU DES OSSONS	22				X
LE RUISSEAU DE SAINT-JEAN	23				X
LE RUISSEAU DE GREVE	24				X
LE RUISSEAU DE MOINCE	25				X
LE RUISSEAU DE SAINT-PIERRE	26				X

TABLEAU E.1 – Disponibilité de données physico-chimiques sur les localisations selon les différentes sources d'information. Les localisations sont placées sur une carte de la Seille en Figure E.1

2.1 La base de données Naïades

Pour simplifier l'analyse, nous agrégeons les valeurs de concentrations disponibles, sélectionnées entre 2015 et 2020, pour chaque station en calculant des moyennes mensuelles. Dans cette base de données, aucune donnée de [Na^+] n'est disponible sur les stations de la Seille à Chambrey et de la Seille à Lanfroicourt, ne permettant pas de calculer un SAR sur ces stations. Ces stations peuvent néanmoins être analysées au regard de leur conductivité. De plus, nous considérons que les données disponibles à une station sont représentatives de l'ensemble de la variabilité saisonnière potentielle si suffisamment de mois sont représentés en période hivernale (novembre à avril) et estivale (mai à octobre). Pour les stations Cheminot et Haboudange, nous ne disposons ainsi pas de valeurs de [Na^+] représentatives de l'ensemble de la variabilité saisonnière potentielle. Or, nous supposons que les concentrations en sodium et chlorures sont probablement corrélées, notamment parce que ces ions peuvent être obtenus par la dissolution de chlorure de sodium NaCl. Pour ces deux stations, nous obtenons une relation entre [Na^+] et [Cl^-] sur les points de mesure disponibles, c'est-à-dire avec mesure conjointe de [Na^+] et [Cl^-] (14 points pour la Seille à Cheminot, 14 points pour la Seille à Haboudange) par régression linéaire : $Y_i = a + b \times X_i + E_i$, avec :

- Y_i : [Na^+] en mmol L^{-1}, la variable cible ;
- X_i : [Cl^-] en mmol L^{-1}, la variable explicative ;
- a : l'ordonnée à l'origine (-) ;
- b : le coefficient directeur (-) ;
- E_i : l'erreur en mmol L^{-1}.

Les régressions obtenues sont dans le Tableau E.2. Nous obtenons sur ces deux stations des relations linéaires précises et fiables entre [Na^+] et [Cl^-]. Nous remarquons en particulier sur la Seille à Cheminot que la relation obtenue s'assimile à l'équilibre stœchiométrique [Na^+] = [Cl^-], en mmol L^{-1}, mettant en évidence la dissolution de NaCl comme principal facteur de présence de Na^+ et de Cl^- dans l'eau. Nous complétons donc les chroniques observées de [Na^+] par des valeurs estimées pour les mois pour lesquels nous ne disposons pas de données sur les stations de la Seille à Cheminot et la Petite Seille à Haboudange.

	a	b	p-valeur(b)	R^2
La Seille à Cheminot	$-0,06$	$1,02$	$< 2 \times 10^{-16}$	$0,997$
La Petite Seille à Haboudange	$-0,06$	$1,20$	$5,44 \times 10^{-12}$	$0,980$

TABLEAU E.2 – Résultats des régressions linéaires entre concentration en sodium et concentration en chlore. La p-valeur de b est la probabilité que b soit nul, calculée avec un test de Student. La probabilité est très faible, donc il est probable que b ne soit pas nul. R^2 est le coefficient de détermination,compris entre 0 et 1, qui évalue l'écart de la dispersion des points par rapport au modèle, ici la droite de régression. Plus la valeur est proche de 1, plus les points sont proches de la droite : ici les points sont proches de la droite de régression

2.2 Thèse de DUBOST-EBERSVEILLER (1996)

Concernant les données présentées dans la thèse de DUBOST-EBERSVEILLER (1996), nous ne disposons pas des valeurs exhaustives, mais seulement d'intervalles de variation de concentration de Na^+, Cl^- et de conductivité. Nous estimerons ainsi des valeurs minimales et maximales de SAR et de conductivité au regard des données partagées.

2.3 Thèse de L'HÔTE (1967)

Ces données ponctuelles, issues de l'analyse de prélèvements effectués de 1964 à 1966 sur 13 stations, sont directement exploitées. Elles ne permettent néanmoins pas de couvrir l'ensemble de la variabilité saisonnière potentielle de la qualité des eaux d'irrigation.

2.4 Mesures complémentaires en juin 2022

Les mesures complémentaires que j'ai réalisées ne permettent pas de calculer directement un SAR, puisque nous ne disposons pas de concentrations en sodium. Nous évaluerons donc ces échantillons au regard de leur conductivité.

3 Méthodologie d'analyse de la qualité des eaux de surface pour l'irrigation

Notre méthodologie d'analyse s'appuie d'une part sur le diagramme RICHARDS (1954) pour les données pour lesquelles nous disposons des données nécessaires à son calcul (Equation E.1), d'autre part sur l'analyse simple de la conductivité pour les autres données.

3.1 Diagramme RICHARDS (1954)

Le diagramme Richards permet de visualiser la qualité de l'eau pour l'irrigation (Tableau E.3) selon un croisement de classes de SAR et de conductivité. Pour faciliter l'analyse, une chronique de SAR moyen mensuel et une chronique de conductivité moyenne mensuelle sont construites pour chaque station, et placées dans le diagramme Richards, afin de visualiser pour chaque station si l'eau paraît utilisable pour l'irrigation selon le mois étudié.

			Risque d'alcalinisation			
			S1	**S2**	**S3**	**S4**
			Faible	**Moyen**	**Elevé**	**Très élevé**
Risque de salinisation	**C1**	**Faible**	Excellente	Bonne	Admissible	Mauvaise
	C2	**Moyen**	Bonne	Bonne	Admissible	Mauvaise
	C3	**Elevé**	Admissible	Admissible	Admissible	Très mauvaise
	C4	**Très élevé**	Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise	Très mauvaise

TABLEAU E.3 – Qualité de l'eau pour l'irrigation selon les classes de risque de salinisation et d'alcalinisation du diagramme Richards (interprété de RICHARDS, 1954). Les classes seront présentées dans les graphiques ultérieurs

De plus, nous complétons le diagramme Richards par l'ajout de limites caractéristiques de conductivité pour l'irrigation selon le type de sol et la sensibilité des cultures (DURAND, 1973). Nous considérons que nous sommes sur un sol majoritairement argileux (EL GHACHI, 2007), type de sol contraignant pour l'utilisation d'eau saline, et nous obtenons les limites présentées dans le Tableau E.4.

Seuil de conductivité (µS cm^{-1})	Cultures qui ne peuvent plus être irriguées au-delà du seuil de conductivité
1800	Prairies de prés salés
1600	Colza
1000	Vergers, céréales à paille, maïs, sorgho, tournesol, la plupart des espèces de maraîchage
400	Prairies non résistantes à la salinité, salades...

TABLEAU E.4 – Seuil de tolérance de conductivité des cultures sur sol argileux

3.2 Comparaison des données de concentration en chlore et de conductivité

Pour certaines stations et pour les prélèvements complémentaires, nous ne disposons pas des données nécessaires de SAR permettant de les analyser à travers un diagramme Richards. De ce fait, nous comparons ces stations directement au regard des données de conductivité ou de concentration de chlore, si elles sont disponibles, sur des périodes homogènes.

4 Résultats

Les diagrammes Richards de la Seille et de ses affluents pour les données pour lesquelles nous avons pu calculer des SAR sont données respectivement en Figure E.2a et Figure E.2b. En complément, nous avons tracé les courbes de conductivité pour toutes les localisations disposées sur les affluents et pour les localisations sur la Seille sur lesquelles nous ne pouvions pas calculer le SAR (Figure E.3). Nous analysons les résultats dans l'ordre suivant : d'abord la Seille, puis les affluents de l'étang de Lindre, puis l'étang de Lindre.

4.1 La Seille

Pour la Seille, nous avons pu placer huit stations dans le diagramme Richards (Figure E.2a). Les stations de la Seille sont situées dans les catégories C3S1, C3S2, C4S2, C4S3 . D'après le Tableau E.3, une conductivité au niveau C3 correspond déjà à un haut niveau de risque de salinisation. Néanmoins, une eau avec une salinité C3, conjuguée avec un niveau modéré de risque d'alcalinisation (S1, S2), est généralement considérée comme admissible pour l'irrigation, à condition de pouvoir lessiver les minéraux et de mettre en place des cultures suffisamment tolérantes. Les eaux C4 ne peuvent être utilisées que pour des cultures très tolérantes au sel. Chaque station sur la Seille est classée en C4 pour au moins un mois dans l'année. Ainsi, aucune station sur la Seille ne correspond à une eau qui peut être utilisée toute l'année. De plus, les conductivités et SAR les plus élevés sont observés de mai à octobre, c'est-à-dire en période de potentielle irrigation. Certaines stations présentent, pour les mois d'hiver, des caractéristiques admissibles (C3S1, C3S2). Néanmoins, même sur la période de novembre à avril, la conductivité paraît élevée, puisque toutes les stations ont globalement des conductivités supérieures à 1000 µS cm^{-1}, seuil de tolérance pour de nombreuses cultures sur des sols argileux (Tableau E.4). On considère ainsi que les eaux de la Seille sont impropres à l'irrigation, même par stockage d'eau hivernale.

Nous ne disposions pas de données de [Na^+] pour les stations de Chambrey (4) et de Lanfroicourt (6) (les numérotations correspondent à celles indiquées dans le Tableau E.1). Ces stations sont assez centrales sur le bassin versant (Figure E.1). Nous avons donc analysé ces stations au regard de leur conductivité (Figure E.3). Ces stations atteignent des conductivités très élevées, largement supérieures à 1000 µS/cm tout au long de l'année. L'eau à ces localisations ne peut donc pas non plus être utilisée pour l'irrigation.

4.2 Les affluents de l'étang de Lindre

Nous disposons de données pour le ruisseau de Boule (11), le ruisseau de l'étang de Norweiher (12) et le Speck (13). Sur la Figure E.2a, nous voyons que ces affluents parviennent à des valeurs presque acceptables certains mois de l'année, c'est-à-dire proches ou en-dessous de 1000 µS cm^{-1}. Globalement, les affluents de l'étang de Lindre pour lesquels nous disposons de données semblent ainsi présenter une conductivité relativement faible. Il est à noter que nous ne disposons que d'une donnée en période d'étiage pour le ruisseau de l'étang de Norweiher et le Speck, et qu'il est donc probable que la conductivité en période de hautes eaux soit encore bien inférieure.

