
Projet GICC REMedHE (2012–2015)

Impacts des changements climatiques et anthropiques sur la
gestion quantitative des **Ressources en Eau en Méditerranée** :
évaluation comparative **Hérault-Ebre**

Coordinateur : Denis Ruelland (CNRS, HydroSciences Montpellier)



Rapport de fin de contrat - Mars 2016

Principaux contributeurs :

Denis Ruelland (CNRS, HSM – coord.), Julie Fabre (CNRS, HSM), Benjamin Grouillet (CNRS, HSM), Alain Dezetter (IRD, HSM), Mathieu Vrac (CNRS, LSCE), Sylvain Lassonde (CNRS, LSCE), Sandra Ardoin-Bardin (IRD, HSM), Jean-François Boyer (IRD, HSM), Lila Collet (UM2, HSM), Christophe Vivier (SMBFH), Rogelio Galván (CHE).

REMERCIEMENTS

Ces premiers mots visent à remercier l'ensemble des personnes impliquées de près ou de loin dans le projet GICC REMedHE et qui ont contribué à sa réussite. Ces personnes sont nombreuses et je ne peux pas en faire une liste exhaustive. Je pense notamment aux acteurs qui ont bien voulu se prêter aux ateliers conçus pour construire les scénarios territoriaux à moyen terme sur le bassin de l'Hérault, à ceux qui ont répondu à nos demandes de données ou d'informations relatives à leur pratique en matière de gestion de l'eau, ainsi qu'aux personnalités qui ont toujours cru en notre projet scientifique et n'ont cessé de nous encourager.

Je tiens, au nom du collectif de recherche, à remercier plus particulièrement le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie au travers du programme GICC pour avoir soutenu financièrement ce projet et pour nous avoir accompagné de façon bienveillante durant les trois dernières années. Merci notamment à Claude Millier, Maurice Imbart et Christelle Bakhache pour leurs participations aux réunions annuelles de projet et pour leur soutien administratif.

Ma profonde gratitude va évidemment à l'ensemble de l'équipe projet, dont les membres ont contribué pleinement à sa réussite :

- Julie Fabre pour son implication exceptionnelle dans le projet GICC REMedHE à l'occasion d'une thèse alliant rigueur, créativité et synthèse qui a constitué l'élément central du projet ;
- Benjamin Grouillet pour son implication de premier plan dans la reconstruction historique et les projections des dynamiques spatio-temporelles des demandes en eau sur les deux bassins, à l'occasion d'un stage de Master, puis d'un contrat d'ingénieur financé dans le cadre du projet ;
- Alain Dezetter pour sa contribution essentielle au travail de modélisation intégré réalisé, son expertise hydrologique, et son soutien informatique tant sur des aspects de calcul scientifique intensif que dans la gestion de toute l'infrastructure matérielle et logicielle de notre équipe de recherche ;
- Sandra Ardoin-Bardin pour son soutien précieux dans l'aide à la coordination et à l'animation du projet ;
- Mathieu Vrac et Sylvain Lasonde pour les travaux de désagrégation statistique des sorties de modèles climatiques et les échanges scientifiques riches et passionnants à ce sujet ;
- Jean-François Boyer pour la mise en place efficace d'un site web faisant office de système d'information, de gestion des bases de données et de communication pour le projet ;
- les anciennes doctorantes, Marianne Milano et Lila Collet, dont les travaux ont permis d'initier respectivement nos recherches sur le bassin de l'Ebre et le bassin de l'Hérault comme point de départ indispensable au projet REMedHE ;
- Les partenaires du projet, et notamment le Syndicat Mixte du Bassin du Fleuve Hérault, en la personne de Christophe Vivier, ainsi que la *Confederación Hidrográfica del Ebro*, en la personne de Rogelio Galván, pour nous avoir transmis leur connaissance experte de terrain et pour avoir facilité nos démarches sur les territoires.

Denis Ruelland
Coordinateur du projet GICC REMedHE

SOMMAIRE

A. RESUMES	9
Résumé court	9
Short abstract	10
Synthèse	11
1. Contexte et objectifs.....	11
2. Modélisation intégrée des hydrosystèmes	11
2.1. Développement d'une chaîne intégrative de modélisation	11
2.2. Schématisation du fonctionnement demandes/ressources	13
2.3. Calage et validation de la chaîne et analyse des évolutions passées	13
2.3.1. Calage de la chaîne de modélisation et analyse de l'évolution passée des débits	13
2.3.2. Reconstruction de l'évolution passée de la satisfaction des demandes en eau	13
3. Projections hydro-climatiques et d'usages de l'eau à l'horizon 2050	13
3.1. Scénarios climatiques et impacts sur les écoulements naturels.....	13
3.2. Scénario tendanciel des usages de l'eau et demandes associées	15
4. Adéquation entre ressource et demande en eau à l'horizon 2050	16
4.1. Combinaison des scénarios climatiques et d'usages de l'eau	16
4.2. Indicateurs de stress hydrique.....	16
4.3. Evolution de la satisfaction des demandes en eau.....	16
4.4. Pression anthropique sur les écoulements.....	18
5. Efficacité et robustesse de mesures d'adaptation	18
5.1. Analyse de sensibilité à des mesures individuelles.....	18
5.2. Impact de scénarios d'adaptation combinant plusieurs mesures	19
6. Challenges scientifiques relevés : apports et limites pour la gestion de l'eau	20
6.1. Avancées méthodologiques	20
6.2. Incertitudes et limites.....	20
6.3. De nouvelles connaissances pour la gestion de l'eau	21
6.4. Perspectives.....	22
B. GESTION ET ANIMATION DU PROJET	23
Partenaires et personnels associés	23
1. Composition du partenariat et organisation en GT	23
2. Organisation et suivi des recrutements	24
Synthèse sur les dépenses du projet	24
Actions d'animation	25
1. Chronogramme des réalisations	25
2. Réunions du consortium	25
3. Rencontres et travail collaboratif avec les gestionnaires.....	26
C. VALORISATION	29
Site web : système d'information et bases de données	29
1. Sources de données et inventaires	29
2. Un outil numérique collaboratif.....	30
Publications et communications	31
1. Articles à comité de lecture	31
2. Communications avec actes publiés	32
3. Communications sans actes	33
4. Posters scientifiques	33
5. Mémoires	33
6. Articles de vulgarisation	34
Séminaire d'échanges avec les acteurs du bassin de l'Hérault	34
1. Objectifs et participants.....	34
2. Programme	35
3. Synthèse sur les tables rondes	35
3.1. Changement climatique et impacts hydrologiques	35
3.2. Evolution passée et future des usages de l'eau	36
3.3. Satisfaction des demandes en eau et stratégies d'adaptation	38
3.4. Conclusion sur les tables rondes.....	39

D. RAPPORT SCIENTIFIQUE	41
Contexte général et problématique	41
Les hydrosystèmes Hérault et Ebre	42
1. Introduction	42
2. Contexte géographique	43
3. Données hydro-climatiques	43
4. Conditions hydro-climatiques et évolutions sur 1971–2009	44
5. Gestion et usages de l'eau	46
5.1. Pressions anthropiques actuelles sur le bassin de l'Hérault	46
5.2. Pressions anthropiques actuelles sur le bassin de l'Ebre	47
5.3. Enjeux de gestion sur les deux bassins	47
6. Conclusion : comparaison de deux bassins pour des objectifs méthodologiques et appliqués	48
Modélisation intégrée des hydrosystèmes	49
1. Introduction	49
2. Développement d'une chaîne intégrative de modélisation	49
2.1. Principes généraux de la chaîne	49
2.2. Représentation fonctionnelle des nœuds de demande et de disponibilité en eau	50
2.3. Modélisation des demandes en eau	51
2.3.1. Modèles d'estimation de la demande en eau	51
2.3.2. Traitements des données socio-économiques et environnementales	53
2.4. Modélisation des écoulements naturels	55
2.5. Modélisation du fonctionnement des barrages-réservoirs	56
2.6. Modélisation des écoulements influencés par les usages de l'eau	58
2.7. Indicateurs de fréquences et d'intensité de la capacité à satisfaire les demandes en eau	59
3. Dynamiques des équilibres entre demande et disponibilité en eau	60
3.1. Reconstruction historique des dynamiques de demandes en eau	60
3.1.1. Variations passées sur le bassin de l'Hérault	60
3.1.2. Variations passées sur le bassin de l'Ebre	60
3.2. Performance de la chaîne de modélisation intégrée	62
3.2.1. Simulation des écoulements naturels	62
3.2.2. Simulation du fonctionnement des barrages-réservoirs	63
3.2.3. Simulation des écoulements influencés	63
3.3. Analyse des changements passés dans les débits observés	66
3.3.1. Evolution de la demande en eau	66
3.3.2. Impact de la variabilité climatique sur les écoulements naturels	67
3.3.3. Impact relatif des facteurs anthropiques et climatiques sur les écoulements	67
3.4. Analyse des équilibres entre demande et disponibilité en eau	67
3.4.1. Restrictions d'eau simulées sur 1971–2009	67
3.4.2. Viabilité des usages de l'eau actuels sous les conditions climatiques de 1971–2009	69
4. Conclusion	70
Projections climatiques et anthropiques en 2050 et impacts sur la demande en eau	71
1. Introduction	71
2. Simulations climatiques	71
2.1. Méthodes statistiques de régionalisation	71
2.1.1. Principe de désagrégation statistique	71
2.1.2. Description des modèles statistiques utilisés	72
2.1.3. Observations et données à grande échelle	73
2.1.4. Sélection des variables d'analyse	73
2.1.5. Validation croisée	74
2.1.6. Résultats avec les GCMs	75
2.2. Sensibilité de la modélisation hydrologique aux méthodes de régionalisation	77
2.2.1. Approche méthodologique mise en place	77
2.2.2. Recommandations pour l'utilisation des méthodes statistiques de régionalisation	78
2.3. Projections climatiques retenues	79
2.3.1. Modèles climatiques	79
2.3.2. Méthode de construction des scénarios climatiques	80
2.3.3. Tendances climatiques futures	80
3. Scénarios tendanciels d'usages de l'eau sur les bassins	81
4. Impacts des changements anthropiques et climatiques sur la demande en eau	82
4.1. Sous changements anthropiques seuls	82
4.2. Sous changements climatiques seuls	85
4.3. Sous changements climatiques et anthropiques combinés	85
5. Conclusion	86

Adéquation entre ressource et demande en eau à l'horizon 2050.....	86
1. Introduction	86
2. Utilisation de la chaîne intégrative de modélisation sous scénarios prospectifs	87
2.1. Prise en compte d'un débit environnemental minimum	87
2.2. Ordres de priorité d'allocation et restrictions	88
2.3. Combinaison des scénarios climatiques et d'usages de l'eau	88
2.4. Indicateurs de satisfaction de la demande en eau	89
2.5. Evaluation de la pression anthropique sur les écoulements.....	89
3. Résultats	90
3.1. Projections hydro-climatiques et de demandes en eau	90
3.1.1. Projections hydro-climatiques en 2050.....	90
3.1.2. Projections des demandes en eau en 2050	90
3.2. Satisfaction de la demande en eau sous scénarios climatiques et d'usages de l'eau.....	92
3.2.1. Satisfaction de la demande en eau sur le bassin de l'Hérault	92
3.2.2. Satisfaction de la demande en eau sur le bassin de l'Ebre	92
3.3. Pression anthropique sur les écoulements.....	94
4. Conclusion	96
Efficacité et robustesse de stratégies d'adaptation	96
1. Introduction	96
2. Tests de sensibilité.....	97
2.1. Variables d'ajustement pour l'adaptation.....	97
2.1.1. Sensibilité de la satisfaction de la demande en eau aux principales variables.....	97
2.1.2. Sensibilité aux variations des débits environnementaux minimum.....	97
2.1.3. Sensibilité aux variations de gestion des barrages-réservoirs.....	97
2.2. Evaluation de l'efficacité et de la robustesse des mesures d'adaptation.....	98
2.2.1. Sensibilité aux mesures individuelles	98
2.2.2. Sensibilité à des mesures d'adaptation combinées.....	98
3. Résultats	98
3.1. Sensibilité des demandes en eau municipales et d'irrigation à des mesures individuelles	98
3.1.1. Contraintes sur l'augmentation de la population	98
3.1.2. Contraintes sur l'augmentation des surfaces irriguées.....	98
3.2. Efficacité et robustesse de mesures individuelles pour réduire les fréquences de restrictions	99
3.2.1. Limiter l'augmentation de la demande municipale et d'irrigation	99
3.2.2. Ajuster les débits environnementaux minimum	101
3.2.3. Modifier les règles de gestion de barrages-réservoirs.....	102
3.3. Efficacité et robustesse de scénarios d'adaptation.....	102
3.3.1. Scénarios d'adaptation retenus	102
3.3.2. Impacts sur la satisfaction de la demande en eau	103
3.3.3. Impacts sur le niveau de pression anthropique	103
4. Conclusion	105
Challenges scientifiques relevés : apports et limites pour la gestion de l'eau.....	105
1. Introduction	105
2. Avancées méthodologiques pour l'évaluation du stress hydrique dans des hydrosystèmes complexes	106
2.1. Intégration de variables climatiques et anthropiques sur une longue période passée.....	106
2.2. Schématisation des nœuds de disponibilité et de demande au sein des hydrosystèmes	107
2.3. Transférabilité de la chaîne de modélisation	107
3. Incertitudes et limites de l'utilisation prospective de la chaîne de modélisation	108
3.1. Calage et de validation de la chaîne de modélisation	108
3.2. Incertitudes de modélisation sous conditions non-stationnaires.....	109
3.3. Intégration limitée des déterminants physiques et humains du stress hydrique.....	110
4. Des nouvelles connaissances pour la gestion de l'eau.....	111
4.1. Connaissance sur les processus menant au stress hydrique.....	111
4.2. Projections de stress hydrique et options d'adaptation	112
4.2.1. Evolution de la disponibilité en eau	112
4.2.2. Evolution des demandes en eau	112
4.2.3. Evolution de la satisfaction des demandes en eau	113
4.2.4. Capacité d'adaptation aux changements	114
4.3. Indicateurs de restrictions d'eau sous incertitude climatique : apports et limites.....	114
5. Réflexions et perspectives sur la vulnérabilité des usages de l'eau.....	116
E. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	117
F. ANNEXES	123

RESUMES

Résumé court

Le projet GICC REMedHE (2012–2015), associant des scientifiques et des gestionnaires de bassin, a permis de proposer une approche originale pour évaluer les évolutions à moyen terme des équilibres entre usages et disponibilité en eau à l'échelle d'hydrosystèmes. Un cadre de modélisation intégrant les dynamiques hydro-climatiques et des activités humaines ainsi que les liens entre demandes et ressources en eau a été développé et appliqué sur deux bassins d'échelles différentes et aux usages de l'eau contrastés : l'Hérault (2 500 km², France) et l'Ebre (85 000 km², Espagne). La modélisation a comporté trois étapes-clé : (i) la représentation de la dynamique spatio-temporelle des usages (municipaux, d'irrigation, industriels et énergétiques) et des demandes en eau associées ; (ii) la simulation des écoulements naturels et de leur perturbation par les principaux ouvrages hydrauliques et prélèvements ; et (iii) l'évaluation des équilibres usages-ressources en eau au travers d'indicateurs sur la fréquence et l'intensité des restrictions sur les prélèvements. Les demandes en eau municipale, industrielle et d'irrigation ont été estimées à partir de données socio-économiques, agronomiques et climatiques. Les écoulements naturels ont été simulés avec un modèle hydrologique conceptuel et un modèle de gestion de barrage piloté par les demandes associées et les contraintes de gestion, a été implémenté. Des débits environnementaux seuils, en-dessous desquels les prélèvements sont limités, ont également été considérés. La chaîne de modélisation a d'abord été calée et validée sous les conditions anthropiques et hydroclimatiques non-stationnaires d'une période rétrospective de 40 ans (1971–2009), avant d'être appliquée sous quatre combinaisons de scénarios de changements climatiques et d'usages de l'eau, permettant ainsi de différencier les impacts des changements climatiques et anthropiques sur le stress hydrique. Des simulations climatiques de l'exercice CMIP5 ont été utilisées pour générer 18 scénarios climatiques à l'horizon 2050, et un scénario tendanciel des usages de l'eau a été établi en concertation avec les gestionnaires de bassin sur la base des tendances socio-économiques locales et des projections de gestion. La disponibilité en eau a été comparée à la demande à travers des indicateurs de fréquence et d'intensité de restrictions. Les résultats ont montré que les bassins seraient soumis à des conditions climatiques plus déficitaires (augmentation des températures associée à une diminution des précipitations printanières et estivales) et des pressions anthropiques croissantes (augmentation de la population et des surfaces irriguées). La combinaison de ces conditions devrait entraîner une diminution sensible de la ressource en eau disponible, ainsi qu'une augmentation des demandes municipales et d'irrigation sur ces deux bassins, ce qui pourrait remettre en question les allocations et débits environnementaux envisagés pour les décennies à venir. Les restrictions de prélèvements pourraient devenir plus fréquentes, et la pression anthropique sur les milieux aquatiques pourrait s'intensifier. Pour évaluer le potentiel d'adaptation aux changements climatiques, une analyse de sensibilité des indicateurs aux principaux facteurs d'évolution de la demande et de la gestion de barrages a été réalisée. L'efficacité et la robustesse de mesures individuelles varient entre les bassins et selon les noeuds de demande. Un scénario d'adaptation combinant différentes mesures a ensuite été testé. Ce scénario pourrait réduire sensiblement le stress hydrique, cependant sa robustesse vis-à-vis des incertitudes climatiques pourrait être insuffisante. Afin d'atteindre un équilibre durable entre usages et ressources en eau, une complémentarité doit être trouvée entre des études quantitatives à l'échelle de bassins versants, comme celle menée dans ce projet, et des études locales de la vulnérabilité socio-économique et des capacités d'adaptation.

Mots-clé : Usages de l'eau, Changement climatique, Impacts, Intégration, Vulnérabilité, Adaptation, Incertitudes

Short abstract

The GICC REMedHE 2012–2015 project associated scientists in hydrology and climatology with local water management agencies. It proposed an original approach to assess multi-decadal changes in the balance between water use and availability in managed river basins. A modeling framework integrating human and hydro-climatic dynamics and accounting for linkages between resource and demand was developed and applied in two basins of different scales and with contrasted water uses: the Herault (2 500 km², France) and the Ebro (85 000 km², Spain) basins. The modelling involved three key steps: (i) representing the spatiotemporal dynamics of water uses (domestic, agricultural, industrial and energy) and associated demand; (ii) simulating natural flows and the influence of the main hydraulic works and water withdrawals; and (iii) assessing the balance between water availability and demand using indicators. Municipal, industrial and irrigation water demands were estimated from socio-economic, agronomic and climatic drivers. Natural streamflow was evaluated using a conceptual hydrological model, and a demand-driven reservoir management model was designed to account for streamflow regulations from the main dams. Environmental flows were accounted for by defining streamflow thresholds under which water withdrawals were strictly limited. This framework was successfully calibrated and validated under non-stationary human and hydro-climatic conditions over a 40-year past period (1971–2009) before being applied under four combinations of climatic and water use scenarios to differentiate the impacts of climate- and human-induced changes on streamflow and water balance. Climate simulations from the CMIP5 exercise were used to generate 18 climate scenarios at the 2050 horizon and a trend water use scenario was built based on local socio-economic trends and management projections by the mid-21st century. The frequency and intensity of water stress were assessed using normalized indicators. Results showed that the basins could face drier climatic conditions (increased temperatures associated with decreased spring and summer precipitation) and intensified anthropogenic pressure (increase in population and in irrigated areas). The combination of these conditions could lead to a substantial decline in available water resources and to an increase in domestic and irrigation needs, thus questioning the water allocations and environmental requirements currently planned for the coming decades. Water shortages for human use could become more frequent and intense, and the pressure on water resources and aquatic ecosystems could intensify. To assess the efficiency of potential adaptation measures under climate change scenarios, the sensitivity of water stress to variations in the main drivers of water demand and dam management was tested. The effectiveness and robustness of individual measures varied between the basins and within each basin. Finally an adaptation scenario combining different measures was tested in both basins. This scenario led to encouraging results regarding the decrease of water stress. However, the adaptation strategies were shown to be insufficiently robust to climate change uncertainties. To achieve a sustainable balance between water availability and demand and reduce the vulnerability of water uses to climate change, a complementarity needs to be found between basin-scale studies of the water balance, such as the ones conducted in this project, and local assessments of vulnerability and adaptive capacity.

Key words: Water uses, climate change, impacts, integrated assessment, vulnerability, adaptation, uncertainties.

Synthèse

1. Contexte et objectifs

Les évolutions climatiques et anthropiques récentes et à venir dans la région méditerranéenne posent la question de **l'équilibre entre usages et ressources en eau à l'échelle de gestion sur des hydrosystèmes anthropisés**. Cet équilibre dépend de l'évolution conjuguée de l'état quantitatif des ressources en eau et des usages anthropiques et environnementaux. Or les initiatives engagées aujourd'hui dans la gestion de l'eau en termes d'adaptation au changement climatique reposent sur une connaissance limitée de la vulnérabilité des hydrosystèmes aux changements. L'évaluation de cette vulnérabilité se heurte en effet à de nombreux verrous méthodologiques, liés à la nécessaire intégration de processus physiques et humains ainsi qu'à la représentation de leurs interactions dans l'espace et dans le temps.

Ces questions ont été appréhendées dans le cadre du projet GICC REMedHE (2012–2015), associant des scientifiques et des gestionnaires de bassin, en vue de **proposer une approche originale pour évaluer les évolutions à moyen terme des équilibres entre usages et ressources en eau** à l'échelle d'hydrosystèmes. Le projet visait ainsi à **appréhender les interrelations complexes entre forçages climatiques, pressions humaines et écoulements à des échelles opérationnelles** sur deux bassins versants méditerranéens : le **bassin de l'Hérault** (2 500 km²) dans le sud de la France et le **bassin de l'Ebre** (85 000 km²) en Espagne.

Sur les dernières décennies, les ressources en eau de ces bassins ont en effet subi une pression croissante du fait d'une importante variabilité climatique et des mutations des secteurs principaux de demande en eau (irrigation, alimentation en eau potable, activités touristiques). Du fait d'une demande croissante pour l'alimentation en eau potable sur le bassin de l'Hérault et d'un développement agricole marqué sur le bassin de l'Ebre, la capacité future d'allocation en eau est préoccupante sur les deux bassins où des changements climatiques importants sont attendus.

Sur chaque bassin **une chaîne de modélisation intégrée des équilibres ressources-usages de l'eau** a été développée de manière à : (i) représenter le fonctionnement de ces hydrosystèmes et leur évolution sur les 40 dernières années ; (ii) proposer des scénarios hydrologiques sous contrainte de changement climatique et d'évolution des usages de l'eau à moyen terme (2050) ; (iii) évaluer le niveau d'adéquation entre la disponibilité et la demande en eau à travers des indicateurs liés aux objectifs de planification ; (iv) tester des stratégies d'adaptation à travers une co-construction de scénarios avec les gestionnaires de bassin.

L'implémentation d'une méthodologie commune de modélisation sur deux bassins de tailles différentes et avec des caractéristiques physiques et humaines contrastées **visait à tester sa robustesse et sa généralité**. Cette approche devait permettre de répondre aux questions suivantes sur les bassins étudiés : l'évolution attendue en termes d'usages de l'eau est-elle compatible avec les changements climatiques projetés ? Les demandes en eau seront-elles satisfaites dans le futur ? Quel pourrait être l'impact de stratégies d'adaptation sur l'amélioration de la capacité d'allocation en eau à moyen terme ?

2. Modélisation intégrée des hydrosystèmes

2.1. Développement d'une chaîne intégrative de modélisation

Un cadre de modélisation intégrée prenant en compte les interactions entre disponibilité et demande en eau a été conçu et mis en place afin d'analyser l'évolution des équilibres ressource-demande avec des indicateurs pertinents et parlants pour les gestionnaires. Les priorités et règles de gestion ont été représentées sous forme de modèles en privilégiant la reconstruction des dynamiques concernant les variables climatiques et anthropiques de forçage.

La chaîne de modélisation intégratrice développée a été appliquée dans un premier temps sur une période rétrospective de quatre décennies (1971–2009), avec pour objectif de caler/valider les différents modules au pas de temps décadaire, et de représenter et comprendre les dynamiques passées des équilibres entre disponibilité et demande en eau au sein des hydrosystèmes étudiés. La chaîne de modélisation comporte trois composants (Fig. A.1) :

- **la représentation dynamique des usages et des demandes en eau associées** : les demandes en eau ont été simulées au pas de temps décadaire par noeud de demande pour les trois secteurs principaux d'usages : la demande municipale liée à la population permanente et touristique (MWD), la demande industrielle et énergétique (OWD), et la demande agricole liée à l'irrigation (IWD). La demande en eau municipale a été estimée à partir de données de population et de demande unitaire en eau et la

demande en eau d'irrigation a été simulée à partir de données sur les types de cultures, les pratiques agricoles (surfaces irriguées, efficacité hydraulique), les sols et les conditions climatiques. La demande industrielle sur le bassin de l'Ebre a été estimée à partir d'allocations unitaires par employés selon le type d'activités industrielles, du nombre de salariés et de la valeur ajoutée brute (VAB) à prix constants de la production. Enfin, la demande énergétique a été considérée à travers les volumes d'eau évaporés par les systèmes de refroidissement des centrales nucléaires sur le bassin de l'Ebre.

- **la simulation des écoulements naturels et de leur perturbation par les principaux ouvrages hydrauliques et les prélèvements** : un modèle hydrologique conceptuel journalier (GR4j) agrégé au pas de temps décadaire a été utilisé pour simuler les écoulements naturels pour chaque unité hydrologique déterminée lors de la schématisation des bassins, à partir des forçages climatiques. Afin de représenter les écoulements de type nival sur l'Ebre, un module neige a été intégré au modèle hydrologique. Pour simuler les écoulements naturels, non-influencés par les prélèvements (principalement agricoles), le calage du modèle a été effectué uniquement sur les décades où la demande d'irrigation simulée est négligeable. Les dynamiques de stockage/restitution des principaux barrages ont été prises en compte à travers l'implémentation d'un modèle de gestion de barrage piloté principalement par les demandes d'irrigation et les contraintes de gestion.
- **l'évaluation des équilibres disponibilité-demande au travers d'indicateurs de satisfaction** : l'évolution des équilibres entre usages et ressources a été évaluée par la confrontation de la disponibilité et de la demande en eau en chaque nœud des schémas fonctionnels des hydrosystèmes. Des indicateurs représentant la fréquence et l'intensité des restrictions sur les prélèvements ont été construits.

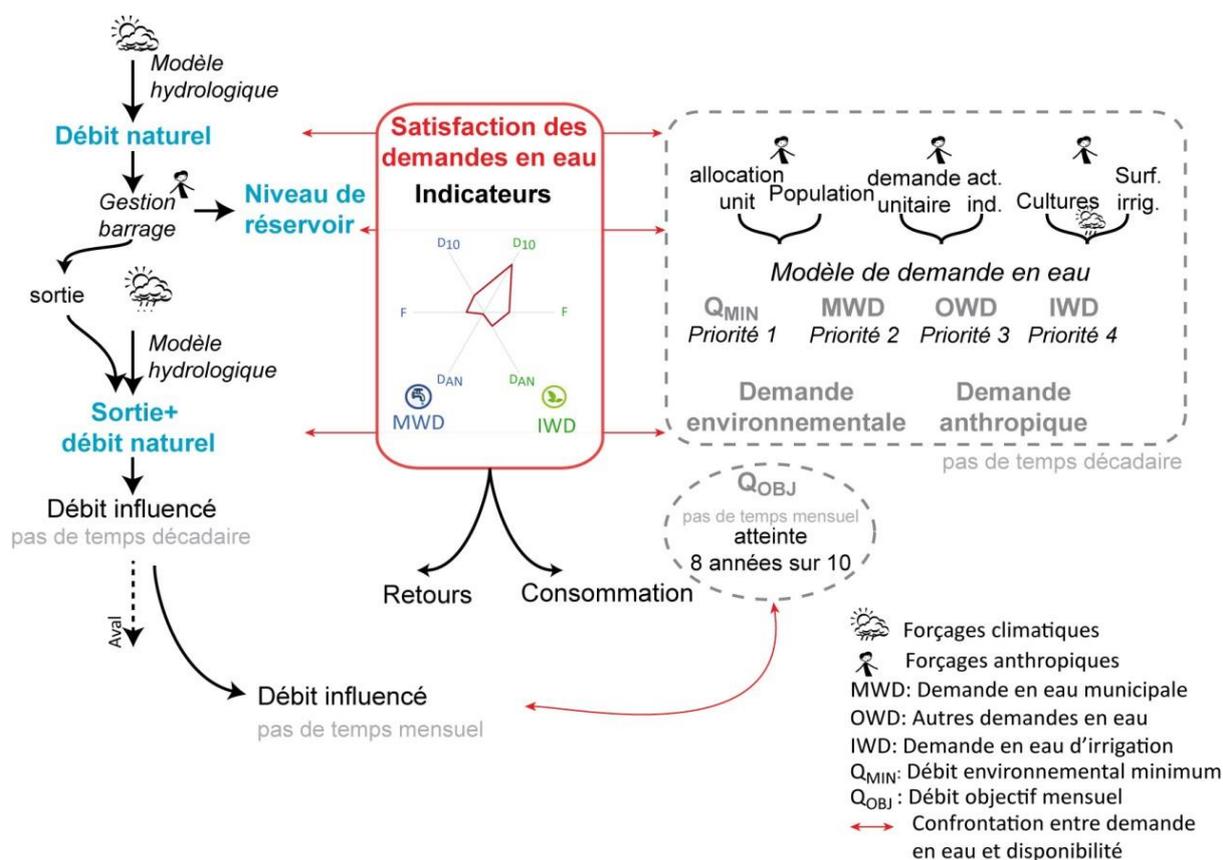


Figure A.1. Chaîne de modélisation intégrative développée et appliquée sur les bassins de l'Hérault et de l'Ebre au pas de temps décadaire. Les demandes en eau et les débits naturels ont été simulés à partir de contraintes climatiques et anthropiques. La pression anthropique sur les ressources en eau a été évaluée en simulant la gestion des barrages-réservoirs et la consommation nette.

2.2. Schématisation du fonctionnement demandes/ressources

Un des défis relevés par le projet a consisté à considérer la complexité de la gestion de l'eau au sein des deux hydrosystèmes en proposant des représentations adaptées de la disponibilité et de la demande en eau, tout en considérant l'influence anthropique sur les écoulements. Des unités de ressource et d'usages de l'eau ont ainsi été déterminées à travers une schématisation fonctionnelle de nœuds principaux de disponibilité et de demande. Du point de vue de la ressource, il s'agissait particulièrement d'isoler les zones les plus contributives aux écoulements et de déterminer les barrages-réservoirs stratégiques pour la satisfaction des demandes en eau. Les hétérogénéités géographiques ont également été prises en compte, notamment les contrastes climatiques et d'occupation du sol. Cette schématisation a nécessité de nombreuses informations (cartes, bases de données, plans de gestion de l'eau, rapports techniques) et une collaboration étroite avec les gestionnaires locaux. La définition des nœuds de ressource et de demande en eau au sein des bassins a donc reposé sur un compromis entre la disponibilité de données de contrôle pour les simulations (stations hydrométriques), la localisation des principaux barrages-réservoirs et canaux d'irrigation, et la localisation des grands secteurs irrigués. Cette schématisation a servi de base pour analyser l'influence anthropique sur les écoulements au sein des bassins à partir de la simulation des écoulements naturels et des perturbations causées par les usages de l'eau, telles que les opérations de stockage et de restitution, ou encore la consommation en eau.

2.3. Calage et validation de la chaîne et analyse des évolutions passées

2.3.1. Calage de la chaîne de modélisation et analyse de l'évolution passée des débits

La saisonnalité et les variations interannuelles des débits influencés et des niveaux de réserve des barrages ont été reproduits de manière satisfaisante pour la plupart des points de mesure de débit et des barrages. Les critères utilisés pour le calage des débits naturels ont été recalculés pour comparer les débits influencés simulés aux débits observés, en ajoutant le critère de Nash-Sutcliffe sur les étiages. La comparaison des évolutions de débits simulés naturels vs. influencés a permis de comparer l'impact relatif des facteurs climatiques et anthropiques dans la baisse des débits observée dans les deux bassins (-40 % environ entre 1971–1980 et 1981–2009 à l'exutoire des deux bassins). Les pressions anthropiques expliqueraient 3 % et 20 % de la baisse de débits observée après 1980 sur l'Hérault et l'Ebre respectivement (Fig. A.2.).

2.3.2. Reconstruction de l'évolution passée de la satisfaction des demandes en eau

Dans le bassin de l'Hérault, les besoins d'irrigation de la vigne présentent une tendance à l'augmentation et une forte variabilité interannuelle. La satisfaction estimée de cette demande apparaît sensible à la variabilité hydro-climatique, néanmoins les améliorations d'efficacité de l'irrigation dans le secteur de Gignac dans les années 2000 ont contribué à limiter les déficits. Un déséquilibre quantitatif apparaît dans la basse vallée de l'Hérault dans les années 2000, du fait de l'augmentation des demandes municipales et d'irrigation combinée à la baisse des débits naturels. Dans le bassin de l'Ebre, un fort contraste ressort entre les secteurs de la rive droite, en fort déséquilibre quantitatif durant les quarante dernières années, et la rive gauche de l'Ebre, qui bénéficie de la régulation des écoulements pyrénéens et cantabriques par les barrages. Dans certains secteurs de la rive gauche, la demande en eau d'irrigation a largement augmenté (du fait principalement de l'expansion des surfaces irriguées), dépassant la capacité de stockage et donc la ressource disponible.

Malgré une forte sensibilité de certains secteurs clefs du bassin de l'Hérault à la variabilité hydro-climatique, les déséquilibres entre usages et disponibilité de l'eau apparaissent plus marqués dans le bassin de l'Ebre, du fait de conditions climatiques plus déficitaires et d'une forte pression agricole sur les ressources en eau. Néanmoins, sur l'Ebre, un certain nombre de secteurs irrigués, qui concentrent 60 % des demandes en eau liées aux larges systèmes d'irrigation, apparaissent à l'équilibre. La demande en eau d'irrigation du secteur de Gignac représente, en comparaison, 70 % de la demande d'irrigation totale du bassin de l'Hérault en moyenne entre 1971 et 2009.

3. Projections hydro-climatiques et d'usages à l'horizon 2050

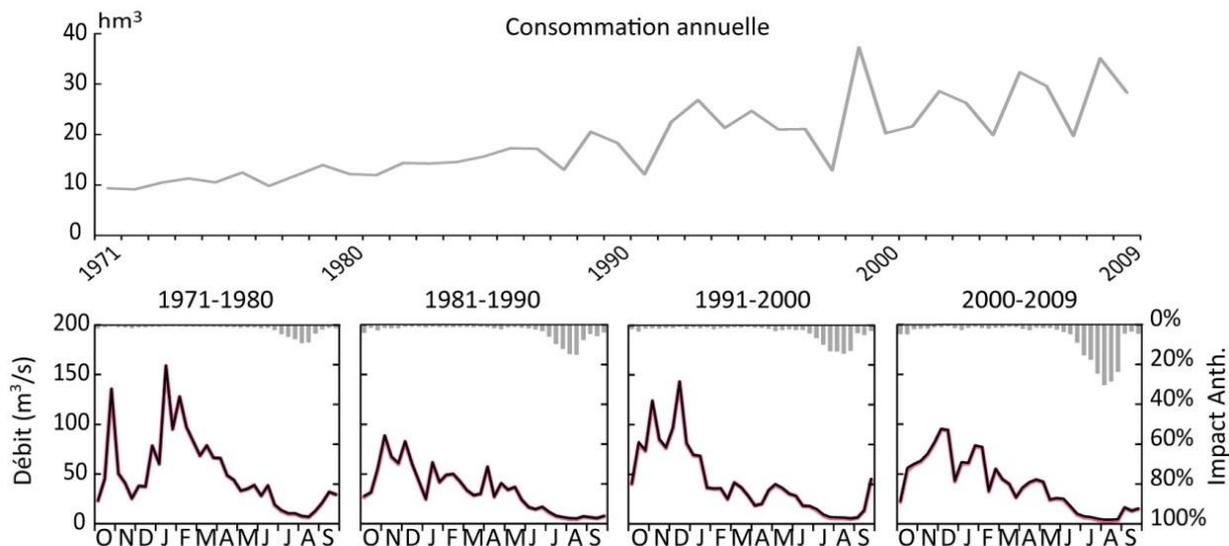
3.1. Scénarios climatiques et impacts sur les écoulements naturels

Des séries temporelles de température et de précipitation ont été générées à partir de trois méthodes statistiques de désagrégation sur les bassins d'étude. Deux de ces méthodes, un modèle stochastique et un modèle de correction de biais CDF-t avec calage mensuel, ont été retenues pour fournir des simulations

climatiques sur une période de contrôle (1976–2005) et une période future (2036–2065) selon deux scénarios d'émission de forçage radiatif (RCP4.5 et RCP8.5). Les températures sont bien représentées quel que soit le modèle utilisé mais les résultats médiocres concernant les précipitations ont contraint à envisager l'utilisation d'une méthode plus robuste pour s'affranchir des biais liés à la désagrégation statistique des sorties de modèles.

Afin de couvrir un large spectre de futurs possibles, 18 scénarios climatiques journaliers haute-résolution ont été générés en utilisant les simulations de 9 modèles climatiques globaux de l'exercice CMIP5 sous RCP4.5 et 8.5 et une méthode de perturbation. L'horizon d'étude à 2050 a permis de distinguer le signal changement climatique par rapport à la variabilité climatique, sans s'éloigner excessivement des horizons de planification et donc de perception des gestionnaires.

(a) Hérault à Agde



(b) Ebre à Tortosa

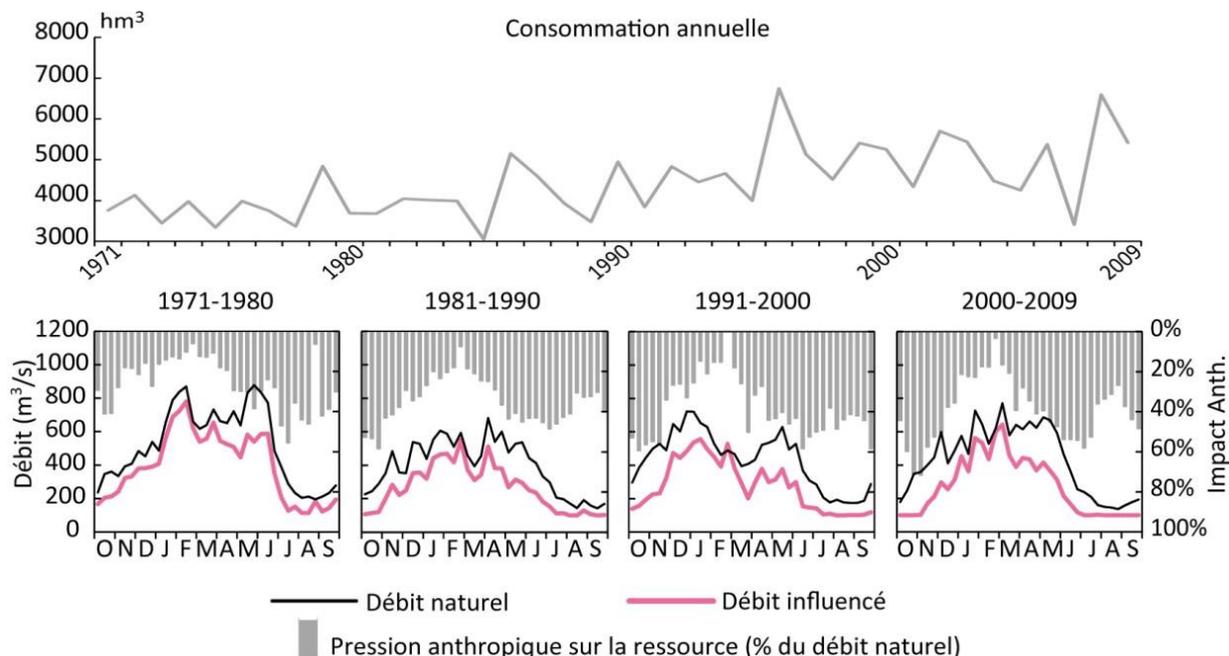


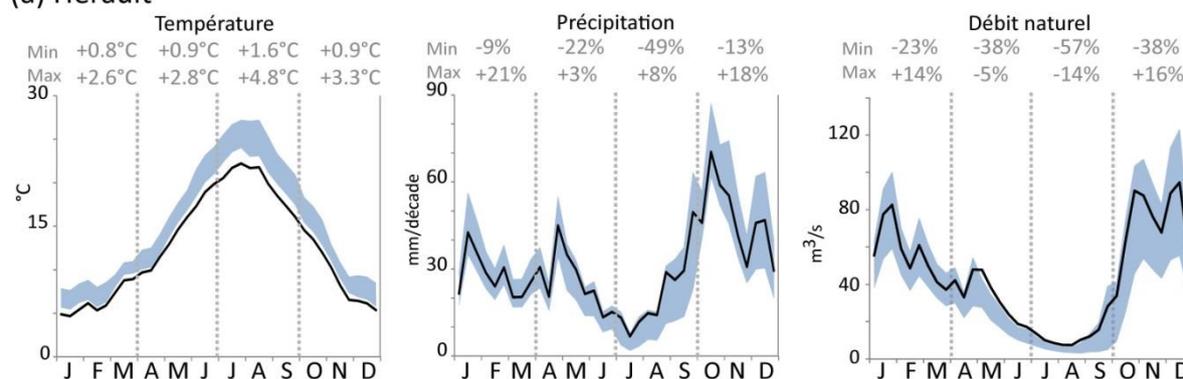
Figure A.2. Comparaison des débits simulés naturels et influencés : pression anthropique (par le stockage et la consommation nette) dans les bassins versants (a) de l'Hérault et (b) de l'Ebre.

Les projections de températures à l'horizon 2050 montrent une tendance claire à l'augmentation (entre +1 °C et 3,3 °C à l'échelle annuelle sur les deux bassins), particulièrement marquée en été (jusqu'à +4,8 °C sur le

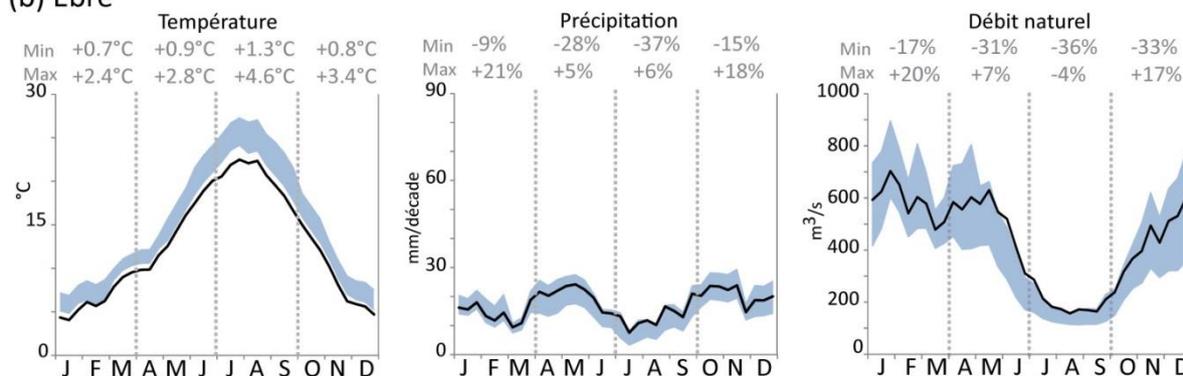
bassin de l'Hérault et +4,6 °C sur le bassin de l'Ébre). Les projections de précipitation sont plus incertaines et diffèrent significativement entre les 18 scénarios climatiques (Fig. A3). En fonction des scénarios climatiques, les changements de précipitation annuelle vont ainsi de -13 % à +7 % sur l'Hérault et de -15 % à +5 % sur l'Ébre. Néanmoins, les projections de précipitations printanières et estivales montrent une tendance assez claire à la diminution sur les deux bassins : ainsi, pour les mois d'été, la plupart des scénarios projettent une diminution sensible des précipitations, de l'ordre de -20 % et -18 % en valeurs médianes sur les bassins de l'Hérault et de l'Ébre respectivement.

Les changements climatiques projetés ont pour conséquence des évolutions dans les débits naturels simulés : alors que les scénarios hydrologiques divergent pour l'automne, l'hiver et le printemps, ils convergent vers une baisse des débits d'été allant de -15 à -55 % sur l'Hérault et de -5 à -35 % sur l'Ébre. Sur le bassin de l'Ébre, bien qu'incertains, les changements projetés montrent une tendance assez claire à l'augmentation des débits en début de printemps (avril) en lien avec une fonte plus précoce de la neige, tandis que tous les scénarios s'accordent sur une diminution des débits de printemps (de -5 % à -38 %) sur le bassin de l'Hérault.

(a) Hérault



(b) Ebre



— Variabilité saisonnière moyenne des températures, précipitations et débits naturels sur la période 1976–2005

■ Enveloppes de projections à l'horizon 2050 (2036–2065) sous 18 scénarios de changement climatique

Figure A.3. Enveloppes de projections hydro-climatiques saisonnières moyennes selon 18 scénarios climatiques à l'horizon 2050 en comparaison avec les conditions de référence sur la période 1976–2005 au niveau des bassins (a) de l'Hérault et (b) de l'Ébre. Les écoulements naturels sont simulés avec le modèle hydrologique sur la période de référence et sur la période future.

3.2. Scénario tendanciel des usages de l'eau et demandes associées

En parallèle, un scénario d'évolution tendancielle des usages de l'eau à l'horizon 2050 a été établi à l'échelle des différents nœuds de demande considérés. Ce scénario s'appuie sur les projections démographiques locales et sur la prolongation des projections territoriales fournies par les gestionnaires de bassin pour 2030. Des débits environnementaux seuils, en-dessous desquels les prélèvements sont strictement limités, ont également été pris en compte.

Indépendamment du changement climatique, la demande en eau devrait augmenter dans les deux hydrosystèmes. Les projections de demandes sur le bassin de l'Hérault sont contrastées entre les zones amont et aval. Malgré une hausse de la demande d'irrigation dans certaines zones amont, celle-ci resterait faible

comparativement aux zones aval de la vallée de l'Hérault. L'amélioration de l'efficacité de l'irrigation dans le secteur de Gignac permet une baisse de 50 % de la demande d'irrigation malgré une augmentation de 65 % des surfaces irriguées dans le scénario tendanciel. Par contre, la demande d'irrigation dans la portion d'Agde pourrait doubler du fait d'un accroissement de 90 % des surfaces irriguées. Dans ce secteur, la demande en eau municipale, liée pour une large part à un transfert d'eau hors bassin, pourrait également augmenter de 57 %, pour atteindre 40 hm³/an (dont 28 hm³/an pour le transfert) en 2050, du fait de l'augmentation projetée de population. Dans le bassin de l'Ebre, le scénario tendanciel d'usages prévoit une extension des surfaces irriguées au niveau de tous les secteurs, soit une augmentation de 46 % par rapport aux 660 000 ha irrigués actuellement.

Le changement climatique projeté induit généralement une augmentation de la demande agricole ; il n'affecte pas la demande en eau municipale (modèle construit sans lien avec des facteurs climatiques). Les volumes supplémentaires requis pour l'irrigation sont conséquents, bien que variables selon les scénarios climatiques, et concernent quasiment tous les sous-bassins, à l'exception du secteur irrigué de Gignac dans le bassin de l'Hérault, où les efforts de rénovation hydraulique permettraient de réduire sensiblement les prélèvements malgré une demande évapotranspiratoire plus importante sous changement climatique.

L'incertitude climatique reste néanmoins forte sur les bassins d'étude. Si l'augmentation des températures fait peu de doute (dans une gamme assez large selon les scénarios), les projections de précipitation sont très contrastées. En conséquence, l'hétérogénéité de l'évolution la demande en eau projetée à l'horizon 2050, avec une tendance majoritairement à la hausse, pose la question de la disponibilité en eau pour assurer les équilibres ressource/demande sur les bassins, tout en considérant l'incertitude climatique.

4. Adéquation entre ressource et demande en eau à l'horizon 2050

4.1. Combinaison des scénarios climatiques et d'usages de l'eau

La chaîne de modélisation a été appliquée sous quatre combinaisons de scénarios climatiques et d'usages de l'eau, afin de différencier les impacts climatiques et anthropiques sur la capacité à satisfaire les demandes en eau et le niveau de pression anthropique sur les ressources et les milieux.

- **un scénario de référence** : combinant les usages de référence (années 2000) et un climat de référence (1976–2005), il visait à étudier la durabilité des usages actuels sous un climat de référence ;
- **un scénario de changements climatiques seul** : combinant les usages de référence (années 2000) et 18 scénarios de changement climatique à l'horizon 2050 (2036–2065), il visait à étudier la durabilité des usages actuels sous changement climatique ;
- **un scénario de changements d'usages seul** : combinant un scénario tendanciel d'usages de l'eau à l'horizon 2050 et le climat de référence (1976–2005), il visait à étudier la durabilité des usages planifiés sous un climat de référence ;
- **un scénario de changement climatiques et d'usages de l'eau** : combinant le scénario tendanciel d'usages de l'eau à l'horizon 2050 et chacun des 18 scénarios de changement climatique (2036–2065), il visait à étudier la durabilité des usages planifiés sous changement climatique.

4.2. Indicateurs de stress hydrique

Pour chaque combinaison de scénarios, trois indicateurs caractérisant la fréquence et l'intensité des restrictions de prélèvements ont été calculés pour la demande en eau municipale (MWD) et la demande en eau d'irrigation (IWD) :

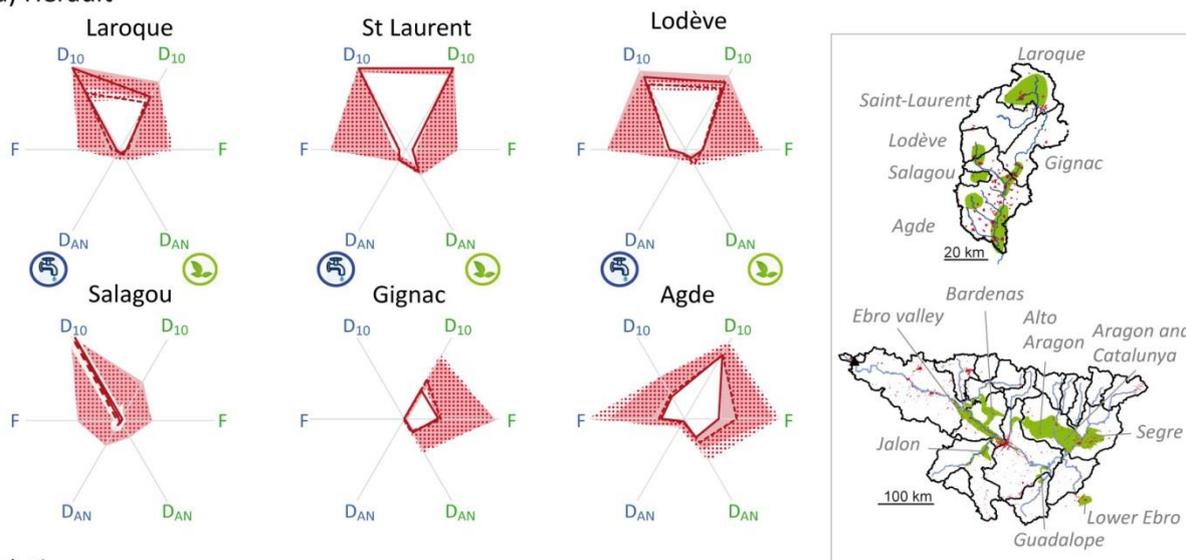
- F : fréquence d'années avec au moins une restriction significative au pas de temps décadaire, soit une limitation de prélèvements de plus de 5 % de la demande municipale (MWD) ou d'irrigation (IWD) ;
- D₁₀ : déficit décadaire moyen (%) au moment des restrictions ;
- D_{AN} : déficit annuel moyen (%) occasionné par les restrictions.

Pour chaque combinaison de scénarios, le niveau de pression anthropique sur les ressources en eau a également été calculé. La différence entre les débits naturels et influencés (exprimée en pourcentage du débit naturel) a ainsi été calculée à l'exutoire des deux bassins versants au pas de temps décadaire, puis la moyenne interannuelle de la pression au pas de temps décadaire a été calculée sur les périodes de 30 ans.

4.3. Evolution de la satisfaction des demandes en eau

Si l'on considère les usages de l'eau actuels soumis à la variabilité climatique de référence, les débits mensuels objectifs pourraient être respectés dans les deux bassins, impliquant néanmoins des restrictions fréquentes sur les prélèvements d'irrigation au niveau de plusieurs noeuds de demande (Fig. A.4). Les restrictions d'eau apparaissent moins d'une année sur cinq dans le bassin de l'Hérault à l'exception des secteurs de Gignac et d'Agde, où les restrictions pour l'irrigation se produisent deux années sur cinq avec déficits annuels d'environ 10 à 20 % quand l'année enregistre au moins une restriction décadaire. Dans ces conditions, plusieurs secteurs de l'Ebre seraient en déséquilibre avec des restrictions d'irrigation chaque année et des déficits annuels moyens de 30 % pour Bardenas et la vallée de l'Ebre, et de 60 à 70 % pour les secteurs du Jalón et de Guadalupe situés sur la rive droite.

(a) Hérault



(b) Ebre



Indicateurs de satisfaction des demandes en eau

- Usages actuels sous climat de référence
- Usages 2050 sous climat de référence
- Usages actuels sous 18 scénarios climatiques
- Usages 2050 sous 18 scénarios climatiques
- 🏠 Demande en eau municipale
- 🌿 Demande en eau d'irrigation
- D₁₀: déficit décadaire moyen
- F: fréquence d'années avec au moins un déficit décadaire
- D_{AN}: déficit annuel moyen

Figure A.4. Indicateurs de satisfaction des demandes en eau municipales et d'irrigation dans (a) le bassin de l'Hérault et (b) le bassin de l'Ebre sous quatre combinaisons de scénarios climatiques et d'usages de l'eau.

En comparaison, le scénario tendanciel d'usages de l'eau sous le même climat de référence a un impact limité sur l'augmentation des fréquences et intensités de restrictions au niveau des deux hydrosystèmes. Dans l'Hérault, seule la satisfaction de la demande en eau d'irrigation sur le secteur d'Agde semble sensible à ce scénario avec des fréquences de restrictions passant de 4 à 5 années sur 10, et des déficits annuels moyens qui restent inférieurs à 20 %. Dans l'Ebre, le doublement de la capacité du barrage de Yesa conduit même à améliorer la satisfaction d'irrigation dans le secteur de Bardenas et seul le secteur d'Alto Aragon enregistre des restrictions d'irrigation plus fréquentes en lien avec l'augmentation projetées des surfaces irriguées.

En revanche, **l'impact des changements climatiques testés sur la disponibilité et la demande amène à s'interroger sur la pertinence des usages et des contraintes environnementales actuellement projetées pour les prochaines décennies sur les deux bassins.** En effet, sous contrainte conjuguée de changements climatiques et anthropiques, les restrictions d'eau pour les activités humaines pourraient devenir plus fréquentes et plus sévères, et la pression sur les écoulements et les écosystèmes aquatiques pourrait s'intensifier. Les résultats sont soumis à une forte incertitude, notamment liée aux projections divergentes de précipitation dans les scénarios climatiques utilisés. Néanmoins, **avec les scénarios climatiques les plus pessimistes, les usages actuels et projetés ne seraient pas viables et d'importants déséquilibres quantitatifs apparaîtraient au sein des deux hydrosystèmes avec des débits environnementaux ne pouvant pas être respectés plus de une année sur deux dans de nombreux secteurs, et des restrictions plus fréquentes et intenses sur les demandes en eau municipale et d'irrigation.** Non seulement les prélèvements en eau seraient limités plus d'une année sur cinq, soit beaucoup plus fréquemment que les objectifs de gestion, mais l'impact des usages de l'eau sur les écoulements pourrait s'intensifier significativement.

4.4. Pression anthropique sur les écoulements

Dans les deux bassins versants, les pressions anthropiques simulées sur les ressources en eau pourraient ainsi s'accroître, passant de 2 % (38 %) des écoulements naturels annuels dans le scénario de référence à 3 % (45 %) dans le scénario tendanciel sur le bassin de l'Hérault et de l'Ebre, respectivement. Elles pourraient s'élever respectivement de 2 à 3 % pour l'Hérault (36 à 44 % pour l'Ebre) des ressources annuelles sous changements climatiques uniquement, et de 3 à 4 % (43 à 52 %) sous changements climatiques et d'usages de l'eau. Au pas de temps décennaire, la consommation nette sur le bassin de l'Hérault s'élève à 20 % des ressources décennaires à la fin du mois de juillet dans le scénario de référence. Elle s'élèverait à 27 % sous changements d'usages uniquement, et à 25 à 45 % sous changements climatiques uniquement. Sous changements climatiques et d'usages de l'eau, le pic de consommation nette pourrait s'élever, en moyenne, à 30 à 50 % des ressources naturelles au pas de temps décennaire.

5. Efficacité et robustesse de mesures d'adaptation

5.1. Analyse de sensibilité à des mesures individuelles

La chaîne de modélisation développée dans le projet a alors été utilisée pour évaluer des options d'adaptation visant à réduire les restrictions sur la demande en eau sous contraintes de scénarios climatiques et d'usages de l'eau. Une méthode originale a été proposée pour évaluer l'efficacité de mesures d'adaptation et leur robustesse en simulant l'impact de chaque mesure individuelle sous 18 scénarios de changement climatique de manière à couvrir un large spectre d'incertitudes climatiques. L'efficacité a été définie comme la baisse moyenne (pour les 18 scénarios climatiques) de fréquence de restrictions induite par la mesure d'adaptation. La robustesse à l'incertitude climatique de l'adaptation a été évaluée à travers le nombre de scénarios climatiques dans lesquels la mesure d'adaptation induit une baisse de la fréquence des restrictions.

Une étude de sensibilité à l'augmentation de la population permanente et touristique, à l'extension des surfaces irriguées, aux débits environnementaux et, pour le bassin de l'Hérault, au débit imposé en sortie de barrage du Salagou (et corrélativement une réduction de la cote minimale autorisée) a ainsi d'abord été menée indépendamment sur chaque paramètre selon une approche incrémentale (les valeurs d'entrées dans le modèle étant modifiées par étapes).

Cette approche testée au niveau de chacun des deux bassins, a permis de montrer par exemple que dans les secteurs d'Agde et de Gignac dans la partie aval de l'Hérault, c'est clairement le paramètre « évolution de la population résidente » qui a un impact sur la demande en eau future, alors que la demande en eau pour la population touristique impacte relativement peu le stress hydrique. Au niveau du bassin de l'Ebre, une forte sensibilité du stress hydrique à la réduction des surfaces irriguées projetées dans le scénario tendanciel a été relevée. Les simulations permettent également de mesurer le rôle des modifications des valeurs de débits

environnementaux sur la fréquence des restrictions. C'est un des leviers qui apparaît comme le plus efficace et robuste pour limiter les restrictions, notamment au niveau du bassin de l'Hérault, indépendamment de toute notion de faisabilité politique ou d'acceptabilité sociale et environnementale.

Bien que certaines mesures se soient révélées plus efficaces et plus robustes aux incertitudes climatiques que d'autres, aucune ne semble à même de limiter seule drastiquement les fréquences de restrictions de demande en eau sous les changements climatiques et anthropiques projetés sur les territoires d'étude. En conséquence, différentes mesures pourraient être combinées de manière à proposer des scénarios alternatifs pour l'horizon 2050.

5.2. Impact de scénarios d'adaptation combinant plusieurs mesures

A partir des analyses de sensibilité précédentes, des scénarios d'adaptation combinant les leviers les plus sensibles ont alors été construits à titre d'exemple et testés avec l'ensemble de la chaîne de modélisation. Ils incluent notamment un maintien des surfaces irriguées dans les deux bassins, une stagnation de la population desservie par le transfert d'eau hors du bassin de l'Hérault, une baisse de 30 % de la demande domestique unitaire, une baisse de 20 % des débits seuils environnementaux, et une modification des règles de gestion du barrage du Salagou dans l'Hérault.

Ces scénarios d'adaptation pourraient réduire sensiblement le stress hydrique par rapport au scénario tendanciel (Fig. A.5). En plus d'une réduction de la fréquence et de l'intensité concernant les restrictions de prélèvements, les scénarios d'adaptation mènent à une baisse de la consommation nette (et donc de la pression anthropique sur les milieux) en pourcentage des écoulements naturels, malgré la baisse des débits seuils environnementaux. Néanmoins, leur robustesse semble insuffisante au regard des incertitudes liées aux projections de changement climatique testées.

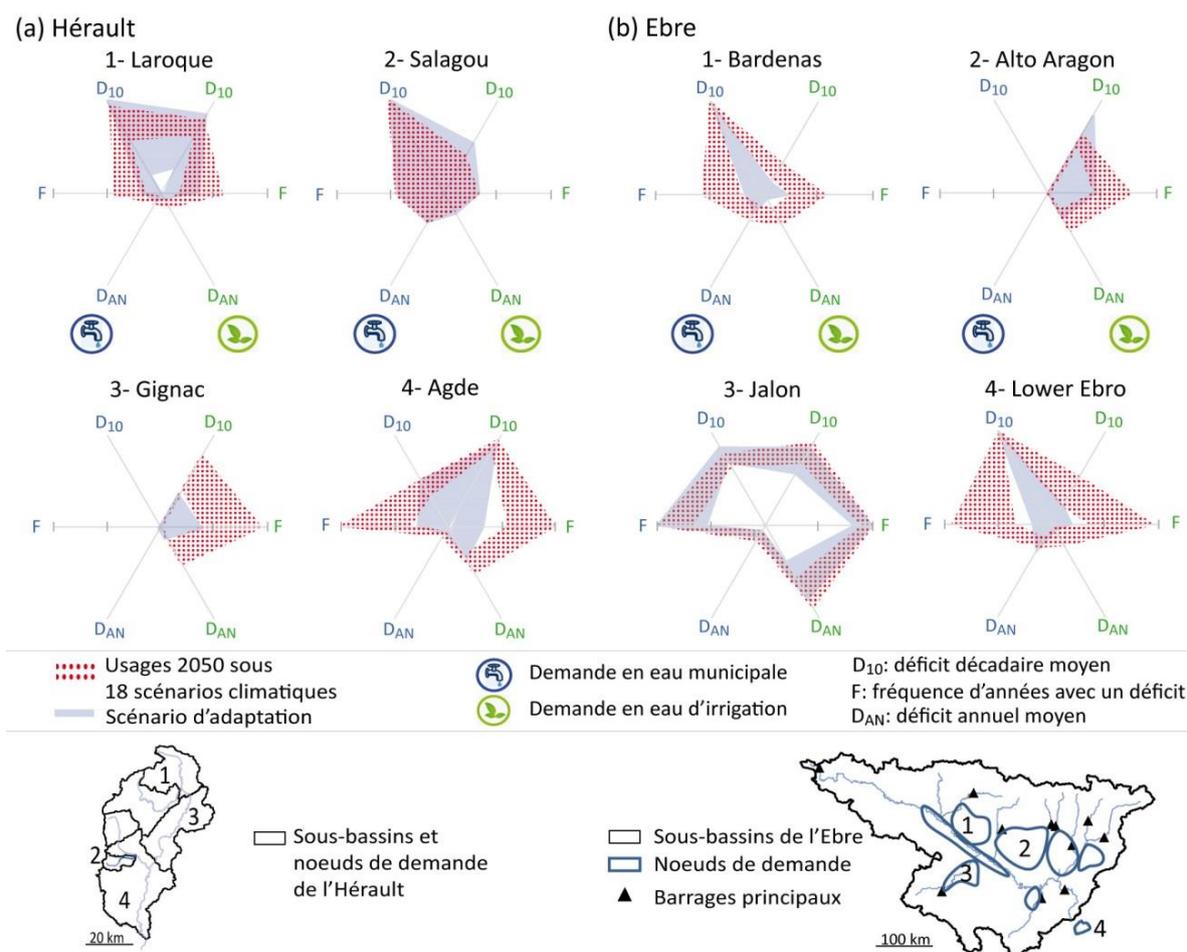


Figure A.4. Indicateurs de satisfaction des demandes en eau sous scénarios de changement climatique combinés avec le scénario tendanciel d'usages de l'eau et le scénario d'adaptation pour quatre nœuds de demande des bassins (a) de l'Hérault et (b) de l'Ebre.

6. Challenges scientifiques relevés : apports et limites pour la gestion de l'eau

6.1. Avancées méthodologiques

Les avancées méthodologiques du projet concernent la **représentation des liens entre ressource et demande en eau dans des hydrosystèmes complexes**, ainsi que la **prise en compte des dynamiques spatio-temporelles multi-décennales des déterminants climatiques et anthropiques**. Le développement et l'application d'une chaîne intégrative de modélisation sur deux hydrosystèmes contrastés ont permis de montrer la généralité et la transposabilité des méthodes proposées pour évaluer l'évolution des équilibres ressource-demande.

Une chaîne intégrative de modélisation combinant des données hydro-climatiques et socio-économiques a ainsi été développée pour simuler les risques de restrictions d'eau au sein des bassins. La chaîne de modélisation a été calée et validée sur une période passée de 40 ans, ce qui a permis d'analyser les évolutions passées des équilibres ressource-demande.

Les évolutions des restrictions d'eau sur la période de simulation ont été estimées à partir de la modélisation des écoulements (et de leur perturbation) et de la demande en eau. Ainsi, la chaîne permet de considérer l'influence conjuguée des déterminants climatiques (précipitation, température) et anthropiques sur les restrictions. L'influence des activités humaines sur la disponibilité en eau a été prise en compte à travers la simulation du fonctionnement des barrages-réservoirs principaux, les transferts d'eau hors des bassins et les consommations liées aux demandes en eau (municipale, d'irrigation ou autres). Pour ce faire, la reconstruction des changements passés concernant la demande en eau sous contrainte d'évolutions socio-économiques et climatiques s'est avérée essentielle pour reconstituer des séries de débits naturels en l'absence de données précises sur les prélèvements en eau sur des périodes passées et à un pas de temps plus fin qu'à l'échelle annuelle.

6.2. Incertitudes et limites

Du fait du manque de données d'observation et de barrières méthodologiques, plusieurs limites peuvent être évoquées concernant le calage et la validation de la chaîne de modélisation mise en œuvre. La simulation des écoulements a été contrainte par des informations parfois incomplètes, peu précises, voire inexistantes concernant la régulation des écoulements et les prélèvements, qui auraient rendu possible une reconstruction plus rigoureuse des écoulements naturels. Par ailleurs, les simulations de demande en eau n'ont pu être correctement validées du fait du manque de données d'observation. Enfin, eu égard à leur méconnaissance dans l'espace et dans le temps, des hypothèses discutables ont été retenues concernant les efficacités hydrauliques, les taux de pertes, consommations et retours pour les usages municipaux et d'irrigation.

Les résultats obtenus sont donc tributaires de nombreuses incertitudes cumulées concernant les différentes modélisations (climatiques, hydrologiques, fonctionnement des barrages, évaluation des demandes en eau, etc.). Par ailleurs, l'application prospective de ces modélisations sous contrainte de scénarios climatiques et d'usages de l'eau repose sur une hypothèse de stationnarité des processus hydrologiques et anthropiques liés à l'eau. Cette hypothèse est critiquable tant en termes de processus physiques hors des domaines de validité testés (e.g. réponses hydrologiques ou phénologiques à des niveaux de températures plus élevées) que d'évolutions territoriales figées dans les projections d'usages de l'eau en 2050, alors même que l'étude rétrospective multi-décennale a montré combien il était important de prendre en compte la non-stationnarité des usages de l'eau et des pratiques de gestion dans des simulations de long terme.

Malgré un effort d'intégration de facteurs physiques et humains dans la chaîne de modélisation, on peut citer d'autres déterminants des équilibres entre disponibilité et usages de l'eau non-inclus dans les simulations. Les écoulements naturels ont été simulés à partir de données climatiques, cependant d'autres facteurs tels que des modifications dans le couvert végétal ou dans l'occupation du sol peuvent affecter la relation pluie-débit. De plus, les ressources en eau souterraines et les relations eaux de surface – eaux souterraines n'ont pas été explicitement prises en compte. Un certain nombre de facteurs physiques et humains non-inclus dans la chaîne de modélisation pourrait influencer sur les évolutions des demandes en eau. On peut citer notamment les processus phénologiques et les pratiques d'irrigation pour le modèle de demande d'irrigation, et les déterminants socio-économiques de la demande en eau unitaire pour le modèle de demande municipale. À visée intégrative, l'approche développée dans le projet ne peut être considérée comme une étude holistique des équilibres quantitatifs. Ainsi, les rétroactions entre les composantes humaines et physiques des hydrosystèmes pourraient être mieux considérées.

6.3. De nouvelles connaissances pour la gestion de l'eau

Malgré ces limites, le projet a apporté de nombreux éléments de connaissance utiles pour la gestion de l'eau sur les deux hydrosystèmes.

Connaissance sur les processus menant au stress hydrique

La simulation de l'évolution des équilibres entre disponibilité et demande en eau sur une période multi-décennale a permis de mieux comprendre les processus conduisant à des situations de stress hydrique, avant d'envisager les évolutions possibles sous scénarios climatiques et d'usages de l'eau.

En simulant dynamiquement dans le temps et dans l'espace tous les composants des équilibres ressources-demandes en réponse aux forçages climatiques et anthropiques (écoulements naturels, demande en eau, gestion de barrages, prélèvements et retours, consommation et écoulements influencés résultants), le projet a permis une compréhension objective des évolutions passées concernant la satisfaction des demandes en eau et la modification des écoulements.

En premier lieu, les résultats montrent des évolutions hétérogènes du stress hydrique dans l'espace avec certains secteurs (principalement les secteurs aval) ayant connu une augmentation du stress hydrique, tandis que d'autres témoignent d'un équilibre plus stable entre la disponibilité et la demande. En comparant la simulation des restrictions théoriques en eau sous contrainte des usages actuels soumis à la variabilité climatique 1971–2009 avec la reconstruction des restrictions d'eau sur la même période, on observe que les conditions plus chaudes et plus sèches des années récentes ont affecté la satisfaction de la demande en eau dans certains secteurs amont de l'Hérault et de l'Ebre. A l'inverse, au niveau de certains grands systèmes irrigués du bassin de l'Ebre et de la basse vallée de l'Hérault (secteur d'Agde), c'est surtout l'extension des surfaces irriguées et l'augmentation de la population qui ont contribué à augmenter les fréquences de restrictions en eau. Bien que la capacité de stockage du bassin de l'Ebre semble offrir une résilience à la variabilité climatique observée et à un certain niveau d'augmentation de la demande, les résultats n'ont pas montré de claires distinctions dans les causes de restrictions d'eau entre les bassins de l'Hérault et de l'Ebre. Les causes d'évolution du stress hydrique sont aussi variées entre les sous-bassins d'un même hydrosystème qu'entre les deux hydrosystèmes étudiés. Néanmoins, une différence nette entre les deux hydrosystèmes est que les principales évolutions de demande en eau concernent les usages domestiques pour le bassin de l'Hérault et l'irrigation pour le bassin de l'Ebre.

Projections de stress hydrique

Dans les conditions climatiques de référence, les débits mensuels objectifs pourraient être respectés dans les deux bassins, impliquant néanmoins des restrictions fréquentes sur les prélèvements au niveau de plusieurs nœuds de demande. Cependant, face aux projections hydro-climatiques et de demandes en eau, la durabilité des usages est mise en question sur les deux bassins. Les restrictions sur les prélèvements pourraient en effet devenir plus fréquentes et plus intenses, et la pression sur les milieux aquatiques devrait s'intensifier.

Dans certains secteurs les évolutions d'usage pourraient être la principale cause de l'apparition de déséquilibres quantitatifs : dans quatre grands systèmes irrigués du bassin de l'Ebre, les usages actuels pourraient être durables sous des conditions de changements climatiques, néanmoins en combinant le scénario tendanciel d'usages de l'eau avec les projections de changements climatiques, d'importants déséquilibres quantitatifs apparaissent.

La pression anthropique semble contenue sur l'Hérault si on l'examine par la différence entre débits annuels naturels et influencés, rapportée au débit annuel (inférieure à 4 %), mais est notable en été avec une consommation nette pouvant représenter jusqu'à 50 % des écoulements naturels au mois de juillet selon les scénarios les plus pessimistes. La tension est plus forte sur l'Ebre puisque la consommation représente près de 40 % des écoulements à l'échelle annuelle avec les usages actuels sous climat de référence. Celle-ci pourrait atteindre près de 50 % en combinant le scénario tendanciel d'usages avec les scénarios climatiques les plus pessimistes. Néanmoins, du fait de l'importante capacité de stockage dans le bassin de l'Ebre, les changements climatiques et d'usages de l'eau pourraient conduire à augmenter le stockage en automne, en hiver et au printemps (une plus grande proportion d'écoulement naturel étant stocké dans les réservoirs) et à réduire l'impact sur les écoulements en été du fait du soutien d'étiage assuré par les barrages. Ceci diffère beaucoup avec le bassin de l'Hérault, où la consommation nette pourrait doubler (en proportion des écoulements naturels) durant les mois d'été du fait de capacités de stockage et de soutien limitées.

Capacité d'adaptation aux changements

Les projections d'usages de l'eau dans les bassins de l'Hérault et de l'Ebre présentent donc un risque très important de non viabilité sous scénarios de changement climatique.

Les scénarios d'adaptation testés pourraient permettre de réduire sensiblement le stress hydrique par rapport au scénario tendanciel. En plus d'une réduction de la fréquence et de l'intensité des restrictions sur les prélèvements, ces scénarios mènent à une baisse de la consommation nette, malgré la baisse des débits seuils environnementaux. Néanmoins, leur robustesse semble insuffisante au regard des incertitudes liées aux projections de changement climatique testées. Ces résultats suggèrent donc des mesures plus drastiques de réduction de la demande et d'augmentation de la disponibilité en eau dans le cas des scénarios climatiques les plus déficitaires. Ces mesures conduiraient alors à faire évoluer de manière sensible les modes de gestion actuels ou envisagés sur les deux bassins. Les leviers à mobiliser concernant la disponibilité en eau seraient d'envisager des transferts d'eau vers le bassin (e.g. projet Aqua Domitia à l'étude dans l'Hérault), d'augmenter la capacité de stockage (e.g. projets de barrage-réservoir dans le bassin de l'Ebre ou modification de la gestion du barrage du Salagou dans l'Hérault), d'exploiter de nouveaux prélèvements (e.g. sources karstiques dans le bassin de l'Hérault). Concernant la réduction des demandes en eau, les leviers possibles concernent la réduction des surfaces irriguées, les changements de types ou variétés de cultures, les économies d'eau par réfection des réseaux, la maîtrise de la demande AEP par une politique incitative de tarification de l'eau et/ou une sensibilisation de la population aux consommations, une modulation des contraintes environnementales envisagées, etc. Ces mesures peuvent être testées de manière individuelle ou combinée dans la chaîne de modélisation REMedHE mais leur application dépend évidemment de choix de planification et de décisions politiques.

6.4. Perspectives

Si le projet a permis de fournir des éléments de connaissance originaux sur la vulnérabilité des usages de l'eau aux changements climatiques et anthropiques au sein des bassins de l'Hérault et de l'Ebre, il n'a pas pu appréhender toutes les facettes de la durabilité de la gestion de l'eau. En effet, des facteurs autres que la présence ou non de restrictions peuvent conditionner la durabilité de la gestion de l'eau, comme les modes de gestion des pénuries d'eau et notamment la mise en place de mécanismes socio-économiques qui permettent de gérer de manière équitable les restrictions. Ainsi, l'étude n'a pas du tout pris en compte la composante économique, et très peu la composante sociale, de la gestion de l'eau. Des études complémentaires sur la vulnérabilité sociale et la capacité d'adaptation seraient donc nécessaires.

Ces analyses complémentaires sur la vulnérabilité et les capacités d'adaptation doivent être menées localement, à une échelle plus fine que les plans de gestion des bassins. Ainsi, pour atteindre un équilibre durable entre la disponibilité et la demande en eau et pour réduire la vulnérabilité des usages de l'eau au changement climatique, une complémentarité doit être trouvée entre les études quantitatives sur le stress hydrique à l'échelle des hydrosystèmes, comme celle menée dans le projet GICC REMedHE, et des évaluations locales sur la vulnérabilité et l'adaptation.

GESTION ET ANIMATION DU PROJET

Partenaires et personnels associés

1. Composition du partenariat et organisation en GT

Le partenariat du projet est composé de deux équipes de recherche (HSM et LSCE) et de deux organismes de gestion de bassin (SMBFH et CHE). Ce partenariat repose sur des collaborations existantes sur ces deux bassins que le projet visait à renforcer. Pour des raisons administratives, la *Confederación Hidrográfica del Ebro* (CHE) associée au projet n'a pas été financée mais des crédits ont été prévus sur la ligne budgétaire d'HSM pour prendre en charge les frais de déplacements de ce partenaire.

Le projet a été volontairement conçu selon un partenariat réduit (quatre partenaires et une douzaine de chercheurs et ingénieurs) de manière à préserver la souplesse de fonctionnement et de réaction de ce groupe. Son organisation en six Groupes de Travail (GT, Fig. B.1) a visé à donner une indépendance d'action et de proposition à chacun, tout en satisfaisant les objectifs de la proposition.

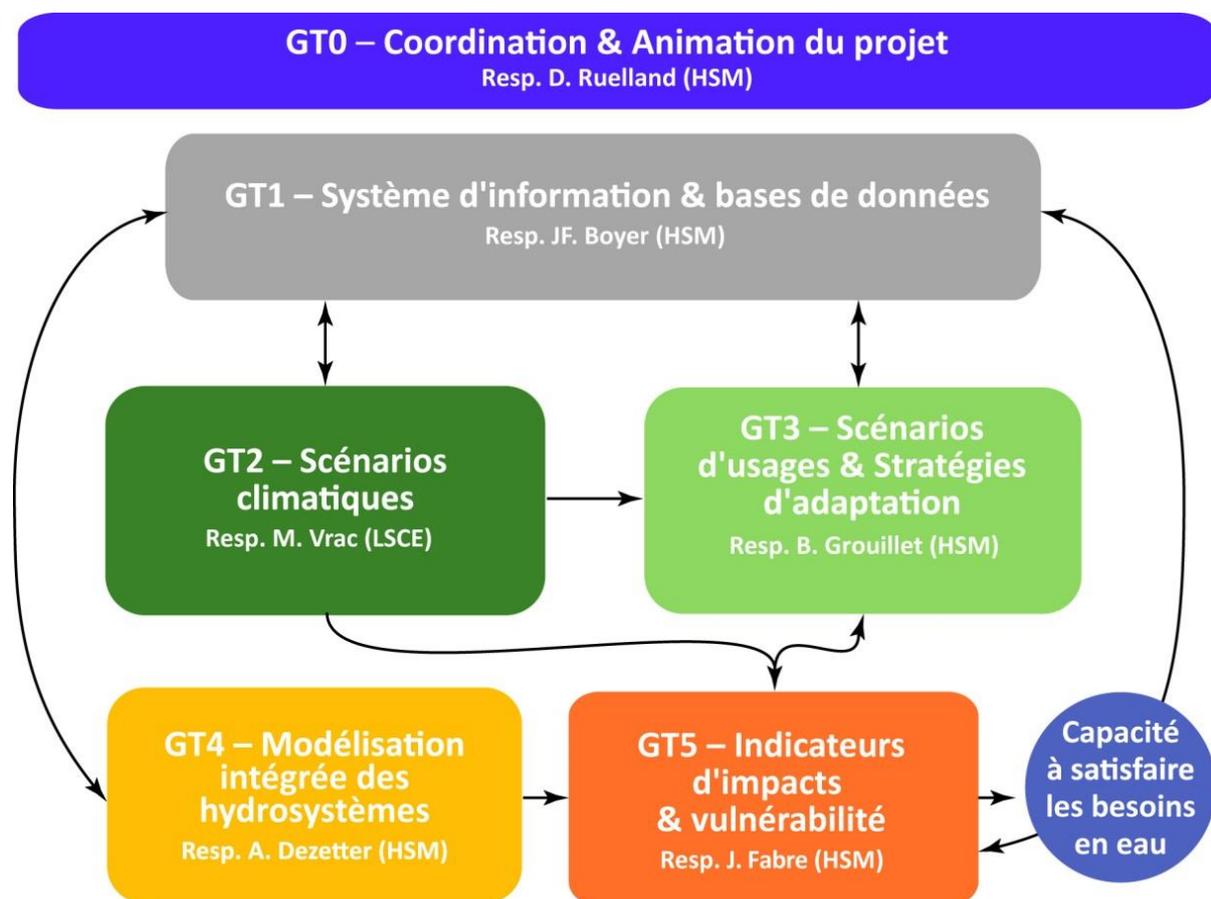


Figure B.1. Organisation fonctionnelle du projet GICC REMedHE (2012–2015) et liens entre les Groupes de Travail Thématiques.

De nombreux échanges de résultats ont eu lieu entre les GT. Ainsi, le GT1 « Système d'information & bases de données » a centralisé et mis à disposition du consortium l'ensemble des informations scientifiques, administratives et techniques produites dans le cadre du projet. Le GT2 « Scénarios climatiques » visait à fournir des projections climatiques à l'horizon 2050. Ces projections ont servi notamment de forçage pour l'estimation des demandes d'irrigation pour les développements du GT3 « Scénarios d'usages & stratégies

d'adaptation ». De la même manière, les demandes en eau passées reconstruites dans le cadre du GT3 ont constitué une donnée de base pour la naturalisation des écoulements et la simulation du fonctionnement des barrages-réservoirs qui ont été développés dans le cadre du GT4 « Modélisation intégrée des hydrosystèmes ». Enfin, le GT5 « Indicateurs d'impacts et de vulnérabilité » visait à utiliser l'ensemble de la chaîne de modélisation intégratrice développée dans le projet pour analyser les restrictions d'eau passées (période 1971–2009) et futures (horizon 2050) au sein des hydrosystèmes Hérault et Ebre sous la contrainte conjuguée de changements climatiques et anthropiques. Les personnels impliqués dans les différents groupes de travail du projet sont indiqués dans le Tableau B.1.

Tableau B.1. Composition du partenariat et implication dans le projet – les personnels dont le nom est en gras ont été directement financés par le projet GICC REMedHE (2012-2015).

Partenaire	Personnels	Statut/Tutelle	Implication GT	% implication	mois	Total
1. HSM	D. Ruelland	CNRS – Coordination	0, 1, 2, 3, 4, 5	35 % / 3 ans	12,5	
	S. Ardoin-Bardin	Ingénieur IRD	0	15 % / 3 ans	4,5	
	J-F. Boyer	Ingénieur IRD	1	15 % / 3 ans	4,5	
	L. Collet	Doctorante UM2	4	100 % / 1 an	12	
	A. Dezetter	Chercheur IRD	2, 4, 5	30 % / 3 ans	12	
	B. Grouillet	CDD Ingénieur CNRS	1, 3, 4, 5	100 % / 11 mois	11	
	J. Fabre	CDD Thèse CNRS	1, 3, 4, 5	100 % / 36 mois	36	92,5
2. LSCE	M. Vrac	Chercheur CNRS	2	15 % / 3 ans	4,5	
	S. Lassonde	CDD Ingénieur CNRS	2	100 % / 11 mois	11	15,5
3. SMBFH	C. Vivier	Directeur du SMBFH	3, 4, 5	5 % / 3 ans	1,5	1,5
4. CHE	R. Galvan	Resp. planification CHE	3, 4, 5	-	-	-

2. Organisation et suivi des recrutements

Le budget alloué au projet GICC REMedHE a permis d'assurer le recrutement de non-permanents en soutien aux objectifs de la proposition.

Ainsi, Julie Fabre, ingénieure AgroParisTech, qui travaillait en liaison avec l'équipe RESCUE d'HSM Montpellier depuis 2010 et qui venait d'effectuer deux CDD à l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, a été recrutée en thèse CNRS dans le cadre du projet GICC REMedHE sur la période janvier 2013 à décembre 2015. Elle a été inscrite à l'Université de Montpellier dans le cadre d'une thèse portant sur la thématique « Equilibres entre usages et disponibilité en eau sur deux hydrosystèmes méditerranéens – adaptation aux changements climatiques et anthropiques » sous la direction de Denis Ruelland. Cette thèse constitue une contribution majeure au projet : elle a bénéficié de l'expérience, des moyens et de la capacité de travail de l'ensemble du projet, en même temps qu'elle l'a servi en première ligne. Les travaux de cette thèse s'inscrivent plus particulièrement dans le GT4 et le GT5. Cette thèse a été soutenue avec succès le 7 décembre 2015.

En parallèle, Benjamin Grouillet a été recruté en stage de Master 2 EAU de février à juillet 2013. La première partie du stage a consisté à faire la synthèse des données existantes en provenance de travaux précédents et en cours sur les secteurs d'étude puis à les répertorier, trier et classer en vue d'une mise à disposition du consortium à travers le site intranet (GT1). A partir des données rassemblées, la deuxième partie du stage a porté sur l'évaluation de la demande en eau passée sur les deux bassins (GT3). La qualité du travail réalisé et l'excellente intégration du candidat à l'équipe de projet ont conduit à le recruter sur un CDD de 11 mois (septembre 2013–juillet 2014) et à lui confier l'animation du GT3 « Scénarios d'usages et stratégies d'adaptation » en collaboration étroite avec les membres de l'équipe et les gestionnaires de bassin.

Enfin, Sylvain Lassonde a été recruté dans le cadre du GT2 « Scénarios Climatiques » sur un CDD de 11 mois (mars 2013–février 2014) pour appliquer et comparer différentes méthodes de désagrégation de sorties de modèles climatiques à l'échelle des hydrosystèmes.

Synthèse sur les dépenses du projet

Le coût prévisionnel total du projet s'élevait à 484 731 €. Ce coût incluait les salaires de l'état pour les personnels permanents et non-permanents non-financés dans le projet (263 042 € TTC) et le montant d'aide financière accordée par le programme GICC (221 689 €). Le projet a été financé sur la période 2012–2015 à travers un conventionnement sur 36 mois à partir du 11 octobre 2012.

Au 1^{er} février 2016, les dépenses engagées (Tableau B.2) représentent 96 % du montant total financé et correspondent majoritairement aux dépenses liées aux recrutements de personnels : thèse HSM, CDD Ingénieur HSM et CDD Ingénieur LSCE, soit 72 % du montant total accordé. Les dépenses de fonctionnement ont servi majoritairement à financer les participations aux conférences nationales et internationales, l'achat de matériels et logiciels, les missions de terrain, les participations aux réunions du consortium et celles organisées par les instances GICC, ainsi que l'organisation d'un jury de thèse internationale. La ligne budgétaire « prestations de services » a été consacrée à des frais de traductions et publications ainsi qu'à l'organisation d'un séminaire de restitution et d'échanges avec les acteurs locaux et régionaux afin de confronter les résultats du projet REMedHE avec d'autres projets scientifiques sur des thématiques similaires et d'échanger avec les gestionnaires sur le bassin de l'Hérault.

Les crédits restants (8 385 €) seront utilisés en 2016 pour des missions de communication sur le projet (participation à des conférences internationales, restitution du projet aux instances GICC et aux instances de bassin, etc.) ainsi que pour des frais de publications (reproduction du rapport de fin de projet, financement de publications en cours, etc.).

Tableau B.2. Synthèse des dépenses par partenaires par rapport au budget prévisionnel. * Thèse HSM 36 mois (J. Fabre) + CDD Ingénieur HSM 11 mois (B. Grouillet) / ** CDD Ingénieur LSCE 11 mois (S. Lassonde).

Partenaires	Personnel	Fonctionnement	Prestations de service	Frais généraux	Total financé	Total engagé au 01/02/2016
1. HSM	130 674*	28 428	2 900	6 480	168 482	100 %
2. LSCE	37 580**	8 100	-	1 827	45 622	92 %
3. SMBFH	-	4 200	1 500	-	5 700	50 %
Total	158 612	50 370	4 400	8 307	221 689 €	213 304 € (96 %)

Actions d'animation

1. Chronogramme des réalisations

Les réalisations des Groupes de Travail (GT), tâches, livrables et étapes-clefs associés ont été synthétisées dans un chronogramme (Tableau B.3). L'estimation du degré de réalisation des tâches allouées à chaque GT montre un bon respect d'ensemble des activités prévues au début du projet.