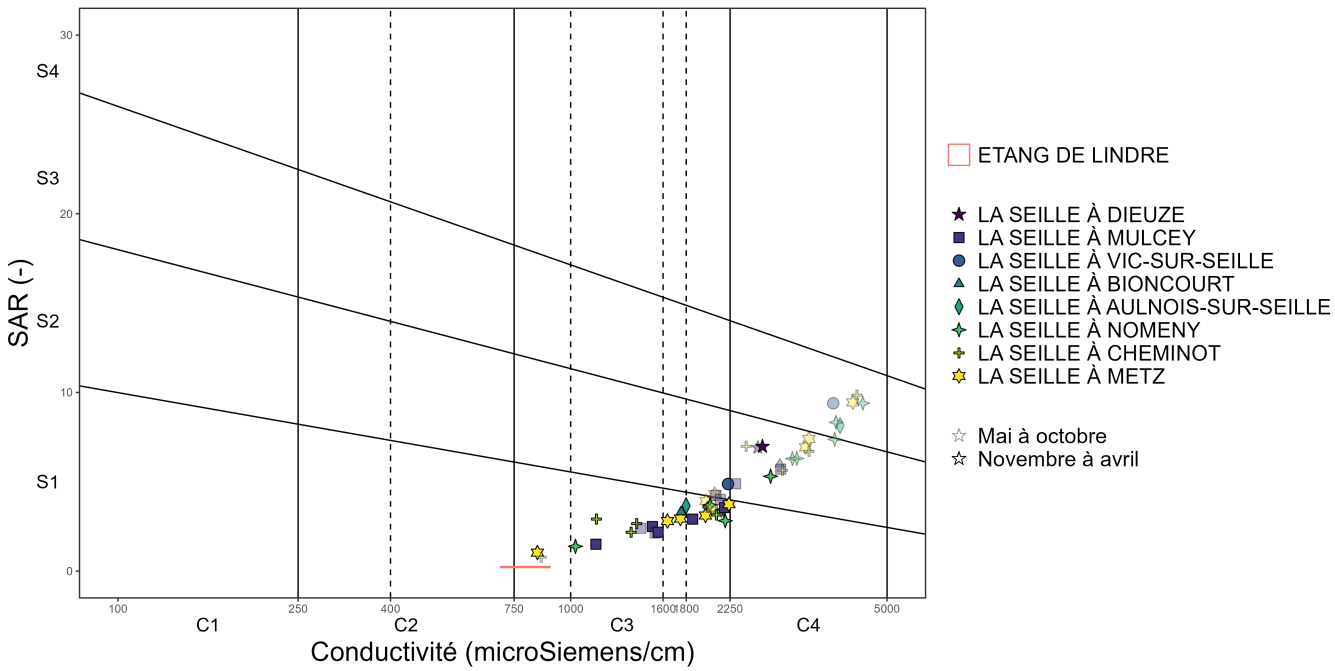
4.3 L'étang de Lindre

Nous avons fait apparaître l'intervalle de SAR et de conductivité de l'étang de Lindre sur la Figure E.2 estimé à partir des données présentées dans la thèse de DUBOST-EBERSVEILLER (1996). On observe que le SAR semble peu varier. De plus, la conductivité demeure modérée, puisque inférieure à 1000 µS cm^{-1}. Cette information est cohérente avec les données récoltées sur les affluents de l'étang de Lindre ci-dessus.

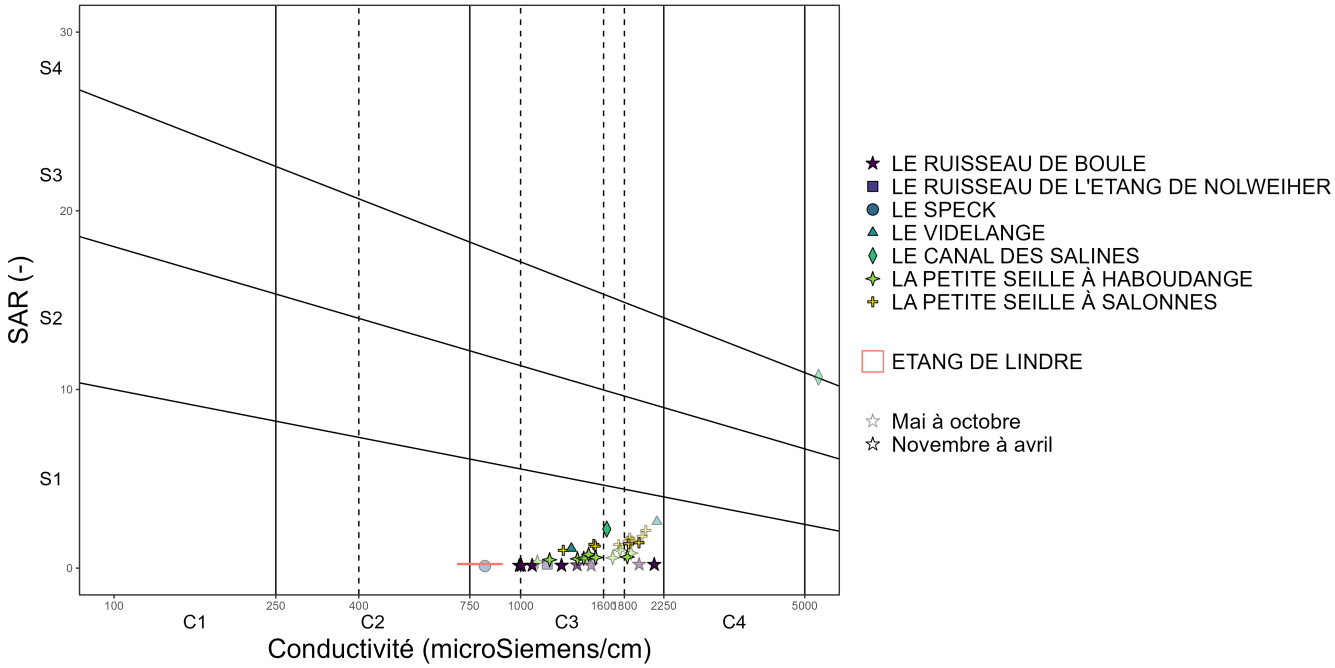
4.4 Les affluents de la Seille

Concernant les affluents de la Seille, nous avons pu en disposer sept sur le diagramme Richards (Figure E.2b). Les affluents de la Seille sont globalement moins salins que la Seille elle-même. De plus, les affluents pour lesquels nous disposions de données de [Na^+] paraissent globalement avoir un SAR faible.

La discrimination entre une eau utilisable pour l'irrigation et une eau non utilisable pour l'irrigation pour les affluents va donc se faire selon la conductivité. Sur la Figure E.2b, seuls les affluents en amont de l'étang de Lindre, ainsi que la Petite Seille à Haboudange (19), plutôt située en amont de la Petite Seille (Figure E.1), parviennent à des valeurs modérées de conductivité. Concernant la Figure E.3, L'HÔTE (1967) a relevé une faible conductivité (C1) pour le Verbach (15) en étiage, néanmoins, notre mesure complémentaire a donné une conductivité de 1602 µS cm^{-1} au mois de juin 2022, faisant passer cet affluent dans la catégorie C3. On peut donc supposer que la qualité de l'eau s'est fortement dégradée entre 1967 et 2022 sur le bassin versant du Verbach. Nous supposerons que le Spin, voisin du Verbach qui présentait également une faible conductivité dans les travaux de L'Hôte, a connu la même évolution. Ainsi, parmi les données Naïades et issues de la thèse de L'HÔTE (1967), peu d'affluents semblent mobilisables pour l'irrigation, même par stockage en hautes eaux, à part les affluents de l'étang de Lindre et l'étang de Lindre lui-même. Néanmoins, certains prélèvements réalisés en juin 2022 ont donné des valeurs de conductivité satisfaisantes, soit inférieurs à 1000 µS cm^{-1}, à partir du ruisseau des Ossons (22) et en aval de cet affluent.



(a) Mesures sur la Seille



(b) Mesures sur les affluents de la Seille

FIGURE E.2 – Moyennes mensuelles aux stations Naïades, valeurs ponctuelles mesurées par L'HÔTE (1967) et intervalle estimé de l'étang de Lindre d'après DUBOST-EBERSVEILLER (1996) de SAR et de conductivité disposées sur le diagramme Richards pour les localisations sur la Seille (a) et ses affluents (b)

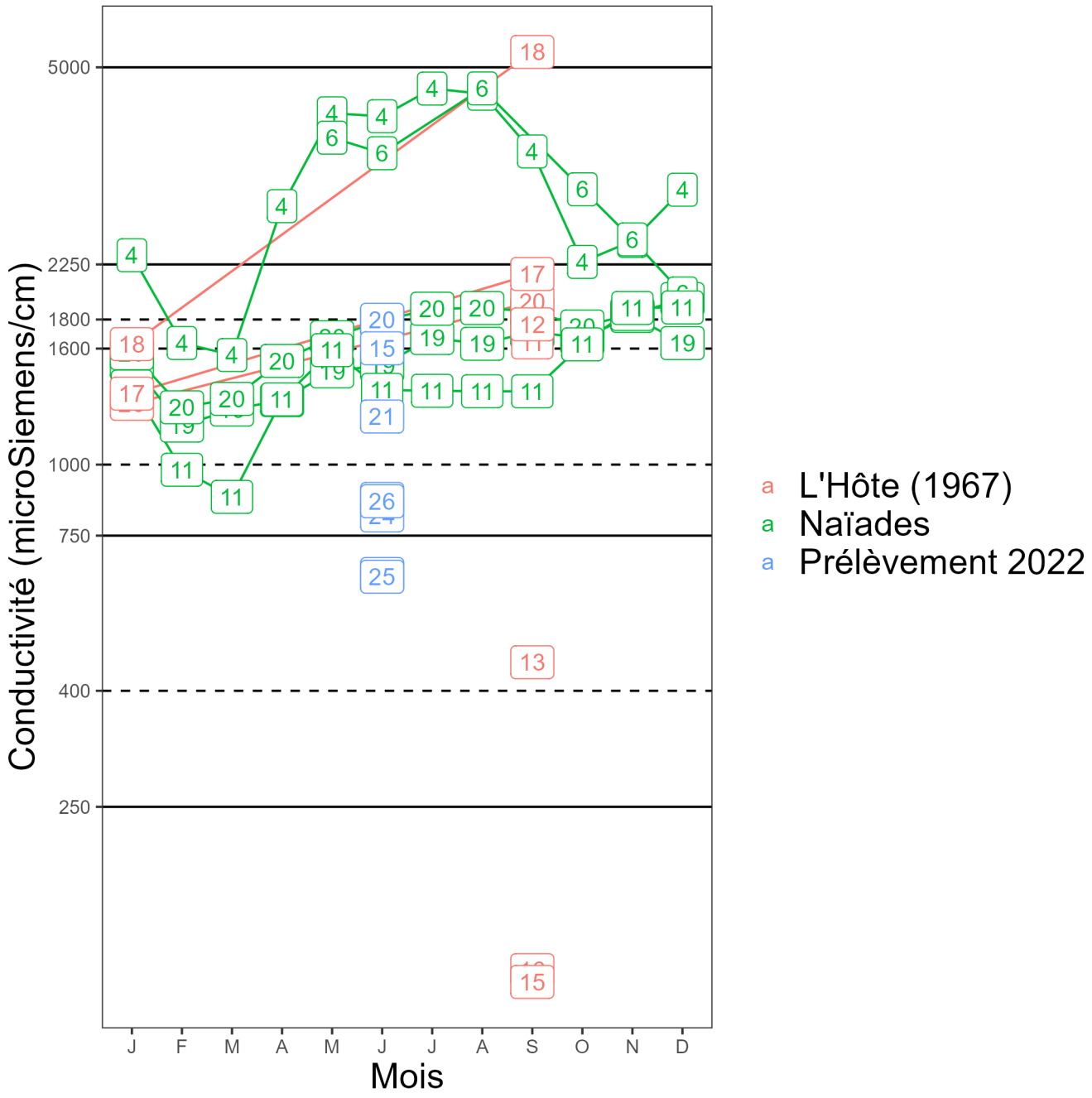


FIGURE E.3 – Conductivité pour les stations sans données de concentration en sodium

Plus généralement, en croisant ces résultats et leur localisation (Figure E.1), nous pouvons constater la présence d'une zone d'enrichissement en sels dès Dieuze par rapport à l'eau stockée dans l'étang de Lindre apportée par des affluents relativement peu chargés en sels.

Les affluents entre l'étang de Lindre et le Ruisseau des Ossons semblent également assez chargés en sel. La conductivité en amont des affluents semble plus faible, comme l'indiquent les valeurs sur la Petite Seille à Haboudange (19).

Enfin, à partir du Ruisseau des Ossons, et plus en aval, les affluents semblent peu chargés en sels.

5 Conclusion et hypothèses pour la scénarisation

Suite à ces analyses, nous considérerons pour l'ensemble des scénarios que l'eau ne peut être valorisable pour l'irrigation que par stockage en période de hautes eaux. Cela permet à la fois d'éviter de stocker de l'eau lors des périodes où celle-ci serait riche en sels, mais aussi de limiter a priori l'impact de l'irrigation sur les étiages par rapport à des prélèvements directement en rivière en période d'étiage.

Nous considérons que seuls trois types de masses d'eau seront exploitables pour l'irrigation sous forme de stockage :

- l'eau des affluents à partir du Ruisseau des Ossons ;
- l'eau de l'étang de Lindre : l'étang constitue un stock d'eau très important (13 millions de m^3). Nous devrons donc définir une zone autour de l'étang de Lindre sur laquelle l'irrigation, si elle est effective, se fait à partir de l'étang de Lindre via des réseaux sous pression ;
- l'eau en amont des affluents sur le secteur entre l'étang de Lindre et le bassin versant du ruisseau des Ossons.

Annexe F

Développement d'une modélisation des vidanges de l'étang de Lindre

Les caractéristiques générales de l'étang de Lindre sont renseignées dans la Section III.3.3. Les détails de sa gestion et des problématiques qu'il génère sont quant à elles décrites dans la Section IV.2.1.5.

L'hydrologie de la Seille est fortement influencée par l'étang de Lindre en amont, comme on peut le voir sur la station limnimétrique la plus proche de l'étang de Lindre, la Seille à Moyenvic (A7581020) (Figure F.1). Les impacts de la gestion de l'étang de Lindre sur les débits y sont particulièrement remarquables. Celle-ci est toutefois située à une longueur hydraulique de 15,23 km en aval du barrage de l'étang de Lindre (Figure III.15). Celui-ci est vidangé régulièrement en fin d'été et en automne pour la pêche, puis se remplit au cours de l'automne et de l'hiver. De plus, la gestion de l'étang de Lindre dans le futur pourra varier selon les scénarios modélisés (Section IV.2.4). Il est donc nécessaire de mettre en place une modélisation explicite de ce dernier. **Cependant, nous ne disposons pas de données de gestion (chroniques de remplissage et de vidange) ni des règles précises. Une approche a donc été mise en place pour pallier ce manque.**

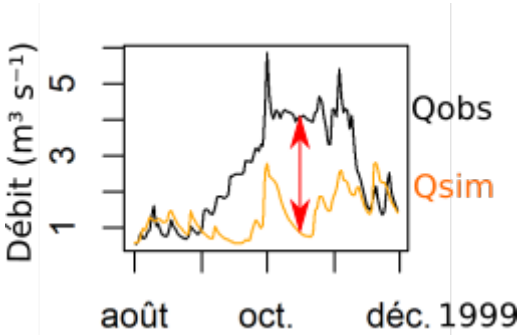


FIGURE F.1 – Mise en évidence de l'impact d'une vidange durant l'automne 1999 : le débit observé augmente de façon inexpliquée sur la Seille à Moyenvic par comparaison avec le débit simulé sans prise en compte de la vidange. L'écart s'explique par l'occurrence d'une vidange de l'étang de Lindre à cette période, non prise en compte dans le modèle hydrologique "naturel"

Pour modéliser la gestion de l'étang de Lindre, nous avons ainsi développé une méthode nécessitant plusieurs étapes :

- une reconstitution des chroniques de vidange de l'étang de Lindre ;
- une estimation des dates de vidange ;
- une mise en place du modèle de vidange.

1 Développement de la modélisation de l'étang de Lindre

1.1 Reconstitution des chroniques de vidange de l'étang de Lindre :

Faute de mesures disponibles, nous supposons que la gestion peut être déduite de la différence entre la simulation hydrologique sans prise en compte de l'influence et les débits observés à la station de la Seille à Moyenvic (A7581020). Nous sommes conscients que procéder ainsi revient à négliger l'incertitude de modélisation hydrologique, mais nous considérons qu'il s'agit de la meilleure approximation réalisable.

La simulation initiale est issue d'un modèle (naturel) calé sur les observations (influencées), et il est nécessaire d'adapter le calage à la prise en compte de la vidange pour estimer l'erreur réelle. Nous mettons en place un algorithme (Figure F.2) itératif de la manière suivante :

1. Calage du modèle hydrologique (naturel) du bassin versant de la Seille à Moyenvic ;
2. Réalisation d'une simulation (Q_{sim}) du modèle hydrologique dans lequel on injecte les séries temporelles de vidange (nulle à la première itération), de remplissage et de débit réservé ;
3. Ajustement de la chronique de vidange par la chronique de l'erreur $Q_{obs} - Q_{sim}$;
4. Simulation d'un réservoir rempli par ruissellement et vidangé par la chronique de vidange (et par le débit réservé) permettant de déterminer une nouvelle chronique de vidange, de remplissage et de débit observé ;
5. Calage du modèle hydrologique dans lequel on injecte les séries temporelles de vidange, de remplissage et de débit réservé précédemment obtenues ;
6. Retour à la deuxième étape. Cette séquence est répétée jusqu'à ce que le KGE calculé grâce à la transformation racine carrée des débits de la simulation avec supervision ne varie plus que de 0,01 entre deux itérations.

Nous fixons un débit réservé de 80 L s^{-1} conformément à la valeur indiquée dans la thèse de BANAS (2001). L'évaluation des chroniques de vidange obtenues a de plus été réalisée qualitativement, en sollicitant l'expertise du gestionnaire de l'étang de Lindre. Les chroniques de vidange reconstituées nous permettent de construire un modèle de gestion de l'étang de Lindre capable de reproduire de façon satisfaisante ces vidanges.

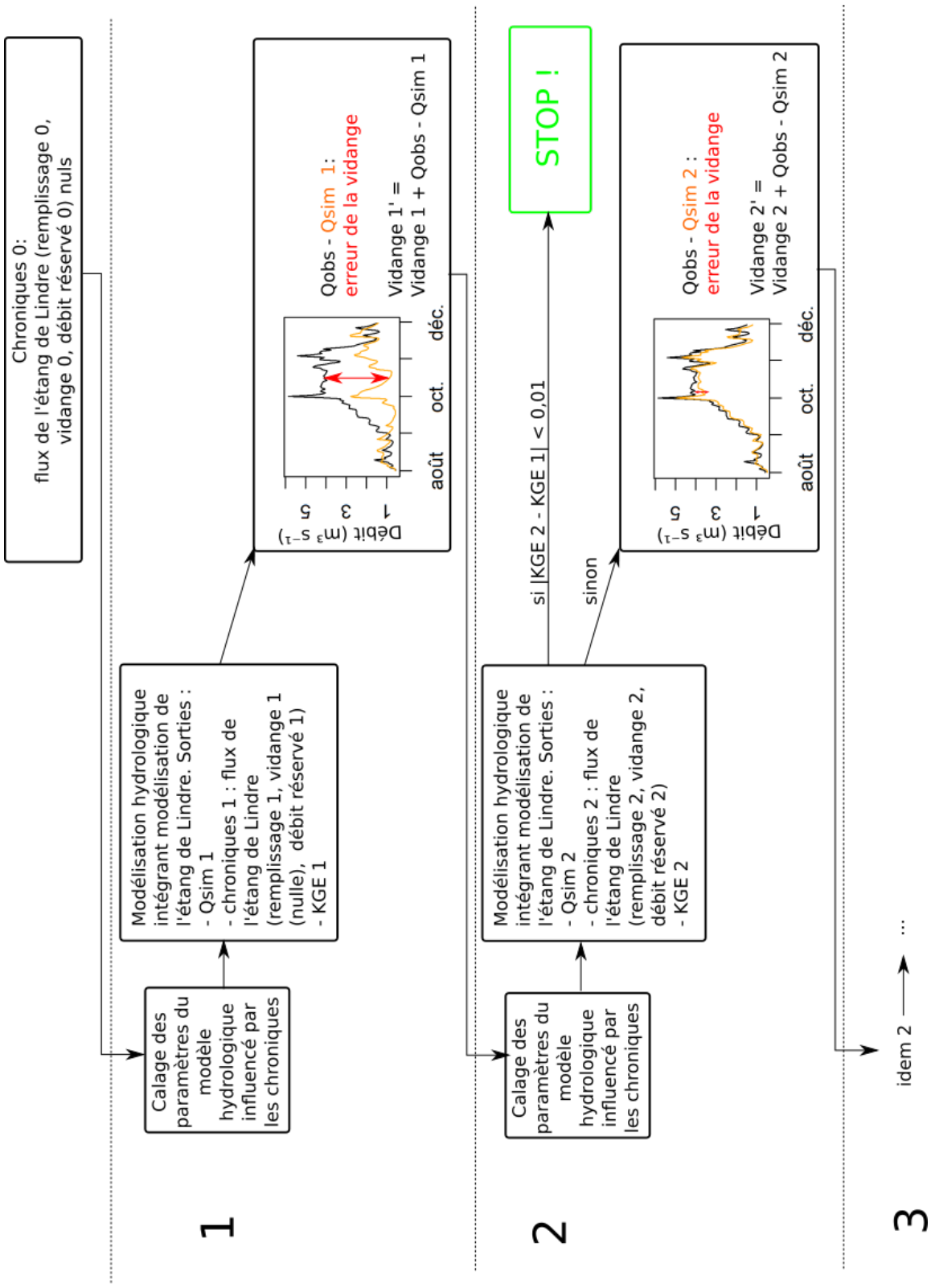


FIGURE F.2 – Fonctionnement de l'algorithme de construction des chroniques de vidange de l'étang de Lindre par comparaison entre simulations et observations et amélioration itérative

1.2 Estimation des dates de vidange :

Les années de vidange et les dates de début de vidange ont été estimées via la visualisation des chroniques reconstituées. Les dates de début de vidange ont ensuite été comparées aux données de gestion de l'étang de Lindre disponibles certaines de 1998 à 2000, de 2002 à 2004, puis de 2008 à aujourd'hui. Ces données précisent seulement le nombre de tours d'ouverture de plusieurs vannes sur le barrage de l'étang de Lindre, et n'ont pu être recueillies qu'en début de troisième année de la thèse, ce qui explique pourquoi elles n'ont pas été utilisées directement dans la mise en place du modèle de vidange. Cette comparaison a permis d'ajuster les dates de début de vidange réelles. De plus, les échanges avec le gestionnaire de l'étang de Lindre ont permis de prendre en compte dans la modélisation les assecs prolongés de l'étang de Lindre de 2004 à 2006, et de 2009 à 2011, pour travaux.

Certaines années, le modèle ne parvient pas à finaliser la vidange, c'est-à-dire à vider l'étang. Nous avons donc imposé des dates de fin de vidange plus tardives pour les années concernées au regard des chroniques de vidange reconstituées pour établir les chroniques de vidange reconstituées définitives.

1.3 Modélisation simplifiée de la gestion de l'étang de Lindre :

A partir des chroniques de vidange reconstituées précédemment, un modèle simplifié de l'étang de Lindre a été construit. Nous avons défini cinq paramètres, détaillés dans le Tableau F.1, permettant de modéliser la vidange afin de reproduire la forme en cloche, décrite en Figure F.3.