En accord avec l'ensemble du consortium et les instances du GICC, nous avons privilégié la tenue d'un atelier avec les acteurs de bassins à travers une journée d'échanges (séminaire et table ronde) à la mi-parcours du projet (novembre 2014) plutôt qu'un atelier de restitution finale. La restitution des résultats finaux du projet REMedHE auprès des acteurs du bassin de l'Ebre sera faite à l'occasion d'un workshop international HYMEX prévu en avril 2016 à Saragosse. Avec les crédits restants, il est également prévu de présenter une synthèse sur le projet devant la Commission Locale de l'Eau du Bassin de l'Hérault en juin 2016.

2. Réunions du consortium

La majorité des participants au projet REMedHE étant rattachés à HSM, les échanges internes, en particulier scientifiques, ont eu lieu à travers des réunions en groupe selon une fréquence hebdomadaire.

Au sein du consortium, les échanges entre partenaires ont été réguliers et ont été réalisés principalement par téléphone et par mail. Depuis le début du projet, on retiendra cependant la tenue des réunions structurantes ci-après :

- Réunion de lancement de projet (Montpellier, 27 novembre 2012) ;
- Réunion d'avancement interne HSM GT3, 4 et 5 (Montpellier, 4 juillet 2013) ;
- Visio-conférence Skype HSM/LSCE « scénarios climatiques et liens avec les autres GT » (1^{er} octobre 2013) ;
- Réunion de travail HSM/LSCE « scénarios climatiques et liens avec les autres GT » (Gif-sur-Yvette, 22 octobre 2013) ;
- Réunion annuelle de projet (Montpellier, 3 décembre 2013) ;
- Réunion interne HSM d'organisation de la journée d'échanges REMedHE (Montpellier, 18 février 2014) ;
- Réunion interne HSM d'organisation de la journée d'échanges REMedHE (Montpellier, 5 mai 2014) ;

- Réunions de préparation de la journée d'échanges REMedHE avec le SMBFH (Clermont l'Hérault, 15 mai 2014 et 14 novembre 2014) ;
- Journée d'échanges REMedHE (Montpellier, 21 novembre 2014) ;
- Réunion annuelle de projet (Montpellier, 27 janvier 2015).

Les instances du GICC ont été invitées aux réunions annuelles de projet et des comptes rendus ont été systématiquement diffusés par mail à l'issue de ces réunions.

Tableau B.3. Degré de réalisation des Groupes de Travail par rapport au calendrier prévisionnel des tâches et livrables par Groupes de Travail (exprimé par trimestres). Livrables/Milestone : AL - Atelier de lancement, AR - Atelier de restitution, R - Rapport, RP – Réunion de projet, C - Conférence internationale, P - Publication de rang A.

Groupes de travail	2012-2013					2013-2014			2014-2015			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
GT0 Coordination – animation projet	95%											
GT 0.1 – Réunions annuelles	AL					RP			RP			
GT 0.2 – Recrutements												
GT 0.3 – Suivi du projet						R						R
GT 0.4 – Visite de terrain				R						R		
GT 0.5 – Ateliers de restitution									AR			AR
GT1 Système d'Information & BDD	100%											
GT 1.1 – Données et inventaire					R							
GT 1.2 – BDD & site web			R									
GT 1.3 – Implémentation outils collaboratifs				R								
GT 1.4 – Gestion du site web et des données												
GT2 Scénarios climatiques	100%											
GT 2.1 – Sélection de modèles climatiques												
GT 2.2 – Scénarios climatiques HR						P						
GT 2.3 – Estimations des incertitudes												
GT3 Scénarios UE & stratégies d'adaptation	100%											
GT 3.1 – BDD des usages en eau					R							
GT 3.2 – Scénario tendanciel des UE (sous CC)					C	P						
GT 3.3 – Scénarios alternatifs d'adaptation												
GT 3.4 – Estimations des incertitudes UE												
GT4 Modélisation intégrée des hydrosystèmes	100%											
GT 4.1 – Analyse de la période actuelle et passée				R								
GT 4.2 – Modélisation des hydrosystèmes						P						
GT 4.3 – Analyse de sensibilité & incertitudes												
GT5 Indicateurs d'impact & vulnérabilité	100%											
GT 5.1 – Indicateurs d'impact					R							
GT 5.2 – Capacité d'allocation rétrospective												
GT 5.3 – Capacité d'allocation future												
GT 5.4 – Impacts & stratégies d'adaptation							C					
GT 5.5 – Analyse critique des futurs possibles												P

3. Rencontres et travail collaboratif avec les gestionnaires

La proximité géographique du bassin de l'Hérault a rendu les échanges avec les gestionnaires du bassin et les visites de terrain très faciles. Ainsi, plusieurs réunions et visites ont eu lieu avec Christophe Vivier, Directeur du SMBFH, et Antony Meunier, Chargé de mission « rivières et milieux aquatiques », pour reconstruire les trajectoires d'usages de l'eau sur le bassin (GT3) mais également considérer les différents aménagements (canaux d'irrigation, barrages) susceptibles de perturber les écoulements du bassin (GT4), ou encore établir des indicateurs de restrictions d'eau en lien avec les modes de gestion (GT5).

Concernant le bassin de l'Ebre, une visite spécifique a été organisée du 23 au 27 septembre 2013. Cette visite a permis de réaliser les actions suivantes :

- Atelier technique d'échanges avec la *Confederación Hidrográfica del Ebro (Zaragoza)* – Rencontre avec le responsable de la planification (Rogelio Galván) et les membres de son équipe ;
- Visite des systèmes irrigués, des barrages principaux (*Ebro, Yesa, Sotonera, El Grado, Barasona*, etc.) et des principales stations de jaugeage ;

- Collecte de données complémentaires sur les usages de l'eau du bassin ;
- Entretien avec l'ancien Président de la CHE (Rafael Romeo), aujourd'hui responsable du système d'irrigation *Esera-Noguera Ribagorzana*.

En dehors de cette visite spécifique, de nombreux échanges ont eu lieu par courriel et téléphone avec la CHE : discussions autour des objectifs de planification, validation de la dynamique des demandes en eau et des fréquences/intensités de restrictions d'eau sur les 40 dernières années, définition des trajectoires possibles des usages de l'eau sur le bassin, relecture des publications avant soumission.

Dans le cadre du projet, une **journée d'échanges** à mi-parcours a également été organisée le **21 novembre 2014 à Montpellier** sur le thème de la vulnérabilité des hydrosystèmes face aux changements climatiques et anthropiques (voir section Valorisation ci-après).

VALORISATION

Site web, système d'information et bases de données

Le support privilégié de communication du projet est un site Internet se présentant comme un portail d'information et de téléchargement : <http://www.remedhe.org>. Une partie du site est consultable par le grand public. Il contient à ce jour des informations sur différents aspects du projet : objectifs, organisation du consortium, et liste des résultats sous forme de publications. Un volet intranet du site a été mis en place de façon à centraliser les échanges de grandes quantités de données. Les membres du consortium de projet ont ainsi accès à l'ensemble des comptes rendus de réunions annuelles, des présentations associées et des publications. Par ailleurs, il recense et met à disposition du consortium l'ensemble des bases de données hydro-climatiques et d'usages de l'eau, rassemblées dans le projet sous forme de chroniques temporelles et de fonds SIG, et nécessaires à la chaîne de modélisation intégratrice développée.

1. Sources de données et inventaires

En collaboration avec les partenaires du projet, une identification des sources de données sur les deux bassins a été menée dès le commencement du projet. Les données disponibles, diffusées par l'intermédiaire du portail, ont fait l'objet d'un travail de critique et de validation, garantissant leur qualité. Elles sont le produit d'un inventaire exhaustif sur toutes les sources de données existantes, que ce soit au niveau des deux organismes de gestion de bassins ou des différents chercheurs et étudiants des deux laboratoires de recherche ayant déjà travaillé sur ces bassins.

Le Tableau C.1 recense les différents types de données collectées et leur répartition sur les deux bassins. Au total, 160 unités de données sur l'Hérault et l'Ebre se répartissant entre 10 grandes catégories ont été rassemblées. Toutes les données du projet sont gérées par une base de données client/serveur sauvegardée et sont disponibles, par un accès protégé, sur le site internet. Leur organisation se fait grâce à l'utilisation d'un « arbre de données » (Fig. C.1).

Tableau C.1. Inventaire des données du projet GICC REMedHE (nombres d'entrées par bassin).

Catégories de données	Ebre	Hérault	Total
Activités humaines (occupation du sol, prélèvements domestiques, agricoles, industriels, etc.)	19	21	40
Barrages réservoirs	5	5	10
Débits des cours d'eau	11	5	16
Limites administratives	3	4	7
Géologie	2	3	5
Hydrogéologie	5	6	11
Unités de schématisation et réseau hydrographique	6	13	19
Climatologie : données d'observations et scénarios climatique	26	11	37
Topographie et Modèles Numériques de Terrain	6	4	10
Divers (liens vers partenaires, institutions etc.)	4	1	5
		TOTAL	160



Figure C.1. Extrait de l'arbre de données permettant le téléchargement depuis le site internet.

2. Un outil numérique collaboratif

La coordination du projet REMedHE a fait l'achat du nom de domaine **www.remedhe.org** auprès du bureau d'enregistrement (registrar) GANDI.NET pour une durée de cinq ans. Le site internet correspondant à cet URL est hébergé sur les serveurs de l'UMR HydroSciences Montpellier (Fig. C.2) et est en ligne depuis mars 2013.

Projet REMedHE
Identification et impacts du changement climatique sur la gestion intégrée des Ressources en Eau en Méditerranée
évaluation comparative Hérault - Ebre

Accueil Documents Données Photos Gestion

RESUME DU PROJET

La région méditerranéenne a été identifiée comme un « hot spot » du changement climatique, c'est-à-dire une zone où les changements seront très marqués en termes de températures et de précipitations moyennes à l'échelle saisonnière et interannuelle. Dans un contexte de pénurie en eau croissante dans cette région, et face aux incertitudes liées aux changements climatiques, il est nécessaire d'évaluer leur impact sur la disponibilité des ressources en eau à différents horizons pour le 21ème siècle. La question est d'autant plus cruciale que la pression anthropique sur le milieu s'accroît progressivement dans cette région du fait d'une croissance démographique marquée.

Le projet vise à appréhender les interrelations complexes entre forçages climatiques, pressions humaines et écoulements à des échelles opérationnelles sur deux bassins versants méditerranéens : le bassin de l'Hérault (2 500 km²) dans le sud de la France et le bassin de l'Ebre (85 000 km²) en Espagne. Sur les 50 dernières années, les ressources en eau de ces bassins ont en effet subi une pression croissante du fait d'une importante variabilité climatique et des mutations des secteurs principaux de demande en eau (irrigation, alimentation en eau potable, activités touristiques), qui ont eu un impact sur l'adéquation entre l'offre et la demande dans ces régions. Du fait d'une demande croissante pour l'alimentation en eau potable sur le bassin de l'Hérault et d'un développement agricole marqué sur le bassin de l'Ebre, la disponibilité future en eau est préoccupante sur les deux bassins où des changements climatiques importants sont projetés (diminution des précipitations, augmentation des températures).

Sur chaque bassin, l'objectif est de développer une chaîne de modélisation intégrée ressources-usages de l'eau de manière à : (i) représenter le fonctionnement de ces hydrosystèmes et leur évolution sur les 50 dernières années ; (ii) proposer des scénarios hydrologiques sous contrainte de changement climatique et d'évolution des usages de l'eau à court (2025) et moyen (2050) termes ; (iii) évaluer le niveau d'adéquation entre la disponibilité de la ressource et les demandes futures ; (iv) tester des stratégies d'adaptation/mitigation à travers une co-construction de scénarios avec les gestionnaires de bassin.

Ce projet propose donc d'élaborer une méthodologie pour évaluer la capacité d'allocation en eau de deux bassins méditerranéens à différentes échelles d'espace et de temps. Cette méthode permettra de comparer l'état de vulnérabilité actuel et futur de leurs ressources en eau en fonction des besoins. Son implémentation sur deux bassins de tailles différentes et avec des caractéristiques physiques et humaines contrastées visera à tester sa robustesse et sa généralité. Cette approche doit permettre de répondre aux questions suivantes sur les bassins étudiés : l'évolution attendue en termes d'usages de l'eau est-elle compatible avec les changements climatiques projetés ? Les demandes en eau seront-elles satisfaites dans le futur ? Quel pourrait être l'impact de stratégies d'adaptation sur l'amélioration de la capacité d'allocation en eau à différents horizons ?

Contacts :

Pour toutes informations complémentaires sur le projet :
[Denis Ruelland](#) : coordinateur général du projet

Informations sur la base de données :
[Jean-François BOYER](#)

Adresse postale
 CC Maison des Sciences de l'Eau, Université Montpellier 2, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier cedex 5, France.
 web : www.hydrosciences.fr

Figure C.2. Page d'accueil du site du GICC REMedHE (www.remedhe.org).

Ce site est développé en scripts ASP et est adossé à une structure de base de données développée avec MS SQL Server. Trois items du menu permettent d'accéder aux trois grands types d'informations (Fig. C.3) :

- des séries chronologiques de pluies, de débits et de températures, des données matricielles de sorties de différents modèles climatiques, des cartes de bassins versants, de barrages et de réseaux hydrographiques, des fonds de cartes géologiques et hydrogéologiques, des données socio-économiques, des données sur les demandes en eau agricoles et domestiques, des données démographiques, des cartes de réseaux d'irrigation et de zones irriguées, des informations sur les pratiques culturelles des bassins, etc. D'autres données, comme des chroniques de pluies, températures et évapotranspiration potentielle établies par interpolation des sorties de différents scénarios climatiques, alimentent également cette base de données ;
- des valorisations (publications, posters, etc.) ;

- des documents techniques de gestion du projet comme les agendas et compte-rendus des différentes réunions, les présentations des différents GT, etc.

Enfin, une partie permettant de gérer des albums photos (stations, barrages, ouvrages hydrauliques, paysages, etc.) a été développée mais n'a pas encore été alimentée.

La pérennité de cette base de données et du site web sera assurée pendant une durée égale au minimum à deux fois la durée du projet.

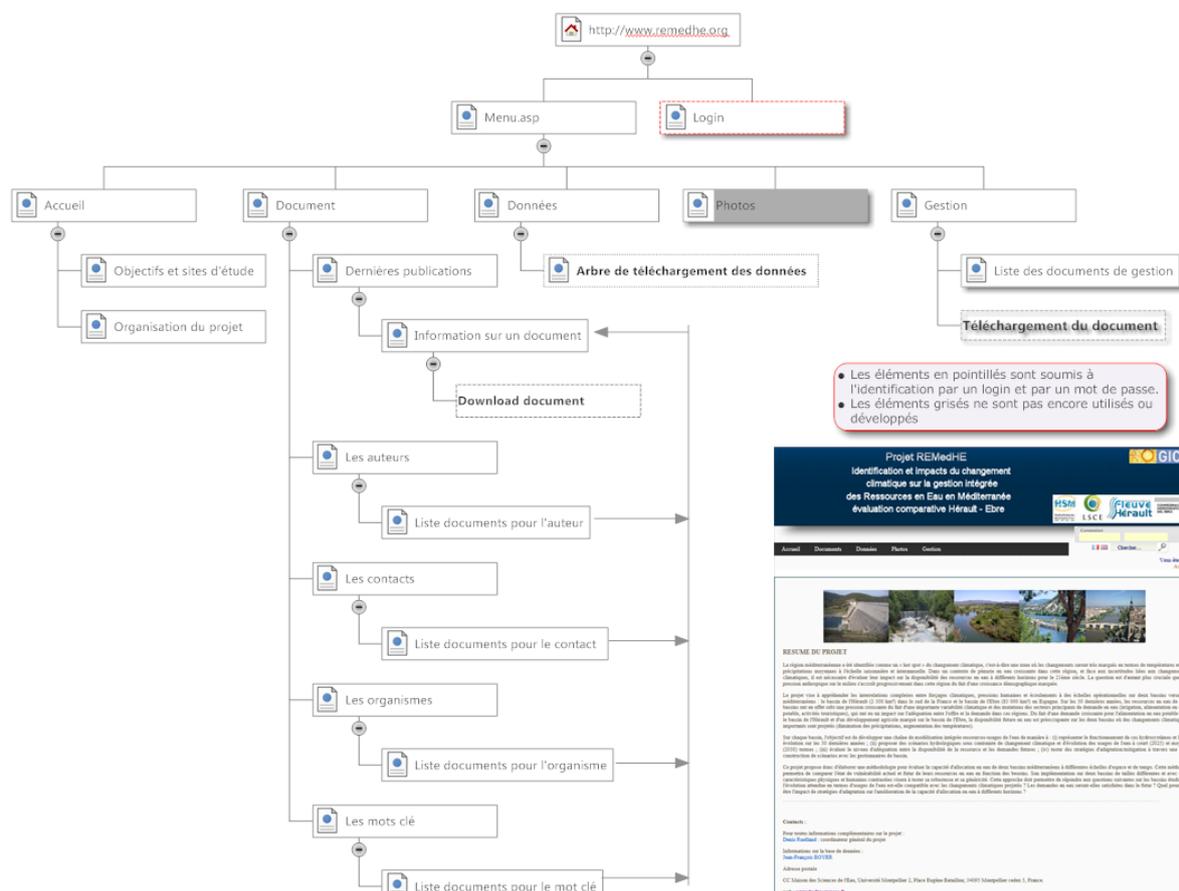


Figure C.3. Plan du site du GICC REMedHE (www.remedhe.org).

Publications et communications

Le projet a donné lieu à de nombreuses valorisations (articles à comité de lecture, communications dans des conférences ou séminaires internationaux, mémoires, articles de vulgarisation, etc.) listées ci-après et sur lesquelles le rapport scientifique du projet s'appuie. Conformément aux usages internationaux et à la convention de programme, toutes ces publications et communications mentionnent explicitement le soutien financier du MEDDE au projet GICC REMedHE.

1. Articles à comité de lecture (ACL)

[9] Collet, L., Ruelland, D., Borrell-Estupina, V., Dezetter, A. & Servat, E. (2015). Water supply sustainability and adaptation strategies under future anthropogenic and climatic changes in a meso-scale catchment. *Sci. Tot. Env.*, 536, 589–602.

[8] Collet, L., Ruelland, D., Borrell-Estupina, V. & Servat, E. (2014). Assessing the long-term impact of climatic variability and human activities on the water resources of a meso-scale Mediterranean catchment. *Hydrol. Sci. J.*, 59, 1457–1469.

- [7] Collet, L., Ruelland, D., Borrell-Estupina, V., Dezetter, A. & Servat, E. (2013). Integrated modelling to assess long-term water supply capacity on a meso-scale Mediterranean catchment. *Sci. Tot. Env.*, 461–462, 528–540.
- [6] Fabre, J., Ruelland, D., Dezetter, A. & Grouillet, B. (2016). Reducing the gap between water demand and availability under climate and water use changes: assessing the effectiveness and robustness of adaptation. *La Houille Blanche*, in press.
- [5] Fabre, J., Ruelland, D., Dezetter, A. & Grouillet, B. (2016). Sustainability of water uses in managed hydrosystems: human- and climate-induced changes for the mid-21st century. *Hydrol. & Earth Syst. Sci. Discuss.*, 12, 9247–9293.
- [4] Fabre, J., Ruelland, D., Dezetter, A. & Grouillet, B. (2015). Simulating past changes in the balance between water demand and availability and assessing their main drivers at the river basin scale. *Hydrol. & Earth Syst. Sci.*, 19, 1263–1265.
- [3] Grouillet, B., Ruelland, D., Vaittinada Ayar, P. & Vrac, M. (2016). Sensitivity analysis of runoff modelling to statistical downscaling methods in the western Mediterranean. *Hydrol. & Earth Syst. Sci.*, 20, 1031–1047.
- [2] Grouillet, B., Fabre, J., Ruelland, D. & Dezetter, A. (2015). Historical reconstruction and 2050 projections of water demand under anthropogenic and climate changes in two contrasted Mediterranean catchments. *J. Hydrol.*, 522, 684–696.
- [1] Milano, M., Ruelland, D., Dezetter, A., Fabre, J., Ardoin-Bardin, S., & Servat, E. (2013). Modeling the current and future capacity of water resources to meet water demands over the Ebro basin. *J. Hydrol.*, 500, 114–126.

2. Communications avec actes publiés (ACT)

- [9] Collet, L., Ruelland, D., Borrell-Estupina, V., Dezetter, A. & Servat E. (2013). Water supply capacity of a meso-scale Mediterranean catchment under long-term climatic and anthropogenic changes. In: *Climate and land surface changes in hydrology (Proc. IAHS/IAPSO/IASPEI Joint Assembly, H01, Gothenburg, Sweden, 22–26 July 2013)*. IAHS Publ., 359, 60–66.
- [8] Dezetter, A., Fabre, J., Ruelland, D. & Servat E. (2014). Selecting an optimal climatic dataset for integrated modelling of the Ebro hydrosystem. In: *Hydrology in a changing world: environmental and human dimensions (Proc. 7th FRIEND-Water Int. Conf., Montpellier, France, 7–10 Oct. 2014)*. IAHS Publ., 363, 355–360.
- [7] Fabre, J., Collet, L., Milano, M., Ruelland, D., Dezetter, A., Ardoin-Bardin, S., & Servat, E. (2014). Assessing the long-term evolution of water supply capacity: comparison of two Mediterranean catchments. In: *Hydrology in a changing world: environmental and human dimensions (Proc. 7th FRIEND-Water Int. Conf., Montpellier, France, 7–10 Oct. 2014)*. IAHS Publ., 363, 203–208.
- [6] Fabre, J., Ruelland, D., Dezetter, A. & Grouillet, B. (2015). Accounting for hydro-climatic and water use variability in the assessment of past and future water balance at the basin scale. In: *Hydrologic non-stationarity and extrapolating models to predict the future (Proc. of symp. HS02 held during IUGG2015 in Prague, Czech Republic, June 2015)*. IAHS Publ., 371, 43–48.
- [5] Fabre, J., Ruelland, D., Dezetter, A. & Grouillet, B. (2015). Reducing the gap between water demand and availability under climate and water use changes: assessing the effectiveness and robustness of adaptation. In: *Water Tensions in Europe and in the Mediterranean: water crisis by 2050? (Proc. of symp. Société Hydrotechnique de France held in Paris-Marne la Vallée, France, Oct. 8–9 2015)*. In press.
- [4] Fabre, J., Ruelland, D., Dezetter, A. & Grouillet, B. (2015). Evolution des déséquilibres quantitatifs, adaptation aux changements climatiques et anthropiques au sein de deux hydrosystèmes méditerranéens : l'Hérault et l'Ebre. In: *Séminaire (Proc. of symp. "Gestion quantitative de la ressource en eau et changement climatique : l'exemple méditerranéen français", Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, held during ICID 2015 in Montpellier, France, Oct. 11–16 2015)*. URL : <http://icid2015.sciencesconf.org/78414/document>
- [3] Grouillet, B., Fabre, J., Ruelland, D., Collet, L. & Boyer, J.-F. (2014). Assessing past and future water demands under climate change and anthropogenic pressures on two Mediterranean basins. In: *Hydrology in a changing world: environmental and human dimensions (Proc. 7th FRIEND-Water Int. Conf., Montpellier, France, 7–10 Oct. 2014)*. IAHS Publ., 363, 185–190.

- [2] Milano, M., Ruelland, D., Dezetter, A., Fabre, J., Ardoin-Bardin, S., & Servat, E. (2013). Assessing the capacity of water resources to meet current and future water demands over the Ebro catchment (Spain). In: Considering hydrological change in reservoir planning and management (Proc. IAHS/IAPSO/IASPEI Joint Assembly, H09, Gothenburg, Sweden, 22–26 July 2013). IAHS Publ., 362, 199–206.
- [1] Ruelland, D., Hublart, P. & Trambly, Y. (2015). Assessing uncertainties in climate change impacts on runoff in western Mediterranean basins. In: Hydrologic non-stationarity and extrapolating models to predict the future (Proc. of symp. HS02 held during IUGG2015 in Prague, Czech Republic, June 2015). IAHS Publ., 371, 75–81.

3. Communications sans actes (COM)

- [9] Dezetter, A. et al. (2014). Changement climatique et impacts hydrologiques. Séminaire d'échanges du Projet GICC REMedHE « Les besoins futurs en eau seront-ils satisfaits ? », Agropolis International, 21 Nov., 2014 – Montpellier, France.
- [8] Fabre, J. et al. (2014). Satisfaction des demandes en eau et stratégies d'adaptation. Séminaire d'échanges du Projet GICC REMedHE « Les besoins futurs en eau seront-ils satisfaits ? », Agropolis International, 21 Nov., 2014 – Montpellier, France.
- [7] Grouillet, B., Fabre, J., Ruelland, D. & Dezetter, A. (2014). Past and future water demand under the combined impacts of anthropogenic and climatic changes: case study on two Mediterranean catchments. 6th IAHS-EGU Int. Symp. on Integrated Water Resources Management, 4–6 June, 2014 – Bologna, Italy.
- [6] Grouillet, B. et al. (2014). Evolution passée et future des usages de l'eau. Séminaire d'échanges du Projet GICC REMedHE « Les besoins futurs en eau seront-ils satisfaits ? », Agropolis International, 21 Nov., 2014 – Montpellier, France.
- [5] Grouillet, B., Ruelland, D., Vaittinada Ayar, P. & Vrac, M. (2015). Hydrological sensitivity analysis to statistically downscaled climate values on Western Mediterranean catchments. Symp. HW02 Hydrological model intercomparison for climate impact assessments, IUGG2015, June 2015 – Prague, Czech Republic.
- [4] Ruelland, D. et al. (2012). Projet REMedHE – Identification et impacts du changement climatique sur la gestion intégrée des Ressources en Eau en Méditerranée : évaluation comparative Hérault–Ebre. Colloque Programme GICC, 10 octobre 2012 – Paris.
- [3] Ruelland, D. et al. (2014). Projet REMedHE – Identification et impacts du changement climatique sur la gestion intégrée des Ressources en Eau en Méditerranée : évaluation comparative Hérault–Ebre. Séminaire GICC de restitution à mi-parcours, 20 mai 2014 – Paris.
- [2] Ruelland, D. et al. (2014). Présentation du projet GICC REMedHE, impacts du changement climatique sur la gestion intégrée des Ressources en Eau en Méditerranée à travers une évolution comparative Hérault–Ebre. Séminaire d'échanges du Projet GICC REMedHE « Les besoins futurs en eau seront-ils satisfaits ? », Agropolis International, 21 Nov., 2014 – Montpellier, France.
- [1] Ruelland, D. (2015). Eau, changements environnementaux et sociétaux : impacts, vulnérabilité et adaptation. Séminaire « Analyses prospectives des ressources et des usages de l'eau : enjeux méthodologiques », Conférence invitée, 11 mars 2015 – Institut de Géographie et Durabilité, Université de Lausanne, Suisse.

4. Posters scientifiques (POS)

- [4] Fabre, J., Ruelland, D., Dezetter, A. & Grouillet, B. (2014). Vulnerability of two Mediterranean catchments to climatic and anthropogenic pressures – spatial and temporal evolution of water supply capacity over the past 40 years. 6th IAHS-EGU Int. Symp. on Integrated Water Resources Management, 4–6 June, 2014 – Bologna, Italy.
- [3] Fabre, J., Ruelland, D., Dezetter, A. & Grouillet, B. (2015). Water stress by 2050 under human and climatic changes. IWRA World Water Congress XV – 25–29 May 2015. Edinburgh, Scotland.
- [2] Fabre, J., Ruelland, D., Dezetter, A. & Grouillet, B. (2015). Balancing water uses and availability under human- and climate-induced changes at the 2050 horizon. Our Common Future under Climate Change international scientific conference - 7–10 July 2015. Paris, France.
- [1] Lassonde, S., Vrac, M., Ruelland, D. & Dezetter, A. (2014). Comparison of three statistical downscaling methods for precipitation in the Hérault and Ebro catchments. EGU General Assembly, HS7.2 Precipitation

uncertainty and variability: observations, ensemble simulation and downscaling, April 27–May 2, 2014, Vienna, Austria.

5. Mémoires (MEM)

- [4] Collet, L. (2013). Modélisation de la capacité à satisfaire la demande en eau sous contraintes climatique et anthropique sur le bassin de l'Hérault. Thèse Université Montpellier II, 251 p.
- [3] Fabre, J. (2015). Changes in the balance between water uses and availability in two Mediterranean hydrosystems: adaptation to climatic and anthropogenic changes. Thèse Université de Montpellier, 212 p.
- [2] Grouillet, B. (2013). Evaluation de la demande en eau passée et future sous contraintes climatiques sur deux bassins versants méditerranéens. Rapport de stage de Master2 Eau – H3E, Université Montpellier II, 42 p.
- [1] Ruelland, D. (2013). Modélisation prospective des flux d'eau et de nutriments sous contrainte de changements climatiques et anthropiques. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Montpellier II, 238 p.

6. Articles de vulgarisation (VUL)

- [2] Ruelland, D. (2015). Equilibres entre ressources en eau et usages : les besoins futurs seront-ils satisfaits ? Dossier Agropolis International, « Changement climatique : impacts et adaptation », 20, p. 12.
- [1] Ruelland, D. (2016). Le bassin de l'Hérault à l'horizon 2050. Interview par la journaliste Idelette Fritsch dans la revue Objectif Languedoc-Roussillon n°72, janvier 2016.

Séminaire d'échanges avec les acteurs du bassin de l'Hérault

1. Objectifs et participants

Dans le cadre du projet, une **journée d'échanges** a été organisée le **21 novembre 2014 à Montpellier** (Fig. C.4) sur le thème de la vulnérabilité des hydrosystèmes face aux changements climatiques et anthropiques. L'objectif de cette journée était double :

- Confronter le retour d'expérience à mi-parcours du projet GICC REMedHE avec d'autres projets terminés ou en cours sur des thématiques similaires et différents bassins (Garonne 2050, GICC R2D2 Durance) à travers des présentations de projets ;
- Echanger avec les gestionnaires et acteurs locaux sur les résultats obtenus sur le bassin de l'Hérault.

Le public visé consistait en une cinquantaine de personnes rassemblant des participants scientifiques rattachés à l'Institut Montpellierain de l'Eau et de l'Environnement (IM2E), mais également au plan national ainsi que les gestionnaires et acteurs locaux du bassin de l'Hérault.



Figure C.4. « Equilibre entre usages et ressources en eau : les besoins futurs seront-ils satisfaits ? » - Séminaire d'échanges organisé dans le cadre du projet GICC REMedHE le 21 nov. 2014 à Agropolis Montpellier.

2. Programme

La journée a été organisée selon le format suivant :

Retour d'expérience de projets sur la thématique « vulnérabilité des hydrosystèmes face aux changements climatiques et anthropiques » (ouvert à tous, gratuit sur inscription)

- 09H00-09H15 Accueil des participants
- 09H15-10H00 Projet GICC REMedHE – D. Ruelland *et al.* - Ebre/Hérault
- 10H00-10H45 Projet Garonne 2050 – F. Goulard *et al.* - Garonne
- 10H45-11H00 Pause café
- 11H00-11H45 Projet GICC R2D2 – E. Sauquet *et al.* - Durance
- 11H45-12H30 Synthèse & discussions
- 12H30-14H00 Buffet

Tables rondes avec les gestionnaires/acteurs locaux du bassin de l'Hérault : Prospective sur les ressources et les demandes en eau (sur invitation)

- 14H00-15H00 Changement climatique et impacts hydrologiques sur l'Hérault – Animateurs : A. Dezetter & C. Vivier
- 15H00-16H00 Evolution passée et future des usages de l'eau – Animateurs : B. Grouillet & C. Vivier
- 16H00-16H15 Pause café
- 16H15-17H15 Satisfaction des besoins en eau & stratégies d'adaptation – Animateurs : J. Fabre & C. Vivier
- 17H15-17H30 Synthèse et conclusion sur les tables rondes – D. Ruelland

3. Synthèse sur les tables rondes

Les tables rondes organisées ont impliqué les personnes suivantes : Sandra Ardoin-Bardin (IRD/HSM – Ingénieur REMedHE), Frédérique Cancel-Tonellot (Région Languedoc-Roussillon), Patricia Carrière (Communauté de Communes Vallée de l'Hérault), Dominique Charbonnier (SIEVH), Fabien Christin (CEREG Ingénierie), Charlotte Courbis (DDTM34), Amélie Déage (Communauté de Communes Lodévois Larzac), Alain Dezetter (IRD/HSM – Chercheur REMedHE), Véronique Dubois (SMETA), Julie Fabre (CNRS/HSM – Thèse REMedHE), Benjamin Grouillet (CNRS/HSM – Ingénieur REMedHE), Céline Hugodot (ASA Canal de Gignac), Thierry Laniesse (SYDEL Pays Cœur d'Hérault), Stéphane Lauret (SCOT Bittérois), Claude Millier (GICC), Morgan Pujol (SYDEL Pays Cœur d'Hérault), Denis Ruelland (CNRS/HSM – Coordinateur REMedHE), Christophe Vivier (SMBFH – Gestionnaire bassin REMedHE).

Une synthèse a été réalisée et diffusée suite à ces tables rondes sur 3 thématiques :

- Changement climatique et impacts hydrologiques ;
- Evolution passée et future des usages de l'eau ;
- Satisfaction des demandes en eau et stratégies d'adaptation.

3.1. Changement climatique et impacts hydrologiques

Résumé. Cet atelier a permis de préciser les grandes notions sur le changement climatique (modèle climatique, scénarios d'émission de gaz à effet de serre, méthodes de changement d'échelle, etc.) dans le cadre des études d'impacts hydrologiques. Elle a également permis de présenter les évolutions hydroclimatiques observées sur le bassin de l'Hérault sur les 40 dernières années : baisse des écoulements de 30 à 40% aux différentes stations (entre les périodes 1971–1980 et 1981–2010) qui s'explique principalement par une augmentation des températures moyennes de 1°C et une diminution des précipitations annuelles de 12 % particulièrement marquée en hiver. Les simulations hydrologiques réalisées dans le cadre du projet montrent que la dynamique des écoulements naturels et influencés est bien reproduite par modélisation sur les 40 dernières années. Les tendances climatiques futures sur le bassin selon 9 modèles climatiques et 2 scénarios d'émission de gaz à effet de serre pourraient conduire à une augmentation des températures de 1° à 3°C à l'horizon 2050. Les projections de précipitations sont divergentes à l'échelle annuelle (-13 % à +7 %) même si on observe une tendance à la diminution des précipitations printanières et estivales. En conséquence, les simulations hydrologiques prospectives présentent des incertitudes même si on peut s'attendre à une diminution des écoulements au printemps et en été selon les tendances climatiques futures testées.

Échanges et discussions

- Les tendances passées sont-elles dues au changement climatique ?

Ces tendances ne sont pas nécessairement imputables au changement climatique. Il faut distinguer variabilité hydroclimatique naturelle et changement climatique global. La fenêtre d'analyse (1971-2010) offre un recul limité. Cependant, l'augmentation de température observée sur le bassin de l'Hérault rejoint les résultats d'analyse de données de température sur d'autres territoires et est très probablement attribuable au réchauffement global.

- Est-ce que la rupture en 1980 se voit aussi à l'échelle globale ?

La rupture statistique observée en 1980 dans les séries chronologiques de températures et de débits est très dépendante de la période étudiée et donc de la fenêtre spatio-temporelle d'analyse (ici, bassin de l'Hérault sur la période 1971-2010). L'analyse statistique pourrait conduire par exemple à d'autres résultats sur une période différente (plus longue ou plus courte). Cette rupture indique seulement un changement de moyennes dans le signal entre les deux périodes 1971-1980 et 1981-2010 qui se traduit par une augmentation de 1°C des températures et une diminution de 30 à 40 % des écoulements enregistrés aux différentes stations hydrométriques.

- L'impact du changement climatique est-il uniforme sur l'ensemble du bassin de l'Hérault ? Comment cet impact pourrait-il se traduire en termes de vulnérabilité locale au sein du bassin ?

Du fait de la résolution spatiale des modèles climatiques, les projections de températures et de précipitations sont relativement homogènes au sein du bassin. Autrement dit, pour un même modèle climatique, le signal et l'amplitude du changement est de même ordre de grandeur sur l'ensemble du bassin (quelle que soit la portion de bassin considérée, amont ou aval). En conséquence, l'impact de l'augmentation de température et du changement des précipitations au niveau des écoulements est relativement homogène quelle que soit la portion de bassin considérée. En revanche, la vulnérabilité de ces portions au changement dépend de la pression d'usages locale. C'est toute la motivation de conduire dans ce projet REMedHE une analyse semi-distribuée par portions des équilibres ressources-demandes. Cela pose aussi les questions de priorisation d'allocation en eau entre l'amont et l'aval par secteurs de demandes.

- L'augmentation possible des précipitations en hiver et en automne à l'horizon 2050 pourrait-elle compenser les probables diminutions printanières et estivales ?

La compensation pourrait se faire à l'échelle annuelle en matière de bilan de précipitations. Cependant, la diminution projetée des précipitations de printemps et d'été accompagnée d'une augmentation des températures et des demandes en eau pourraient occasionner des problèmes de satisfaction des besoins au moment de l'étiage.

3.2. Evolution passée et future des usages de l'eau

Résumé. Cet atelier a permis de préciser les étapes méthodologiques pour reconstituer les dynamiques spatio-temporelles de demandes en eau (municipales et d'irrigation) sur la période 1971–2010 et pour projeter leurs évolutions à l'horizon 2050 sous contraintes d'un scénario tendanciel d'usages défini avec le gestionnaire de bassin (SMBFH) et de 18 scénarios climatiques. A l'échelle du bassin, la demande brute en eau a augmenté en lien avec des conditions hydroclimatiques plus déficitaires et une croissance démographique marquée. Dans le futur, les efforts d'efficacité hydraulique projetés sur la portion de Gignac pourraient conduire à diminuer (scénario d'usages tendanciel seul) ou contenir (scénarios climatiques et d'usages combinés) la demande en eau pour l'irrigation. Par contre, la demande (principalement domestique) pourrait doubler sur la portion d'Agde selon les scénarios testés. Par ailleurs, la demande en eau dans le futur montre une plus grande sensibilité aux changements d'usages testés qu'à la variabilité induite par les 18 scénarios climatiques projetés.

Échanges et discussions

- Qu'est-ce que « demande » signifie dans le projet REMedHE ?

La demande considérée dans le projet correspond au volume décadaire que l'on souhaite maintenir ou prélever dans le milieu pour satisfaire aux besoins environnementaux (débit seuil), municipaux (principalement AEP) et agricoles (irrigation en complément des eaux pluviales). Cette demande est une demande brute qui considère l'efficacité hydraulique et les pertes dans les réseaux d'acheminement.

- Quelles ont été les données de références pour l'estimation de la demande en eau ?

Les mêmes données que l'Étude des Volumes Prélevables (EVP) menée actuellement sur le bassin ont été mobilisées. Pour la demande unitaire AEP, les données produites par les producteurs d'eau potable à travers une demande brute de prélèvements ont été utilisées. Pour la prospective, les projections démographiques de l'INSEE sur les communes du bassin ont été utilisées. D'autres études actuellement en cours menées par les Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT) et les syndicats d'eau potable montrent des projections démographiques plus importantes à l'échelle des communes. Pour la prospective agricole, le SMBFH a fourni les travaux de la commission agricole du SAGE.

- Discordance entre la demande d'irrigation brute théorique et la « réalité »

Avant 1980 sur le secteur de Gignac, 40 millions de m³ de prélèvements étaient assurés par le seul canal de Gignac. Ce prélèvement allait bien au-delà du seul besoin des cultures. Dans les simulations, la demande en eau a été limitée au volume pouvant être acheminé par le canal. Autre remarque, avant 2006 l'irrigation de la vigne était interdite mais se faisait quand même. En conséquence, avant cette date, l'irrigation viticole est certaine mais dans des proportions inconnues.

- Quelle efficacité doit-on considérer pour le canal de Gignac ?

L'ASA indique que l'efficacité du canal de Gignac est passée de 18 à 55 % sur les 20 dernières années. Dans l'EVP, l'efficacité a été limitée à 30-40 % considérant une irrigation gravitaire.

- Discussions autour de l'évolution de la demande AEP.

La consommation unitaire AEP prend en compte la demande municipale, les demandes d'arrosages des espaces verts et du nettoyage des rues. La projection d'augmentation de la demande unitaire AEP de +21 % estimée par le BRGM sur le bassin a jusqu'à présent été utilisée dans le cadre du scénario tendanciel d'usages de l'eau. Cette évolution pourrait être moins importante si la demande AEP était réduite par une augmentation des tarifs de consommation d'eau domestique ou par la mise en place d'un double réseau (eau brute + eau AEP) pour l'arrosage des espaces verts, le nettoyage des rues, etc. Ainsi la baisse de consommation d'eau par les abonnés serait actuellement liée à « un besoin de réduire la facture ». Le mode d'urbanisation récent n'est probablement pas viable à long terme. L'allocation AEP a explosé sur les dernières décennies mais aujourd'hui elle aurait tendance à stagner du fait de l'augmentation du coût du foncier. On pourrait donc s'attendre à une demande unitaire plus faible. Par ailleurs, concernant l'utilisation plus systématique d'un double réseau (eau brute + eau AEP), il faut noter que sur les communes où ce double réseau existe, on assiste à une surconsommation d'eau du fait d'une réglementation insuffisante. En conséquence, il faudrait aussi prendre en compte la demande d'eau brute dans le bilan. Enfin, il faut noter que même quand deux réseaux existent, le prélèvement en eau dans le milieu reste généralement le même.

- Quelles évolutions de surfaces irriguées prendre en compte à l'horizon 2050 ?

Dans le scénario tendanciel, une augmentation de +80 % de surfaces irriguées (SI) a été testée. Ce chiffre correspond au potentiel maximum estimé dans le cadre du SAGE pour l'extension de SI. En fonction des conditions futures, il pourrait être utile de tester un faisceau d'évolution de SI entre +40 et +80 %.

- Éléments informatifs sur le projet Aqua Domitia

Actuellement, les 2 maillons qui seront opérationnels fin 2015 ne concernent pas le BV de l'Hérault : maillon bittérois et maillon de Montpellier à Fabrègues. Le maillon de l'Hérault est actuellement à l'étude et est envisagé pour 2018-2020. Aqua Domitia aurait pour vocation à soulager la basse vallée de l'Hérault (Thau, nappe astienne). Les besoins dans la moyenne vallée de l'Hérault devraient être couverts à partir des barrages du Salagou et des Olivettes. Aqua Domitia est là pour répondre aux besoins à moyen terme (2025-2030). Au-

delà, ce projet ne peut en aucun cas constituer la seule réponse. Les acteurs de l'eau doivent s'organiser pour mettre en place tout ce qui pourrait aider à répondre à leurs besoins.

3.3. Satisfaction des demandes en eau et stratégies d'adaptation

Résumé. Cet atelier a permis de présenter une première mise en regard des demandes et des ressources en eau sur une période passée (1971–2010) et future (horizon 2050), ainsi qu'une réflexion sur les types d'indicateurs à construire pour rendre compte de la vulnérabilité de l'hydrosystème Hérault face aux changements climatiques et anthropiques, du point de vue des équilibres entre ressource et demande. Ainsi, pour la partie prospective, différentes combinaisons de scénarios climatiques et d'usages de l'eau ont été introduits comme forçages dans la modélisation intégrée du fonctionnement du bassin de l'Hérault. Les indicateurs proposés reposent sur l'identification de fréquences et d'intensité d'insatisfaction des demandes en eau municipales et d'irrigation, à différents pas de temps (décadaires, annuels). Dans le cadre de l'exercice prospectif, une demande environnementale caractérisée par un débit seuil (Q95) a également été considérée en priorité d'allocation n°1 dans les différentes portions du bassin. L'analyse des résultats ne montre pas de tension majeure quant à la satisfaction des demandes en eau au sein du bassin sur les 40 dernières années, excepté sur la portion d'Agde où un soutien d'étiage par le Salagou a été nécessaire en 2005 et 2006. L'exercice prospectif montre des vulnérabilités hétérogènes entre les portions de bassin en fonction des différentes combinaisons de scénarios (scénario tendanciel d'usages de l'eau sous contraintes climatiques passées, usages de l'eau actuels sous contraintes de différents scénarios climatiques, ou impacts conjugués des scénarios prospectifs climatiques et d'usages de l'eau). L'introduction du débit environnemental en priorité n°1 souligne des déséquilibres importants mais aussi une forte sensibilité de la satisfaction des demandes anthropiques à de faibles variations (+/-10 % à +/-30 %) du débit environnemental.