TABLEAU F.1 – Paramètres de modélisation de l'étang de Lindre

Paramètre	**Signification**
L_1 (j)	Durée d'augmentation initiale de la vidange, constituée d'un débit égal à une interpolation linéaire de 0 jusqu'à Q_{max}
Q_{max} (m^3 s^{-1})	Débit de vidange maximal, qui forme un plateau jusqu'à la condition V_{fin} ou DOY_{max}
V_{fin} (m^3)	Volume à atteindre dans le réservoir pour commencer à déclencher la fin de la vidange
DOY_{max} (jour de l'année)	Jour de l'année maximal auquel déclencher la fin de la vidange
L_{fin} (j)	Durée de la phase finale de la vidange, dont le débit forme une interpolation linéaire entre Q_{max} et 0

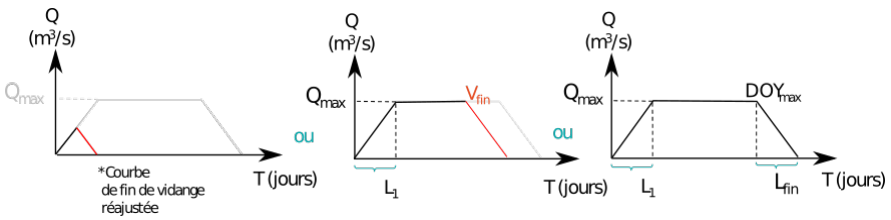


FIGURE F.3 – Modèle de gestion de l'étang de Lindre. La vidange augmente progressivement jusqu'à un débit maximal Q_{max} pendant la durée L_1. Si le volume restant dans l'étang atteint la valeur V_{fin}, la fin de la vidange est déclenchée, avec une diminution progressive du volume de vidange sur la durée L_{fin} (figures de gauche et du milieu). Si le volume V_{fin} n'est pas atteint, on déclenche tout de même la fin de la vidange à partir de la date DOY_{max} (figure de droite).

Les valeurs des paramètres de gestion de l'étang de Lindre n'ont pas été obtenues via une optimisation, mais en testant plusieurs valeurs pour chaque paramètre. L'ensemble des valeurs testées est présenté dans le Tableau F.2.

Paramètre	Valeurs	Unité
L_1	1, 5, **7**, **9**, 10, **11**, 15, 20, 25, 30	j
Q_{max}	2, **3**, **3.5**, **4**, 5	$m^3\ s^{-1}$
V_{fin}	1 000, 10 000, 100 000, 1 000 000, 2 000 000, **2 500 000**, **3 000 000**, **3 500 000**, **4 000 000**	m^3
DOY_{max}	**290**, **300**, **310**, 320, 330, 340	Jour de l'année
L_{fin}	1, 5, 10, **15**, **20**, **25**, 30	j

TABLEAU F.2 – Valeurs de paramètres testées pour l'exploration des paramètres de modélisation de l'étang de Lindre. En gras, les valeurs retenues pour la calibration du modèle intégré, parmi lesquelles on identifiera la meilleure combinaison par la suite

Une première exploration de ces paramètres a été réalisée par construction approchée des courbes de vidange obtenues au regard de la simulation du réservoir lors de la construction des courbes de vidange approchées. On a ainsi pu comparer les courbes de vidanges simulées avec les courbes de vidange approchées par calcul d'un RMSE. Un ensemble réduit de valeurs de paramètres permettant d'obtenir la meilleure valeur de RMSE ont ainsi été retenues (valeurs en gras dans le Tableau F.2). Celles-ci ont ensuite été utilisées pour effectuer des calages du modèle intégré selon la méthodologie de calage présentée dans la Section VI.3.5. La fonction-objectif utilisée pour la calibration finale est le KGE appliqué à la transformation Box-Cox du débit sur la station de la Seille à Moyenvic. C'est la combinaison de paramètres de gestion de l'étang de Lindre la plus performante qui sera retenue par la suite.

Les résultats de modélisation simplifiée de l'étang de Lindre obtenus ont été discutés avec le gestionnaire de l'étang de Lindre. Celui-ci a validé à la fois l'identification des années ayant subi des vidanges, ainsi que l'estimation des débits vidangés.

2 Résultats

Le gestionnaire de l'étang de Lindre a évalué la forme des courbes de vidange, qui lui a semblé vraisemblable. La comparaison avec les données de gestion de l'étang de Lindre a permis de montrer une parfaite détection des années avec vidange (Figure F.4), et une très bonne correspondance pour la détection des dates de début de vidange. Nous avons donc pu confirmer notre capacité à détecter les années avec vidange et leur temporalité à partir des chroniques reconstituées, permettant de définir des dates pour les périodes pour lesquelles nous ne disposons pas de données. Nous estimons ainsi que des vidanges se sont déroulées environ 6 années sur 10 (21 années sur 34) entre 1985 et 2018.

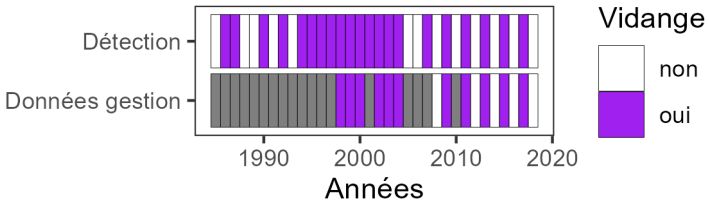


FIGURE F.4 – Comparaison entre les vidanges détectées par comparaison entre observations et simulations de débit sur la Seille à Moyenvic (Détection) et les données issues des archives de gestion de l'étang de Lindre (Données gestion). Le gris correspond aux années pour lesquelles nous ne disposons pas d'archives

La gestion théorique de l'étang de Lindre obtenue via un modèle simplifié a été présentée dans la Figure F.3. La distribution des valeurs de performance obtenues pour les différentes valeurs de paramètres de l'étang de

Lindre est présentée dans la Figure F.5. Toutes les combinaisons de paramètres testées permettent d'améliorer grandement la performance en termes de débit simulé du modèle intégré par rapport au modèle sans prise en compte des influences. La performance paraît plus sensible à la valeur de Q_{max} et DOY_{max}, ainsi que dans une moindre mesure à la valeur de L_{fin}, certaines valeurs de ces paramètres menant à des scores notablement plus faibles, qu'aux autres valeurs de paramètres testées. Les valeurs des paramètres du modèle de l'étang de Lindre permettant d'obtenir la meilleure performance, et donc retenues pour la modélisation intégrée de la Seille, sont indiquées dans le Tableau F.3. Ces valeurs ont paru réalistes au gestionnaire de l'étang de Lindre

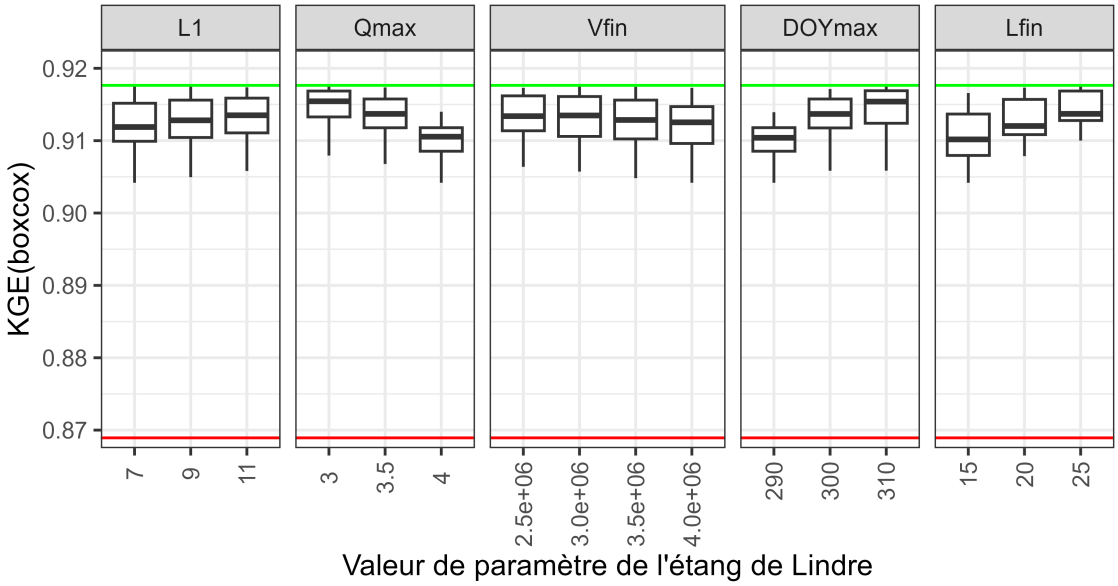


FIGURE F.5 – Distribution des valeurs du critère de performance KGE calculé avec une transformation des débits de type Box-Cox sur la période (calage et évaluation de GRcrop sur la période 1986-2019). Un boxplot indique l'ensemble des valeurs de KGE obtenues pour une valeur donnée d'un paramètre, lorsque l'on fait varier les valeurs des autres paramètres sur l'ensemble des valeurs possibles pour effectuer le calage. La ligne rouge indique la performance obtenue sans prise en compte de l'étang de Lindre. La ligne verte indique la performance maximale obtenue

TABLEAU F.3 – Valeurs des paramètres du modèle de gestion de l'étang de Lindre obtenus suite à l'analyse de sensibilité et représentant la gestion actuelle

L_1 (j)	Q_{max} (m^3 s^{-1})	V_{fin} (m^3)	DOY_{max} (jour de l'année)	L_{fin} (j)	KGE Box-Cox $]-\infty ; 1]$
7	3	3.10^6	310	25	0.92

Annexe G

Détails des paramètres de modélisation des cultures

Dans cette annexe, nous détaillons les paramètres attribués dans la modélisation du bilan en eau et de l'irrigation des cultures sur le secteur de l'Aveyron et de la Seille. Les paramètres descriptifs de l'irrigation ne sont mobilisés que pour les cultures irriguées.

TABLEAU G.1 – Paramètres culturaux sur la zone d'étude de l'Aveyron aval. Notations issues de SOUTIF-BELLENGER et al., 2023. Kc_{ini}, Kc_{mid}, Kc_{end} : Coefficients culturaux respectivement durant la période initiale (ini), la période de coefficient maximal (mid), à la fin du cycle de culture (end) ; L_{ini}, L_{dev}, L_{mid}, L_{end} : durée des périodes respectivement : initiale (ini), d'augmentation du Kc (dev), de valeur maximale de Kc (mid), de décroissance du Kc (end) ; Z_{ini} et Z_{end} : profondeur racinaire respectivement initiale (ini) et maximale (end) ; p_{ini}, p_{mid}, p_{end} : coefficient de puisement selon la même distribution que le Kc ; Date_semis : date de semis ; deb_irrig et fin_irrig : début et fin de la période d'irrigation pour les simulations utilisant cette information dans la modélisation de l'irrigation ; tour_d_eau : l'intervalle entre deux irrigations pour la modélisation semi-parcellaire. CP : céréales à paille (blé) ; maisP : maïs précoce, maisT : maïs tardif, maisEnsil : maïs ensilage

	colza	CP	maisP	maisT	maisEnsil	pois	prairie	semence	soja	tournesol	vergers	vignes
Kc_{ini} (-)	0,45	0,5	0,55	0,55	0,5	0,5	0,5	0,55	0,5	0,55	0,55	0,5
Kc_{mid} (-)	1,1	1,0	1,1	1,1	1,1	0,95	0,95	1,05	1,15	0,9	0,95	0,95
Kc_{end} (-)	0,45	0,5	0,05	0,15	0,3	0,3	0,3	0,05	0,35	0,3	0,15	0,15
L_{ini} (j)	15	145	47	52	38	40	75	40	47	32	115	110
L_{dev} (j)	165	60	34	38	37	40	29	30	50	49	47	52
L_{mid} (j)	61	27	32	35	35	28	26	36	38	32	45	45
L_{end} (j)	37	22	47	48	32	15	18	47	36	29	42	42
Z_{ini} (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	1	1
Z_{end} (m)	1,25	1,65	1,35	1,35	1,35	0,8	1	1,35	0,95	1,15	1,5	1,5
p_{ini} (-)	0,8	0,8	0,75	0,75	0,75	0,6	0,8	0,7	0,7	0,45	0,7	0,7
p_{mid} (-)	0.7	0.6	0,55	0,55	0,55	0,45	0,65	0,6	0,5	0,45	0,55	0,5
p_{end} (-)	0.7	0.65	0,75	0,75	0,7	0,5	0,75	0,75	0,7	0,45	0,7	0,65
Date_semis (date)	1er sept.	16 oct.	17 avril	8 avr.	26 avr.	25 fév.	2 mars	5 mai	4 avr.	8 avr.	-	-
deb_irrig (jour de l'année)	244	100	137	135	140	105	91	135	141	161	135	-
fin_irrig (jour de l'année)	276	181	281	288	253	166	140	288	258	227	314	-
dose_irrig (mm)	15	24	33	26	26	32	37	24	32	20	24	-
tour_d_eau (j)	20	7	7	5	5	6	9	4	6	9	4	-

TABLEAU G.2 – Paramètres culturaux sur la zone d'étude de la Seille. Notations issues de SOUTIF-BELLENGER et al., 2023. $Kc_{ini,int}$,$Kc_{mid,int}$, coefficients culturaux respectivement durant la période initiale (ini), la période de coefficient maximal (mid) pour la culture intermédiaire si modélisée ; $L_{dev,int}$, $L_{mid,int}$: durée des périodes respectivement : d'augmentation du Kc (dev), de valeur maximale de Kc (mid) pour la culture intermédiaire si modélisée ; $Z_{end,int}$: profondeur racinaire maximale de la culture intermédiaire, si modélisée ; p_{int} : coefficient de puisement de la culture intermédiaire, si modélisée ; Kc_{ini}, Kc_{mid}, Kc_{end} : Coefficients culturaux respectivement durant la période initiale (ini), la période de coefficient maximal (mid), à la fin du cycle de culture (end) ; L_{ini}, L_{dev}, L_{mid}, L_{end} : durée des périodes respectivement : initiale (ini), d'augmentation du Kc (dev), de valeur maximale de Kc (mid), de décroissance du Kc (end) ; z_{ini} et z_{end} : profondeur racinaire respectivement initiale (ini) et maximale (end) ; p_{ini}, p_{mid}, p_{end} : coefficient de puisement selon la même distribution que le Kc ; Date_semis : date de semis ; deb_irrig et fin_irrig : début et fin de la période d'irrigation pour les simulations utilisant cette information dans la modélisation de l'irrigation ; tour_d_eau : l'intervalle entre deux irrigations pour la modélisation semi-parcellaire. CP : céréales à paille (blé) ; maisP : maïs précoce ; maisEnsil : maïs ensilage ; orgeh : orge d'hiver ; orgep : orge de printemps ; legPC : légumes de plein champ (pomme-de-terre)

	colza	CP	maisP	maisEnsil	pois	prairie	soja	tournesol	orgeh	orgep	triticale	feverolle	sorgho	legPC
$Kc_{ini,int}$ (-)	-	-	0,7	0,7	0,7	-	0,7	0,7	-	0,7	-	-	0,7	0,7
$Kc_{mid,int}$ (-)	-	-	0,9	0,9	0,9	-	0,9	0,95	-	0,9	-	-	0,9	0,9
$L_{dev,int}$ (j)	-	-	60	60	75	-	75	75	-	75	-	-	60	75
$L_{mid,int}$ (j)	-	-	111	111	85	-	85	85	-	74	-	-	111	85
$Z_{end,int}$ (m)	-	-	0,5	0,5	0,5	-	0,5	0,5	-	0,5	-	-	0,5	0,5
p_{int} (-)	-	-	0,3	0,3	0,3	-	0,3	0,3	-	0,3	-	-	0,3	0,3
Kc_{ini} (-)	0,45	0,75	0,45	0,5	0,4	0,7	0,4	0,35	0,8	0,5	0,75	0,7	0,45	0,5
Kc_{mid} (-)	1,1	1,1	1,1	1,2	1	1,1	1	1	1,1	1,1	1,1	1	1	1,1
Kc_{end} (-)	0,45	0,3	0,7	0,55	0,4	0,3	0,5	0,2	0,2	0,45	0,3	0,3	0,55	0,75

L_{ini} (j)	18	185	50	18	40	175	20	37	185	60	185	90	20	30
L_{dev} (j)	85	44	41	62	40	52	35	59	44	40	44	45	35	35
L_{mid}(j)	161	27	32	35	28	27	60	37	27	25	27	40	40	50
L_{end} (j)	41	34	30	28	20	34	25	39	34	25	34	60	30	30
Z_{ini} (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Z_{end} (m)	1,35	1,65	1,35	1,35	0,8	1,65	1	1,15	1,65	1,65	1,65	0,6	1,5	0,5
p_{ini} (-)	0,8	0,8	0,75	0,75	0,6	0,8	0,5	0,45	0,8	0,8	0,8	0,45	0,55	0,35
p_{mid} (-)	0,7	0,6	0,55	0,55	0,45	0,6	0,5	0,45	0,6	0,6	0,6	0,45	0,55	0,35
p_{end} (-)	0,7	0,65	0,75	0,7	0,55	0,65	0,5	0,45	0,65	0,65	0,65	0,45	0,55	0,35
Date_semis (date)	1er août	20 sept.	20 avr.	20 avr.	15 mars	20 sept.	1er mai	1er avril	10 sept.	1er mars	20 sept.	15 nov.	1er mai	15 avr.
tour_d_eau (j)	-	7	7	-	-	-	6	9	-	-	-	-	7	1

TABLEAU G.3 – Durées des phases de développement cultural raccourcies sur la zone d'étude de la Seille. L_{ini}, L_{dev}, L_{mid}, L_{end} : durée des périodes respectivement : initiale (ini), d'augmentation du Kc (dev), de valeur maximale de Kc (mid), de décroissance du Kc (end). CP : céréales à paille (blé) ; maisP : maïs précoce ; maisEnsil : maïs ensilage ; orgeh : orge d'hiver ; orgep : orge de printemps ; legPC : légumes de plein champ (pomme-de-terre)

	colza	CP	maisP	maisEnsil	pois	prairie	soja	tournesol	orgeh	orgep	triticale	feverolle	sorgho	legPC
L_{ini} (j)	18	177	40	14	36	168	18	33	177	54	177	86	16	27
L_{dev} (j)	84	42	33	50	36	50	32	53	42	36	42	43	29	32
L_{mid} (j)	158	26	26	28	25	26	54	33	26	23	26	38	33	45
L_{end} (j)	40	33	24	23	18	33	23	35	33	23	33	58	25	27

Annexe H

Rendements avec cycles raccourcis

Nous complétons l'analyse des rendements effectuée dans la Section IX.5 en calculant les mêmes indicateurs de rendement, cette fois pour les cycles raccourcis. Les figures doivent ainsi être interprétées au regard des figures obtenues pour les cycles standard, présentées dans la Section IX.5.

1 Rendements des Usages constants

Nous commençons par présenter les projections d'évolution des rendements pour les simulations dans le cas des Usages constants (Figure H.1), c'est-à-dire avec les mêmes assolements passés et futurs et sans irrigation.

On observe que le rendement relatif est plus élevé pour les simulations avec les cycles raccourcis : le raccourcissement des cycles permet d'échapper à des épisodes chauds et secs, alors que la réserve utile du sol a été consommée. Ainsi, les baisses de rendement du maïs par exemple paraissent très atténuées quand on cumule les effets du CO_2 et de la température.

Les rendements annuels et moyens interannuels (Figure H.2) montre en effet des valeurs légèrement plus élevées pour que dans le cas sans réduction des cycles (Figure IX.19).

2 Rendements des scénarios

Nous visualisons ensuite les résultats des rendements pour les différents scénarios (Figures H.3, H.4, H.5).

De façon cohérente avec les projections avec Usages constants, les rendements paraissent plutôt améliorés avec les cycles raccourcis, en particulier pour les cultures irriguées. Cela est cohérent avec les résultats de satisfaction de l'irrigation, qui était améliorée avec les cycles raccourcis (Section IX.2.1.2).