Échanges et discussions

- Appropriation des indicateurs de satisfaction ?

La représentation graphique de l'insatisfaction selon des diagrammes radars a engendré de nombreuses interrogations. L'interprétation de l'évolution des indicateurs selon les différentes combinaisons de scénarios testées est complexe et n'a pas encore fait l'objet d'une analyse poussée dans la mesure où les résultats ont été obtenus très récemment. Malgré les difficultés de compréhension posées par ce mode de représentation, il semble bien que les notions de fréquence et d'intensité d'insatisfaction à l'échelle décadaire, saisonnière et annuelle soient pertinentes pour l'analyse des équilibres ressources/demandes ainsi que leurs évolutions. Les prochains travaux viseront à affiner ces indicateurs et leur mode de représentation.

- Satisfaction des demandes et connexion amont/aval

Les échanges ont soulevé la question de la prise en compte des satisfactions au sein du bassin versant selon une logique amont/aval entre les portions. Ce type de logique contraint à considérer les priorités sectorielles d'allocation en eau par portions de bassin et non à l'échelle du bassin. En conséquence, les portions amont (Laroque, Lodève, etc.) participent au déficit en eau pour les demandes en eau prioritaires des portions aval (Gignac et Agde). Pour pallier à ces problèmes, l'EVP a retenu une logique inverse (aval/amont) dans son analyse des volumes prélevables, considérant ainsi les portions aval les plus demandeuses comme prioritaires. A l'heure actuelle, dans le projet REMedHE, la logique amont/aval n'est pas pleinement prise en compte sauf entre les portions de Gignac et d'Agde où les priorités d'allocations ont été considérées de manière concomitantes. Eu égard aux volumes consommés dans les portions amont, cette logique d'analyse paraît acceptable pour le bassin. Une autre solution pourrait consister à traiter le bassin dans sa globalité en termes de satisfaction sectorielle mais on perdrait ainsi une précieuse information territoriale pour répondre aux besoins de gestion.

- Débits environnementaux

Les échanges ont porté en premier lieu sur la définition des débits seuils Q95 retenus dans l'analyse comme priorité n°1 d'allocation pour satisfaire la demande environnementale. Ces débits correspondent à une valeur seuil (en m³/s) dépassée 95 fois sur 100 sur une période de 30 ans dans les simulations. Cela signifie que cette valeur évolue dans le futur en fonction du scénario climatique testé. Cette solution a été retenue préférentiellement aux débits biologiques dont les valeurs sont mal connues et actuellement en débat. Par contre, les débits seuils également en débat ne sont pas vraiment plus contraignants que le Q95 car la valeur envisagée au niveau réglementaire s'approche en général du Q95 observé. La solution du Q95 a donc été

retenue pour trois raisons principales : (i) les débits seuils ne sont pas encore définis au niveau réglementaire ; (ii) une valeur de dépassement par rapport aux simulations est préférable car les simulations hydrologiques du projet GICC ne reproduisent pas les étiages avec une précision suffisante pour dire si on est au-dessus ou en-dessous du seuil à 0.1 m³/s près ; (iii) ceci permet d'obtenir une valeur seuil qui varie à chaque nœud d'étude en fonction du scénario hydro-climatique envisagé.

Les échanges ont également porté sur le pas de temps d'analyse des Q95. Le pas de temps décadaire utilisé dans le projet REMedHE s'inscrit plutôt dans une gestion de crise. Un pas de temps mensuel pourrait être utilisé en vue d'une gestion plus structurelle de planification et de réglementation des usages. La variation du débit environnemental réservé en fonction de la variation du débit naturel simulé sous changement climatique pose par ailleurs la question de la viabilité de ce débit seuil pour les écosystèmes.

- Question sur le manque d'eau au moment crucial de certains stades phénologiques

La diminution de la disponibilité en eau à certains stades clés du développement des cultures (blé dur, vigne, etc.) pourrait conduire à une vulnérabilité accrue de l'usage agricole. Il serait donc utile d'évaluer le déficit (en pourcentage de la demande en eau de la plante) en fonction du stade phénologique. La chaîne méthodologique de modélisation intégrée développée dans le projet REMedHE permet de simuler la variabilité saisonnière de la disponibilité et de la demande en eau selon différentes conditions. Ainsi, le besoin en eau des plantes est estimé en fonction de la précipitation efficace, de la température, du type de sol et de coefficients cultureux. Des processus phénologiques fins (décalage temporel du débourrement, de la floraison, etc.) ne sont pas pris en compte dans l'analyse du fait du recours à des coefficients cultureux fixes. Ceci nécessiterait des modélisations à base physique beaucoup plus complexes qui ne peuvent être appliqués sur l'ensemble du bassin de l'Hérault et sur des périodes pluri-décennales dans le cadre du projet REMedHE. Néanmoins avec une indication calendaire des stades phénologiques en conditions climatiques actuelles, on pourrait repérer certaines vulnérabilités.

3.4. Conclusion sur les tables rondes

Amélioration du scénario tendanciel

- Affiner les volumes transférables par Aqua Domitia (prendre contact avec la Région LR qui dispose des données concernant la vallée de l'Hérault),
- Maintenir la demande domestique unitaire à son niveau actuel. En parallèle de l'augmentation de la consommation unitaire de +21 %, une consommation unitaire constante (voire en légère diminution) pourrait être testée,
- Envisager une évolution démographique différente. Deux scénarios d'évolution de la population à l'échelle des communes pourraient être considérés : les projections INSEE et les scénarios locaux estimés par les SCoT et les syndicats de l'eau,
- Prendre en compte une augmentation des surfaces irriguées à travers un faisceau d'incertitudes de +40 à +80 %.

Scénarios d'adaptation envisageables

Il existe différentes voies pour les leviers d'adaptation : contraintes par un cadre réglementaire (par exemple, modification de la PAC) et d'autres non contraintes par une réglementation (par exemple, révision de la côte de réserve du barrage du Salagou). Les stratégies d'adaptation qui seront testées dans le projet reposeront sur des leviers pour accroître la ressource disponible et pour réduire la demande :

- Leviers sur la ressource
 - Aqua Domitia
 - Salagou
 - Exploitation réseaux karstiques. Les ressources karstiques sont déconnectées du lit du fleuve (sources de Saint Malmert à Plessan). Certaines ressources karstiques (Fontanilles et Cent fonds) sont déjà exploitées mais cela reste compliqué en termes technique.
 - Réserves de stockage
- Leviers sur la demande
 - Economie d'eau par réfection des réseaux
 - Maîtrise de la demande AEP par tarification de l'eau (par exemple tarification saisonnière, contributions par niveau de consommation, etc.) et sensibilisation de la population et des communes (alimentation intercommunale)

- Eau nécessaire pour les activités touristiques telles que canoë, bases de loisirs (Pont du Diable, Saint Guilhem, Salagou, etc.) mais pas de débit minimal connu.

- Gestion démographique

Actuellement les plans locaux d'urbanisme (PLU) ne sont établis qu'en fonction du dimensionnement de réseaux d'assainissement et non pas d'une disponibilité AEP. Néanmoins, on commence à prendre en compte l'idée d'une maîtrise de l'essor démographique à travers une réduction de l'étalement urbain. En conséquence, des scénarios démographiques où la croissance est moins élevée que dans le scénario tendanciel seraient à tester dans la chaîne de modélisation REMedHE.

RAPPORT SCIENTIFIQUE

Contexte général et problématique

Depuis une vingtaine d'années, l'évaluation des ressources en eau est devenue un sujet particulièrement important pour les scientifiques et les gestionnaires à travers le monde. Le cycle hydrologique constitue une composante des processus climatiques et les dernières décennies ont été marquées par une intensité et une magnitude de changements climatiques sans précédents (Barnett *et al.*, 2001 ; Frich *et al.*, 2002). Des efforts internationaux considérables ont été fournis pour simuler numériquement le fonctionnement du climat global. Ainsi, à l'occasion de son 5^{ème} rapport d'évaluation, le Groupement Intergouvernemental d'Experts sur le Climat (GIEC) a proposé une synthèse de nombreuses études scientifiques visant à évaluer les évolutions climatiques passées et futures en fonction de plusieurs scénarios d'émission de gaz à effet de serre. Cette contribution a permis d'améliorer significativement notre compréhension du climat et des modes de circulation associés. Ces études ont confirmé que le développement des activités industrielles au cours du siècle passé avait causé une augmentation sensible d'émissions de gaz à effet de serre, contribuant ainsi à l'amplification du changement climatique. Ces changements ont évidemment eu un impact marqué sur les ressources en eau (voir e.g. Levitus *et al.*, 2001 ; Vose *et al.*, 2004). Si le développement socio-économique continue à suivre les tendances passées, la température moyenne à l'échelle du globe pourrait augmenter de 2 à 3 °C avant les années 2050 (IPCC, 2013). Ce réchauffement pourrait modifier les modes de précipitation et augmenter l'intensité et la fréquence des événements extrêmes, diminuant ainsi la disponibilité et l'exploitabilité des ressources en eau **notamment dans les régions méditerranéennes et tropicales** (IPCC, 2013a ; Giorgi, 2005 ; Milly *et al.*, 2005).

Le développement économique est fortement dépendant de la disponibilité en eau. Les ressources en eau sont essentielles pour assurer les besoins agricoles, domestiques et industriels (Gallup *et al.*, 1999 ; Foster, 2001). L'accès à l'eau et la maîtrise des techniques de stockage et d'irrigation a ainsi permis de soutenir la croissance économique de nombreux pays. Dans les régions arides à semi-arides, les besoins en eau des sociétés excèdent souvent la disponibilité des ressources, ce qui représente un frein pour le développement socio-économique (Bloom & Sachs, 1998 ; Bao & Fang, 2007). Or, des évolutions comme la croissance démographique, l'augmentation de l'urbanisation et de l'afflux touristique saisonnier sont prévues dans beaucoup de pays, en particulier dans les régions côtières (Burak *et al.*, 2004 ; Gober, 2010). Ces évolutions devront être soutenues par une augmentation de la production agricole pour satisfaire les besoins d'une population croissante. Ces processus augmenteront inévitablement la demande et la consommation en eau et inciteront à des changements significatifs de l'utilisation des terres et des modes d'utilisation de l'eau. Dans des régions où le stress hydrique est déjà important, l'impact conjugué de l'augmentation des besoins et de la diminution de la disponibilité en eau du fait des changements climatiques pourrait aboutir à un manque sévère d'eau et à d'importants conflits d'usage.

Ainsi, au-delà du lien étroit associant le climat à la distribution de l'eau dans l'espace et dans le temps, le développement socio-économique est devenu un des principaux vecteurs de pression sur les ressources en eau (Gober, 2010). Le besoin de comprendre comment la disponibilité et la demande en eau sont affectées par la dynamique du climat et des pressions locales, est donc devenu une priorité. Des analyses globales d'exposition de population au risque de manque d'eau ont été proposées récemment. Arnell (1999) a analysé les impacts de changement climatique sur les régimes hydrologiques en introduisant progressivement des scénarios d'usages de l'eau produits par les Nations Unies (*United Nations Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World*). D'autres études (Vörösmarty *et al.*, 2000 ; Oki *et al.*, 2003) ont examiné les impacts conjugués du changement climatique et de la croissance démographique sur les ressources en eau mondiales. Alcamo *et al.* (2003 ; 2007) ont analysé les impacts de variables socio-économiques sur les prélèvements en eau en considérant un scénario tendanciel de ces variables et un scénario intégrant des variations de revenus, de production électrique ainsi que d'efficacité des réseaux d'eau et des techniques d'irrigation. En complément à ces études, Shen *et al.* (2008) et Menzell & Matovelle (2010) ont évalué la gamme de stress hydrique dans des régions contrastées selon plusieurs scénarios climatiques issus de modèles climatiques globaux (GCM) et plusieurs scénarios d'usages de l'eau. Bien que des méthodologies et des scénarios différents aient été appliqués, toutes ces études s'accordent sur le fait que **la région**

méditerranéenne constitue l'une des régions les plus vulnérables aux changements climatiques et anthropiques et constitue ainsi un des « hot-spots » mondiaux de crise de l'eau.

Cependant, des informations plus précises sur les prélèvements en eau, les stockages-restitutions et les stratégies d'adaptation locales sont nécessaires pour fournir une image plus précise des impacts climatiques et des activités humaines sur les écoulements et les capacités d'allocation des hydrosystèmes. Pour cela, il est nécessaire également de disposer de projections climatiques adaptées aux échelles de gestion à travers des techniques robustes de désagrégation. Enfin, il s'agit de considérer l'incertitude inhérente à ces projections à travers l'intercomparaison de simulations climatiques, de leurs potentiels impacts hydrologiques et donc d'approches distinctes d'adaptation.

Une meilleure connaissance de l'impact des changements climatiques et anthropiques sur les restrictions d'usages dans des régions aussi vulnérables que la Méditerranée est donc essentielle pour évaluer si les futurs besoins en eau pourront être satisfaits et pour améliorer la gestion quantitative de la ressource en eau. Ceci passe par le développement d'**approches interdisciplinaires prenant en compte l'ensemble des facteurs de pression sur les ressources en eau** et permettant d'**évaluer la capacité d'allocation en eau** par une **confrontation entre la disponibilité et la demande**.

Les hydrosystèmes Hérault et Ebre

1. Introduction

La compréhension et la représentation des équilibres entre ressource et demande en eau sous la contrainte de facteurs anthropiques et climatiques sont particulièrement nécessaires dans la région méditerranéenne, qui fait face à une importante variabilité climatique, un rapide développement démographique et économique et une compétition croissante entre les différents usages de l'eau (Milano *et al.*, 2012 ; 2013). La question de la capacité à satisfaire les besoins en eau est, en effet, essentielle dans cette région qui a été identifiée comme l'une des plus vulnérables au risque de pénuries d'eau au 21^{ème} siècle (Alcamo *et al.*, 2007). Les changements climatiques pourraient ainsi conduire à une diminution des ressources en eau au cours du 21^{ème} siècle. Combinée avec une augmentation de la demande en eau, celle-ci pourrait accroître le risque de stress hydrique à l'échelle de plusieurs bassins de la rive Nord et de la rive Sud de la Méditerranée (Milano *et al.*, 2013).

Le projet GICC REMedHE s'est donc donné comme objectif d'appréhender les interrelations complexes entre forçages climatiques, pressions humaines et écoulements à des échelles opérationnelles sur deux bassins versants méditerranéens : le bassin de méso-échelle de l'Hérault (2 500 km²) en France et le grand bassin de l'Ebre (85 000 km²) en Espagne. Dans cette partie, après avoir évoqué le contexte géographique de ces bassins, les jeux de données hydro-climatiques et socio-économiques constitués à l'occasion du projet sont décrits et une analyse hydro-climatique préalable sur les quarante dernières années est présentée. Pour finir, les enjeux de gestion de l'eau sur les deux bassins sont détaillés.

2. Contexte géographique

Les bassins de l'Hérault et de l'Ebre diffèrent par leurs caractéristiques géographiques.

Le bassin de l'Hérault est situé dans le sud de la France (Fig. D.1a) entre le département de l'Hérault (environ 80 %) et du Gard (environ 20 %). Le territoire du bassin comprend 166 communes. Le fleuve principal draine une surface d'environ 2 500 km². Il prend sa source sur le Mont Aigoual dans les Cévennes à 1 565 m d'altitude et se jette dans la mer Méditerranée à Agde. Ses principaux affluents sont l'Arre, la Vis, la Lergue et la Peyne, tous situés sur la partie Ouest du bassin. Le bassin est caractérisé par un système de socle cristallin de faible perméabilité dans la partie amont, des aquifères carbonatés karstifiés dans la partie médiane et une vallée alluviale dans la partie aval.

Le bassin de l'Ebre est situé au Nord de l'Espagne (Fig. D.1b) et draine une surface de 85 000 km², ce qui en fait le quatrième plus grand bassin du pourtour méditerranéen après le Nil, le Rhône et le Pô. Le fleuve Ebre prend sa source à Fontibre dans les Monts Cantabriques à 1 027 m d'altitude et parcourt plus de 900 km jusqu'à son exutoire à Tortosa, où il forme un vaste delta connecté à la mer Méditerranée. Son bassin versant se caractérise par une plaine méditerranéenne de morphologie triangulaire. Elle est délimitée au Nord par les Monts cantabriques et la chaîne pyrénéenne, avec des sommets culminants à plus de 3 000 m d'altitude ; au Sud par le massif ibérique, avec des altitudes pouvant atteindre entre 2 000 et 2 300 m ; et à l'Est par la chaîne côtière catalane, avec des sommets compris entre 1 000 et 1 900 m d'altitude. Le réseau hydrographique se

développe autour d'un axe principal d'orientation Nord-Ouest/Sud-Est défini par le fleuve Ebre. Sur la rive gauche, les principaux affluents sont l'Aragón, le Gallego, la Cinca et le Segre. Sur la rive droite les principaux affluents sont le Jalón et la Guadalope.

3. Données hydro-climatiques

Des forçages climatiques journaliers (précipitation, température, vent, humidité, radiation) sur le bassin de l'Hérault ont été extraits sur la période 1969–2009 à partir des réanalyses météorologiques SAFRAN (Vidal *et al.*, 2010) à 8x8 km de résolution fournie par Météo France et validée sur les territoires métropolitain par Quintana-Segui *et al.* (2008). L'évapotranspiration potentielle (ET_0) a été calculée à partir de la formule FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998).

Contrairement au bassin de l'Hérault, le bassin de l'Ebre ne dispose pas de grille de données climatiques de référence au même titre que les données SAFRAN en France. Il a donc été nécessaire de bâtir cette grille de données pluviométriques et de température de référence pour tout le bassin à la résolution 8x8 km. Pour cela, les données journalières de précipitation et de température minimale et maximale ont été collectées auprès de la météorologie espagnole (AEMET) pour la période 1969–2009. Après un travail de sélection de données basé sur la disponibilité (% de lacunes sur la période), les chroniques journalières de température et de précipitation de 264 et 818 stations, respectivement, ont été interpolées à la résolution 8x8 km selon la méthode de l'inverse distance pondérée. Des gradients altitudinaux de -6.65 °C/km et de -4.16 °C/km établis à partir des données observées ont été respectivement appliqués au niveau des chaînes pyrénéennes et cantabriques au-dessus de 1 000 m d'altitude pour l'interpolation des températures minimales et maximales ([ACT7]). Les données météorologiques additionnelles telles que la vitesse du vent et l'humidité relative étaient trop lacunaires pour calculer une ET_0 Penman-Monteith sur le bassin de l'Ebre sur une longue période passée. La formule empirique de Hargreaves (Hargreaves & Samani, 1985) a donc été utilisée pour estimer l'évapotranspiration journalière sur la période 1969–2009. Le calage du facteur empirique ω proposé par Martínez-Cob & Tejero-Juste (2004) sur la vallée de l'Ebre a été appliqué à l'ensemble du bassin selon l'équation (1). Les zones particulièrement sujettes aux vents sur le bassin de l'Ebre ont été définies par García-Vera et Martínez-Cob (2004) à partir des données disponibles sur la vitesse du vent. Il faut noter que si une formule commune avait été retenue pour estimer l'évapotranspiration potentielle sur les deux bassins, elle aurait été basée uniquement sur la température (e.g. formule de Oudin *et al.*, 2005) et n'aurait pas nécessairement été adaptée aux estimations agronomiques ultérieures (estimation du besoin en eau des plantes pour reconstruire la demande en eau d'irrigation). Par ailleurs, des analyses de sensibilité préliminaires concernant la simulation des demandes en eau d'irrigation et des fonctionnements de barrages (pertes évaporatoires notamment) ont conduit à des résultats plus réalistes avec la formule de Hargreaves qu'avec la formule de Oudin *et al.* (2005). Ainsi, l'application de la formule la plus robuste sur chaque bassin a été choisie plutôt que de privilégier une formule simplifiée identique pour les deux bassins

$$ET_0 = \omega \times (0.0864Ra/\lambda) \times (T_{MAX} - T_{MIN})0.5 \times (T_{MEAN} + 17.8) \quad (1)$$

Où $\omega = 0.0023$ dans les zones ventées, $\omega = 0.0020$ ailleurs, Ra = radiation extraterrestre, λ = flux de chaleur latente, T_{MAX} = température journalière max, T_{MIN} = température journalière min, T_{MEAN} = température journalière moyenne.

Les chroniques de débits mesurées de 6 stations hydrométriques de référence ont été extraites de la banque de données HYDRO du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE, 2010) pour le bassin de l'Hérault. Sur l'Ebre, 20 stations hydrométriques et leurs chroniques associées ont été retenues à partir des données mises à disposition par le CEDEX (Center of studies and experiments on hydraulic systems, 2012). Les chroniques journalières de niveaux de réservoirs et de lâchers de barrages ont été fournies par le Conseil Général de l'Hérault et le CEDEX sur chacun des bassins.

La disponibilité des données hydro-climatiques a permis d'établir une période commune de 40 ans (1971–2009) sur les deux bassins pour analyser la variabilité hydrologique selon l'évolution multi-décennale des conditions climatiques et d'usages de l'eau.

Sur cette période, les données de population à l'échelle communale ont été extraites des recensements des instituts statistiques nationaux (INSEE pour l'Hérault et INE pour l'Ebre). Les informations concernant les surfaces irriguées et les types de cultures ont été extraites des recensements agricoles décennaux. L'efficacité des réseaux d'adduction d'eau et des systèmes d'irrigation ainsi que les données sur les

consommations unitaires et les activités industrielles ont été extraites des monographies (SMBFH, 2005 ; CHE, 2013) fournies par les gestionnaires locaux.

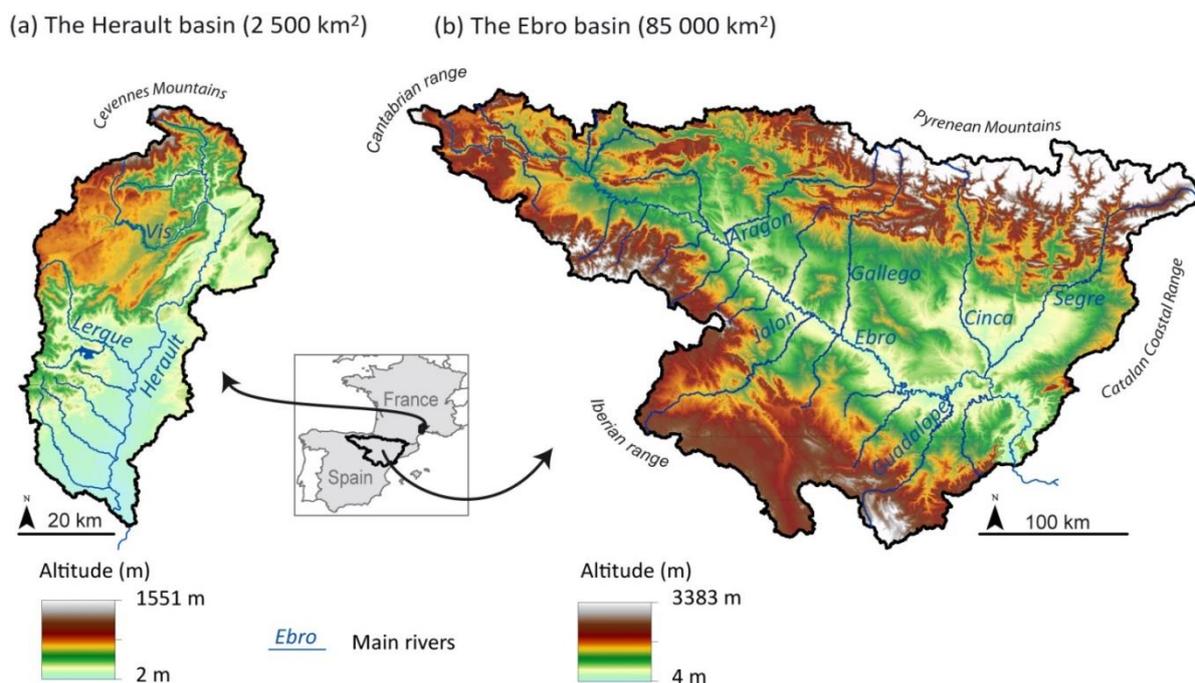


Figure D.1. Localisation, topographie et réseau hydrographique principal sur les bassins (a) de l’Hérault et (b) de l’Ebre. ([MEM3]).

4. Conditions hydro-climatiques et évolutions sur 1971–2009

Le bassin de l’Hérault est caractérisé par un climat méditerranéen sous influence cévenole avec des hivers doux et humides et des étés chauds et secs. Les températures saisonnières moyennes sur la période 1971–2009 vont de 6 °C en hiver à 20 °C en été. La précipitation annuelle moyenne sur le bassin est de 1 100 mm. Les températures et les précipitations suivent un gradient nord-sud avec des températures annuelles moyennes de 8 °C au nord du bassin jusqu’à 15 °C au Sud, et des précipitations allant de 1 600 mm/an au nord à 600 mm/an au sud (Fig. D.2a).

Les conditions climatiques sur le bassin de l’Ebre sont plus complexes du fait des influences contrastées de l’océan Atlantique et de la mer Méditerranée, ainsi que des chaînes de montagne notamment des Pyrénées (Vicente-Serrano & López-Moreno, 2006). Les températures et précipitations annuelles moyennes vont respectivement de 8 °C dans les Pyrénées à 17 °C dans la basse vallée de l’Ebre, et de plus de 2 000 mm dans les Pyrénées occidentales à moins de 400 mm dans la vallée centrale semi-aride de l’Ebre (Fig. D.2b).

Le débit annuel moyen sur la période 1971–2009 est de 36 m³/s (470 mm/an) à l’exutoire du bassin de l’Hérault et de 330 m³/s (120 mm/an) à l’exutoire du bassin de l’Ebre. L’Hérault et ses tributaires ont un régime méditerranéen avec des étiages sévères en été et des hautes eaux durant l’automne et l’hiver qui peuvent être caractérisées par des épisodes de crues intenses à l’automne. Les régimes hydrologiques dans le bassin de l’Ebre varient de nivaux à méditerranéens (Bejarano *et al.*, 2010). Les sous-bassins amont des Pyrénées et des Monts Cantabriques ont produit en moyenne 47 % des écoulements annuels du bassin de l’Ebre entre 1971 et 2009.

La période 1971–2009 a été caractérisée par une variabilité hydro-climatique significative sur les deux bassins. Des ruptures statistiques dans les séries annuelles de températures et de débits ont été détectées sur les deux bassins autour de l’année 1980 ([ACL4] ; [ACL8]). Les températures annuelles ont ainsi augmenté d’environ 1 °C sur les deux bassins entre la période 1971–1980 et la période 1981–2009, tandis que dans le même temps les débits ont respectivement diminué de 41 % et de 37 % à l’exutoire des bassins de l’Hérault et de l’Ebre (Fig. D.3). Bien qu’aucune rupture statistique significative n’ait été détectée, on observe également qu’entre les deux périodes, les précipitations annuelles ont diminué de 10 % sur le bassin de l’Hérault et de 12 % sur le bassin de l’Ebre. Des évolutions saisonnières dans le régime des précipitations peuvent être

observées entre les deux périodes : tandis que les précipitations hivernales ont diminué d'environ 40 % entre les deux périodes sur chaque bassin, les précipitations automnales ont augmenté de 21 % sur le bassin de l'Hérault et de 12 % sur le bassin de l'Ebre (Fig. D.3b).

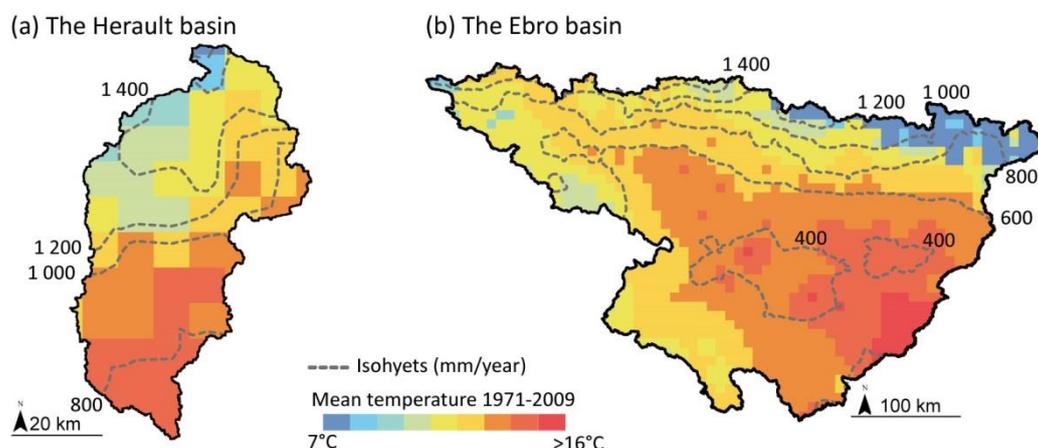


Figure D.2. Gradients climatiques moyens sur la période 1971–2009 sur (a) le bassin de l'Hérault et (b) le bassin de l'Ebre. ([ACL4]).

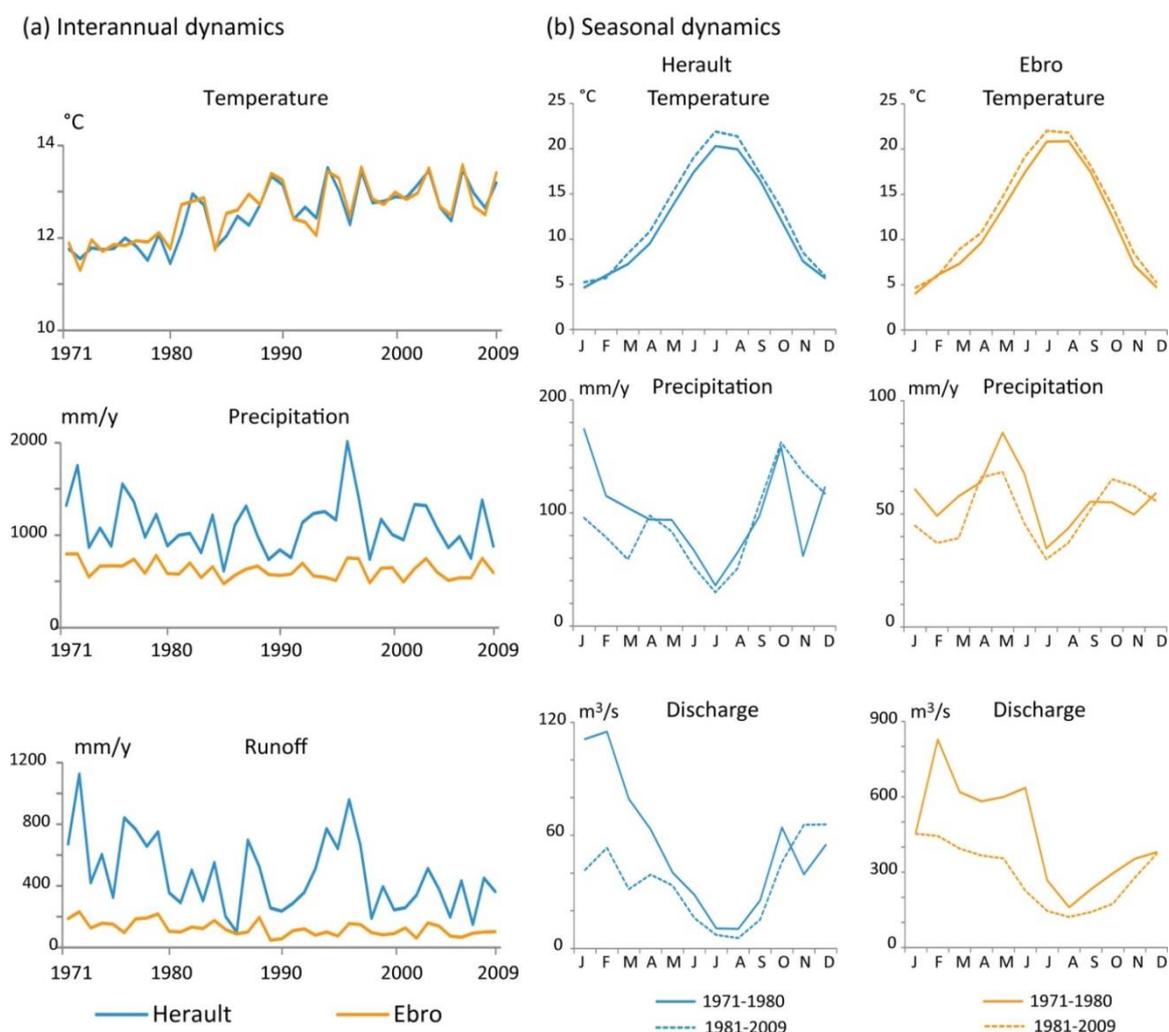


Figure D.3. Evolutions hydro-climatiques sur les bassins de l'Hérault et de l'Ebre : (a) dynamiques interannuelles des températures, précipitations et débits entre 1971 et 2009 ; (b) dynamiques saisonnières des températures, précipitations et débits sur les périodes 1971–1980 et 1981–2009. ([ACL4] ; [ACL8]).

5. Gestion et usages de l'eau

La Figure D.4 montre les principales pressions anthropiques sur les ressources en eau au sein des bassins de l'Hérault et de l'Ebre.

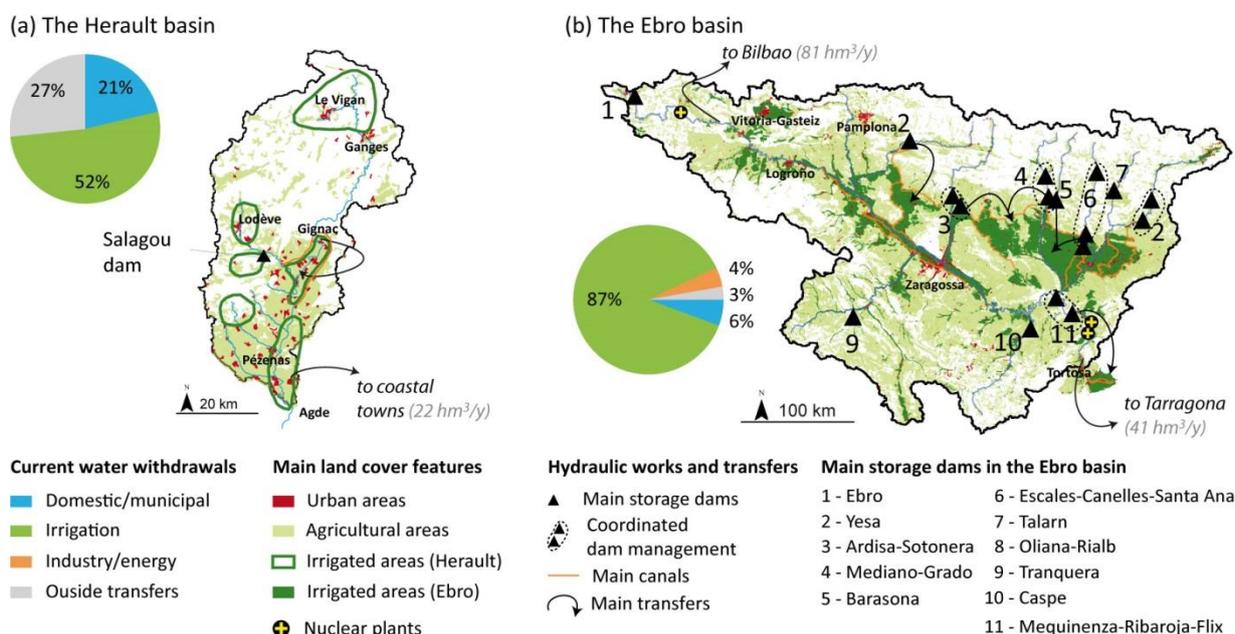


Figure D.4. Principales pressions humaines sur les ressources en eau (zones urbaines et agricoles, principaux barrages-réservoirs et transferts d'eau, prélèvements moyens estimés dans les années 2000 au sein (a) du bassin de l'Hérault et (b) du bassin de l'Ebre en 2009. ([ACL2] ; [ACL4]).

5.1. Pressions anthropiques actuelles sur le bassin de l'Hérault

Le bassin de l'Hérault présentait en 2009 une population résidente d'environ 180 000 habitants, pour une densité moyenne de 71 hab/km². Les agglomérations principales comptant une population supérieure à 5 000 habitants sont Agde, Pézenas, Lodève, Clermont-l'Hérault et Gignac. La partie amont se caractérise par une faible densité de population (37 hab/km²) et des surfaces agricoles éparpillées tandis que la partie aval concentre la majeure partie des zones urbaines et agricoles (Fig. D.4a). La population saisonnière, liée à une activité touristique très importante, notamment dans la partie méridionale, double la population résidente du bassin pendant la période estivale.

Les surfaces agricoles représentaient en 2009 environ 40 % de la surface totale du bassin avec une Surface Agricole Utile (SAU) de 110 000 ha (SMBFH, 2005). L'amont du bassin se caractérise par des cultures fruitières et légumières (vergers, oignon doux des Cévennes) tandis que la viticulture est majoritaire dans la partie aval du bassin. Les surfaces irriguées représentaient en 2009 environ 4 700 ha localisés principalement au niveau des secteurs de l'ASA du Canal de Gignac et de la basse vallée de l'Hérault.

L'activité économique s'organise essentiellement autour des secteurs de l'agriculture, du tourisme saisonnier et du tertiaire (entreprises de service, artisanat). Le recensement de seulement 6 industries importantes (textile, métallurgie et travaux des métaux, agroalimentaire et industrie chimique) souligne la pauvreté du tissu industriel à l'échelle du bassin de l'Hérault (SMBFH, 2005). Hormis ces industries, le bassin se caractérise par une forte concentration de microcentrales hydroélectriques (22) qui concernent aussi bien l'Hérault que ses affluents (l'Arre, la Vis, la Lergue).

Parmi les cinq barrages-réservoirs représentant une capacité de stockage équivalente à 8 % des écoulements totaux annuels du bassin, le barrage du Salagou (102 hm³) constitue le réservoir le plus important puisqu'il représente plus de 90 % des réserves artificielles du bassin de l'Hérault. Mis en service en 1969 pour assurer des prélèvements pour l'irrigation (soit environ 0.4 hm³ en 2009), il a également un rôle d'écrêteur de crues et de soutien d'étiage sur la rivière de la Lergue. Ce barrage sert aussi à produire de l'électricité et est aujourd'hui principalement dédié aux activités nautiques.

En 2009, les volumes annuels moyens prélevés pour l'irrigation, d'une part, et les usages municipaux à l'intérieur et à l'extérieur du bassin, d'autre part, étaient comparables, soit de l'ordre de 40 hm³/an pour chaque usage (Collet *et al.*, 2014). Le prélèvement de Florensac dans la nappe alluviale de l'Hérault, mis en

place au tout début des années 1970, permet d'assurer par transfert l'alimentation en eau potable d'une quinzaine de communes du littoral et de l'ouest montpelliérain. Il représentait 27 % des prélèvements totaux du bassin en 2009. L'efficacité moyenne des réseaux d'adduction en eau potable avoisine les 65 % (SMBFH, 2005) sur l'ensemble du bassin, soit environ 35 % de pertes. L'efficacité est relativement hétérogène avec des valeurs comprises entre 50 et 80 % selon les secteurs (Rinaudo, 2011).

Les prélèvements sont marqués par une forte saisonnalité avec un pic en juillet-août du fait de l'irrigation des cultures (majoritairement les vignes) et de la fréquentation touristique estivale. Les principales zones irriguées sont concentrées autour du canal de Gignac qui distribue une partie de l'eau du fleuve Hérault à un périmètre irriguable d'environ 3 000 ha. Selon les gestionnaires locaux, l'efficacité de ce système gravitaire ne dépassait pas 7 % jusqu'en 1990 où des travaux de rénovation ont été entrepris à la vitesse de 50 ha/an. Cette rénovation a permis d'atteindre en 2009 une efficacité d'environ 20 % et d'économiser 10 hm³/an sur les 40 prélevés auparavant, même si 2 000 ha restaient à rénover.

5.2. Pressions anthropiques actuelles sur le bassin de l'Ebre

Le bassin de l'Ebre présentait en 2009 une population d'environ 3,5 millions d'habitants, pour une densité moyenne relativement faible de 41 hab/km². La population résidente est principalement concentrée dans des zones fortement urbanisées, telles que Zaragoza (675 000 habitants), Vitoria-Gasteiz, Pampelona-Iruña, Logroño, Lleida, Huesca, Tudela ou Tortosa. En dehors de ces centres urbains, la densité de population ne dépasse que rarement 25 hab/km² avec 40 % du territoire considéré comme désertique (< 10 hab/km²).

La structure parcellaire de la répartition de la population, associée à des plans d'aménagement du territoire (CHE, 2013) a permis la mise en place de réseaux d'adduction d'eau potable dont les taux de pertes sont modérés. L'efficacité moyenne des réseaux d'adduction en eau potable, regroupés en grands systèmes d'adduction, avoisine les 80 % (CHE, 2013) sur l'ensemble du bassin soit environ 20 % de pertes.

Le bassin de l'Ebre joue un rôle très important dans la production agricole espagnole, avec 30 % de la production de viande et 60 % de la production de fruits du pays (CHE, 2013). Les principales cultures sont des céréales et des arbres fruitiers, et les surfaces cultivées représentent près de 30 % de la superficie totale du bassin (Portmann *et al.*, 2010). Dopée par une politique de développement de l'agriculture de l'Etat espagnol à partir des années 1950, l'agriculture est ainsi devenue le principal secteur d'activité du bassin (CHE, 2013). Cette politique s'est appuyée sur l'association des ressources en eau abondantes des zones pyrénéennes et cantabriques principalement, avec les conditions climatiques semi-arides des plaines centrales. Le bassin de l'Ebre constitue donc un hydrosystème complexe et largement régulé avec un total de 234 barrages (dont 80 ont été mis en service entre 1940 et 1975) représentant une capacité de stockage équivalente à 60 % des écoulements du bassin. Les 11 principaux barrages ou systèmes de barrages indiqués au niveau de la Fig. D.4b représentent environ 80 % de la capacité de stockage actuelle. Les surfaces irriguées en augmentation régulière (700 000 ha environ en 2009) se concentrent dans la vallée semi-aride de l'Ebre et sont alimentées par un réseau de canaux à l'air libre liés aux grands barrages-réservoirs dont la plupart régulent les écoulements pyrénéens. L'irrigation de type gravitaire est ainsi dominante, elle représente 69 % des surfaces irriguées, suivie par l'irrigation par aspersion (19 %) et le goutte-à-goutte (11 % ; Salvador *et al.*, 2011). En 2009, l'irrigation représentait 92 % des prélèvements totaux sur le bassin (87 % en moyenne sur les années 2000, Fig. D.4).

En comparaison, les autres usages de l'eau (prélèvements AEP, production énergétique et activités industrielles) représentent donc une part faible des prélèvements : les prélèvements liés à la demande industrielle et au refroidissement des centrales nucléaires sont à peu près équivalents à ceux liés à la demande domestique. 3 % des prélèvements totaux concernent également des transferts vers des agglomérations situées hors du bassin, notamment vers Bilbao (81 hm³/an) et Tarragona (41 hm³/an), qui ont été respectivement mis en place à partir de 1975 et 1989.

5.3. Enjeux de gestion sur les deux bassins

Le bassin de l'Hérault fait partie du territoire géré par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse (AERMC) mise en place en 1964. Depuis les années 2000, la gestion du bassin est également assurée par le Syndicat Mixte du Bassin du Fleuve Hérault (SMBFH) à travers un Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE). Une étude sur les volumes prélevables a été lancée récemment par le SMBFH et doit conduire à un plan de partage de l'eau à l'échelle du bassin.

La gestion du bassin de l'Ebre est assurée par la Confédération Hydrographique de l'Ebre (CHE, *Confederación Hidrográfica del Ebro*), créée dès 1926 et rattachée au Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de l'Environnement espagnol. La CHE a été créée dans une optique de développement des infrastructures de stockage et d'irrigation sur le bassin. Aujourd'hui, la CHE assure la gestion intégrée des

ressources en eau dans un souci de maintien de la qualité des milieux aquatiques en lien avec les objectifs européens. Depuis les années 2000, d'importants efforts ont été entrepris pour améliorer l'efficacité des réseaux d'irrigation et optimiser la gestion de la demande en eau (Lecina and Playán, 2002 ; Lecina *et al.*, 2010 ; Salvador *et al.*, 2011).