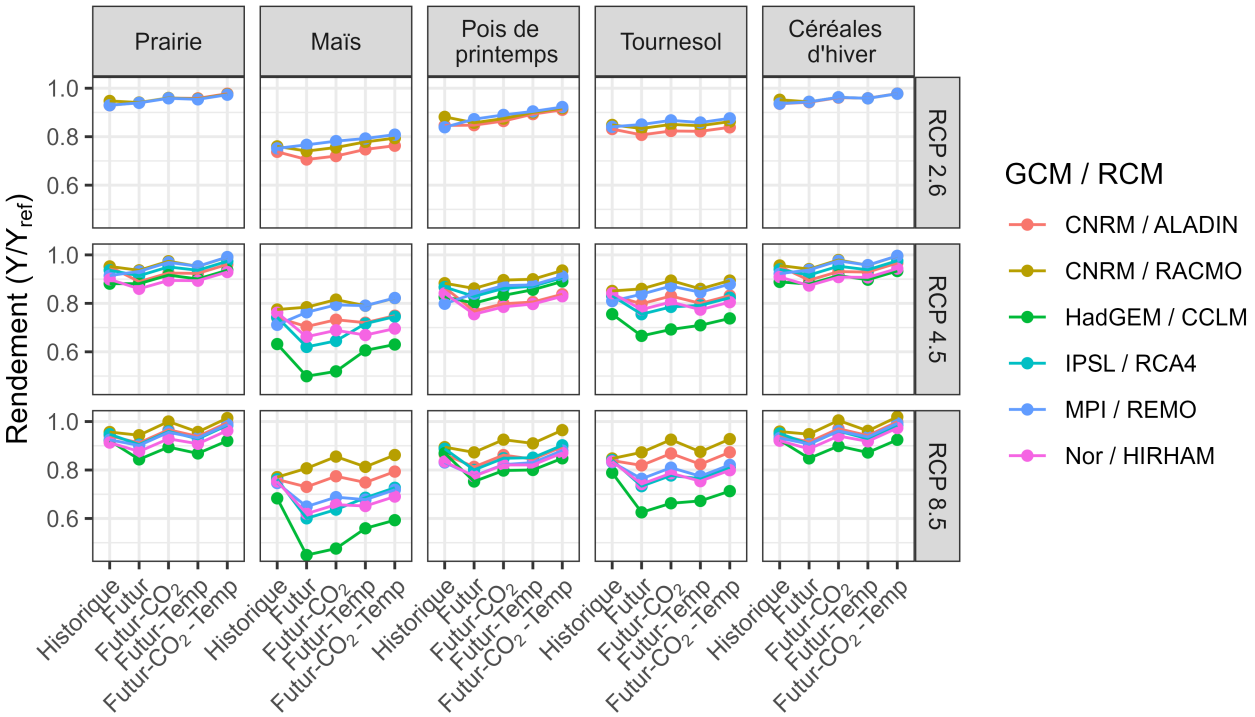
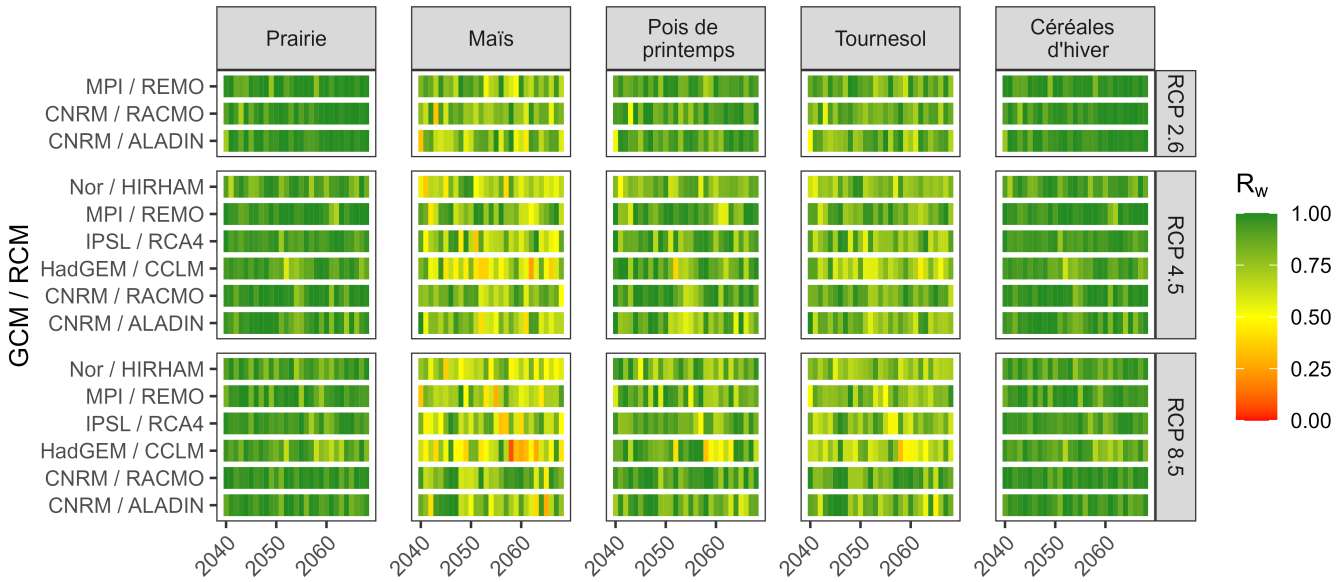
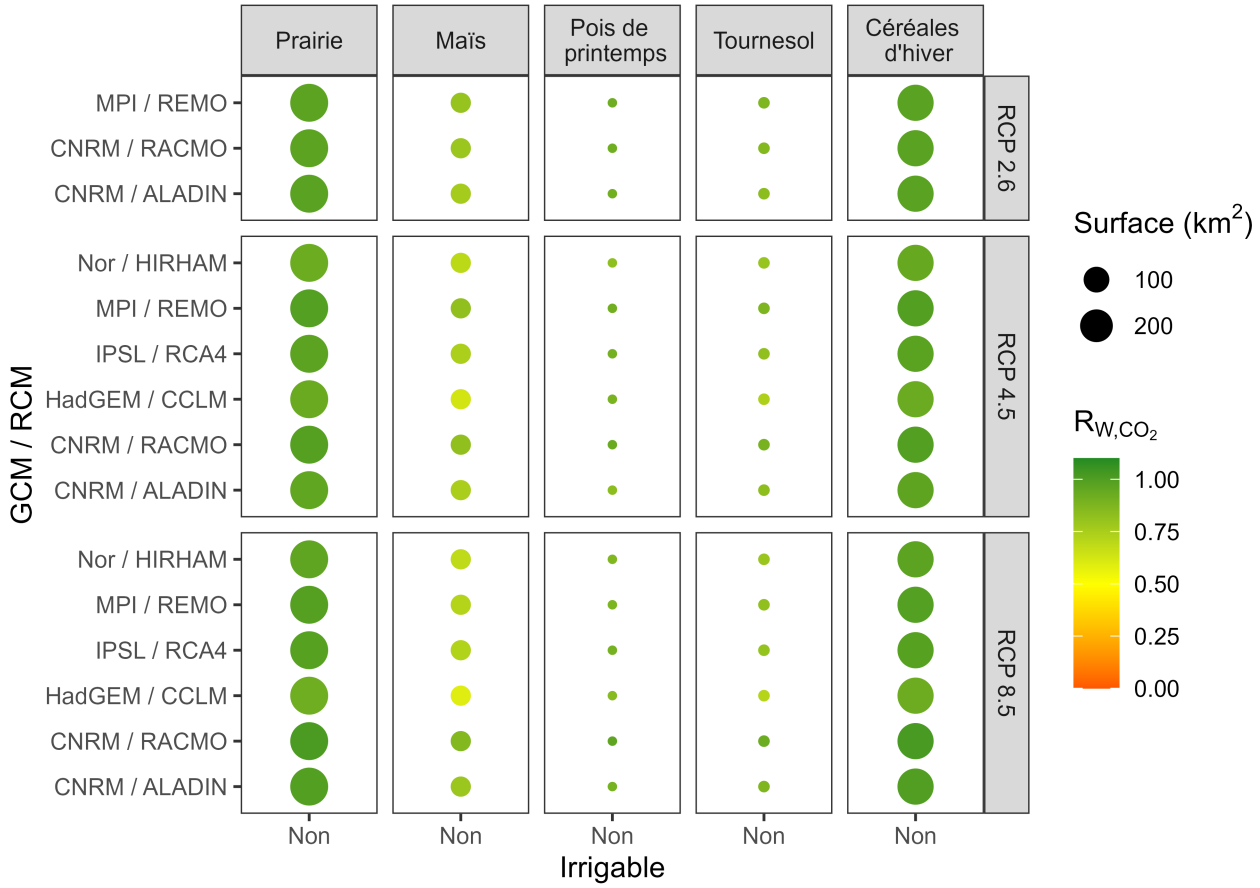


FIGURE H.1 – Évolution des rendements pour le scénario à Usages constants. "Historique" correspond au rendement relatif lié au stress hydrique R_W pour l'horizon historique ; "Futur" correspond au rendement relatif lié au stress hydrique R_W pour l'horizon futur R_W ; "Futur-CO_2" correspond au rendement relatif pour l'horizon futur corrigé pour prendre en compte l'effet fertilisant du CO_2, R_{W,CO_2} ; "Futur-Temp" correspond au rendement relatif lié au stress hydrique R_W pour l'horizon futur avec les cycles raccourcis par l'effet de la température, R_W ; "Futur-CO_2" correspond au rendement relatif pour l'horizon futur corrigé pour prendre en compte l'effet fertilisant du CO_2, R_{W,CO_2} avec les cycles raccourcis par l'effet de la température

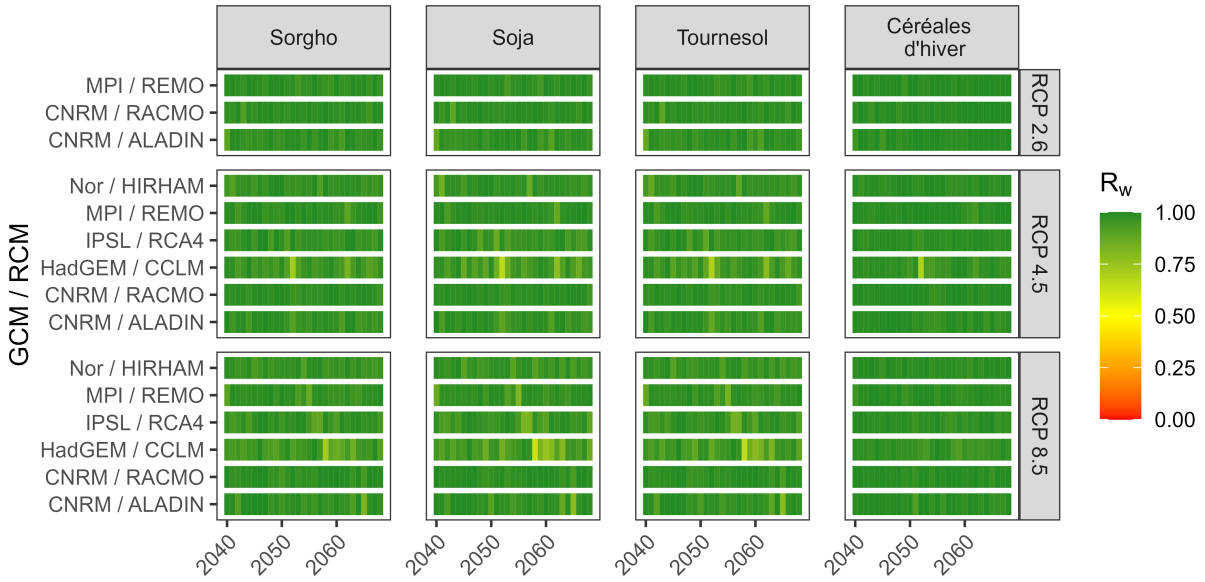


(a) Rendements relatifs annuels R_W, non ajustés par le CO_2

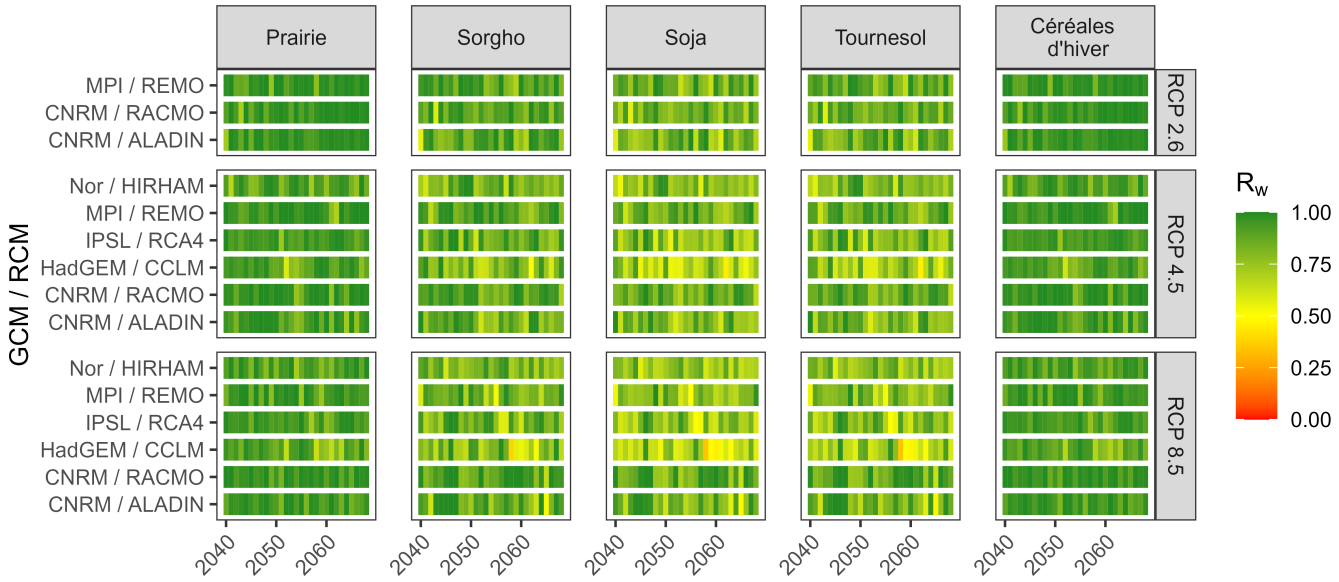


(b) Rendements relatifs moyens interannuels avec prise en compte de l'effet fertilisant du CO_2, R_{W,CO_2} et surfaces cultivées correspondantes

FIGURE H.2 – Projection des rendements pour les simulations avec les Usages constants et cycles raccourcis

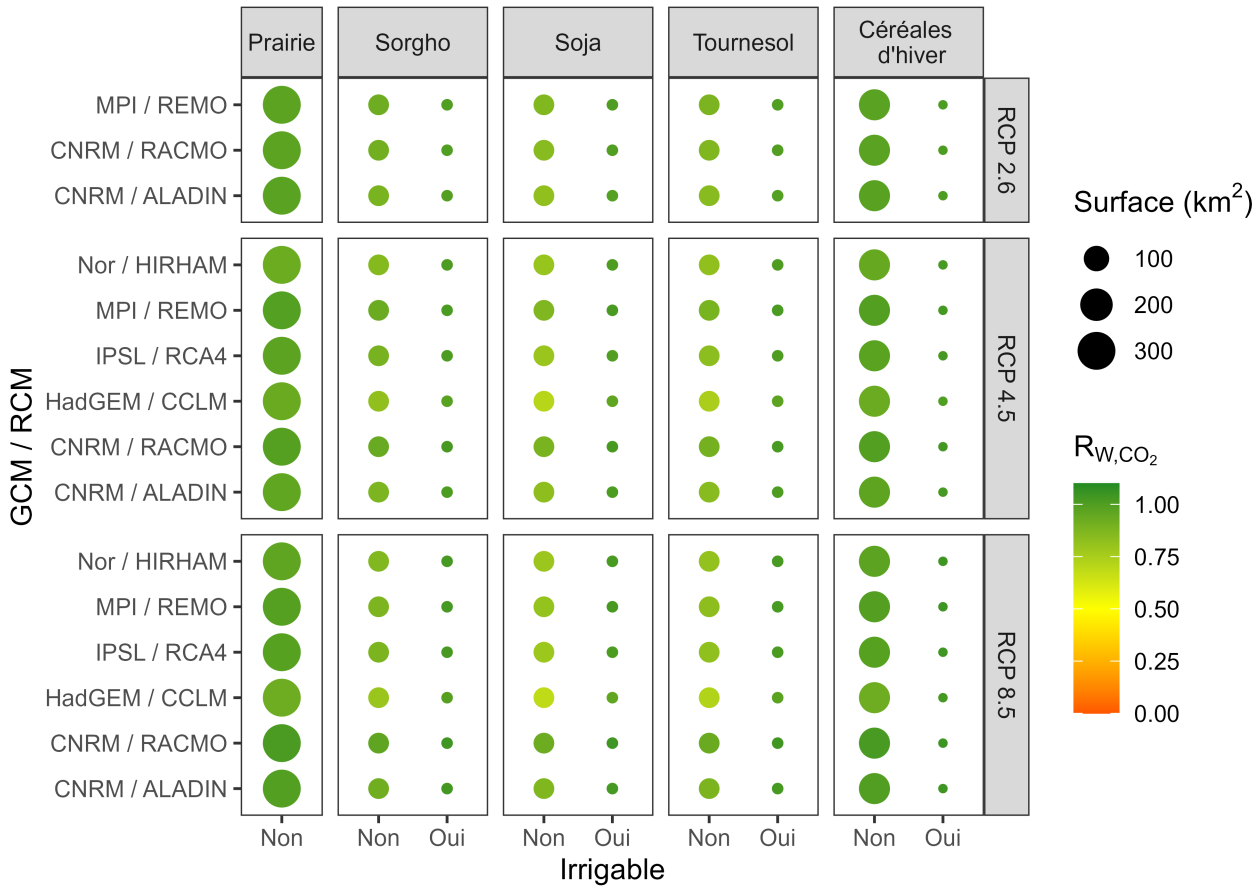


(a) Rendements relatifs annuels R_W des cultures irriguées, non ajustés par le CO_2



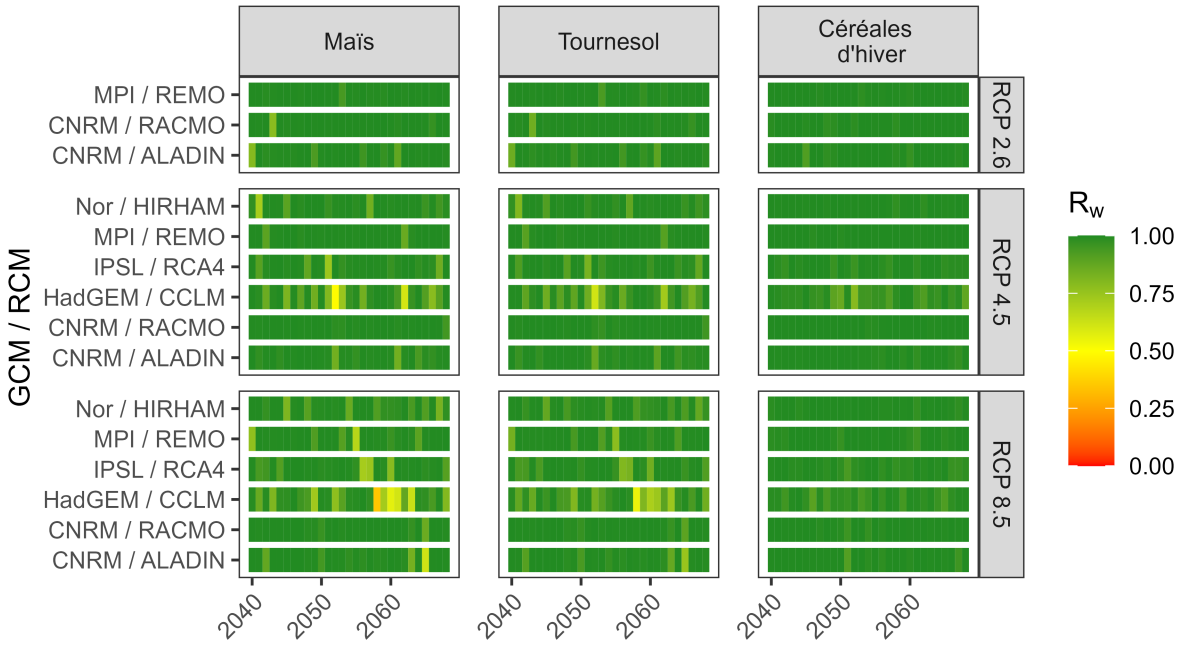
(b) Rendements relatifs annuels R_W des cultures non irriguées, non ajustés par le CO_2

FIGURE H.3 – Projection des rendements pour les simulations avec le scénario Agroécologie industrielle avec les cycles raccourcis

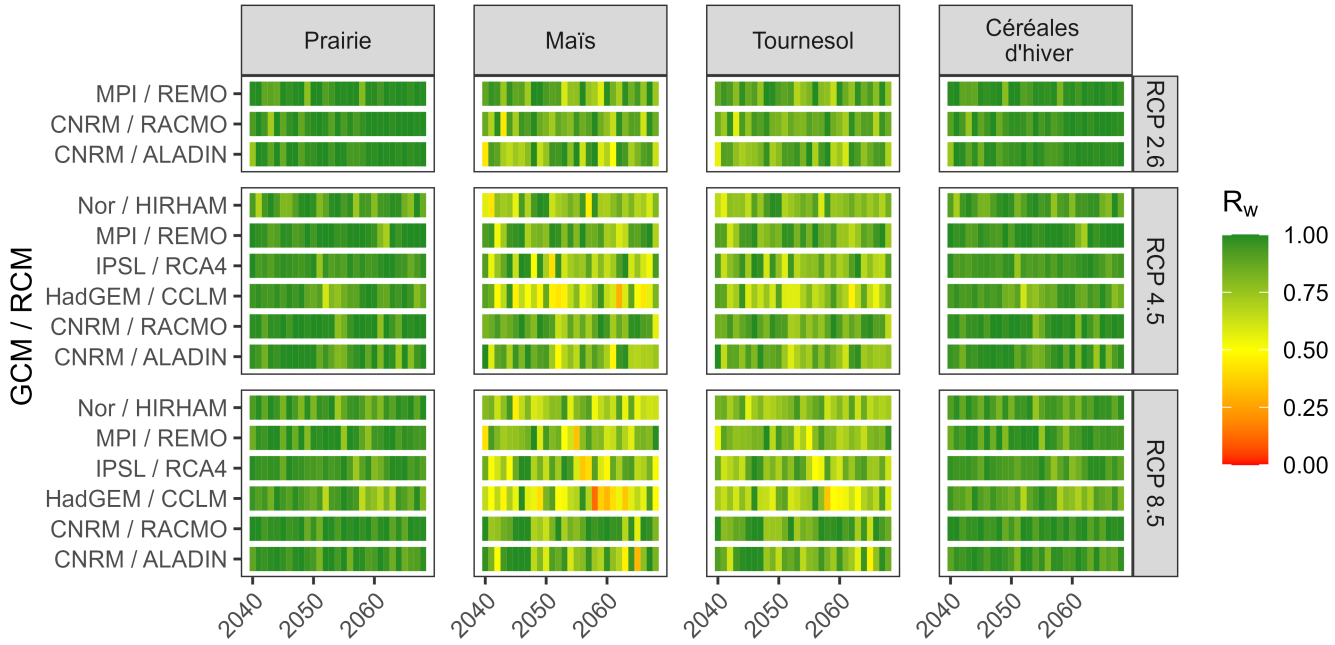


(c) Rendements relatifs moyens interannuels avec prise en compte de l'effet fertilisant du CO_2, R_{W,CO_2}, et surfaces cultivées correspondantes

FIGURE H.3 – Projection des rendements pour les simulations avec le scénario Agroécologie industrielle avec les cycles raccourcis (Suite)