Les bassins de l'Hérault et de l'Ebre font déjà face à des défis de gestion d'offre et de demande en eau. Dans les deux bassins, des conditions chaudes et sèches en été conduisent à un pic de demande en eau d'irrigation au moment des périodes d'étiage. Depuis les années 1970, la population a doublé sur le bassin de l'Hérault tandis que les surfaces irriguées ont augmenté de 30 % sur le bassin de l'Ebre. L'augmentation de la demande associée à des conditions hydro-climatiques plus déficitaires ont conduit à des épisodes de pénuries sur les deux bassins. Par ailleurs, la Directive Cadre Européenne sur l'eau a introduit de nouvelles contraintes en lien avec le maintien de débits environnementaux. Une réflexion sur l'adaptation au changement climatique a été engagée sur les deux zones d'études. Ainsi, l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse a récemment défini un plan d'adaptation (AERMC, 2014a) au niveau duquel les équilibres entre disponibilité et demande en eau sont une question centrale. Sur le bassin de l'Ebre, plusieurs mesures visant à réduire la vulnérabilité de l'hydrosystème aux changements climatiques attendus ont été considérées dans le plan hydrologique de bassin (García-Vera, 2013).

6. Conclusion : comparaison de deux bassins pour des objectifs méthodologiques et appliqués

Sur les 40 dernières années, les ressources en eau des bassins de l'Hérault et de l'Ebre ont subi une pression croissante du fait d'une importante variabilité climatique et des mutations des secteurs principaux de demande en eau (irrigation, alimentation en eau potable, activités touristiques), qui ont eu un impact sur l'adéquation entre l'offre et la demande. Du fait d'une demande croissante pour l'alimentation en eau potable sur le bassin de l'Hérault et d'un développement agricole marqué sur le bassin de l'Ebre, la disponibilité future en eau est préoccupante sur les deux bassins où des changements climatiques importants sont attendus.

La comparaison des deux bassins d'étude présente, dans un premier temps, un intérêt d'ordre méthodologique. Les modèles existants tendent à être soit spécifiques à un site d'étude ou à une région donnée et difficilement transposables à un contexte différent, soit excessivement génériques et donc simplifiés. Le développement d'un cadre conceptuel de modélisation intégratrice sur deux bassins contrastés vise à répondre à des questions sur la généralité et le caractère transposable ou non des modélisations intégratrices, tant en ce qui concerne le type de données disponibles que les caractéristiques des bassins. Les hydrosystèmes de l'Ebre et de l'Hérault diffèrent en effet par leurs enjeux et leurs modes de gestion. La modélisation sur l'Ebre implique notamment de gérer la coexistence d'un modèle opérationnel de gestion en temps réel avec des questions de planification sur le long terme. La schématisation de cet hydrosystème doit être conçue principalement selon une structuration du bassin en systèmes d'exploitation, et donc par la régulation des écoulements par les barrages et canaux. Sur l'Hérault, la gestion quantitative est moins centralisée, et les prélèvements sont davantage diffus avec des usages plus diversifiés. Certains enjeux doivent être représentés sur l'hydrosystème de l'Hérault alors qu'ils ne se retrouvent pas sur l'Ebre, comme l'intégration de contraintes touristiques et environnementales relativement fortes.

Une analyse comparative sur les deux bassins vise également à fournir des éléments de compréhension sur les évolutions des équilibres entre disponibilité et demande en eau sous contrainte de changements climatiques et anthropiques dans le passé et le futur. Des différences ou similarités concernant les facteurs de déséquilibre peuvent ainsi être identifiés : ces différences sont-elles dues à des contrastes hydro-climatiques, de niveau d'aménagement et d'équipement, ou aux volumes et à la diversité des demandes en eau ? Face à des évolutions climatiques incertaines, le mode de gestion et le niveau d'aménagement du bassin sont-ils déterminants dans les équilibres entre ressources et usages de l'eau ? Certains secteurs de demande en eau sont-ils plus vulnérables que d'autres ? Le bassin de l'Ebre présente en effet une demande largement agricole impliquant majoritairement des cultures annuelles, tandis que les demandes en eau sur l'Hérault sont principalement liées à des aménagements urbains et touristiques de long terme et à des cultures pluri-annuelles de vignes. Ces différences auront-elles un impact sur la vulnérabilité des hydrosystèmes et notamment sur leur résilience face à la variabilité climatique ?

Le projet GICC REMedHE s'est fixé comme objectif de **travailler de manière conjointe sur les deux bassins** en vue d'offrir des **éléments originaux de compréhension** quant aux **questions de transférabilité de modèles** et de **facteurs de vulnérabilité**.

Modélisation intégrée des hydrosystèmes

1. Introduction

Cette section présente la mise en place d'une modélisation intégrée appliquée sur la période 1971–2009 sur les deux hydrosystèmes d'étude. Elle vise à : (i) combiner des données hydrologiques et anthropiques au sein d'une chaîne intégrative de modélisation capable de décrire les relations entre disponibilité et usages de l'eau et leurs dynamiques spatio-temporelles sur plusieurs décennies ; (ii) analyser à partir d'indicateurs l'évolution du stress hydrique sur cette période ainsi que la durabilité des usages actuels sous les conditions climatiques passées.

Elle expose successivement les principes généraux de la chaîne développée et de ses modèles associés, son application selon une schématisation fonctionnelle des bassins et un protocole de calage/validation multi-décennal, et sa capacité à reproduire les débits observés avant d'analyser les évolutions des équilibres entre disponibilité et demande en eau sur les 40 dernières années.

2. Développement d'une chaîne intégrative de modélisation

2.1. Principes généraux de la chaîne

Un cadre de modélisation intégrée prenant en compte les dynamiques climatiques et anthropiques, les interactions entre ressources et demandes, et fonctionnant au pas de temps décennal a été conçu et mis en place (Fig. D.5).

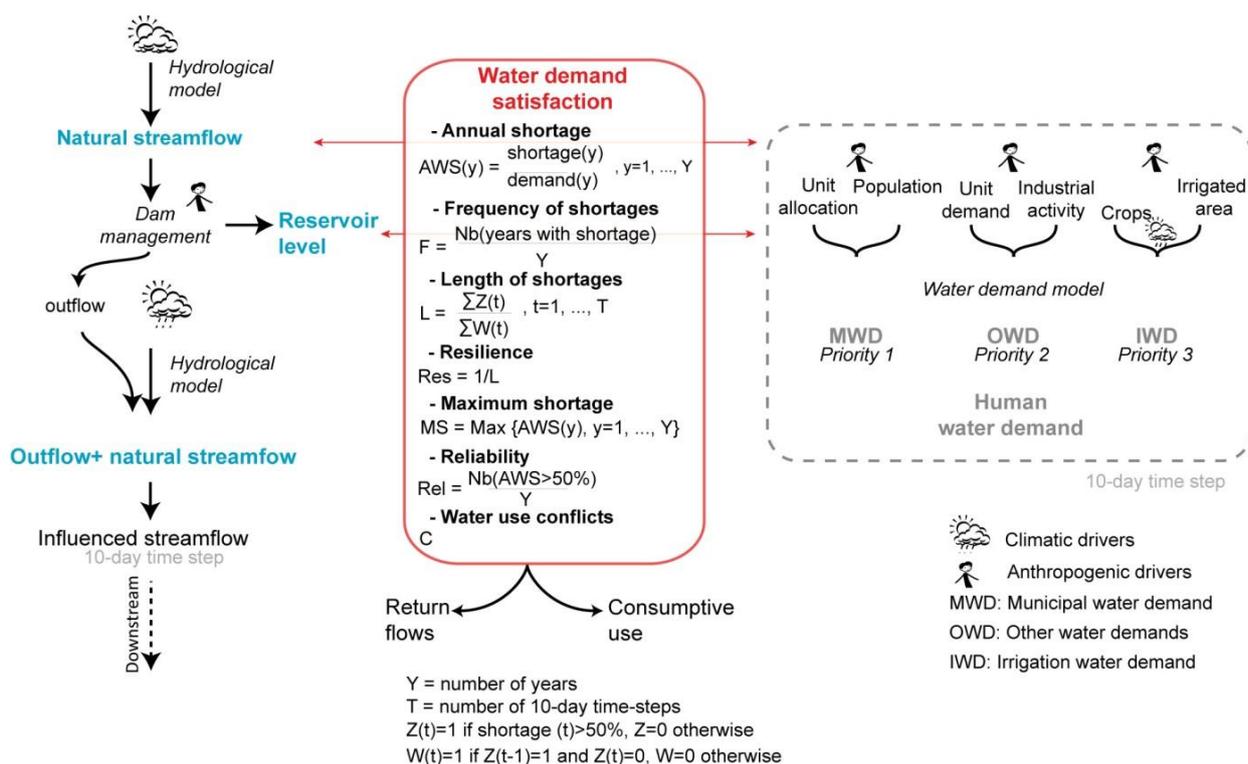


Figure D.5. Cadre général de modélisation intégrée développé et appliqué aux bassins de l'Hérault et de l'Ebre au pas de temps décennal sur la période 1971–2009. Les demandes en eau et les débits naturels ont été simulés en tenant compte des influences climatiques et anthropiques. L'influence anthropique sur les débits a été prise en compte grâce à l'utilisation d'un module barrage piloté par la demande et par la détermination de la consommation effective. Le stress hydrique a été déterminé par la comparaison entre la demande et la disponibilité en eau et caractérisé par l'utilisation de divers indicateurs. ([ACL4]).

La variabilité climatique module la dynamique des écoulements naturels et des demandes en eau (principalement par la variation des demandes en eau d'irrigation) tandis que les activités anthropiques influencent les demandes en eau par l'intermédiaire des évolutions démographiques, des activités industrielles,

des surfaces irriguées et de leurs types de cultures associées, ainsi que de l'efficacité des réseaux d'adduction. La demande en eau est ici définie comme la quantité d'eau que l'utilisateur prélèverait en l'absence de toute restriction, c'est-à-dire le prélèvement qui permettrait aux utilisateurs d'avoir accès aux quantités d'eau optimales pour leur usage en considérant l'efficacité des réseaux d'adduction et des techniques d'irrigation. Les influences anthropiques sur l'équilibre ressource-demande prennent en compte les règles locales de gestion des barrages-réservoirs et des canaux qui contrôlent une part de la disponibilité en eau. Les influences climatiques et anthropiques ont été distribuées et combinées dans l'espace et dans le temps pour évaluer les changements de stress hydrique.

A chaque nœud de demande, la demande en eau est comparée à l'eau disponible (débits des cours d'eau et niveaux des réservoirs). Si le volume d'eau disponible est égal ou supérieur à la demande, alors les prélèvements sont égaux à la demande pour tous les types de demandes. Si le volume disponible est inférieur à la demande, des restrictions sont alors appliquées pour limiter les prélèvements. En accord avec les règles de gestion locales, un ordre de priorité est appliqué pour les restrictions. Les restrictions sont d'abord appliquées aux demandes d'irrigation (IWD), puis aux autres demandes (OWD) et finalement aux demandes en eau municipales (MWD). La restriction en eau est définie comme la différence entre la demande en eau et l'eau effectivement prélevée. Seule une partie de cette eau prélevée est effectivement utilisée, le reste étant considéré comme retournant au milieu et au final à l'exutoire du sous-bassin. La quantification de la consommation effective en eau est expliquée en section D.2.6. Le débit naturel est donc influencé par la gestion des barrages, les prélèvements et les retours au milieu.

Cette modélisation intégrée a été appliquée sur une longue période de temps afin de représenter la variabilité passée des influences climatiques et anthropiques. La période 1971–2009 a été choisie en fonction de la disponibilité des données sur les deux bassins. Cette période d'environ 40 ans comprend une décennie plus humide et plus froide (1971–1980) et une période plus chaude et plus sèche (1981–2009). Le calage et la validation du modèle hydrologique ont été réalisés sur les données de débits naturels (non influencés, voir section D.2.6.) tandis que la simulation des demandes en eau n'a pas pu être complètement validée faute de données suffisantes. La simulation des débits influencés a été validée par comparaison aux débits observés aux différents nœuds de ressource (voir section D.2.6.).

2.2. Représentation fonctionnelle des nœuds de demande et de disponibilité en eau

La distribution spatiale des demandes et des disponibilités en eau a été cartographiée afin de reproduire l'hétérogénéité spatiale des restrictions d'usage présentes dans chaque zone d'étude : en effet, l'évaluation du stress hydrique est dépendante de l'échelle spatiale et temporelle étudiée (Boithias *et al.*, 2014). Il est donc essentiel de bien prendre en compte les principales hétérogénéités des demandes et des disponibilités en eau. Chaque bassin a été divisé en sous-bassins prenant en compte la ressource en eau disponible pour un ou plusieurs nœuds de demande. L'Hérault a ainsi été divisé en 6 sous-bassins et 6 nœuds de demande tandis que l'Ebre a été divisé en 20 sous-bassins et 8 nœuds de demande (Fig. D.6).

La schématisation fonctionnelle de l'hydrosystème Hérault (Fig. D.6a) a été adaptée du travail de Collet *et al.* (2013). Elle tient compte du gradient climatique nord-sud qui sépare le haut-bassin au climat plus doux et humide, de l'aval au climat plus chaud et plus sec. Les sous-bassins ont été également choisis pour regrouper des prélèvements en eau relativement homogènes. Ceux-ci sont faibles et principalement agricoles dans le sous-bassin de Laroque et minimes dans les sous-bassins amonts de Saint-Laurent et Lodève. Le sous-bassin de l'Hérault à Gignac a été délimité pour isoler le canal de Gignac et ses zones irriguées. La section la plus au sud de l'Hérault à Agde cumule, quant à elle, le plus haut niveau de prélèvements urbains du bassin et une forte demande en eau agricole.

S'agissant de l'hydrosystème Ebre, la représentation fonctionnelle a été principalement guidée par l'existence de grands périmètres irrigués gérés en association avec un ou plusieurs grands barrages-réservoirs (voir les triangles noirs sur la Fig. D.6b). Les bassins pyrénéens ayant un régime hydrologique nival ou pluvio-nival ont été sélectionnés pour mieux représenter la ressource disponible. Les deux principaux systèmes en rive droite ont également été sélectionnés car ils sont représentatifs de l'hétérogénéité hydro-climatique du bassin versant de l'Ebre.

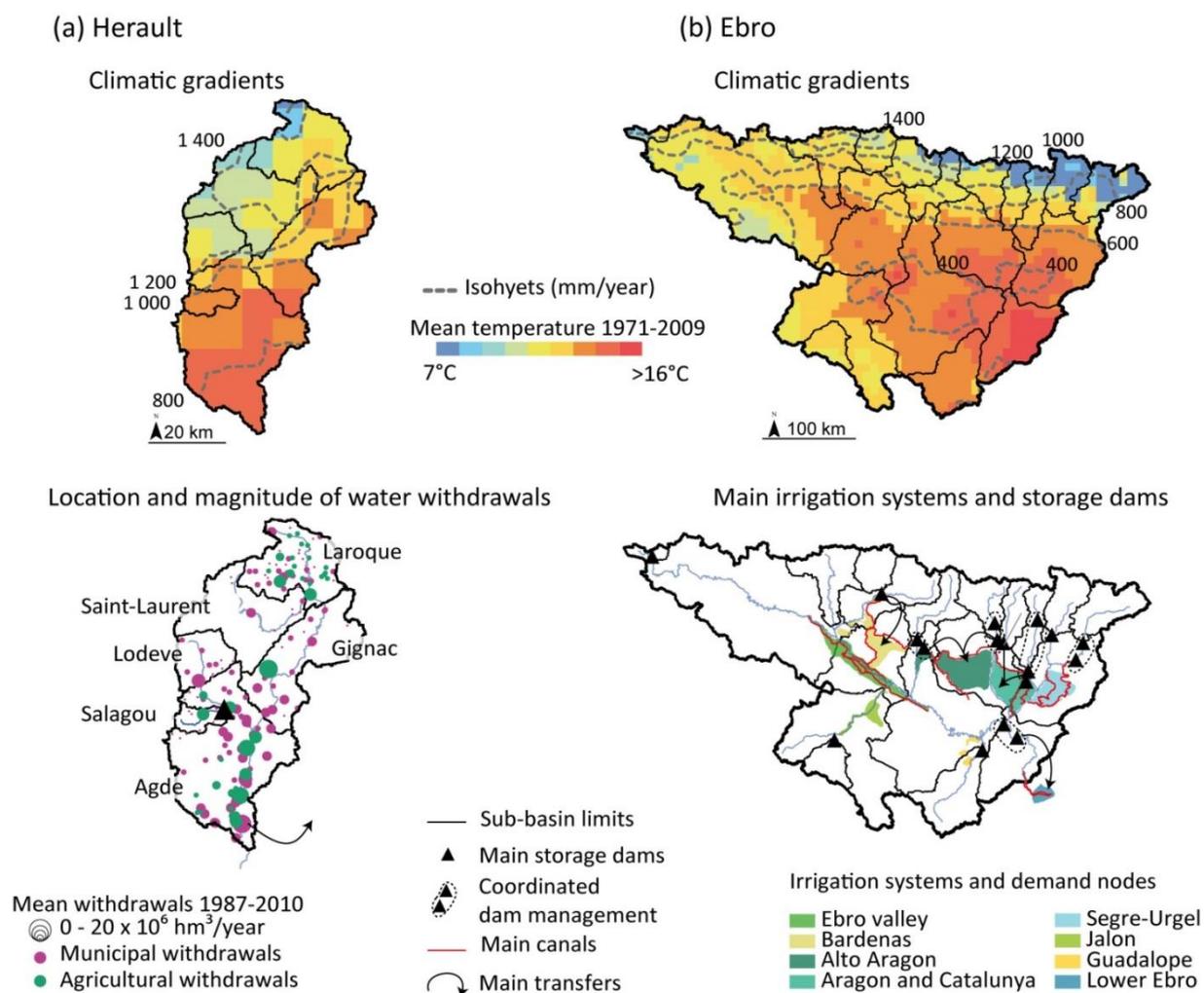


Figure D.6. Principales caractéristiques spatiales physiques et anthropiques des deux bassins versants : (a) 6 sections ont été déterminées pour la simulation des ressources en eau et pour les nœuds de demande dans le bassin de l’Hérault ; (b) 20 sections de simulation des ressources en eau et 8 nœuds de demande correspondant aux principaux systèmes irrigués ont été déterminés pour le bassin de l’Ebre. ([ACL4] ; [ACL7]).

2.3. Modélisation des demandes en eau

2.3.1. Les modèles d’estimation de la demande en eau

Plusieurs modèles (Fig. D.7) basés sur des variables physiques (climat, sols) et socio-économiques (démographie, demande unitaire, types de cultures irriguées, efficacité des réseaux, activités industrielles, etc.) ont été mobilisés pour estimer les différents types de demandes en eau et leur évolution dans le temps et dans l’espace selon la schématisation fonctionnelle présentée précédemment.

La demande en eau municipale (MWD) inclut la demande en eau pour les usages domestiques et commerciaux ainsi que pour l’entretien des parcs et jardins publics. La demande en eau d’irrigation (IWD) correspond à la demande en eau nécessaire à la croissance optimale des cultures irriguées. Les prélèvements en eau pour le bétail ont été jugés négligeables en comparaison des prélèvements pour l’irrigation. Les autres demandes en eau (OWD) ont été estimées pour considérer la demande en eau liée à l’activité industrielle et au refroidissement des centrales nucléaires du bassin de l’Ebre. La demande énergétique induite par les centrales hydroélectriques sur les deux bassins n’a pas été prise en compte car l’hypothèse a été faite que l’eau utilisée par ces centrales n’était pas consommée et retournait entièrement au milieu. La demande environnementale, généralement définie comme le débit minimum pour assurer le bon état écologique des cours d’eau et le maintien de la vie aquatique, a été considérée dans les étapes ultérieures de l’étude visant à évaluer les capacités d’allocation en eau dans des scénarios prospectifs.

La demande en eau municipale (MWD) a été évaluée au pas de temps décennaire en multipliant la population par une allocation unitaire. La population comprend à la fois la population résidente et la

population touristique saisonnière (voir section 2.3.2.). L'allocation unitaire correspond à un volume alloué par individu pour tous les besoins urbains. Cette allocation a été évaluée à l'échelle communale en divisant les prélèvements connus (d'après les recensements des redevances réalisés par les agences de bassin) par la population pour les années où les informations de prélèvements étaient disponibles et fiables, avant d'être ensuite moyennée par sous-bassin. A travers ce traitement, l'allocation unitaire inclue ainsi principalement les demandes domestiques AEP mais également les demandes liées à l'arrosage des parcs et des jardins ainsi qu'aux usages commerciaux.

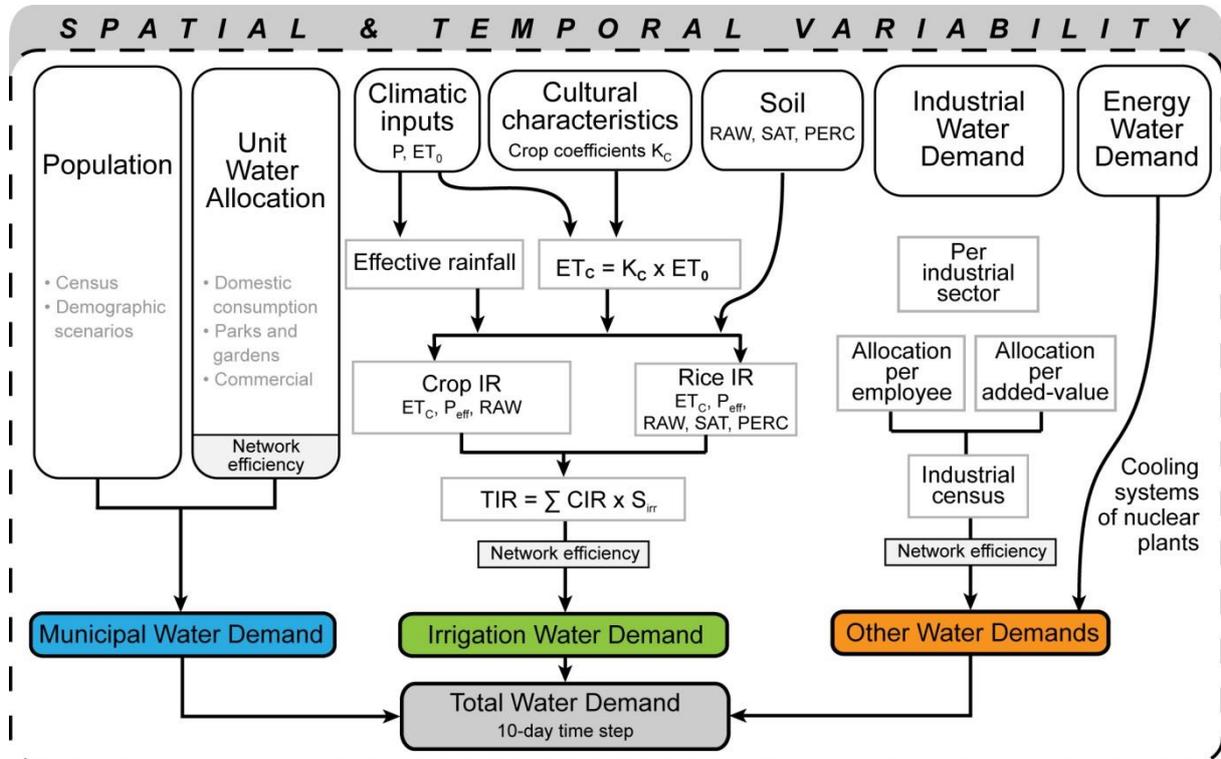


Figure D.7. Modèles d'estimation de la demande en eau municipale (MWD), d'irrigation (IWD), industrielles et énergétiques (OWD) P : précipitation, ET_0 : évapotranspiration potentielle, K_c : coefficients cultureux, RAW réserve utile, SAT : niveau de saturation du sol, PERC : taux de percolation du sol, ET_c : évapotranspiration maximale sous conditions standard, P_{eff} : pluie efficace, CIR : besoin d'irrigation pour la culture, Rice IR : besoin d'irrigation pour la culture de riz, TIR : besoin total d'irrigation, S_{irr} : surfaces irriguées. ([ACL2] ; [ACT3]).

La demande en eau d'irrigation a été estimée au pas de temps décadaire pour chaque nœud de demande (voir Fig. D.6) à l'aide d'un modèle inspiré du modèle Cropwat de la FAO (Allen *et al.*, 1998). Le modèle calcule le besoin en eau d'irrigation des cultures en fonction de la précipitation, de l'évapotranspiration potentielle (ET_0), des caractéristiques des plantes et des sols ainsi que de l'efficacité des réseaux d'irrigation. L'évapotranspiration maximale (ET_c) renvoie au volume d'eau consommé par évapotranspiration dans des conditions optimales de croissance, et a été évaluée pour chaque culture irriguée en utilisant une approche de coefficient culturel (K_c) appliqué à l'évapotranspiration potentielle ET_0 (Fig. D.7). Au début de chaque pas de temps, le réservoir sol est rempli par les précipitations efficaces (tout ou partie en fonction de la réserve d'eau dans le sol au pas de temps précédent) avant que son eau soit mobilisée par les cultures. Les besoins optimum des plantes sont assurés par l'eau présente dans la réserve utile en eau du sol, ou par un apport par irrigation quand celle-ci est vide. Les besoins en eau spécifiques pour la culture de riz (présente dans la zone de delta de l'Ebre) ont été évalués selon un modèle type de la FAO (Allen *et al.*, 1998) basé sur la réserve utile, une valeur globale de saturation du sol et une valeur moyenne de percolation associée aux principaux types de sol dans les zones de riziculture.

La pluie efficace a été calculée au pas de temps décadaire selon la formule empirique suivante (2) recommandée par la FAO :

$$P_{eff} = \frac{P \times (125 - 0.6 \times P)}{125} \quad \text{if } P \leq \frac{250}{3} \text{ mm} \quad (2)$$

$$P_{\text{eff}} = \frac{125}{3} + 0.1 \times P \quad \text{if } P > \frac{250}{3} \text{ mm}$$

Où P_{eff} est la pluie efficace au pas de temps décadaire et P la pluie décadaire.

Le réservoir sol a été considéré par commune selon une moyenne spatialisée de la réserve utile en eau (RAW) fournie par la carte européenne des sols (EC, 2004). Les besoins théoriques d'irrigation (CIR, Fig. D.7) ont été calculés pour chaque culture à l'échelle communale avant d'être agrégés à l'échelle des secteurs irrigués selon les surfaces considérées (S_{irr}) pour obtenir les besoins théoriques d'irrigation totaux par secteur irrigué ou nœud de demande (TIR, Fig. D.7). Les demandes totales d'irrigation (IWD) ont finalement été obtenues en divisant ces besoins théoriques totaux (TIR) par l'efficacité hydraulique (efficacité moyenne des canaux, drains et des systèmes d'irrigation) fournis par les gestionnaires de bassin sur chaque secteur d'étude et éventuellement pour différentes périodes.

La demande industrielle en eau a été négligée sur le bassin de l'Hérault car l'activité industrielle y est très faible et la majeure partie des usines sont connectées aux réseaux urbains d'adduction d'eau. Sur le bassin de l'Ebre, cette demande a été estimée à l'échelle communale dans le cadre du Plan Hydrologique de l'Ebre (CHE, 2013). Selon la CHE, pour chaque secteur industriel, une allocation d'eau par employé et par an est définie selon le nombre de salariés de l'industrie et de la valeur ajoutée brute (VAB) à prix constants de la production (Fig. D.7). Ainsi, en fonction du secteur d'activité industrielle, la CHE fournit une allocation par employé ($\text{m}^3/\text{employé}/\text{an}$) et une allocation par VAB ($\text{m}^3/1000 \text{ €}$). Pour l'année 2007, les allocations réelles ont été obtenues à partir d'enquêtes réalisées par l'INE, par sous-secteur industriel et par commune.

La demande en eau pour la production d'énergie a été prise en compte uniquement sur l'Ebre du fait de la présence de centrales nucléaires sur le territoire (Fig. D.4). La demande énergétique correspond ainsi au volume d'eau évaporé par le système de refroidissement des réacteurs. Ce volume d'eau représente environ $122 \text{ hm}^3/\text{an}$ pour les réacteurs Asco I & II. Il a été considéré comme identique tout au long de la période de mise en service des deux centrales à partir de 1982 et 1998 respectivement. L'impact de la centrale nucléaire de Santa Maria de Garoña à l'ouest du bassin a été négligé en raison de son système de refroidissement en circuit fermé « non-consommateur » d'eau. La demande en eau liée aux centrales hydroélectriques sur les deux bassins n'a pas été prise en compte : ce faisant, l'hypothèse a été faite que l'eau utilisée par ces centrales n'était pas consommée et retournait entièrement au milieu.

2.3.2. Traitements des données socio-économiques et environnementales

Une étape clef dans l'estimation de la demande en eau a consisté à normaliser l'ensemble des données brutes disponibles sur les territoires afin de fournir des forçages spatio-temporels aux différents modèles de demande. Des chroniques continues de variables climatiques et socio-économiques nécessaires aux calculs ont ainsi été établies au pas de temps décadaire sur la période 1971–2009 à l'échelle des différents nœuds de demande sur chaque bassin (Fig. D.6). Le choix d'un pas de temps décadaire résulte d'un compromis entre l'objectif de représenter le plus finement possible les dynamiques saisonnières de la demande en eau (en particulier la demande agricole et la demande urbaine sous influence du tourisme) et les limites inhérentes à la désagrégation temporelle des données disponibles selon un pas de temps plus fin. Le Tableau D.1 synthétise les variables clefs et les techniques de traitement associées qui ont été mises en œuvre pour fournir les forçages aux différents modèles de demande.

La demande en eau municipale (MWD) a été estimée à partir de la population et d'allocations unitaires en eau. Les données de population fournies par les recensements des instituts statistiques nationaux (INSEE et INE) ont permis de renseigner la population résidente de chaque commune à différentes dates (Tableau D.1). Dans le bassin de l'Hérault, un ratio mensuel de population touristique a été appliqué à cette population résidente selon la distribution mensuelle de population non-résidente recensée en 2009 à l'échelle des communes du bassin par le Conseil Général de l'Hérault. Un coefficient de 100 %, 30 % et 0 % a ainsi été appliqué respectivement aux décades des mois de juillet à août, aux décades d'avril à octobre et de novembre à juin, et aux autres décades. La population résidentielle et touristique ainsi disponible pour certaines années clefs liées aux recensements a ensuite été interpolée (ou extrapolée) de façon à reconstituer les dynamiques de population au pas de temps décadaire pour chaque commune sur la période 1971–2009. Les variables de population ont alors été sommées par unité de gestion en attribuant chaque commune à un nœud de demande selon le site de prélèvement d'eau potable de la commune. Les allocations unitaires en eau ont alors été estimées pour chaque nœud de demande en divisant les volumes annuels de prélèvements connus (d'après les recensements de redevances réalisés par les agences de bassin) par la population desservie par ces prélèvements. Les séries chronologiques ont ainsi été construites de façon à reproduire, quand cela était

possible, les variations d’allocations unitaires en eau sur les 40 dernières années. Par exemple, au niveau des différents nœuds de demande sur le bassin de l’Hérault, l’allocation unitaire a été considérée stable jusqu’aux années 1990 (en moyenne 83 m³/hab/an) pour augmenter jusqu’aux années 2000 (en moyenne 105 m³/hab/an) avant de diminuer à partir des années 2000 (en moyenne 97 m³/hab/an). Ces allocations unitaires sont légèrement plus élevées que celles estimées pour la France (71 m³/hab/an, d’après Chazot *et al.*, 2012), ce qui est généralement observé dans la région Languedoc-Roussillon (Rinaudo, 2013). A titre de comparaison, l’allocation unitaire a été estimée en moyenne à 109 m³/hab/an au niveau du bassin de l’Ebre.

Tableau D.1. Variables clef et techniques de traitements associées pour les modèles de demande en eau. (*) R : Données brutes, S : Opérations spatiales appliquées pour la reconstruction des chroniques, T : Opérations temporelles appliquées pour la reconstruction des chroniques. ([ACL2]).

		Hérault		Ebre	
Variables clef (*)		Données brutes et techniques de traitements associés			
Demande en eau municipale (MWD)	Population	R	Données annuelles de recensements (communes)	Données annuelles de recensements (communes)	
		S	Affectation des communes aux noeuds de demande	Affectation des communes aux noeuds de demande	
		T	Application d’un taux d’accroissement entre dates	Application d’un taux d’accroissement entre dates	
	Allocation unitaire	R	Prélèvements annuels connus et population	Prélèvements annuels connus et population	
		S	Affectation des communes aux noeuds de demande	Affectation des communes aux noeuds de demande	
		T	Interpolations (extrapolations) linéaires entre dates	Interpolations (extrapolations) linéaires entre dates	
	Efficience des réseaux d’adduction	R	Evaluation par les gestionnaires de bassin	Evaluation par les gestionnaires de bassin : 80%	
		S	Variable par nœud de demande	Identique sur tout le bassin	
		T	Interpolations (extrapolations) linéaires entre dates	Constant	
	Population touristique	R	Evolution mensuelle 2009 (CG Hérault)		
S		Affectation des communes aux noeuds de demande	Non applicable		
T		Variation annuelle F (taux de residences secondaires)			
Forçages climatiques (P, T°)	R	Données journalières ponctuelles (Météo France)	Données journalières ponctuelles (AEMET)		
	S	Grille 8 × 8 km de réanalyse SAFRAN	Interpolation sur grille 8 × 8 km avec gradients T°C		
	T	Agrégation des données journalières en décadaire	Agrégation des données journalières en décadaire		
Demande en eau d’irrigation (IWD)	ET ₀	R	T _{moy} (+ autres variables) + formule Penman-Monteith	T _{min} /T _{max} journalières + formule Hargreaves	
		S	Grille 8 × 8 km	Grille 8 × 8 km	
		T	Agrégation des données journalières en décadaire	Agrégation des données journalières en décadaire	
	Coefficients et calendriers culturaux	R	Données FAO en climat méditerranéen	Données FAO adaptées localement par la CHE	
		S	Application aux cultures par nœuds de demande	Application aux cultures par nœuds de demande	
		T	Constant sur la période	Constant sur la période	
	Surfaces irriguées et types de cult.	R	Recensements agricoles (communes)	Recensements agricoles (communes)	
		S	Affectation des communes aux noeuds de demande	Affectation des communes aux noeuds de demande	
		T	Interpolations (extrapolations) linéaires entre dates	Interpolations (extrapolations) linéaires entre dates	
	Efficience des réseaux d’irrigation	R	Evaluation par les gestionnaires de bassin : 7 à 80%	Evaluation par les gestionnaires de bassin : 60%	
S		Variable par noeuds de demande	Identique sur tout le bassin		
T		Variable par périodes	Constant		
Autres demandes	Demande industrielle	R		Recensement industriel CHE (communes)	
		S	Non applicable	Affectation des communes aux noeuds de demande	
		T		Interpolations (extrapolations) linéaires entre dates	
Demande énergétique	Demande énergétique	R		Données d’évaporation de 2 centrales	
		S	Non applicable	Affectation des communes aux noeuds de demande	
		T		Constant durant la période de mise en service	

La demande en eau d’irrigation (IWD) a été calculée de manière continue sur 1971–2009 à partir des types de sol et des chroniques de surfaces irriguées et de types de cultures sous contrainte de données décennales de précipitation et d’évapotranspiration. Les cultures irriguées et leurs surfaces correspondantes ont été établies à partir de recensements agricoles à l’échelle communale disponibles sur la période 1970–2009 pour 4 et 20 années distinctes pour le bassin de l’Hérault et le bassin de l’Ebre, respectivement. Chaque commune a été affectée à un nœud de demande selon ses liens fonctionnels ou géographiques avec les principaux systèmes irrigués. Les conditions climatiques (précipitation, ET₀) au pas de temps décennal ont été extraites au niveau de chaque nœud de demande à partir des grilles climatiques 8 x 8 km journalières présentées précédemment.

Les fonds cartographiques des surfaces irriguées (localisation en 2005 et en 2004 sur l'Hérault et l'Ebre respectivement) ont été utilisés pour extraire ces forçages climatiques au niveau des périmètres irrigués. Faute d'autres cartes sur des périodes antérieures, la localisation des surfaces irriguées a été considérée constante sur la période 1971–2009 pour permettre l'extraction des conditions climatiques. En revanche, les données fournies à l'échelle communale par les recensements agricoles et interpolées entre dates ont permis de faire varier la taille des périmètres irrigués et leurs cultures associées sur la période 1971–2009. L'efficacité hydraulique considérée combine l'efficacité des réseaux d'approvisionnement (canaux, drains) et celle des systèmes d'irrigation. Sur le bassin de l'Hérault, elle a été fournie par les gestionnaires de bassin et de canaux d'irrigation et ses valeurs varient entre 60 % à 80 % en fonction du système d'irrigation, excepté sur le secteur irrigué de Gignac, où l'efficacité du réseau d'irrigation gravitaire ne dépassait pas 7 % jusqu'en 1990 pour atteindre 20 % en 2009 après plusieurs années de travaux de rénovation (ASA du Canal de Gignac). Sur le bassin de l'Ebre, en accord avec les gestionnaires du bassin, une efficacité des réseaux d'approvisionnement constante de 60 % a été considérée au niveau de chaque nœud de demande du bassin. L'efficacité des systèmes d'irrigation (gravitaire, aspersion, goutte-à-goutte, autre) est disponible auprès de la CHE (CHE, 2013) par grand système d'exploitation d'irrigation. Ces données d'efficacité ont alors été réattribuées par unité agricole, puis par nœud de demande. L'irrigation de type gravitaire est dominante, elle représente 69 % des surfaces irriguées, suivie par l'irrigation par aspersion (19 %) et le goutte-à-goutte (CHE, 2013).

Pour considérer la dynamique des usages de l'eau et de leur demande associée au sein des deux bassins sur la période 1971–2009, une base de données représentative de la distribution spatiale et temporelle (interannuelle et saisonnière) des principales variables nécessaires pour estimer la demande en eau a été constituée. Néanmoins, les difficultés d'accès à des données de qualité dans le temps et dans l'espace pour de nombreuses variables n'ont pas permis de représenter toutes les dynamiques. Ainsi, l'évolution précise dans le temps et dans l'espace de l'efficacité des réseaux d'adduction et d'irrigation, ou encore des allocations unitaires en eau n'a pas toujours pu être considérée au sein des deux bassins, contrairement aux dynamiques concernant le climat, la population ou les types de cultures.

2.4. Modélisation des écoulements naturels

Les écoulements ont été modélisés pour les 6 sous-bassins de l'Hérault et pour les 20 sous-bassins de l'Ebre à l'aide du modèle GR4j (Perrin *et al.*, 2003), un modèle hydrologique conceptuel fonctionnant au pas de temps journalier, calé et validé ici au pas de temps décennal. Ce modèle hydrologique nécessite des données de précipitation (P) et d'évapotranspiration potentielle (ET_0) journalières. Il simule les écoulements grâce à une fonction de production (qui détermine la pluie nette, remplissant le réservoir de production) et une fonction de transfert. Un module neige basé sur la température moyenne journalière du bassin (Ruelland *et al.*, 2011 ; 2014) a été ajouté au modèle et activé pour les sous-bassins versants à régime nival (Fig. D.8.). GR4j comporte quatre paramètres et le module neige ajoute trois paramètres supplémentaires. Le modèle a été calé sur la période plus sèche (1981–2009) et validé sur la période plus humide (1971–1980). Le calage automatique des paramètres du modèle a été réalisé en utilisant une méthodologie en trois étapes décrite dans Dezetter *et al.* (2014). Elle combine la répétition d'un grand nombre de tirages aléatoires de jeux de paramètres avec la succession de deux méthodes de recherche non linéaire de minimum (méthode de Rosenbrock et simplex de Nelder & Mead) pour minimiser une fonction F_{agg} agrégeant trois critères de calage : le critère de Nash-Sutcliffe (NSE), l'erreur de volume cumulative (VE) et l'erreur moyenne annuelle de volume (VE_M). Les valeurs de NSE ont été considérées bonnes au-dessus de 0.65, satisfaisantes entre 0.5 et 0.65 et faibles en dessous de 0.5.

Pour que le modèle simule les débits naturels des cours d'eau, le calage a été effectué avec les débits mesurés considérés comme naturels, c'est-à-dire non-influencés par des prélèvements ou la gestion de barrages-réservoirs. Les prélèvements en amont des barrages pyrénéens ont été considérés comme négligeables, toutes les données de débits ont donc été utilisées pour le calage de ces bassins. Les débits en entrée des barrages-réservoirs ne sont pas mesurés directement mais calculés à partir du bilan du barrage-réservoir en tenant compte des variations de hauteur dans le barrage, des lâchers et de l'évaporation des plans d'eau. Les écoulements produits dans les bassins en aval ont été calculés au pas de temps décennal en soustrayant le débit entrant au débit mesuré à l'exutoire. Cependant, ces sections aval sont aussi fortement influencées par les prélèvements et les débits naturels ne peuvent pas être reconstitués en utilisant les débits mesurés et les prélèvements par manque de données observées sur ces prélèvements, que ce soit en durée d'observation ou en pas de temps de mesure (les prélèvements sont parfois seulement connus au pas de temps annuel par exemple). Des hypothèses ont donc dû être retenues pour déterminer quand les débits mesurés pouvaient être considérés comme naturels, c'est-à-dire non-influencés par les prélèvements. Etant

donné que la demande en eau agricole est la demande ayant le taux de consommation effective le plus élevé, l'hypothèse a été faite que lorsque les demandes agricoles simulées étaient négligeables, les débits mesurés pouvaient être considérés comme naturels, i.e. très peu ou pas influencés. Ainsi, les pas de temps pour lesquels la demande agricole simulée était supérieure à $0.1 \text{ hm}^3/\text{décade}$ n'ont pas été utilisés dans le calcul du critère de calage du modèle. Dans ces sections aval, les décades non utilisées pour le calage correspondent à la période d'étiage. Par conséquent, le calage ne prend pas en compte les effets des prélèvements et des consommations nettes, qui sont proportionnellement plus importantes en période d'étiage. La simulation des débits influencés par les prélèvements et les consommations nettes (sans retour au cours d'eau) a été validée ultérieurement au regard des débits observés et donc influencés (voir section D.2.6.).

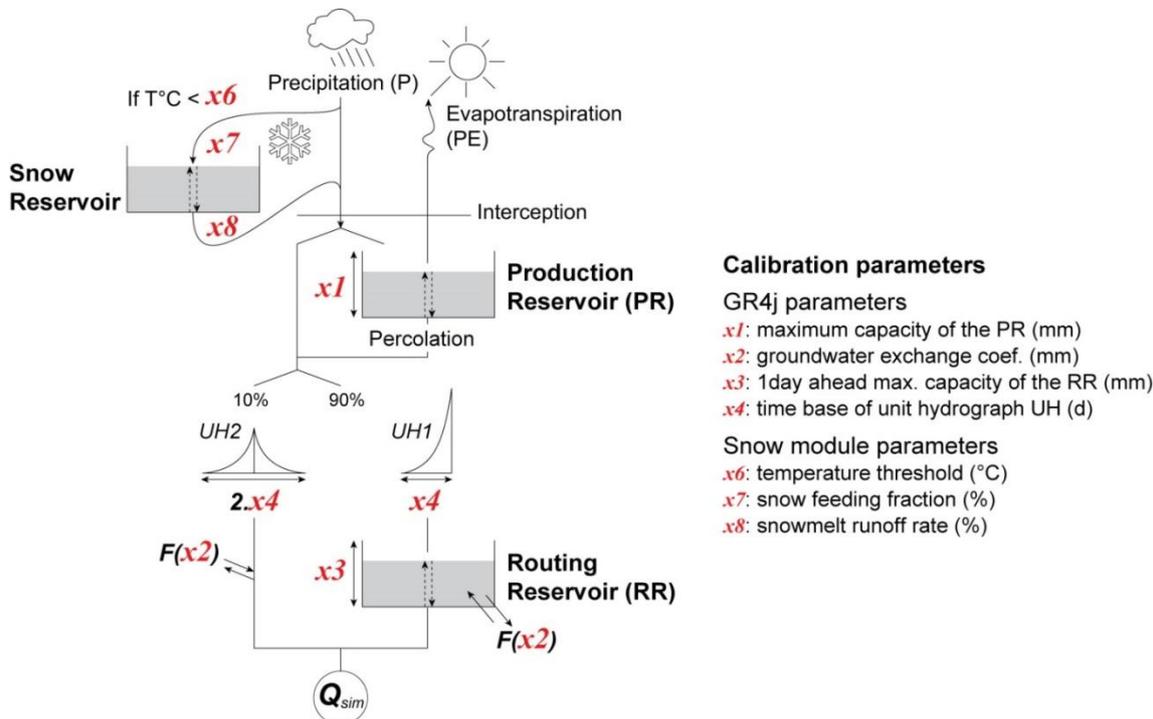


Figure D.8. Le modèle hydrologique GR4j (Perrin *et al.*, 2003) avec un réservoir neige optionnel (adapté de Ruelland *et al.*, 2014).