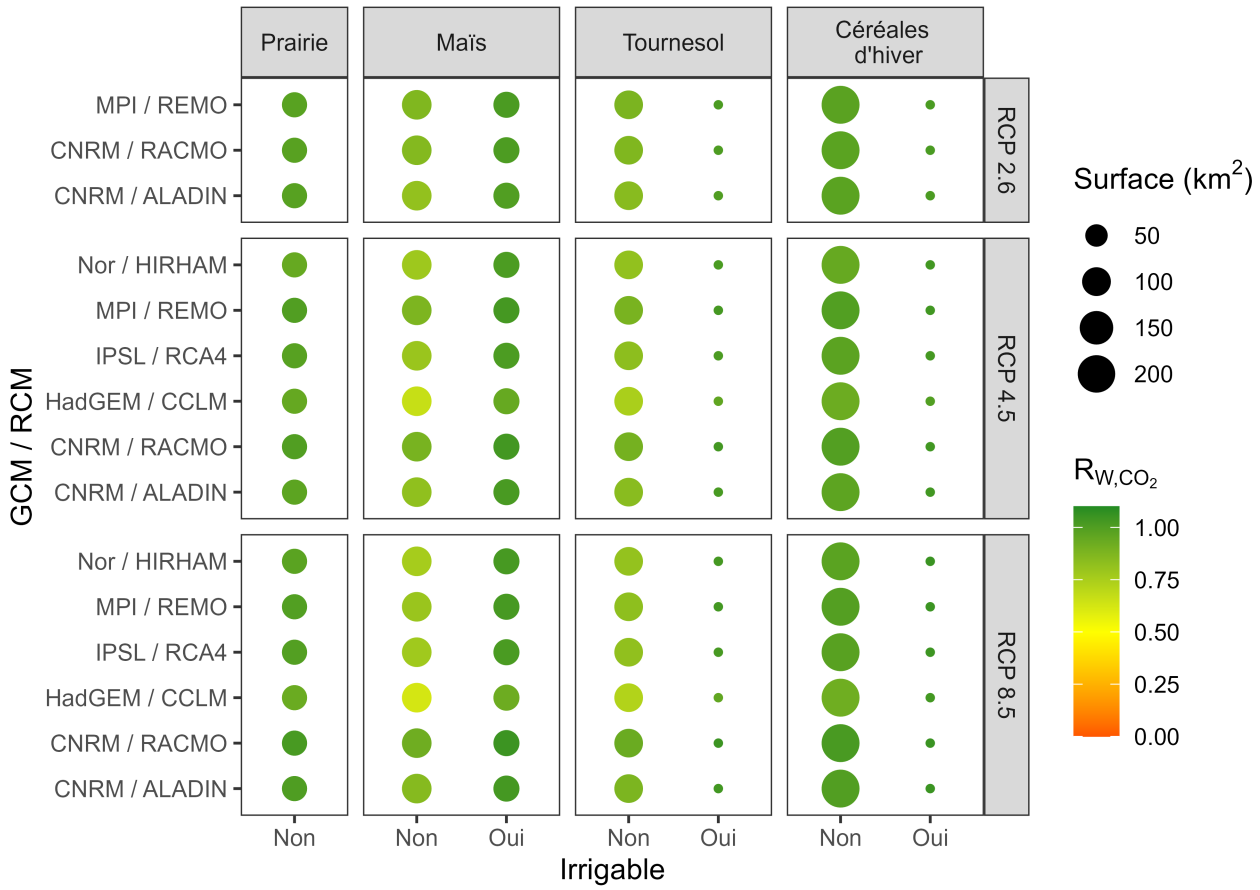


(a) Rendements relatifs annuels des cultures irriguées, non ajustés par le CO_2



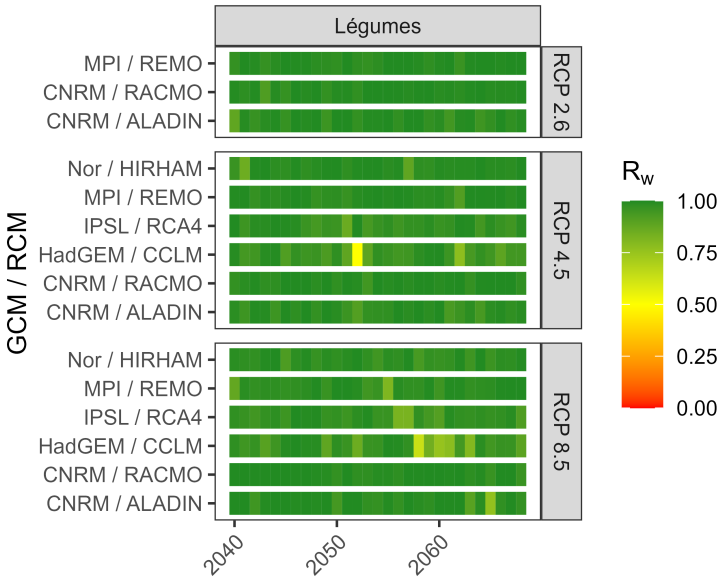
(b) Rendements relatifs annuels des cultures non irriguées, non ajustés par le CO_2

FIGURE H.4 – Projection des rendements pour les simulations avec le scénario Intensification avec les cycles raccourcis

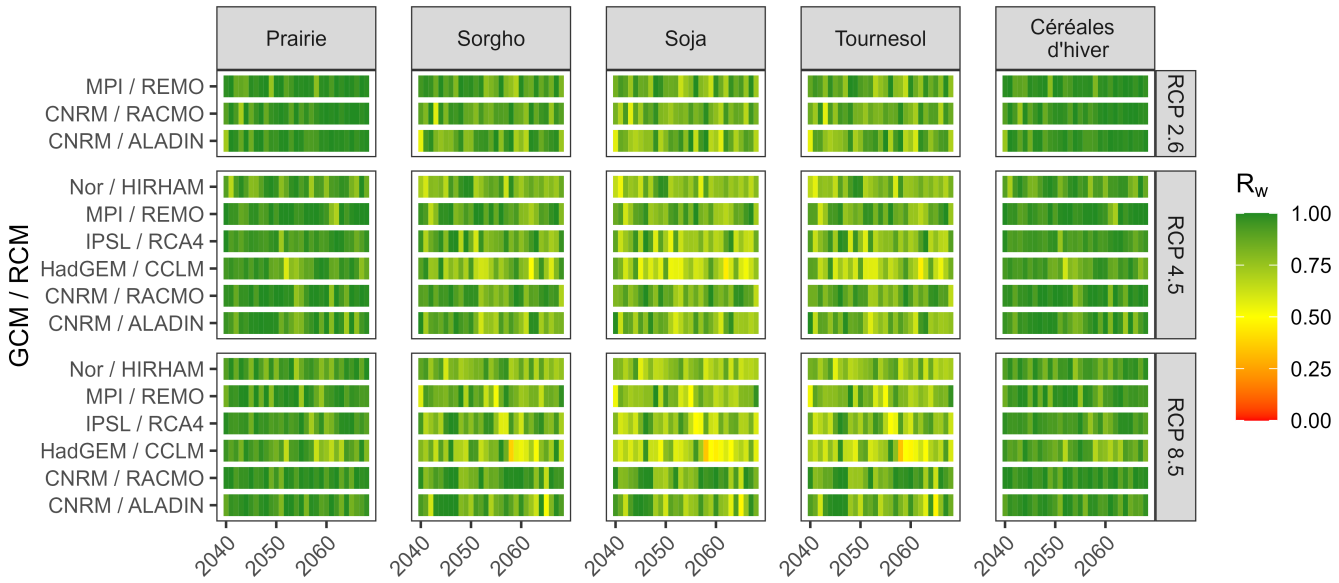


(c) Rendements relatifs moyens interannuels avec prise en compte de l'effet fertilisant du CO_2 et surfaces cultivées correspondantes

FIGURE H.4 – Projection des rendements pour les simulations avec le scénario Intensification avec les cycles raccourcis (Suite)

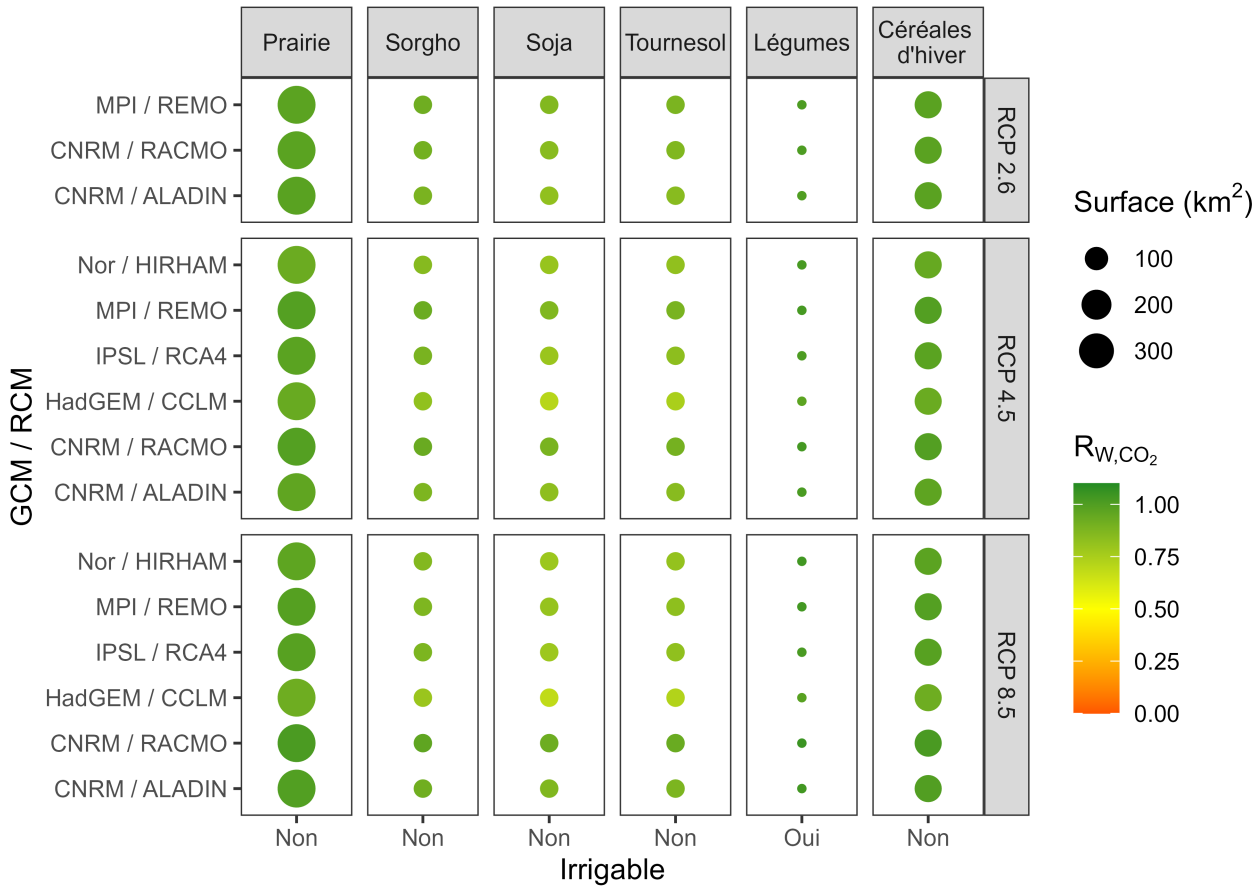


(a) Rendements relatifs annuels R_W des cultures irriguées, non ajustés par le CO_2



(b) Rendements relatifs annuels R_W des cultures non irriguées, non ajustés par le CO_2

FIGURE H.5 – Projection des rendements pour les simulations avec le scénario Repaysannisation avec les cycles raccourcis



(c) Rendements relatifs moyens interannuels avec prise en compte de l'effet fertilisant du CO_2, R_{W,CO_2} et surfaces cultivées correspondantes

FIGURE H.5 – Projection des rendements pour les simulations avec le scénario Repaysannisation avec les cycles raccourcis (Suite)

3 Discussion et conclusion sur les cycles raccourcis

Le raccourcissement des cycles semble atténuer les impacts du changement climatique sur les potentielles pertes de rendement. Toutefois, cette atténuation n'est pas suffisante pour remettre en question les conclusions déjà établies en Section IX.5, c'est-à-dire une potentielle forte perte de rendement des cultures de printemps non irriguées, et des pertes de rendement très importantes certaines années, même pour certaines cultures irriguées.

De plus, il faudrait en toute rigueur effectuer un réajustement, comme nous l'effectuons pour la prise en compte de l'effet fertilisant du CO_2. En effet, si la formule du rendement relatif est toujours vraie, le rendement potentiel pourrait être modifié dans le cadre des cycles raccourcis, car une durée de cycle raccourcie peut conduire à une perte de rendement (la culture dispose de moins de temps pour photosynthétiser et produire de la matière organique valorisable).