2.5. Modélisation du fonctionnement des barrages-réservoirs

Une modélisation aussi précise que possible de la gestion des barrages réservoirs est essentielle pour la simulation des hydrosystèmes fortement anthropisés et régulés par ces barrages. Un modèle de gestion des barrages piloté par la demande en eau, adapté de Fujihara *et al.* (2008), a été construit et appliqué au barrage du Salagou dans le bassin de l'Hérault et aux 11 principaux barrages ou groupes de barrages de l'Ebre (voir Fig. D.9.). Les sorties de ce modèle barrage sont le niveau de réserve du barrage, le volume d'eau lâché dans les canaux d'irrigation le cas échéant et le volume lâché à l'aval dans le cours d'eau au pas de temps décadaire. Dans le bassin de l'Ebre, la gestion des barrages à usage d'irrigation est basée sur des niveaux objectif et minimal. Dans la plupart des cas, le niveau objectif varie dans l'année et le niveau minimum est fixe et correspond à une réserve minimale ou à la hauteur du prélèvement d'un canal d'irrigation. L'eau est fournie pour satisfaire la demande tant que le niveau minimum n'est pas atteint. Ces règles basiques de gestion de barrages ont été utilisées dans la conception du modèle utilisé ici.

Comme indiqué sur la Fig. D.9, le bilan du réservoir est calculé au pas de temps décadaire en fonction de la demande en eau, du débit entrant, de la précipitation, de l'évaporation et du niveau initial du réservoir. L'infiltration a été considérée comme négligeable. La précipitation et l'évaporation sur les réservoirs ont été calculées en moyennant les grilles de données de P et Et_0 sur la surface des plans d'eau disponible au sein du SIG du bassin versant. L'évaporation a ensuite été calculée en multipliant Et_0 par un coefficient K_c recommandé par Allen *et al.* (1998) pour les plans d'eau des climats tempérés. Les règles appliquées pour les lâchés de barrage sont les suivantes : (i) après avoir ajouté les entrées ($V_{in} + PR$) et retiré l'évaporation du niveau initial, l'eau peut être délivrée pour satisfaire la demande et/ou un débit réservé tant que le niveau du réservoir reste

au-dessus du niveau minimum défini (R_{min}); (ii) si le niveau du réservoir dépasse le niveau objectif R_{tar} , l'eau supplémentaire est relâchée du barrage dans le cours d'eau à l'aval.

Les niveaux objectifs ont été définis pour chaque décade en considérant les niveaux maximum observés sur une période de temps pendant laquelle les règles de gestion du barrage ont été jugées similaires. Les changements importants de règles de gestion ont ainsi été pris en compte tout au long de la période d'étude. Les données de hauteur d'eau du barrage de l'Ebre par exemple, ont révélé un changement dans leur variabilité à partir des années 1980 ; pour ce barrage, les niveaux objectifs ont donc été définis séparément pour les périodes 1971–1980 et 1981–2009. Les niveaux minimum ont été fournis par les gestionnaires en charge des barrages ou, dans le cas où l'information n'était pas disponible, ont été fixés au minimum observé sur la période. Les niveaux minimums des réservoirs correspondent à une réserve de sureté pour un usage particulier (par exemple, 100 hm³ sont conservés dans le barrage de l'Ebre pour assurer l'approvisionnement en eau de la ville de Saragosse) ou à une contrainte technique pour maintenir le niveau d'eau au-dessus d'une prise d'eau de canal (par exemple, la hauteur de prise d'eau du canal d'Aragon et Catalunya dans le barrage de Barasona). Dans le cas du barrage du Salagou dans le bassin de l'Hérault, un niveau minimum de 137 m est fixé pour assurer les activités touristiques aquatiques sur le lac.

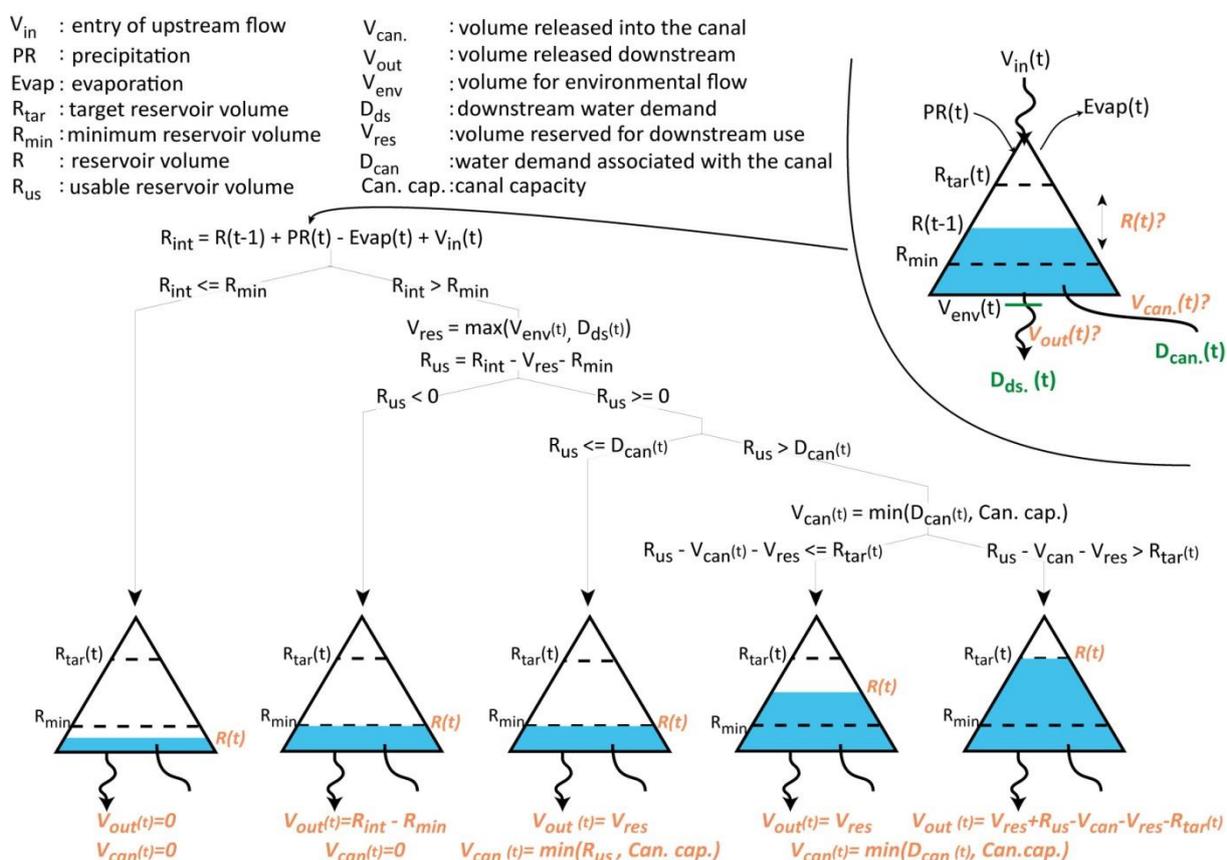


Figure D.9. Modèle de gestion de barrage-réservoir piloté par la demande ; le niveau du réservoir (R) et les volumes relâchés à l'aval (V_{out}) et dans le canal (V_{can}) (si existant) sont calculés au pas de temps décadaire. ([ACL4]).

Comme les règles de gestion des barrages sont pilotées par la demande associée à chaque barrage, la qualité de simulation des barrages dépend d'une cartographie précise des ressources et des demandes. Dans le bassin de l'Hérault, le Salagou fournit de l'eau d'irrigation pour une zone clairement délimitée (Figs. D.4a et D.6a). Dans le bassin de l'Ebre, les règles de gestion sont beaucoup plus complexes. Certains barrages, incluant le barrage de l'Ebre, relâchent de l'eau dans les cours d'eau pour les utilisateurs à l'aval. Le volume d'eau relâché dépend des demandes associées et des écoulements produits entre le barrage et les utilisateurs (c'est-à-dire, pour le barrage de l'Ebre, entre la sortie du barrage et de début du canal de Lodosa). Dans d'autres cas, un canal est directement associé à un barrage (par exemple, le canal de Bardenas et le barrage de Yesa) et transporte l'eau du barrage jusqu'aux zones irriguées, qui peuvent être situées dans un autre sous-bassin versant. Le volume d'eau lâché dépend alors de la demande associée au canal mais également de la capacité du canal. Les barrages peuvent aussi relâcher de l'eau dans les cours d'eau pour des usagers aval ou pour

maintenir des débits réservés. Enfin, la gestion de deux ou plusieurs barrages peut être faite de manière coordonnée pour assurer l'irrigation de certaines zones particulières. Certains barrages peuvent également être situés sur la même rivière pour réguler les débits d'amont en aval (par exemple, les barrages Escales, Canelles et Santa Ana sur la rivière Noguera Ribagorzana ou les barrages Mediano et Grado sur la rivière Cinca ; voir Figs. D.4b et D.6b), auquel cas ils ont été simulés comme un seul grand barrage placé en aval. Deux barrages situés sur deux sous-bassins différents peuvent aussi être gérés conjointement : si la demande totale en eau ne peut plus être assurée par le premier barrage le second vient en support. C'est le cas pour deux systèmes du bassin de l'Ebre modélisé ici : la zone Alto Aragon et la zone Aragon et Catalunya (Fig. D.6b).

2.6. Modélisation des écoulements influencés par les usages de l'eau

A chaque pas de temps, les prélèvements ont été calculés en tenant compte de la disponibilité en eau, de la demande en eau simulée et de l'ordre de priorité suivant : (i) MWD (ii) OWD et (iii) IWD. Les retours au milieu ont aussi été pris en compte. Pour chaque type de demande, une partie de l'eau prélevée a été considérée comme retournant au milieu environnant et au final à l'exutoire du sous-bassin versant au sein duquel le prélèvement avait été effectué (voir Fig. D.10). Tout d'abord, 80 % du volume fourni pour les demandes domestiques (eau potable) et plus généralement municipales (usages reliés aux réseaux d'adductions AEP) a été considéré comme retournant à l'exutoire du sous-bassin par l'intermédiaire des stations d'épuration. Le volume réellement fourni pour la MWD a été calculé en soustrayant les pertes du réseau d'adduction des prélèvements. Ensuite, on considère également qu'une partie des pertes du réseau d'adduction retourne au milieu. Pour les demandes OWD, il a été considéré que 80 % des prélèvements retournaient au milieu. Pour la demande d'irrigation (IWD), seule une partie des pertes des réseaux d'irrigation a été considérée comme retournant au milieu. Toute l'eau apportée aux cultures irriguées a été considérée comme une consommation nette.

Le taux de retour des pertes des réseaux d'adduction et d'irrigation (α dans la Fig. D.10) a été estimé globalement pour le bassin de l'Hérault et par sous-bassins pour l'Ebre, afin de tenir compte des hétérogénéités pédologiques et géologiques. Ce taux de retour a été testé entre 0 et 1 par pas de 0.1 et a été calé en optimisant le critère de Nash sur les débits influencés d'étiage (NSE_{LF} , de juillet à septembre inclus). Ce critère a également servi à valider l'ensemble de la simulation des hydrosystèmes. Ainsi, bien que le modèle hydrologique ne soit pas calé sur les débits d'étiages, les simulations ont été validées sur les débits influencés, incluant les débits d'étiage.

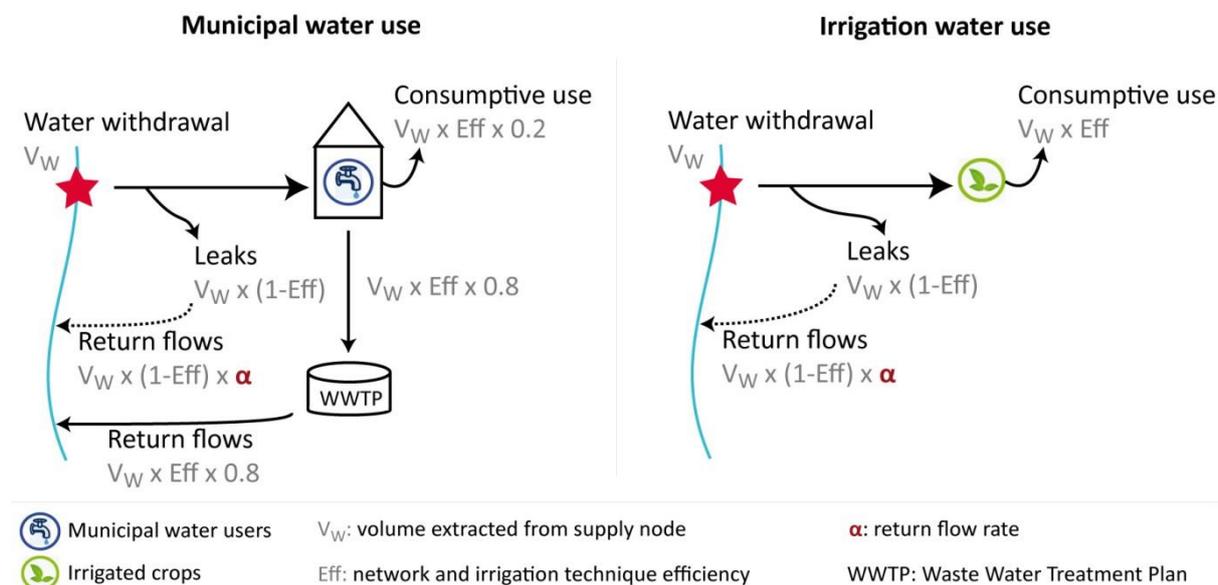


Figure D.10. Représentation des prélèvements, efficacités, pertes, consommations et retours pour les usages municipaux et d'irrigation au sein de la chaîne de modélisation intégrée. Le taux de retour α a été estimé globalement pour le bassin de l'Hérault et par sous-bassins pour le bassin de l'Ebre. Ce taux a été testé entre 0 et 1 avec un incrément de 0.1 et a été calé en optimisant les critères hydrologiques sur les débits influencés. ([ACL4] ; [MEM3]).

2.7. Indicateurs de fréquences et d'intensité de la capacité à satisfaire les demandes en eau

En premier lieu, la pression climatique et anthropique sur les ressources en eau a été évaluée. L'impact anthropique sur les débits (c'est-à-dire la consommation nette) a été estimé comme la différence entre les débits naturels et les débits influencés. La part de la variabilité du débit naturel et de la consommation anthropique dans la baisse des débits observés (voir contexte hydro-climatique sur les bassins) a été évaluée en comparant les variations des débits simulés naturels et influencés.

En second lieu, les restrictions pour chaque type de demande ont été caractérisées par l'amplitude, la fréquence et la durée moyenne des restrictions de prélèvement (voir Fig. D.5). Ces indicateurs ont été calculés pour chaque nœud de demande sous contrainte de la variabilité hydro-climatique et anthropique observée entre 1971 et 2009. Le pourcentage de demande en eau non satisfaite par manque de disponibilité a été calculé pour chaque type de demande au pas de temps décennal. En accord avec les gestionnaires locaux, les restrictions de prélèvements ont été considérées comme acceptables tant qu'elles ne dépassaient pas 50 % de la demande pour les IWD et 5 % pour les MWD. L'analyse des restrictions en eau s'est concentrée principalement sur les demandes agricoles puisque ce sont les moins prioritaires (Fig. D.5). La fréquence des restrictions de prélèvement (F) a été exprimée sous la forme du nombre d'années sur 5 pendant lesquelles au moins un pas de temps comportait une restriction supérieure à 50 % de la demande. La durée moyenne des restrictions (L) est exprimée par le nombre moyen de pas de temps successifs avec une restriction supérieure à 50 % de la demande. Les années avec une restriction de prélèvement pour la MWD supérieure à 5 % pour au moins un pas de temps ont aussi été identifiées. Ces années correspondent à des situations critiques pendant lesquelles des conflits d'usage (C) ont pu avoir lieu. En effet, quand des restrictions sont appliquées aux MWD, prioritaires sur les autres demandes, cela signifie que les trois types de demandes sont restreints.

Finalement, la sensibilité actuelle des deux bassins au stress hydrique a été évaluée en utilisant le modèle intégré calé : les demandes en eau correspondant à la population, aux surfaces irriguées et aux activités industrielles de l'année 2009 ont été comparées aux variations de disponibilité en eau sous les conditions hydro-climatiques de la période 1971–2009 et en utilisant les règles de gestion de barrages en cours en 2009. Cinq indicateurs (voir Fig. D.5) ont été calculés pour chaque nœud de demande pour caractériser l'équilibre entre usages de l'eau et disponibilité dans les bassins de l'Hérault et de l'Ebre avec leurs activités et leur gestion actuelle au regard de la variabilité climatique passée récente (1971–2009). La restriction maximale (MS) a été définie comme le taux maximal annuel simulé de restriction des prélèvements pour l'irrigation et la fiabilité (Rel) comme le taux d'occurrence d'années sans restriction (adapté de Asefa *et al.*, 2014), c'est-à-dire avec un taux de restriction annuel inférieur à 50 %. La fréquence de restrictions (F) indique la fréquence d'occurrence de restrictions de prélèvement d'eau d'irrigation supérieure à 50 % au pas de temps décennal et la résilience (Res), calculée comme l'inverse de la durée moyenne des restrictions, montre la rapidité avec laquelle les restrictions sont levées. La résilience varie entre 0 et 1, une valeur de 0.5 indiquant par exemple que la restriction est levée en moyenne après deux pas de temps. Les définitions de la restriction maximale¹, de la fiabilité² et de la résilience³ se sont appuyées sur les indicateurs utilisés dans la littérature pour évaluer les performances des systèmes d'approvisionnement en eau (Hashimoto *et al.*, 1982 ; Fowler *et al.*, 2003). Le dernier indicateur (C) est la fréquence d'occurrence de conflits de partage de l'eau. Comme mentionné plus haut, les années considérées comme conflictuelles sont celles au cours desquelles la MWD a connu une restriction de prélèvement de plus de 5 % de la demande pendant au moins une décennie.

¹ Aussi parfois appelée vulnérabilité dans la littérature.

² Fréquence d'années avec une fourniture globale en eau au moins supérieure à 50 % de la demande.

³ Indiquant à quelle vitesse le système retourne à l'équilibre, i.e. l'inverse de la durée moyenne des épisodes de restrictions.

3. Dynamiques des équilibres entre demande et disponibilité en eau

3.1. Reconstruction historique des dynamiques de demandes en eau

Les Figures D.11 et D.12 montrent la distribution spatiale de la demande en eau dans les années 2000 (2000–2009) ainsi que sa variation sur la période 1970–2009 à l'échelle du bassin de l'Hérault et du bassin de l'Ebre.

3.3.1. Variations passées sur le bassin de l'Hérault

La demande en eau est concentrée majoritairement dans les portions aval du bassin (Fig. D.11a). Dans les années 2000, les portions d'Agde et de Gignac, avec en moyenne $36 \text{ hm}^3/\text{an}$ et $30 \text{ hm}^3/\text{an}$ respectivement, représentaient ainsi 87 % de la demande totale en eau ($76 \text{ hm}^3/\text{an}$) du bassin. En particulier, le canal de Gignac, qui constitue le principal système d'irrigation du bassin, et le prélèvement de Florensac dans la basse vallée de l'Hérault, qui assure par transfert l'alimentation en eau potable de communes hors du bassin, représentaient respectivement 40 % et 27 % de la demande en eau totale du bassin. A l'échelle du bassin, cette demande totale se répartissait en moyenne dans les années 2000 en 52 % pour l'irrigation, 21% pour la demande municipale à l'intérieur du bassin et 27% pour les transferts d'eau vers les communes hors bassin. La demande en eau a augmenté significativement sur les 40 dernières années en passant de 59 hm^3 dans les années 1970 à 76 hm^3 dans les années 2000. Le pic de demande (Fig. D.11c) s'étend de juin à septembre avec un maximum en juillet (environ $9.5 \text{ hm}^3/\text{décade}$), en lien avec les besoins d'irrigation de la vigne sous conditions chaudes et sèches ainsi qu'avec la fréquentation touristique au sein et en dehors du bassin.

Trois portions (Agde, Gignac et Laroque) sont particulièrement représentatives en termes de contribution à la demande totale en eau et de dynamiques passées des usages. Dans la portion rurale de Laroque (Fig. D.11b), la demande en eau a diminué à partir des années 1980 en lien avec la déprise agricole. Au niveau de la portion de Gignac, 93 % de la demande en eau concerne la demande agricole avec en particulier le réseau d'irrigation de l'Association Syndicale Autorisée (ASA) du canal de Gignac, qui détourne une partie de l'eau de l'Hérault à Saint-Guilhem-le-Désert pour alimenter le périmètre irrigué de l'ASA, soit 102 secteurs d'irrigation d'environ 30 ha chacun. La variation interannuelle de la demande en eau sur les 40 dernières années reflète la sensibilité de la demande d'irrigation aux conditions climatiques. On observe par ailleurs une diminution sensible de la demande dans les années 2000 en lien avec la restauration du canal principal d'alimentation et la conversion de certains réseaux secondaires en systèmes pressurisés entreprises par l'ASA de Gignac pour améliorer l'efficacité hydraulique. Au niveau de la portion d'Agde, la demande en eau a doublé sur les 40 dernières années notamment du fait de l'augmentation des transferts d'eau hors bassin, qui représentaient 57 % de la demande totale en eau de cette portion dans les années 2000. Bien que la population ait augmenté régulièrement sur le bassin, on observe une diminution de la demande en eau municipale dans les années 2000, qui correspond à une diminution de la consommation unitaire sur la période récente en lien avec l'efficacité accrue des équipements ménagers et, dans une certaine mesure, avec une inflexion des comportements.

3.3.2. Variations passées sur le bassin de l'Ebre

La demande en eau d'irrigation prédomine et est distribuée de manière hétérogène au sein du bassin de l'Ebre. Cinq grands systèmes irrigués dans la plaine centrale concentraient ainsi 86 % de la demande en totale du bassin dans les années 2000 (Fig. D.12a). Les variations passées de la demande en eau au sein du bassin sont présentées au niveau de portions représentatives des principales caractéristiques et hétérogénéités du bassin. Comme pour la plupart des portions du bassin, la demande majoritaire au niveau de la portion de Bajo Cinca concerne l'irrigation : cette demande a quasiment doublé sur les 40 dernières années en lien avec une expansion des périmètres irrigués et des conditions climatiques plus déficitaires. L'arrêt de l'extension des zones irriguées dans les années 2000 a néanmoins conduit à une stabilisation de la demande en eau dans cette portion ainsi que dans d'autres portions telles que Bajo Ebro et Alto Ebro (Fig. D.12b). Au niveau de ces dernières portions, la demande en eau municipale pour l'alimentation dans et hors du bassin, ainsi que la demande en eau pour l'industrie et les centrales nucléaires, sont plus marquées bien que minoritaires, puisqu'elles représentaient environ 15 % de la demande totale en eau dans les années 2000 sur ces secteurs. Dans la portion de Bajo Ebro, on observe notamment l'impact de la mise en place d'une nouvelle centrale nucléaire en 1982 sur la demande en eau énergétique (Fig. D.12b). La déprise agricole et l'exode rural dans des portions amont telles que Esera ont conduit à une diminution significative de la demande en eau à partir des années 1990 (Fig. D.12b). A l'échelle du bassin, la demande totale en eau sur les 40 dernières années a

augmenté d'environ 50 % en passant de 4 150 hm³/an dans les années 1970 à 6 340 hm³/an dans les années 2000. Avec un pic de demande en eau maximum de 500 hm³/décade en juillet, l'irrigation a lieu de mars à septembre en lien avec les besoins en eau d'une production agricole diversifiée.

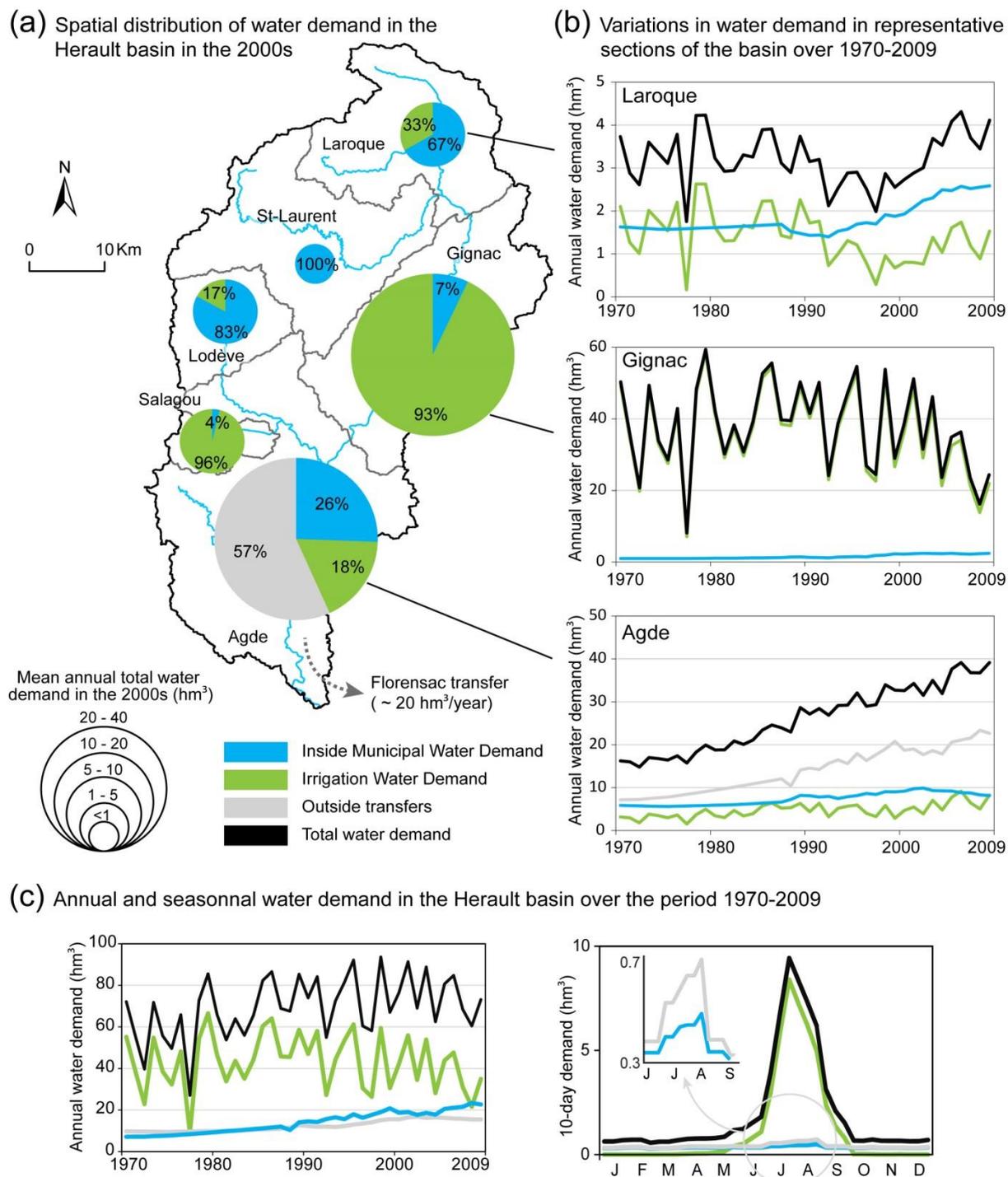


Figure D.11. Dynamiques spatiales et temporelles de la demande en eau au sein du bassin de l'Hérault : (a) distribution spatiale de la demande en eau moyenne dans les années 2000 ; (b) variation interannuelle de la demande en eau sur la période 1970–2009 au niveau de trois portions représentatives ; (c) variation interannuelle et dynamique saisonnière moyenne de la demande en eau sur la période 1970–2009 à l'échelle du bassin. ([ACL2]).

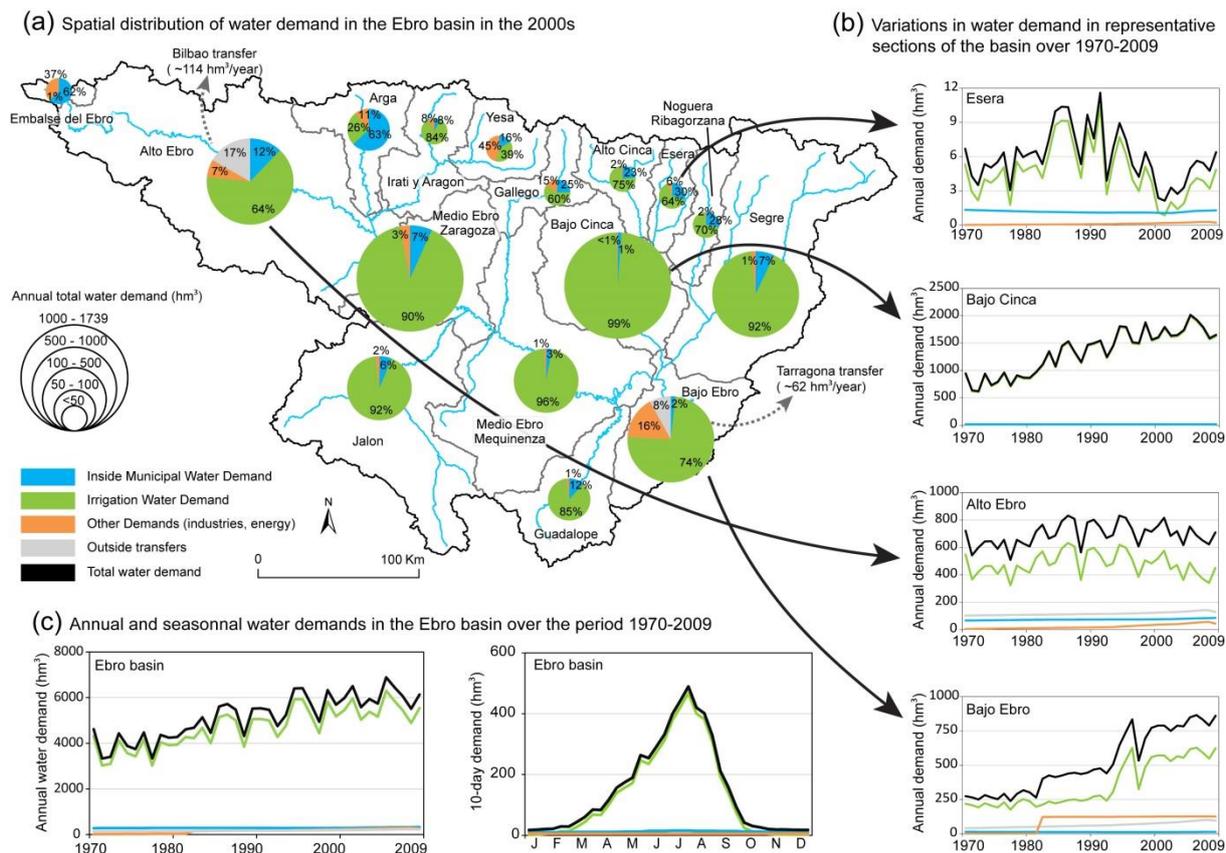


Figure D.12. Dynamiques spatiales et temporelles de la demande en eau au sein du bassin de l’Ebre : (a) distribution spatiale de la demande en eau moyenne dans les années 2000 ; (b) variation interannuelle de la demande en eau sur la période 1970–2009 au niveau de quatre portions représentatives ; (c) variation interannuelle et dynamique saisonnière moyenne de la demande en eau sur la période 1970–2009 à l’échelle du bassin. ([ACL2]).

3.2. Performance de la chaîne de modélisation intégrée

3.2.1. Simulation des écoulements naturels

Les résultats de calage et de validation de la simulation des écoulements naturels par le modèle hydrologique sont présentés dans le Tableau D.2. Globalement, les résultats sont satisfaisants sauf pour quelques sections à l’aval des hydrosystèmes pour lesquelles le débit est extrêmement perturbé et dont les débits naturels disponibles pour le calage sont quasiment inexistants. Cependant, il faut noter que les sous-bassins pour lesquels les performances du modèle hydrologique sont moindres, produisent une faible proportion du débit total du bassin.

Pour le bassin de l’Hérault, les valeurs de NSE sont supérieures à 0.8 et les erreurs de volume (VE) négligeables dans tous les sous-bassins, sauf dans la section d’Agde. Dans les sections amonts de Saint-Laurent et de Laroque, les valeurs de NSE pour la période de validation sont légèrement inférieures (0.79 et 0.72 respectivement) et les erreurs de volume ont tendance à augmenter légèrement. L’absence de données de débits observés dans les années 1970 dans les sous-bassins de Gignac, Salagou et Agde ne permet pas la validation pour ces sections.

La simulation des débits naturels de l’Ebre est conforme aux débits observés dans les sous-bassins les plus contributifs, i.e., les sous-bassins pyrénéens et l’Ebre en amont de la rivière Aragon. Dans ces sous-bassins, les valeurs de NSE sont supérieures à 0.6 et les erreurs de volume (VE_M et valeur absolue de VE) sont inférieures à 18 % pour les périodes de calage et de validation, avec une exception pour le sous-bassin de la Noguera Ribagorzana en amont du barrage de Santa Ana. Dans ce sous-bassin trois barrages successifs (Escalles, Canelles et Santa Ana) ont été simulés comme un seul grand barrage localisé à l’emplacement de celui de Santa Ana (voir section D.2.5.) multipliant ainsi les erreurs possibles dans l’estimation des débits naturels pris en compte pour le calage et la validation. Pour les bassins 13, 14 et 20 (l’Ebre à Saragosse, Mequinenza et Tortosa ; voir Tableau D.2) les résultats montrent de mauvais scores de calage et de validation. Le niveau élevé d’influence anthropique dans ces bassins laisse peu de mesures pour le calage des modèles et en explique la

mauvaise performance. La simulation des débits par le modèle hydrologique pour ces bassins est donc considérée comme peu réaliste. Cependant, les conditions climatiques et topographiques de la moyenne et basse vallée de l'Ebre entraînent une faible contribution de ces bassins au débit total à l'exutoire. Pour le reste de l'étude, les contributions en débits naturels de ces sous-bassins ont donc été considérées comme nulles.

Tableau D.2. Résultats de calage et de validation des débits naturels des bassins versants de l'Hérault et de l'Ebre. Les valeurs optimales de NSE, VE et VEM sont respectivement de 1, 0 et 0. ([ACL4]).

		Calage			Validation			Débit annuel moyen simulé (m ³ /s) 1971–2009
		NSE	VE	VE _M	NSE	VE	VE _M	
Hérault								
	1-Vis à St Laurent	0.88	0%	11%	0.79	19%	16%	10
	2-Hérault à Laroque	0.80	0%	21%	0.72	-15%	22%	9
	3-Hérault à Gignac	0.83	0%	19%	NA	NA	NA	8
	4-Lergue à Lodève	0.84	0%	26%	0.94	-5%	9%	4
	5-Salagou	0.95	0%	6%	NA	NA	NA	1
	6-Hérault à Agde	0.34	0%	60%	NA	NA	NA	11
Ebre								
	1-Ebre à Arroyo	0.83	0%	8%	0.73	-13%	12%	10
	2-Ebre à Castejon	0.76	0%	5%	0.64	-10%	10%	123
	3-Arga	0.82	0%	9%	0.72	-11%	18%	38
	4-Irati à Liedena	0.85	0%	9%	0.87	0%	7%	29
	5-Aragon à Yesa	0.83	0%	7%	0.78	-15%	15%	38
	6-Gallego à Ardisa	0.73	0%	12%	0.62	-2%	12%	25
	7-Cinca à Grado	0.80	0%	5%	0.83	3%	4%	42
	8-Esera	0.71	0%	7%	0.67	-6%	7%	21
	9-Noguera Ribagorzana	0.34	0%	10%	0.57	-6%	28%	20
	10-Noguera Pallaresa	0.66	0%	12%	0.72	-13%	14%	31
	11-Segre à Oliana	0.73	0%	11%	0.72	-17%	17%	26
	12-Aragon à Caparroso	0.39	0%	20%	0.16	-46%	44%	6
	13-Ebre à Saragosse	0.13	0%	21%	-1.55	25%	2%	28
	14-Ebre à Mequinenza	0.02	0%	5%	-1.15	5%	0%	13
	15-Cinca à Fraga	0.61	0%	3%	0.18	-53%	18%	13
	16-Segre à Seros	0.30	-20%	60%	0.13	-24%	51%	11
	17-Piedra	0.62	0%	9%	0.16	-12%	16%	3
	18-Jalon à Grisen	0.76	0%	24%	-0.91	-52%	10%	4
	19-Guadalope	0.71	0%	43%	NA	NA	NA	2
	20-Ebre à Tortosa	0.07	0%	83%	-0.59	39%	124%	30

3.2.2. Simulation du fonctionnement des barrages-réservoirs

La Figure D.13 représente la simulation des volumes des barrages-réservoirs en regard des volumes observés. La gestion saisonnière est bien représentée pour la plupart des barrages. De plus, les variations interannuelles simulées des niveaux de réservoir correspondent aux observations (voir par exemple les barrages Ebre, Sotonera et Tranquera, Fig. D.13b). Malgré la complexité de leur gestion, les barrages de Yesa et Grado sont simulés de manière satisfaisante avec des valeurs de NSE respectives de 0.68 et 0.56 et des erreurs de volume moyen de 9 et 8 %. Les simulations du Salagou aboutissent à un score de 0.53 pour le NSE et de 1 % pour l'erreur de volume moyenne (VE_M) pour la période 1990–2009 (les données de niveau du réservoir du Salagou débutent en 1990). Comme la Figure D13a le montre, les niveaux du réservoir connaissent des variations saisonnières significatives à partir de 1986, date de mise en service de la turbine hydroélectrique et marquent l'augmentation de la demande d'eau d'irrigation à partir des années 1990.

3.2.3. Simulation des écoulements influencés

Les débits influencés sont correctement simulés dans le bassin de l'Hérault (voir Fig. D.14a) avec des valeurs de NSE supérieures à 0.8 pour tous les sous-bassins pour la période de calage et de validation, excepté pour la sortie du barrage du Salagou qui a été moyennement simulée par le modèle barrage. Cependant, la contribution des sorties du barrage du Salagou au débit à l'exutoire de l'Hérault est très faible.

Les résultats à l'exutoire du bassin de l'Ebre (voir Fig. D.14b) montrent que la simulation des débits influencés de cet hydrosystème complexe sont correctement simulés : l'assemblage de toutes les simulations produit un débit influencé à l'exutoire conduisant à un score de NSE et d'erreur de volume de 0.68 et -6 % respectivement pour la période de calage et de 0.64 et -12 % pour la période de validation. Les débits influencés des systèmes Cinca et Segre sont mal reproduits avec des valeurs de NSE inférieures à 0.5 et des

valeurs de NSE négatives pour les étiages (NSE_{LF} , voir section 2.6.) sur la période de calage. Les débits à l’aval du bassin du Segre sont influencés par les sorties des barrages de Santa Ana, Talarn et Oliana qui ont des règles de gestion complexes.

La capacité à représenter les étiages observés, qui sont fortement influencés par la gestion des barrages et par les prélèvements, est un indicateur important de l’efficacité de la chaîne de modélisation. Les étiages sont correctement simulés à l’exutoire de l’Hérault (Hérault à Agde) avec des valeurs NSE_{LF} de 0.66 et 0.87 respectivement pour les périodes 1981–2009 et 1971–1980. Les faibles valeurs de NSE_{LF} pour la Vis à Saint-Laurent et pour l’Hérault à Laroque sont très probablement dues aux difficultés du modèle à reproduire le fonctionnement du système karstique de ces bassins sur les périodes humides alors qu’il a été calé sur une période plus sèche. Les étiages de quelques bassins de l’Ebre sont mal simulés, particulièrement pour le Cinca et le Segre, où les étiages ne sont plus naturels et dépendent presque exclusivement des sorties de divers barrages.

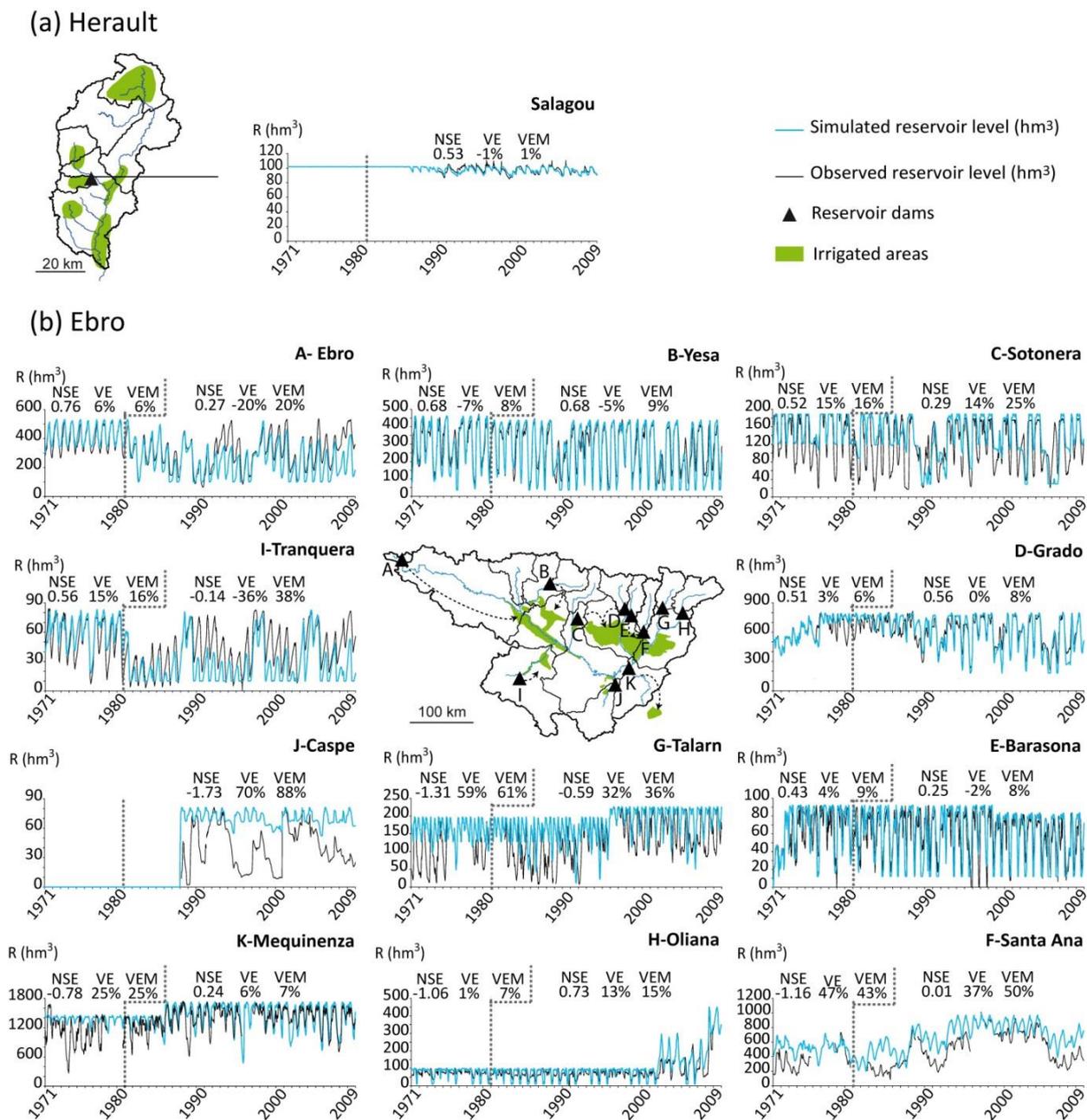
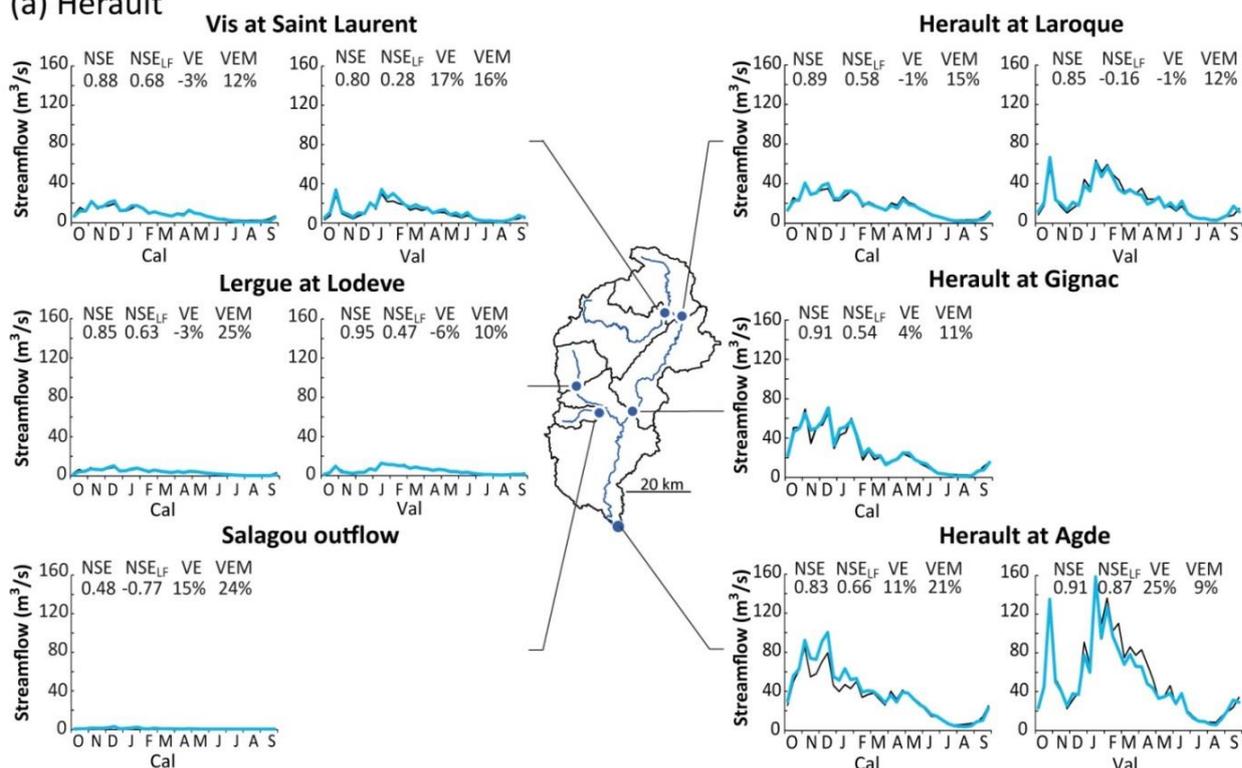


Figure D.13. Volumes d’eau (R) observés et simulés dans les principaux barrages réservoirs (a) de l’Hérault et (b) de l’Ebre. Les résultats pour les périodes de calage (1981–2009) et de validation (1971–1980) des débits naturels sont séparés par une ligne pointillée grise. Les valeurs optimales de NSE, VE et VEM sont respectivement de 1, 0 et 0. ([ACL4]).

(a) Hérault



(b) Ebro

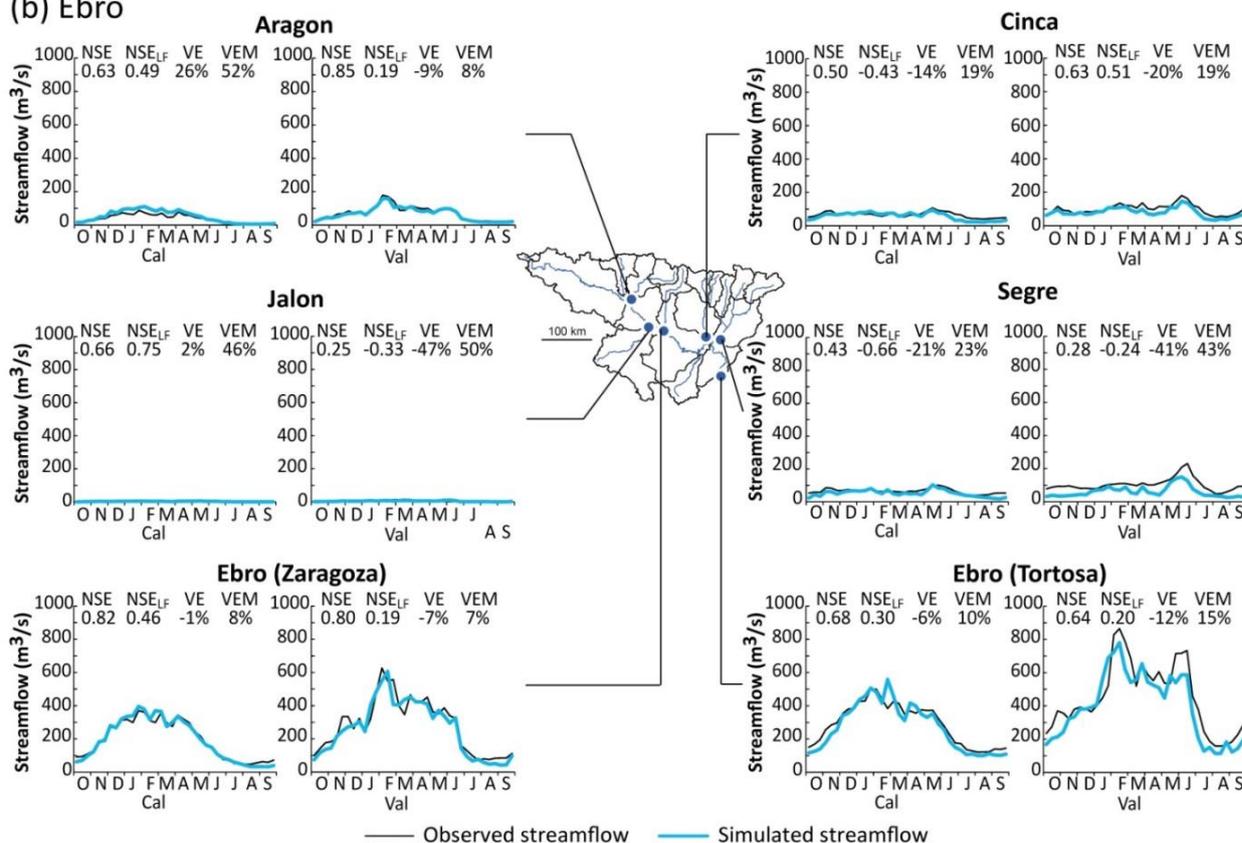


Figure D.14. Simulation des débits influencés de 1971 à 2009 au sein (a) du bassin de l'Hérault et (b) du bassin de l'Ebre : résultats des périodes de calage (Cal : 1981–2009) et de validation (Val : 1971–1980). Les valeurs optimales respectives de NSE, NSE_{LF}, VE et VEM sont de 1, 1, 0 et 0. ([ACL4]).

3.3. Analyse des changements passés dans les débits observés

3.3.1. Evolution de la demande en eau

Comme cela a déjà été détaillé dans la section D.3.1, la demande totale en eau dans le bassin de l'Hérault a doublé entre les années 1970 (24 hm³/an) et les années 2000 (53 hm³/an) principalement à cause d'une augmentation significative des demandes municipales MWD (de 18 hm³/an dans les années 1970 à 36 hm³/an dans les années 2000), particulièrement pour le transfert de Florensac dans la section d'Agde où les MWD ont plus que doublé (voir Figs. D.11 et D.15a). La demande totale en eau d'irrigation (IWD) a également augmenté (de 6 à 17 hm³/an entre les années 1970 et 2000) avec des hétérogénéités au sein du bassin. Dans la section amont de Laroque, l'IWD a diminué dans les années 1990 du fait de la déprise agricole puis s'est stabilisée dans les années 2000. Dans les autres sections amont, la demande d'irrigation a augmenté de manière significative mais les volumes demandés restent malgré tout très faibles. L'augmentation simulée de la demande d'irrigation dans le bassin de l'Hérault est principalement due à des conditions climatiques plus chaudes et plus sèches à partir des années 1980, qui ont conduit à un triplement de la demande dans la section de Gignac (Figs. D.11 et D.15a).

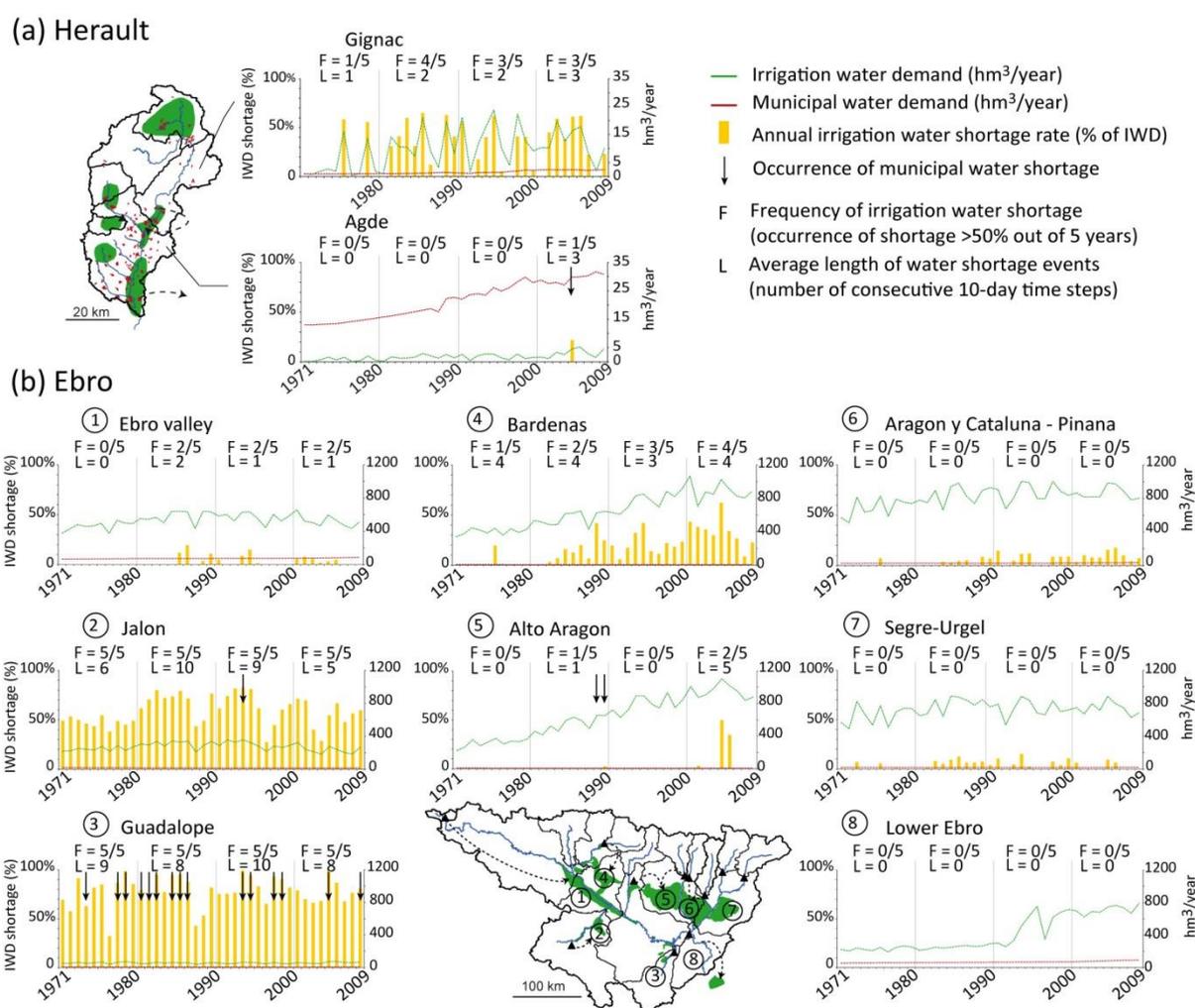


Figure D.15. Fréquence et intensité des restrictions municipales et d'irrigation sur la période 1971–2009 en tenant compte des dynamiques spatiales et temporelles des usages et des conditions hydro-climatiques dans (a) le bassin de l'Hérault et (b) le bassin de l'Ebre. ([ACL4]).

La demande totale du bassin de l'Ebre a augmenté de 4 330 hm³/an dans les années 1970 à 6 820 hm³/an dans les années 2000, avec la plus grande augmentation dans les décennies 70 et 80. Comme le montre la Fig. D.15b, la principale augmentation de l'IWD s'est produite dans les systèmes irrigués de Bardenas et de Alto Aragon (de 400 à 880 hm³/an et de 320 à 950 hm³/an respectivement entre les années 1970 et 2000). Dans la plaine centrale de l'Ebre et les systèmes Aragon et Catalunya et Segre, la IWD a augmenté entre les années 70

et 80 et s'est stabilisée (voire a légèrement diminué pour la plaine de l'Ebre) après 1990. Sur la rive droite, la demande d'irrigation est restée identique avec un pic dans les années 1980 dans le sous-bassin du Jalón.

3.3.2. Impact de la variabilité climatique sur les écoulements naturels

Les changements simulés des débits naturels à l'exutoire de l'Hérault et de l'Ebre sont présentés en Figure D.16. Les décennies 1980 et 2000 apparaissent comme particulièrement sèches en comparaison des décennies 1970 et 1990, surtout dans le bassin de l'Hérault. Dans les deux bassins, les débits naturels simulés diminuent de 20 % entre les périodes 1971–1980 et 1981–2009.

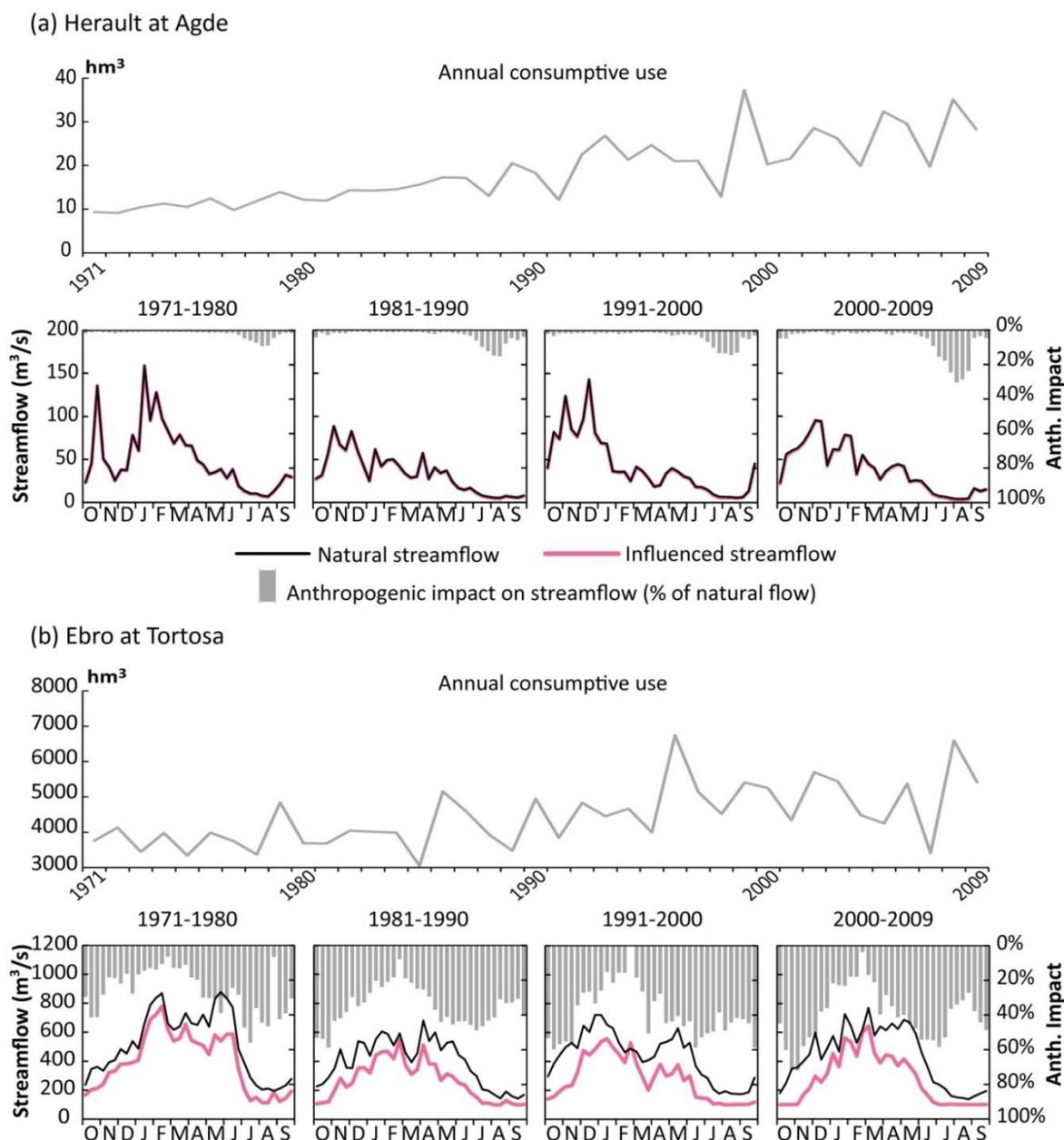


Figure D16. Comparaison des débits naturels et influencés : impacts anthropiques (consommation et stockage) sur (a) l'Hérault et sur (b) l'Ebre. ([ACL4]).

A Agde, le débit naturel du fleuve Hérault a diminué en hiver, au printemps et en été (-52, -30 et -39 % respectivement) et augmenté en automne (+36 %). Des changements similaires sont observés dans les sections amont avec une baisse encore plus importante en été à Laroque et Gignac (-47 et -48 % respectivement). Le débit naturel du fleuve Ebre a aussi diminué en hiver, au printemps et en été (-21, -29 et -23 % respectivement) et a légèrement augmenté en automne (+8 %). Dans les sous-bassins au régime nival tels que le Cinca ou le

Segre, le pic de débit a lieu un mois plus tôt (mai au lieu de juin) après 1980 et les débits diminuent au printemps et en été.

Ces changements dans les débits naturels simulés des deux bassins d'étude s'accordent avec les tendances climatiques observées, i.e. une diminution des précipitations hivernales et une augmentation des précipitations automnales entre les périodes 1971–1980 et 1981–2009, associées à une augmentation de température annuelle d'environ 1°C.

3.3.3. Impact relatif des facteurs anthropiques et climatiques sur les écoulements

La Figure D.16 montre également que la consommation nette a augmenté entre 1971 et 2009 dans les deux bassins, à la fois en valeur absolue et en pourcentage du débit naturel. La consommation nette moyenne annuelle est passée de 11 hm³/an (1 % du débit naturel moyen annuel) dans les années 1970 à 27 hm³/an (2 % du débit naturel moyen annuel) dans les années 2000 pour le bassin de l'Hérault, et de 3 830 hm³/an (24 % du débit naturel moyen annuel) dans les années 1970 à 5 000 hm³/an (38 % du débit naturel moyen annuel) dans les années 2000 pour le bassin de l'Ebre. La consommation nette annuelle s'est stabilisée dans les années 2000 pour les deux bassins versants.

Dans le bassin de l'Hérault, l'impact des usages est particulièrement marqué en été : il atteint 30 % du débit naturel entre mi-juillet et mi-août dans les années 2000 (Fig. D.16a). Pour le bassin de l'Ebre, le rôle des barrages-réservoirs est clairement visible avec un impact anthropique qui diminue en juillet et en août quand les prélèvements se font dans ces barrages.

La simulation des débits naturels et des débits influencés a rendu possible la distinction entre les variations dues au climat et celles dues à la consommation anthropique. Dans les parties amont de l'Hérault (Saint-Laurent, Laroque et Lodève, courbes ne figurant pas sur la Figure D.16a) la diminution du débit entre 1971–1980 et 1981–2009 est uniquement liée à une diminution des débits naturels. Dans les sections d'Agde et de Gignac, 1 et 3 %, respectivement, de la baisse annuelle du débit influencé peut s'expliquer par l'augmentation de la consommation nette. Les simulations montrent également que 80 % de la baisse des débits influencés du bassin de l'Ebre à son exutoire entre 1971–1980 et 1981–2009 sont liés à une baisse du débit naturel et 20 % à une augmentation des consommations. Ces proportions varient à l'intérieur du bassin versant : 75–25 % dans le bassin de l'Aragon, 50–50 % dans le bassin du Cinca et une diminution de la consommation dans le bassin du Segre.

3.4. Analyse des équilibres entre demande et disponibilité en eau

3.3.1. Restrictions d'eau simulées sur 1971–2009

La Figure D.15 montre les restrictions simulées entre 1971 et 2009 pour les bassins de l'Hérault et de l'Ebre. Les résultats sont présentés uniquement pour les sections de Gignac et d'Agde pour le bassin de l'Hérault car elles concentrent la majorité des usages et que les simulations n'ont pas montré d'occurrence de restriction pour les autres sous-bassins. La Figure D.15a montre la forte occurrence de restrictions d'irrigation dans la zone de Gignac à partir des années 1980. Bien que les demandes aient légèrement diminué dans les années 2000 grâce à l'amélioration de l'efficacité du canal de Gignac, les événements de restrictions continuent d'apparaître 3 années sur 5. A Agde, les demandes municipales et d'irrigation croissantes continuent d'être satisfaites jusqu'aux années 2000. Les restrictions municipales et d'irrigation apparaissent en 2005, année sèche. Ces résultats sont conformes aux informations fournies par les gestionnaires locaux sur l'occurrence des problèmes d'approvisionnement en eau dans le bassin de l'Hérault sur les 40 dernières années : les principaux enjeux concernant la fourniture d'eau agricole sont concentrés autour du canal de Gignac, tandis que des conflits d'usage pourraient apparaître dans la section aval d'Agde. L'année 2005 fût notable pour des tensions autour de l'eau dans le bassin avec des restrictions strictes sur les usages et des négociations qui ont abouti à des lâchers exceptionnels du barrage du Salagou pour le soutien d'étiage du fleuve Hérault.

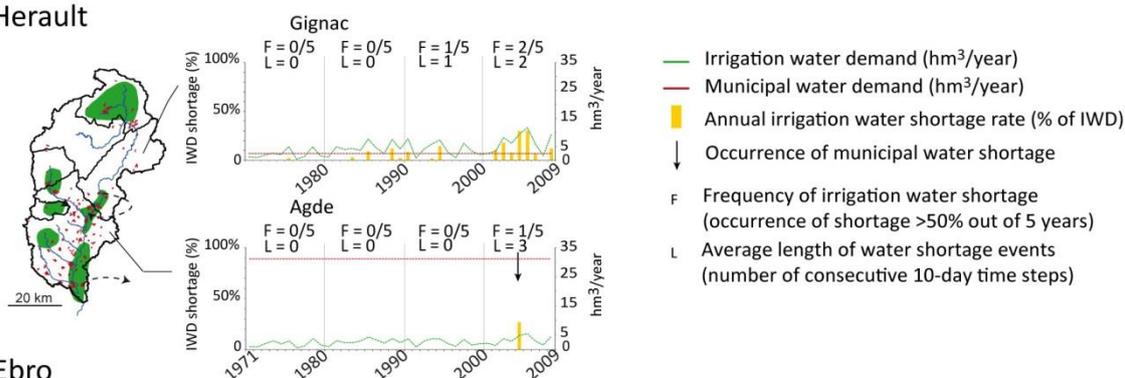
La Figure D.15b montre les résultats des simulations de restrictions pour huit principaux systèmes irrigués du bassin de l'Ebre. Les sections de la rive droite sont très exposées aux pénuries, particulièrement le sous-bassin du Guadalope. Bien que quelques restrictions d'irrigation aient pu se produire dans toutes les régions du bassin de l'Ebre entre 1971 et 2009, à l'exception de la basse vallée de l'Ebre, des restrictions supérieures à 50 % de la demande sont simulées seulement dans les sections vallée de l'Ebre, Bardenas et Alto Aragon. Dans le cas du système irrigué de Bardenas, l'augmentation des restrictions suit l'une augmentation de la demande. La capacité de stockage de ce système (barrage de Yesa) est en cours d'augmentation d'environ 600 hm³. Dans le système Alto Aragon, les barrages Sotona et Grado ont été gérés conjointement depuis 1982, ce qui a aidé à maintenir un équilibre entre les demandes et les ressources malgré une augmentation

significative des demandes dans cette zone (de 320 à 950 hm³/an entre les années 1970 et les années 2000). Cependant des restrictions d'usage sont apparues dans les années 2000. La construction de nouveaux réservoirs d'une capacité d'environ 400 hm³ est d'ores-et-déjà planifiée dans cette zone.

3.3.2. Viabilité des usages de l'eau actuels sous les conditions climatiques de 1971–2009

Dans la zone de Gignac du bassin de l'Hérault, l'impact de l'augmentation de l'efficacité du canal dans les années 2000 est clair. Tandis que les demandes d'irrigation ont atteint en moyenne 13 hm³/an et les restrictions 3 années sur 5 dans les années 1990 (voir Fig. D.15a), les demandes ne seraient que de 4 hm³/an et les restrictions d'une année sur 5 en moyenne avec les mêmes surfaces irriguées et l'efficacité actuelle sous les mêmes conditions climatiques (Fig. D.17a). Cependant, les restrictions seraient plus fréquentes et intenses avec les conditions plus chaudes et plus sèches des années 2000, avec à la fois une augmentation de la demande due à l'augmentation de l'évapotranspiration et à la diminution des précipitations et à une réduction des ressources disponibles (voir Fig. D.16a). La Figure D.18 montre que globalement les équilibres ressource-demande sont plus satisfaisants pour l'hydrosystème de l'Hérault que pour celui de l'Ebre. Hormis le Salagou avec une restriction maximale de 70 % et une résilience de 0.3 et la zone d'Agde avec une résilience de 0.3, les indicateurs restent dans une zone acceptable pour tous les sous-bassins de l'Hérault.

(a) Herault



(b) Ebro

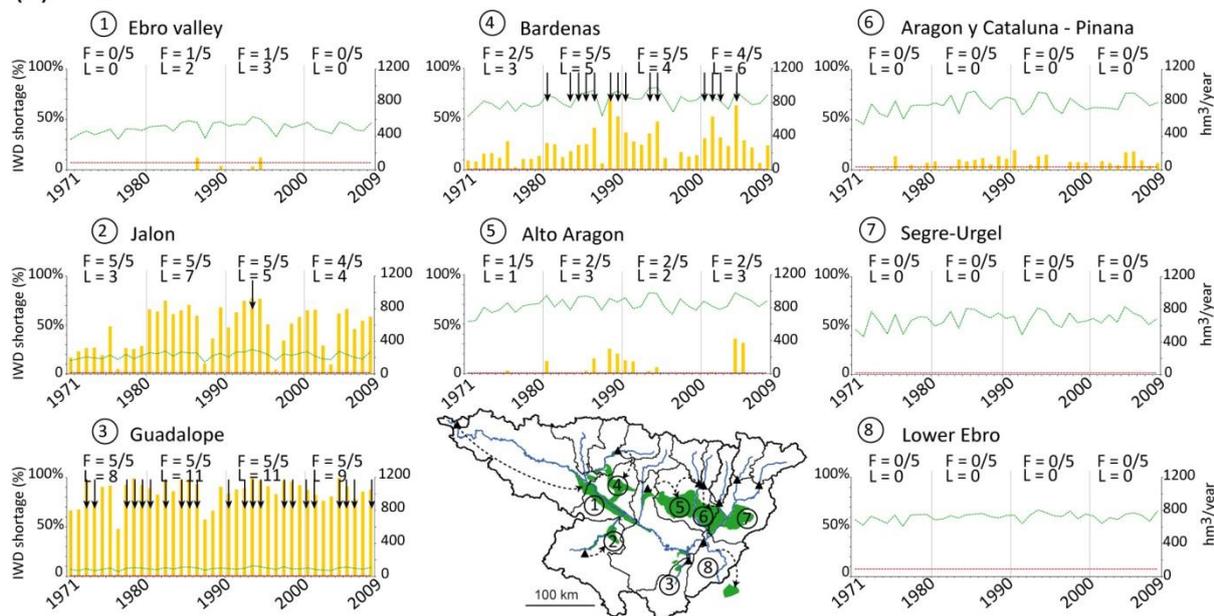


Figure D.17. Fréquence et intensité des restrictions d'irrigation et municipales avec les usages actuels (2009) sous contrainte des conditions climatiques de la période 1971–2009 dans (a) le bassin de l'Hérault et (b) le bassin de l'Ebre. ([ACL4]).

S'agissant de l'Ebre, les usages actuels des secteurs Aragon et Catalunya, vallée de l'Ebre, Segre-Urgel et basse-vallée de l'Ebre (Lower Ebro) montrent un équilibre durable entre ressources et demandes si les conditions climatiques conservent la variabilité observée dans un passé récent (1971–2009). La comparaison des Figures D.15b et D.17b montre une amélioration de l'équilibre ressource-demande du système irrigué Segre-Urgel due

à la construction du barrage Rialb au début des années 2000, qui s'ajoute à la capacité de stockage du barrage d'Oliana. La gestion combinée de ces deux barrages permet de réduire le taux de restrictions d'irrigation (Fig. D.17b) en regard de la seule utilisation du barrage d'Oliana sans la capacité additionnelle de Rialb (Fig. D.15b). D'un autre côté, l'expansion des périmètres irrigués dans les systèmes Bardenas et Alto Aragon semble avoir contribué à une augmentation des restrictions d'eau visible sur la Figure D.15b. La Figure D.17b montre que les usages actuels du système Bardenas ne seraient pas satisfaits par les ressources disponibles sous les conditions climatiques 1971–2009. Dans ses modes actuels d'usages et de gestion et sous les conditions climatiques des quarante dernières années, cette zone pourrait faire face à de nombreux et long épisodes de restriction (MS = 75 % et Res=0.2, Fig. D.18) même si, en général, le système peut être considéré comme durable dans la mesure où les années avec un déficit total supérieur à 50 % apparaissent dans nos simulations moins souvent qu'une année sur 5 (voir Fig. D18). Finalement, les zones du Jalón et de Guadalupe apparaissent comme particulièrement déséquilibrées même si aucun conflit d'usage n'est simulé pour le Jalón (C=0) du fait de très faibles demandes municipales (MWD).

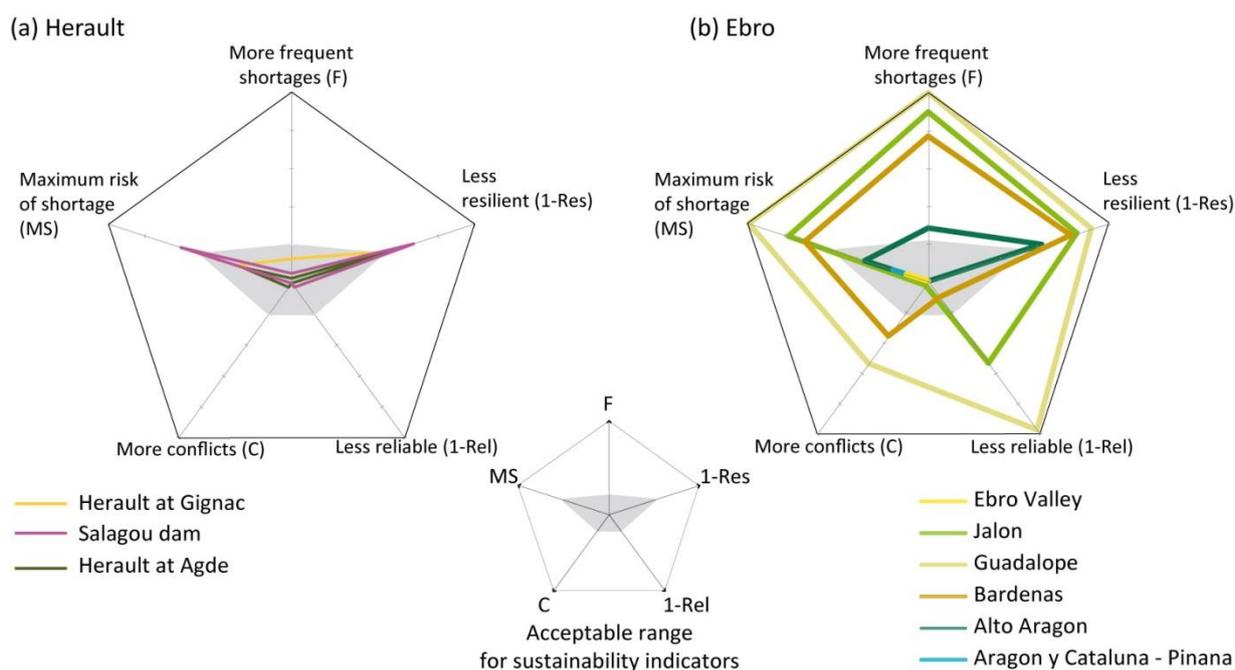


Figure D.18. Viabilité des usages actuels (2009) sous conditions hydro-climatiques 1971–2009 pour les bassins de (a) l’Hérault et (b) de l’Ebre : fréquence des restrictions d’usage agricole (F) et conflits d’usage (C) en nombre d’années sur 5, résilience (Res), restriction agricole maximale (MS) et fiabilité (Rel) aux principaux nœuds de demande de chaque bassin. Seuls les nœuds de demande présentant au moins un indicateur non nul sont présentés ici. ([ACL4]).

4. Conclusion

Cette partie a permis de présenter la chaîne de modélisation intégrée mise en œuvre dans le cadre du projet pour évaluer les équilibres entre disponibilité et demande en eau sur les deux bassins d’étude. Elle a également permis de montrer la capacité de cette chaîne à reproduire des tensions/déficits historiques sur une période de 40 ans (1971–2009) à travers des indicateurs de stress hydriques caractérisés par des valeurs de durée, fréquence et amplitude des restrictions d’usage.

L’analyse des tendances passées a ainsi permis de mettre en évidence les déterminants de l’évolution passée des équilibres ressource/demande sur les deux bassins et d’identifier les causes des changements observés dans les débits mesurés. Un exercice de simulation sur la période 1971–2009 avec des usages figés à ceux de 2009 a aussi permis d’explorer le caractère durable des modes de gestion et pratiques actuels sous climat non modifié.

Dans le bassin de l’Hérault, les besoins d’irrigation de la vigne ont augmenté et ont été soumis à une grande variabilité. La demande en eau municipale a également augmenté significativement notamment du fait d’une augmentation de la population desservie par le transfert d’eau vers des communes situées hors du bassin. Des conflits d’usage sont ainsi apparus sur le bassin. La satisfaction des demandes en eau d’irrigation dans le secteur de Gignac semble particulièrement sensible à la variabilité hydro-climatique. Néanmoins,

l'amélioration de l'efficacité d'irrigation à partir des années 1990 dans ce secteur a permis de limiter les restrictions d'irrigation. Au niveau de la portion d'Agde, des restrictions ont émergé dans les années 2000 du fait de l'augmentation des demandes municipales et d'irrigation en conjonction avec une diminution des écoulements naturels. Les simulations suggèrent ainsi des tensions pour l'année 2005, ce qui est conforme aux témoignages des acteurs présents sur le territoire. Bien que la demande municipale ait également augmenté sur le bassin de l'Ebre, celle-ci reste très faible en comparaison de la demande d'irrigation. Le principal déterminant de la dégradation de la satisfaction des demandes en eau sur ce bassin semble être l'augmentation de la demande en lien avec l'extension des secteurs irrigués, qui a conduit à dépasser la capacité d'allocation dans les conditions actuelles de stockage et de gestion.

Bien que des secteurs du bassin de l'Hérault aient été très sensibles à la variabilité hydro-climatique, les équilibres entre les usages et la disponibilité en eau semblent plus critiques au sein du bassin de l'Ebre du fait d'une forte pression agricole sur la ressource en eau. Néanmoins, la capacité d'allocation en eau semble avoir été assurée dans les grands systèmes comme Ebro Valley, Aragon et Catalunya, Segre, et Lower Ebro, qui concentrent 60 % de la demande en eau des grands systèmes irrigués du bassin. En comparaison, le secteur de Gignac représente à lui seul près de 70 % de la demande d'irrigation de tout le bassin. De plus, les vignobles sur le bassin de l'Hérault peuvent être plus vulnérables à des insatisfactions d'irrigation que les cultures céréalières et fourragères du bassin de l'Ebre, où les assolements peuvent être ajustés d'une année sur l'autre pour s'adapter aux conditions hydro-climatiques. La distribution spatiale proposée à travers l'approche de modélisation développée a permis d'identifier les zones les plus vulnérables : ainsi, les principaux enjeux pour maintenir et atteindre l'adéquation ressource/demande concernent les portions de Gignac et d'Agde sur le bassin de l'Hérault, et les secteurs situés sur la rive droite et au niveau des systèmes irrigués de Bardenas et Alto Aragon au sein du bassin de l'Ebre.

Malgré de nombreuses limites et incertitudes inhérentes à la modélisation qui seront discutées en fin de rapport¹, la chaîne de modélisation développée a été jugée utile pour simuler l'évolution des équilibres entre disponibilité et demande en eau sous contrainte de scénarios complexes de changement climatique et d'usages de l'eau à l'horizon 2050.

Projections climatiques et anthropiques à l'horizon 2050 et impacts sur la demande en eau

1. Introduction

Cette section présente les méthodes mises en œuvre dans le cadre du projet pour construire des scénarios d'évolution climatique et anthropique à l'horizon 2050 à l'échelle des deux bassins d'étude, afin d'étudier leur impact combiné sur la demande et la disponibilité en eau en vue d'une utilisation dans la chaîne de modélisation pour explorer l'adéquation des équilibres ressource/demande à moyen terme.

2. Simulations climatiques

2.1. Méthodes statistiques de régionalisation

2.1.1. Principe de désagrégation statistique

Les sorties de GCM ou les données de réanalyses ont des résolutions spatiales (~250 km x 250 km) souvent insuffisantes pour des études d'impact des changements climatiques locaux ou régionaux comme dans le cadre du projet REMedHE. Pour obtenir des données climatiques à haute résolution, il est donc nécessaire de réaliser une descente d'échelle (« *downscaling* »). Le *downscaling* climatique est l'opération qui consiste à passer de données à faible résolution spatiale (~250 km x 250 km) – fournies par des réanalyses climatiques (ici NCEP/NCAR, Kalnay *et al.*, 1996) ou des GCMs – à des simulations à l'échelle locale ou régionale (e.g. résolution de 8 km x 8 km), soit une résolution sensiblement plus fine.

¹ Reconstruction historique des usages de l'eau et demandes associées, simulation des débits influencés par les prélèvements et la gestion des ouvrages hydrauliques, non-prise en compte explicite des types d'aquifères et pompages associés, validation limitée, voire impossible, de certaines simulations, etc.

Deux grandes familles de descente d'échelle existent : dynamique et statistique. Nous avons utilisé pour les besoins de cette étude l'approche statistique de *downscaling*. Avec cette approche, nous faisons le lien entre la grande échelle et la petite échelle à l'aide de modèles statistiques.

2.1.2. Description des modèles statistiques utilisés

Afin de disposer d'un ensemble de simulations statistiques et non pas d'un unique jeu de données dont la qualité et la variabilité ne sont pas nécessairement représentatives de la majorité des approches de *downscaling* statistique, trois types de modèles statistiques de descente d'échelle ont été appliqués : (i) une approche déterministe (*Generalized Additives Model*, GAM) ; (ii) une approche stochastique (*Vector Generalized Linear Models*, VGLM) ; et (iii) une troisième méthode qui s'apparente à de la correction de biais (CDF-t).

Generalized Additive Model (GAM)

Un modèle additif généralisé (GAM) est une approche de type fonction de transfert. Il s'agit d'une approche déterministe. Les modèles GAM ajoutent aux propriétés des modèles de type GLM l'utilisation de régressions non-linéaires avec des propriétés additives (Hastie & Tibshirani, 1990) entre les variables locales observées (prédicteurs) et les données à grande échelle (prédicteurs). De manière plus précise, GAM modélise l'espérance conditionnelle du prédicteur (Y) au jour i sachant les n prédicteurs $(X_{i,k})_{k=1,\dots,n}$ comme une somme de n fonctions splines $f(X_{i,k})$:

$$E(Y_i | X_{k,k=1\dots n}) = \beta_0 + \sum_{k=1}^n f_k(X_{i,k}) \quad (3)$$

où β_0 est un paramètre constant également à estimer. En pratique, la valeur de l'espérance conditionnelle est prise pour représenter la valeur de la variable au jour i.

Modèle Stochastique (VGLM)

Une méthode stochastique a également été mise en place. La différence entre les modèles déterministes comme GAM et les modèles stochastiques est qu'avec la seconde approche, nous cherchons à simuler la valeur de la variable d'intérêt à partir d'une estimation de sa densité de probabilité. Autrement dit, une approche stochastique va généralement modéliser les paramètres de la distribution (e.g. Chandler & Wheeler, 2002) en fonction des prédicteurs à grande échelle, puis simuler une valeur (une « réalisation ») à partir de cette fonction de densité de probabilité (pdf).

La température suivant généralement une loi gaussienne, nous avons utilisé une distribution normale dont les paramètres (moyenne m et variance v) sont fonctions linéairement des prédicteurs.

Concernant les précipitations nous avons dissocié la modélisation des occurrences de pluies de son intensité. La probabilité de l'occurrence est modélisée à l'aide d'une distribution binomiale selon une régression logistique (Jeffries & Pfeiffer, 2000 ; Vrac & Naveau, 2007) :

$$\log\left(\frac{Y_i = 1}{Y_i = 0}\right) = P_{i,0} + \sum_{j=1}^p p_j X_{i,j} \quad (4)$$

où $Y_i = 1$ représente la probabilité de pluie du prédicteur, $Y_i = 0$, la probabilité qu'il ne pleuve pas.

L'intensité des précipitations est modélisée selon une loi Gamma $\Gamma_{\alpha,\beta}$ de paramètre α (shape) et β (scale), tous deux dépendant linéairement des prédicteurs à grande échelle :

$$\alpha(X_i) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^N \alpha_i X_i \quad \beta(X_i) = \beta_0 + \sum_{i=1}^N \beta_i X_i \quad (5)$$

Correction de biais (CDF-t)

La troisième approche mise en œuvre est la méthode CDF-t qui est philosophiquement différente et qui s'apparente à de la correction de biais. Il s'agit d'une correction « quantile-quantile » entre la distribution future de la variable locale $F_{Lf}(x)$ et la distribution future de la variable à grande échelle $F_{Gf}(x)$, où F_{Lf} est définie par :

$$F_{Lf}(x) = F_{Lh} (F_{Gh}^{-1} (F_{Gf}(x))) \quad (6)$$

où F_{Gh} et F_{Lh} représentent les CDFs des variables d'intérêt pour la période historique de calibration de l'échelle globale et de l'échelle locale. Tous les détails techniques et philosophiques sont donnés dans Michelangeli *et al.* (2009) et Vrac *et al.* (2012).

Cette méthode n'utilise pas les prédicteurs grande échelle des deux autres approches. Elle fait le lien pour la même variable physique (la température par exemple) entre la distribution à grande échelle du point de grille de la réanalyse ou du GCM, et la distribution locale des observations.

Dans le cadre des tests avec CDF-t, plusieurs « découpages » temporels ont été testés : (i) un modèle annuel ; (ii) un modèle mensuel ; et (iii) un modèle mensuel pour l'intensité avec une régression logistique pour les occurrences.

2.1.3. Observations et données à grande échelle

Pour calibrer un modèle statistique (i.e. estimer ses paramètres), il est nécessaire de disposer à la fois de données d'observation à la résolution locale souhaitée et de données à grande échelle ; l'idée étant que le modèle statistique doit « apprendre » le lien entre ces deux types de données. Pour le bassin de l'Hérault, les données locales que nous avons utilisées sont les données SAFRAN (CNRM, Le Moigne, 2002) à une résolution de 8km x 8km. Pour l'Ebre, les données utilisées ont la même résolution et sont issues de traitements réalisés dans le cadre du projet REMedHE ([ACT7] ; [ACL4]) à partir des données de stations fournies par l'agence météorologique espagnole (AEMET).

Les réanalyses utilisées pour la grande échelle sont les réanalyses NCEP/NCAR (Kalnay *et al.*, 1996). En se basant sur les travaux de Vrac & Yiou (2010), nous avons délimité la région méditerranéenne (27,5°N–50°N ; 15°W–42,5°E) comme zone pour les prédicteurs.

Concernant les modèles globaux de climat, nous avons utilisé les deux GCMs français développés par l'IPSL et le CNRM dans les configurations utilisées pour le 5^{ème} rapport du GIEC. Les simulations à grande échelle issues de ces GCMs ont été ré-échantillonnées sur la grille NCEP. En effet, les GCMs ont des résolutions différentes les uns des autres (voir Tableau D.3) et afin d'utiliser les GCMs dans les mêmes conditions que les réanalyses, nous avons réalisé une étape de ré-échantillonnage par interpolation selon la méthode du plus proche voisin.

Tableau D.3. Résolution de la réanalyse NCEP/NCAR et des GCMs de l'IPSL et du CNRM utilisés dans le 5^{ème} rapport du GIEC.

Modèle	Nombre de points de grille pour la région méditerranéenne avant « regrillage »	Résolution
Réanalyse NCEP	24 x 10	2,5° x 2,46°
GCM IPSL-CM5A MR	24 x 18	2,5° x 1,26°
GCM CNRM CM5	42 x 17	1,40° x 1,40°

2.1.4. Sélection des variables d'analyse

Nous nous sommes appuyés sur la littérature (Wilby & Wigley, 2000 ; Cavazos & Hewitson, 2005 ; Crawford *et al.*, 2007). Les prédicteurs retenus pour le *downscaling* de la température et des précipitations sont présentés dans le Tableau D.4.

Tableau D.4. Liste des prédicteurs utilisés.

	Température de surface (T2M)	Pression au niveau de la mer (SLP)	Composante longitudinale du Vent (U)	Composante zonale du Vent (V)	Géopotential à 850hPa (ZG)	Humidité relative (HUR)
Précipitation	x	x	x	x	x	x
Température	x	x	x	x	x	x

Pour le *downscaling* sur les bassins de l'Hérault et de l'Ebre, nous avons utilisé la même région méditerranéenne (27,5°N–50°N ; 15°W–42,5°E) pour les prédictors, soit 240 points de grille. Pour des raisons de puissance de calcul, il n'est pas possible d'utiliser autant de variables (240 points * 6 variables) en entrée des modèles.

Dans le but de réduire le nombre de prédictors, nous avons donc réalisé une analyse en composantes principales (PCA) sur chaque variable physique séparément. Une PCA consiste à transformer les variables en nouvelles variables dé-corrélées les unes des autres et surtout comportant le maximum de variance des données initiales. Ceci nous a donc permis de réduire le nombre de prédictors tout en conservant l'information pertinente.

A partir de ces composantes principales, nous avons pris le parti de tester toutes les combinaisons parmi les deux premières composantes principales de chaque variable physique. Nous avons alors mis en place un certain nombre de critères (Critère d'information bayésien, maximum de vraisemblance, biais, biais conditionnel à occurrence de précipitation, biais en fréquence de précipitation, etc.) afin d'estimer quelles combinaisons étaient les plus pertinentes. Cette étape a été assez longue. Face au grand nombre de combinaisons et à des problèmes de convergence du modèle stochastique pour certains points de grille (moins de 1 % des points de grille), nous avons réalisé cette sélection uniquement avec le modèle GAM pour l'Hérault. A l'issue de cette sélection, nous avons retenu les deux premières composantes principales de chaque prédictor comme étant la meilleure combinaison. En effet, cette combinaison avait des valeurs de critères meilleures quasiment pour l'ensemble des critères et des points de grille. De plus, devant la très large majorité de points de grille ayant la même combinaison de composantes principales, il était plus réaliste qu'un modèle ne différait pas de la combinaison du point de grille voisin.

Par la suite toutes les calibrations et évaluations des différents modèles ont été faites pour la saison « d'hiver » (15 octobre–14 avril) et la saison « d'été » (15 avril – 14 octobre), à l'exception des modélisations avec CDF-t pour lesquelles une calibration mensuelle a été réalisée.

2.1.5. Validation croisée

Avant d'évaluer les modèles que nous avons développés sur des données non-utilisées lors du calage, nous avons travaillé dans un contexte de validation croisée avec les prédictors NCEP/NCAR. La validation croisée nous informe sur la capacité des modèles à travailler sur de nouvelles données. Ici, elle a consisté à calibrer le modèle sur une première période (01/01/1959 au 31/12/1984) puis à réaliser des simulations sur une seconde période (01/01/1985 au 31/12/2005) pour laquelle nous disposons d'observations auxquelles on pouvait comparer les simulations. On a également réalisé l'opération dans l'autre sens. La validation croisée nous a permis de comparer les températures et les précipitations simulées par rapport aux observations, sur la totalité des données observations disponibles. Pour des raisons de synthèse, nous présentons ici uniquement les résultats sur l'Hérault. Toutefois, les conclusions sont relativement similaires pour le bassin de l'Ebre.

Précipitation

L'un des principaux enseignements a concerné la modélisation des précipitations avec le modèle GAM. Les descentes d'échelle réalisées avec les réanalyses NCEP/NCAR et le modèle GAM ont généré un cumul annuel de précipitations proche de la moyenne du cumul observé. Cependant, GAM ne reproduisait pas la variabilité interannuelle du cumul annuel des précipitations. Par ailleurs, le cycle saisonnier était très peu marqué, et le biais des occurrences de précipitation était de 55 à 60 % : il pleuvait trop souvent en petites quantités. La variabilité journalière était également très faible avec un pourcentage de variance expliquée inférieur à 10 %.

Les modèles stochastiques et CDF-t ont présenté des cycles saisonniers cohérents avec celui des observations. Les occurrences de précipitation étaient très proches des observations dès lors que l'occurrence était modélisée séparément par la régression logistique. Les biais en fréquence des jours de pluie n'étaient que de quelques pourcents (<8 % sur l'Hérault) alors que, lorsque le calcul de l'occurrence n'était pas séparé, le biais en fréquence était en moyenne de 50 % (pour GAM le biais en fréquence était en moyenne de 55–60 %). Ceci a montré l'importance de séparer l'intensité de l'occurrence dans les simulations. Les cycles saisonniers des observations (SAFRAN) et ceux des données simulées étaient bien corrélés. Pour le bassin de l'Hérault, le coefficient de corrélation était supérieur à 0,8 quel que soit le point de grille (avec le modèle stochastique dirigé par les réanalyses NCEP/NCAR). Le pourcentage de variance expliquée était supérieur à 50 % pour tous les modèles autres que GAM.

Température

Les différents modèles testés représentaient correctement la température lors de la validation. Le pourcentage de variance expliquée était supérieur à 80 % aussi bien avec le modèle GAM que le modèle stochastique. Le biais moyen en température sur la période était de l'ordre de quelques dixièmes de degrés Celsius. Au niveau de l'analyse temporelle de l'évolution des températures, la tendance à l'augmentation au cours de la seconde moitié du 20^{ème} siècle présente dans les observations SAFRAN était aussi présente dans les simulations et le cycle saisonnier était extrêmement bien corrélé aux observations (0,99 pour tous les modèles de température).

Le travail de validation des modèles de *downscaling* sur l'Hérault nous a permis d'évaluer la pertinence de chacun des modèles en température et en précipitation. Pour la suite du projet, nous avons retenu uniquement les modèles qui donnaient satisfaction. Ainsi, l'approche stochastique et la méthode CDF-t avec une calibration mensuelle pour la température et la précipitation ont été retenues pour les étapes de descente d'échelle au niveau des deux bassins (Hérault et Ebre) ainsi que pour les trois scénarios d'émission de gaz à effet de serre (période de contrôle 1976–2005 et période de projection 2036–2065).

2.1.6. Résultats avec les GCMs

Les modèles de *downscaling* sont maintenant appliqués aux deux GCM (IPSL et CNRM) pour les projections (période de contrôle et période future). La période de calibration utilisée est 1959–2010 pour l'Hérault (1970–2010 pour l'Ebre). Nous avons projeté sur la période de contrôle (1976–2005) et sur 2036–2065 pour les projections futures (RCP 4.5 et RCP 8.5). Le modèle stochastique est calé à l'aide des prédicteurs NCEP/NCAR. La méthode CDF-t est, quant à elle, calée avec les valeurs de la grande échelle des GCMs.

Température

Le *downscaling* des températures à partir des GCM de l'IPSL et du CNRM a fait ressortir une surestimation de 2,2°C à 2,5°C avec l'approche stochastique, ce décalage s'explique par un biais des GCMs. Afin de fournir des données de température cohérentes avec les observations, nous avons appliqué la méthode du Delta du cycle saisonnier aux sorties du modèle stochastique. Cette méthode a été appliquée entre les sorties des modèles dirigés par les GCMs et celles du modèle dirigé par les réanalyses NCEP/NCAR. Ce delta a ainsi permis de combler la surestimation et d'améliorer la représentation des cycles saisonniers de manière cohérente puisqu'il était calculé et appliqué sur les données à haute résolution.

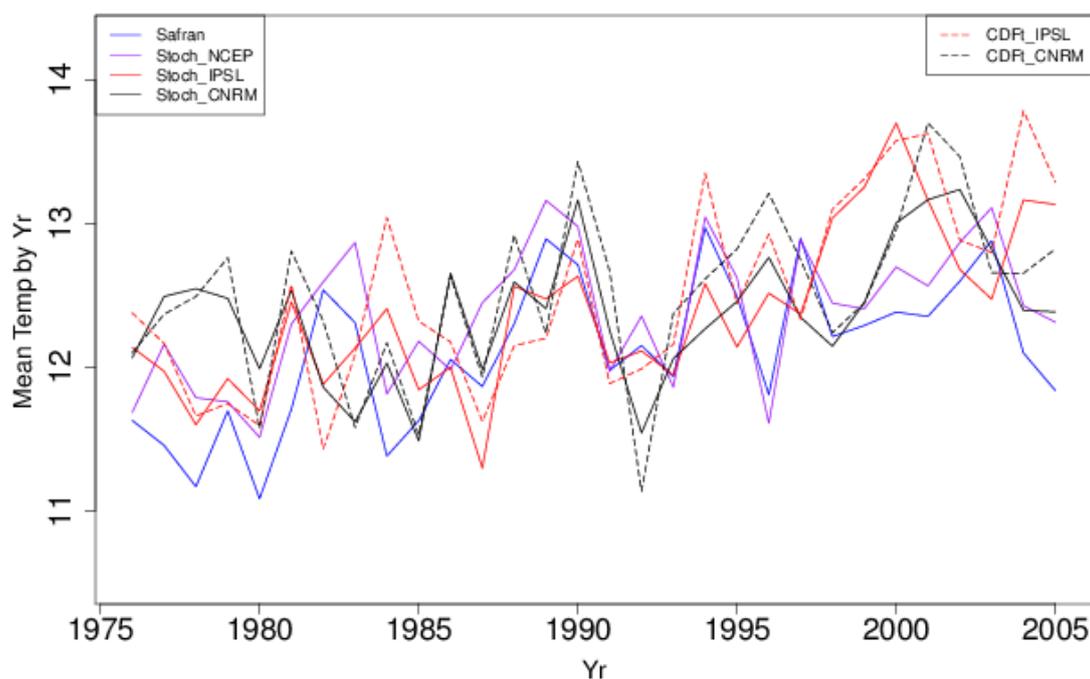


Figure D.19. Variabilité interannuelle de la température moyenne sur l'ensemble du bassin de l'Hérault sur la période de contrôle (1976–2005). ([POS1]).

La température modélisée avec la méthode de correction de biais (CDF-t) avait un cycle saisonnier extrêmement corrélé aux observations avec un coefficient de corrélation de 0,99 pour le bassin de l'Hérault. La

Figure D.19 montre la variabilité interannuelle des températures moyennes sur ce bassin. La tendance de réchauffement observée au cours des 30 dernières années était également présente avec la descente d'échelle des GCMs. Le pourcentage de variance expliquée était très bon (compris entre 91 et 106 % suivant le modèle et les point de grille pour la période 1976–2005). En moyenne, le biais de température était 0,2°C plus froid pour le modèle stochastique. Pour l'approche par CDF-t, en moyenne, quasiment aucun biais (inférieur à 0,03°C) n'a été trouvé sur la période de référence 1976–2005.

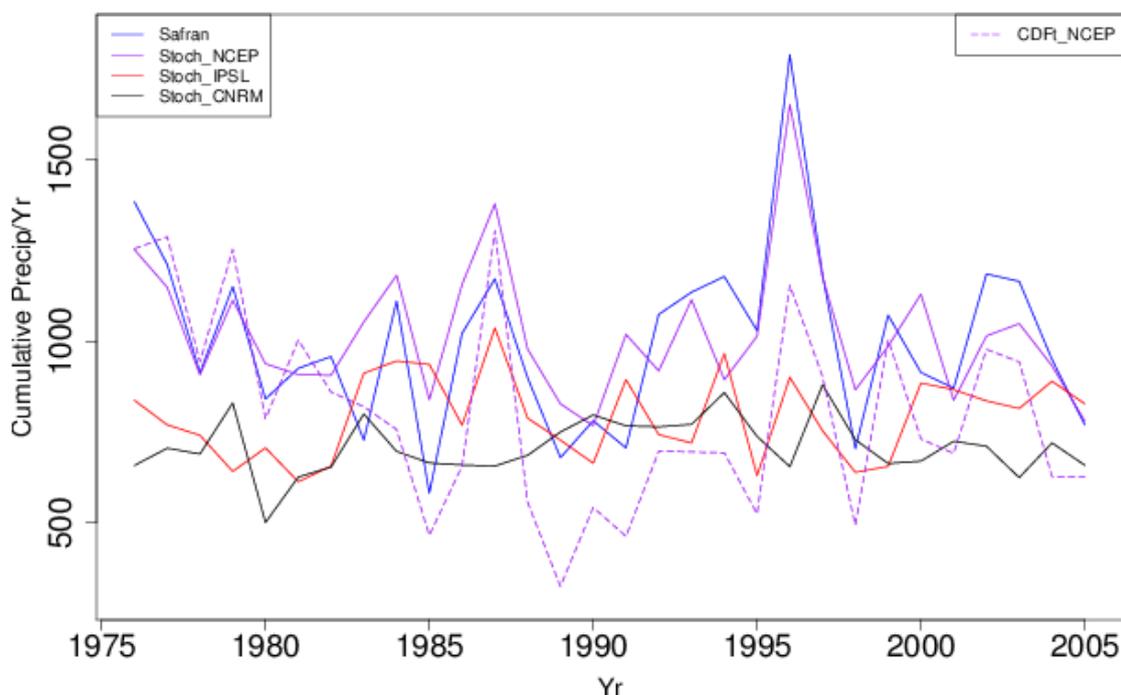


Figure D.20. Variabilité interannuelle du cumul annuel de précipitation l'ensemble du bassin de l'Hérault sur la période de contrôle (1976–2005). ([POS1]).

Précipitation

Les occurrences de précipitation étaient bien représentées avec les réanalyses comme prédicteurs, mais avec le GCM de l'IPSL il pleuvait en moyenne sur le bassin 10 % moins souvent que les observations sur le bassin de l'Hérault (près de 22 % plus souvent sur l'Ebre). Le cumul annuel de précipitation (Fig. D.20) sur l'ensemble de la période de contrôle était bien représenté pour la réanalyse avec les prédicteurs NCEP (seulement 0,16 % de différence entre le cumul des précipitations sur la totalité de la période de contrôle entre les réalisations issues de NCEP/NCAR et celui des données SAFRAN). Par contre les intensités simulées par les modèles stochastiques dirigées par le GCM de l'IPSL étaient 30 % plus sèches sur l'Hérault (4,4 % plus sèches pour l'Ebre) et celles du CNRM étaient plus de 20 % plus sèches sur l'Hérault (23 % plus humides sur l'Ebre). Ceci peut s'expliquer en partie par la représentation des occurrences.

Les simulations utilisant les GCMs avec la correction de biais CDF-t posent encore un problème pour le cumul annuel de précipitation. Avec le GCM IPSL, les réalisations sont deux à trois fois plus pluvieuses que les observations, les occurrences sont comparables à l'approche stochastique pour l'IPSL. Par contre avec le modèle conduit par CNRM, il ne pleut pas assez souvent (seulement un tiers de jours de pluie par rapport aux observations), même si les extrêmes de précipitation sont réalistes (de l'ordre de quelques dizaines de centimètres de pluies au maximum par jour). Le problème viendrait d'une surreprésentation des jours de pluie de quelques centimètres par rapport aux observations. Ceci peut s'expliquer par la présence quasi quotidienne de précipitation au point de grille considérée à la grande échelle.

2.2. Sensibilité de la modélisation hydrologique aux méthodes statistiques de régionalisation

2.1.1. Approche méthodologique mise en place

Dans le cadre d'un projet ANR JC StaRMIP (2012–2016) parallèle au projet GICC REMedHE, des recherches complémentaires ont été réalisées pour analyser la sensibilité de simulations hydrologiques à différents types

de climats régionalisés selon des méthodes statistiques sur trois sous-bassins tests de méso-échelle (910 à 1 800 km²) situés sur le bassin de l'Hérault et le bassin de l'Ebre : l'Hérault à Laroque (France), l'Irati à Liedena (Espagne) et le Segre à Seo de Urgel (Espagne).

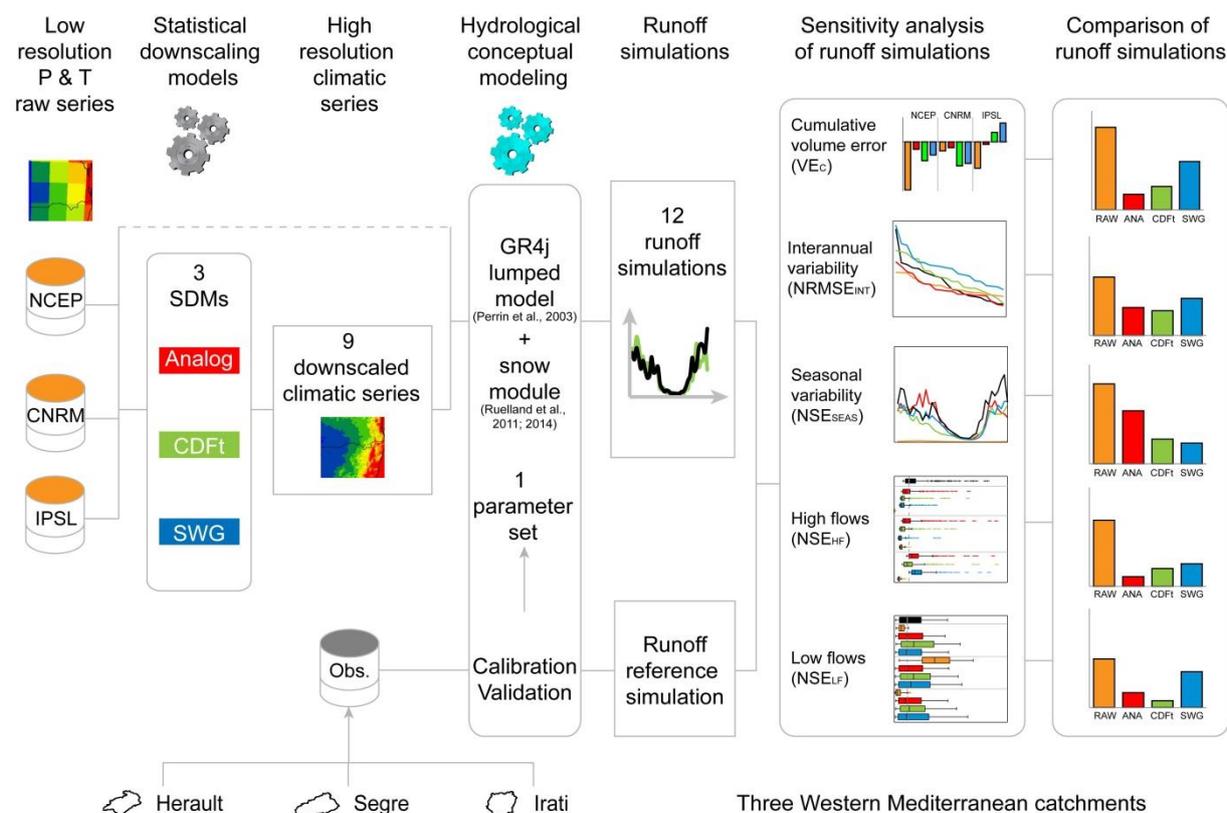


Figure D.21. Approche méthodologique mise en place dans le cadre de l'analyse de sensibilité hydrologique pour comparer différentes méthodes de désagrégation. ([ACL3]).

Le travail a permis de comparer les simulations hydrologiques forcées par les simulations climatiques désagrégées sur une période commune de 20 ans (1986–2005). Pour cette étude, un exercice croisé de calage/validation basée sur une fonction critère unique a permis de montrer la capacité du modèle hydrologique GR4j à reproduire correctement les débits dans des conditions sèches et humides, soulignant la robustesse du modèle forcé par les données climatiques observées à l'échelle locale. Ces simulations ont donc été utilisées comme référence pour tester la capacité de différents jeux de données climatiques basse et haute-résolution à reproduire divers aspects de l'hydrogramme de référence (Fig. D.21).

Trois méthodes de désagrégation statistique ont été comparées : la méthode dite des analogues (ANALOG), la méthode CDFt (« Cumulative Distribution Function – transform ») et un générateur stochastique de temps (SWG). Ces méthodes ont été utilisées pour désagréger des simulations basse résolution de précipitation et de température issues des réanalyses NCEP/NCAR et de sorties des modèles climatiques globaux (GCMs) français CNRM-CM5 et IPSL-CM5A-MR sur la période CTRL. La sensibilité du modèle hydrologique aux divers jeux de données a été analysée à travers plusieurs indicateurs hydrologiques illustrant les principales caractéristiques du débit (volumes écoulés, variabilité intrannuelle et saisonnière, crues et étiages). Ces indicateurs ont également été choisis pour caractériser l'impact sur la ressource en eau dans le but d'initier une approche quantitative de la sensibilité hydrologique.

2.1.2. Recommandations pour l'utilisation des méthodes statistiques de régionalisation

Les résultats ont confirmé que le recours à des simulations climatiques désagrégées à haute-résolution conduisait à une amélioration significative des simulations de débits par rapport à l'utilisation de données climatiques basse-résolution issues des données de réanalyses ou de GCMs. Les résultats ont également montré que les méthodes ANALOG et CDFt étaient plus performantes que SWG pour reproduire la saisonnalité moyenne des débits, la variabilité interannuelle des écoulements ainsi que la distribution des débits de crue et

d'étiage. Plus généralement, ce travail a permis de fournir des recommandations pour aider à choisir les méthodes statistiques de désagrégation appropriées pour une utilisation dans les études d'impact du changement climatique afin de minimiser l'incertitude associée à ces méthodes ([ACL3]).

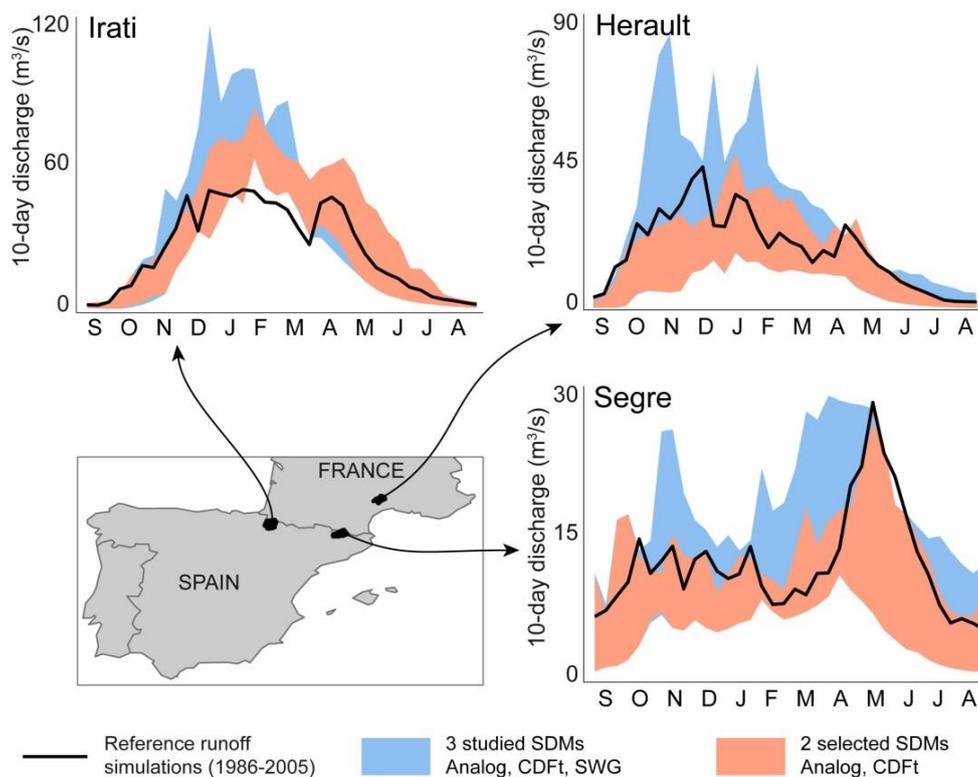


Figure D.22. Enveloppes d'incertitude associées aux débits simulés sur la période 2041–2060 selon 2 GCMs (CNRM, IPSL), 2 RCPs (RCP4.5 et 8.5) et 2 ou 3 méthodes de désagrégation statistiques (SDMs) au niveau de trois bassins d'étude. ([COM5]).

Des scénarios hydrologiques à l'horizon 2050 (2041–2060) ont ensuite été élaborés à partir des simulations climatiques à haute résolution. Ces projections hydrologiques ont été réalisées en respectant l'approche méthodologique utilisée sur la période CTRL. Les scénarios climatiques utilisés ont été construits à partir des méthodes ANALOG, CDFt et SWG appliquées aux simulations basse-résolution des GCMs CNRM et IPSL sous RCP 4.5 et 8.5. Les simulations hydrologiques prospectives ont permis de mettre en évidence la valeur ajoutée de l'application d'un protocole de validation préalable des méthodes de désagrégation pour la construction de scénarios climatiques. En effet, dans notre cas d'étude, en sélectionnant les méthodes les plus appropriées au regard des indicateurs hydrologiques sur la période CTRL (ANALOG et CDFt), l'incertitude dans la scénarisation hydrologique a diminué significativement de 30 % à 67 % selon les bassins (Fig. D.22). De plus, une analyse des composantes de l'incertitude hydrologique liée à la scénarisation climatique a également permis de quantifier la part d'incertitude selon son origine et de mettre en avant une plus faible incertitude liée à l'application de méthodes de désagrégation que celles issues des GCMs ou des RCPs.

Néanmoins, les difficultés des méthodes de *downscaling* testées (ANALOG, CDFt et SWG) à reproduire avec précision les cumuls pluviométriques annuels et la saisonnalité des précipitations et l'incertitude hydrologique qui en découlait pour simuler la variabilité interannuelle et saisonnière des débits ainsi que les événements extrêmes de crues et d'étiages, ont conduit à envisager d'autres méthodes pour construire des scénarios climatiques locaux à partir des dernières simulations climatiques du dernier rapport de l'IPCC (2013). En effet, dans ces conditions, une validation de la chaîne de modélisation sur la période 1971–2009 (reproduction des débits influencés, niveaux de réserve des barrages, évolution des restrictions d'eau) était impossible avec des données climatiques désagrégées et ne pouvait s'appuyer que sur des forçages climatiques observés haute-résolution représentant de manière plus réaliste la variabilité interannuelle et saisonnière du climat. En raison des biais engendrés, il aurait alors été incohérent d'utiliser la chaîne de modélisation avec des projections climatiques désagrégées selon ces méthodes, dont les temps de calcul ne permettaient, par ailleurs, pas une application aisée à de nombreux modèles climatiques.

2.3. Projections climatiques retenues

2.3.1. Modèles climatiques

De manière à couvrir un large spectre de projections climatiques, 18 scénarios climatiques ont été construits à partir des sorties de 9 Modèles Climatiques Globaux (GCMs, voir Tableau D.5) issues de l'exercice CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*) de l'IPCC (2013). L'utilisation d'un jeu diversifié de GCMs est en effet recommandée dans la mesure où la dispersion entre les projections climatiques provient en premier lieu des modèles climatiques (Arnell *et al.*, 2004 ; Dessai & Hulme, 2007). L'horizon 2050 (2036–2065) a été choisi selon un compromis entre les projections locales d'usages de l'eau (généralement pour 2030) et la nécessité d'utiliser des simulations climatiques pour lesquelles un signal de changement climatique pouvait être distingué de la variabilité climatique.

Tableau D.5. Modèles Climatiques Globaux sélectionnés depuis le centre de distribution de données du GIEC (IPCC, 2013a).

Nom du modèle	Centre climatique (Pays)	Résolution atmosphérique	Référence
CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (Canada)	1.875° x 1.875°	von Salzen <i>et al.</i> , 2013
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques / Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique (France)	1.4° x 1.4°	Voltaire <i>et al.</i> , 2013
CSIROMK3.6.0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence (Australia)	1.875° x 1.875°	Rotstayn <i>et al.</i> , 2012
GFDL-ESM2G	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (USA)	2.5° x 2°	Dunne <i>et al.</i> , 2012
HADGEM2-CC	Met Office Hadley Centre (UK)	1.875° x 1.25°	Collins <i>et al.</i> , 2011; Martin <i>et al.</i> , 2011
HADGEM2-ES	Met Office Hadley Centre (UK)	1.875° x 1.25°	Collins <i>et al.</i> , 2011; Martin <i>et al.</i> , 2011
IPSL-CM5AMR	Institut Pierre-Simon Laplace (France)	1.25° x 1.25°	Dufresne <i>et al.</i> , 2013
MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (Japan)	1.40625° x 1.40625°	Watanabe <i>et al.</i> , 2010
MPIM	Max Planck Institute for Meteorology (Germany)	1.8° x 1.875°	Stevens <i>et al.</i> , 2013

2.3.2. Méthode de construction des scénarios climatiques

Les scénarios climatiques utilisés dans la suite du projet concernent une période de référence (1976–2005, considérée comme représentative de la variabilité climatique actuelle) et une période future centrée sur l'horizon 2050 (2036–2065).

Les GCMs utilisés dans l'exercice CMIP5 sont forcés par des scénarios de forçage radiatif, appelés RCPs pour *Representative Concentration Pathways*. Dans le projet GICC REMedHE, les simulations climatiques des 9 GCMs présentés précédemment (Tableau D.5) ont été extraites pour le RCP historique sur la période de référence (1976–2005) et les RCPs 8.5 (scénario radiatif tendanciel) et 4.5 (scénario radiatif d'évolution modérée) sur la période future (2036–2065). Les scénarios de changement climatique ont alors été générés à partir d'une méthode de perturbation (Fig. D.23 ; Ruelland *et al.*, 2012). Pour chaque maille GCM, les variations moyennes mensuelles entre les simulations climatiques historiques et futures ont été appliquées aux séries observées de précipitation et de température (sur la période de référence 1976–2005) à l'échelle des grilles de référence 8 x 8 km. Comme sur la période de référence, l'évapotranspiration potentielle (ET₀) journalière future a été calculée selon la formule FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) sur le bassin de l'Hérault et l'équation empirique de Hargreaves (Hargreaves & Samani, 1985) sur le bassin de l'Ebre.

Au-delà de la désagrégation spatiale qu'elle offre pour passer de la résolution des GCMs à la résolution climatique locale, la méthode de perturbation a également pour objectif de s'affranchir de l'incapacité des GCMs à reproduire la variabilité interannuelle, voire saisonnière, du climat présent. Ce faisant, une hypothèse forte est retenue : la variabilité climatique future est héritée du climat passé, et les scénarios climatiques n'intègrent que des variations mensuelles moyennes de températures et précipitations (Ruelland *et al.*, 2012).

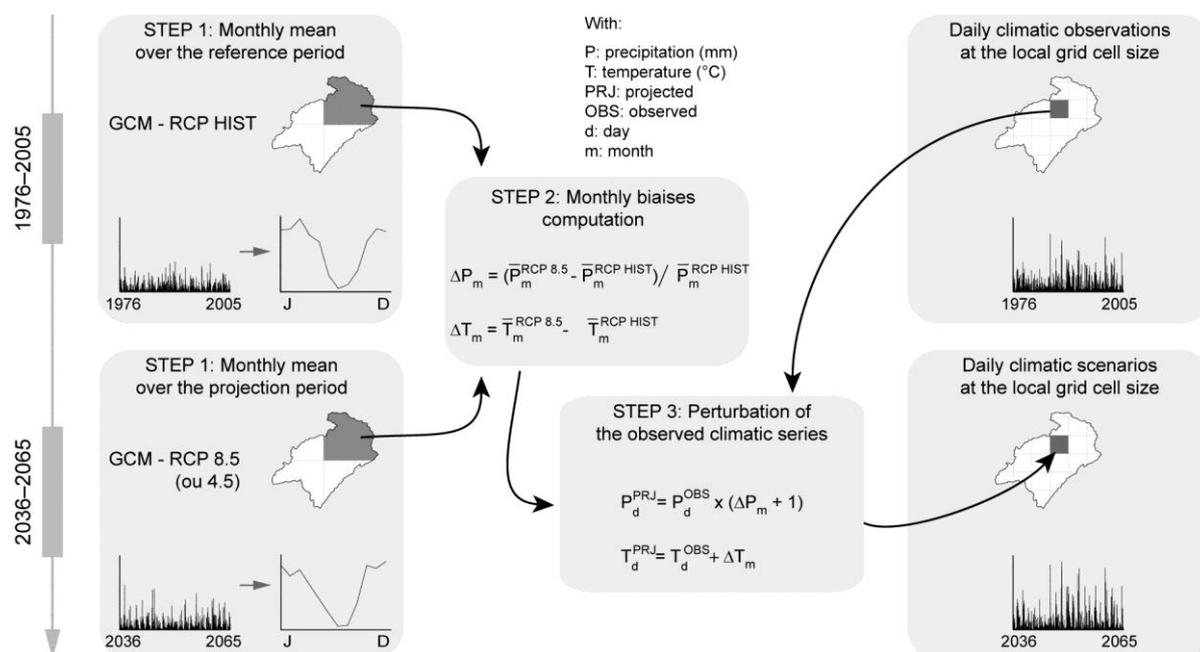


Figure D.23. Construction de scénarios climatiques journaliers par perturbation des séries climatiques observées avec les variations moyennes mensuelles de précipitation et de température entre les simulations climatiques historiques et futures des sorties de GCMs.

2.3.3. Tendances climatiques futures

Le Tableau D.6 montre les changements de température et de précipitation projetés par les 9 GCMs sous 2 RCPs à l’horizon 2050 en comparaison de la période de référence 1976–2005 sur les bassins de l’Hérault et de l’Ebre. Les projections de températures montrent une tendance claire à l’augmentation (entre +1 °C et 3,3 °C à l’échelle annuelle sur les deux bassins), particulièrement en été (jusqu’à +4,8 °C sur le bassin de l’Hérault et +4,6 °C sur le bassin de l’Ebre). Les projections de précipitation sont plus incertaines et diffèrent significativement entre les 18 scénarios climatiques. En fonction des scénarios climatiques, les changements de précipitation annuelle vont ainsi de -13 % à +7 % sur l’Hérault et de -15 % à +5 % sur l’Ebre. Néanmoins, les projections de précipitations printanières et estivales montrent une tendance assez claire à la diminution sur les deux bassins : ainsi, au niveau des mois déjà secs de juin, juillet et août, la plupart des scénarios projettent une diminution sensible des précipitations, de l’ordre de -20 % et -18 % en valeurs médianes sur les bassins de l’Hérault et de l’Ebre respectivement.

Tableau D.6. Enveloppes de projections climatiques saisonnières à l’horizon 2050 à partir de 9 GCMs sous deux scénarios de forçage radiatif (RCPs 4.5 et 8.5).

		Température				Précipitation			
		Hiver JFM (°C)	Print. AMJ (°C)	Été JAS (°C)	Automne OND (°C)	Hiver JFM (%)	Print. AMJ (%)	Été JAS (%)	Automne OND (%)
Hérault	Min	+0.8	+0.9	+1.6	+0.9	-9	-22	-49	-13
	Médiane	+1.5	+1.9	+3.1	+1.9	+5	-12	-20	+5
	Max	+2.6	+2.8	+4.8	+3.3	+21	+3	+8	+18
Ebre	Min	+0.7	+0.9	+1.3	+0.8	-9	-28	-37	-15
	Médiane	+1.7	+2.3	+3.5	+2.1	0	-11	-18	0
	Max	+2.4	+2.8	+4.6	+3.4	+21	+5	+6	+18

3. Scénarios tendanciels d’usages de l’eau sur les bassins

Dans le cadre de la planification en lien avec l’atteinte des objectifs de la Directive Cadre Européenne sur l’Eau, les gestionnaires de bassin réalisent des projections de changements d’usages de l’eau à l’horizon 2030. Le scénario tendanciel d’usages de l’eau a été conçu selon la prolongation des projections 2030 fournies par les gestionnaires (SMBFH, 2005 ; CHE, 2011) à l’horizon 2050 pour le faire coïncider avec la période retenue pour

les scénarios climatiques du projet. Les changements appliqués aux principaux déterminants de la demande en eau entre les usages actuels et le scénario tendanciel 2050 sont présentés dans le Tableau D.7.

Tableau D.7. Principaux déterminants de la demande en eau à l'échelle des bassins de l'Hérault et de l'Ebre selon les usages actuels (décennie 2000) et le scénario tendanciel à l'horizon 2050. NA : Non-Applicable. ([ACL2] ; [ACL5]).

		Hérault			Ebro		
		2000s	2050s	Trend	2000s	2050s	Trend
MWD	Population résidente totale (hab.)	350 417	440 651	+39 %	468 675	554 241	+18 %
	Activité touristique			+74 %	NA	NA	NA
	Transferts (hab. hors du bassin)	186 620	234 676	+38 %			+27 %
	Allocation unitaire (m ³ /hab/an)	97	117	+21 %	109	111	+4 %
	Efficienc e moyenne des réseaux d'adduction (%)	65 %	80 %	+5 %	80 %	80 %	+0 %
OWD	Allocation pour l'eau industrielle	NA	NA	NA			+95 %
IWD	Surfaces irriguées totales (ha)	4 734	8 502	+80 %	658 500	961 400	+46 %
	Efficienc e moyenne des réseaux d'irrigation (%)	57 %	75 %	+22 %	60 %	65 %	+9 %

Les projections de population ont été basées sur les scénarios médians des instituts statistiques nationaux (INSEE en France et INE en Espagne) à l'échelle communale à l'horizon 2050. Ceux-ci prévoient une augmentation de la population résidente d'environ 39 % pour les communes situées sur le bassin de l'Hérault et d'environ 38 % pour les communes situées hors du bassin et desservies en eau potable depuis la basse vallée de l'Hérault. Dans le même temps, le Conseil Général de l'Hérault prévoit que la population touristique pourrait augmenter de 74 % par rapport aux années 2000. Sur l'Ebre, les projections démographiques prévoient une augmentation de 18 % de la population actuelle pour atteindre environ 550 000 habitants à l'horizon 2050. Les évolutions possibles concernant les allocations unitaires pour la demande municipale en eau proviennent d'une étude sur les usages de l'eau dans la région pour le bassin de l'Hérault (Rinaudo, 2011) et des projections fournies par la CHE pour le bassin de l'Ebre. Au niveau de l'Hérault, Rinaudo (2011) a suggéré une diminution de 12 % de la consommation domestique unitaire à l'horizon 2050 par rapport aux usages actuels, en lien avec les changements projetés de comportement et avec une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau par les appareils domestiques. Cependant, les projections suggèrent également un taux de connection accru des petites industries, parcs et jardins municipaux, et autres usages commerciaux aux réseaux d'adduction d'eau potable, ce qui induirait une augmentation totale de 21 % de l'allocation unitaire municipale pour la faire atteindre 117 m³/hab/an à l'horizon 2050. Sur l'Ebre, l'augmentation prévue pour l'allocation unitaire n'est que de 4 %, et pourrait atteindre 111 m³/hab/an à l'horizon 2050. Sur l'Hérault, l'efficacité des réseaux d'adduction d'eau potable devrait s'améliorer pour passer en moyenne de 70 % à 80 % en lien avec les objectifs locaux pour répondre aux politiques nationales de réduction des pertes. Sur l'Ebre, les réseaux d'adduction étant déjà considérés comme efficaces (en moyenne 80 %) selon les gestionnaires de bassin, aucune amélioration n'a été prise en compte dans le scénario tendanciel.

Une étude prospective a été menée dans le bassin de l'Hérault en lien avec un plan de partage de l'eau, dans laquelle un inventaire des projets locaux d'irrigation a été réalisé (indépendamment des ressources disponibles). Ces projections envisagent une augmentation de 80 % des surfaces irriguées par rapport aux 4 734 ha recensés sur le bassin en 2009, et ont été utilisées dans le scénario tendanciel. Au niveau du bassin de l'Ebre, le scénario tendanciel considère que les surfaces irriguées atteignent l'étendue maximale définie par le CHE dans son rapport de planification (CHE, 2013) soit 961 400 ha à l'horizon 2050. Dans le même temps, les efforts de rénovation des canaux et l'optimisation des techniques d'irrigation devaient conduire à améliorer l'efficacité des réseaux et systèmes d'irrigation qui passerait de 57 % et 60 % dans les années 2000 à 75 % et 65 % à l'horizon 2050 sur l'Hérault et l'Ebre respectivement.

Les changements de population (permanente et touristique) et d'allocation unitaire pour l'eau potable ont été appliqués uniformément à tous les nœuds de demande, tandis que les changements d'efficacité d'irrigation, de surfaces irriguées et d'activité industrielle ont été appliqués différemment selon les connaissances locales pour chaque nœud de demande.

4. Impacts des changements anthropiques et climatiques sur la demande en eau

Afin de distinguer l'impact relatif des changements climatiques et d'usages de l'eau projetés sur la demande en eau future, les simulations de demande en eau ont été réalisées selon trois modalités : (i) simulation sous contrainte du scénario tendanciel d'usages de l'eau à l'horizon 2050 (sous les conditions climatiques passées de

la période 1976–2005) ; (ii) simulation sous contrainte des usages de l'eau actuels (décennie 2000) sous les conditions climatiques à l'horizon 2050 (2036–2065, 9 scénarios climatiques issus de 9 GCMs sous RCP8.5¹) ; (iii) simulation sous contrainte combinée du scénario tendanciel d'usages de l'eau et des scénarios climatiques. Pour faciliter la lecture, tous les pourcentages présentés dans cette section (sauf mention particulière) représentent l'évolution de la demande entre la moyenne sur les années 2000 et l'horizon 2050.

4.1. Sous changements anthropiques seuls

A l'échelle du bassin de l'Hérault, les projections de demande en eau sous scénario tendanciel d'usages de l'eau à l'horizon 2050 et sous les conditions climatiques passées conduisent à une augmentation totale de 54 % de la demande par rapport à la décennie 2000 pour atteindre 88 hm³/an. Cette augmentation globale masque de fortes hétérogénéités au sein du bassin (Fig. D.24a). Sous les conditions testées, la demande en eau diminue de 28 % au niveau de la portion de Gignac tandis qu'elle augmente de 96 % au niveau de la portion d'Agde. La réduction de la demande en eau dans la portion de Gignac (et dans une moindre mesure dans la portion du Salagou) s'explique principalement par l'amélioration projetée de l'efficacité des réseaux de distribution et par la priorité donnée à des systèmes d'irrigation plus efficaces. Au niveau de la portion d'Agde, l'augmentation de la demande s'explique par une extension de 91 % des surfaces irriguées, une augmentation de 26 % de la population desservie en eau potable (dans et à l'extérieur du bassin) et un accroissement de 20 % de la population touristique annuelle. Ainsi, par rapport aux autres déterminants, l'amélioration de l'efficacité des réseaux de distribution (de 70 à 80 %) aurait peu d'impact sur la demande totale au niveau de cette portion.

A l'échelle du bassin de l'Ebre, la demande en eau augmenterait de 37 % pour atteindre 7 805 hm³/an contre 6 340 hm³/an en moyenne dans les années 2000. Les différentes portions au sein du bassin sont également marquées par des variations hétérogènes de la demande en eau (de +16 % à +206 %) selon les projections locales (Fig. D.24b). Malgré des augmentations significatives de demande dans les sous-bassins amont (juqu'à plus de 100 %), les volumes prélevés restent faibles à l'échelle du bassin, avec moins de 70 hm³/an. Dans les portions où la demande en eau est déjà la plus importante, l'augmentation va de +16 % à +63 % et est particulièrement marquée en été en lien avec les besoins d'irrigation. Cette augmentation s'explique par la politique d'extension des surfaces irriguées projetées à l'horizon 2050 dans le scénario tendanciel des usages de l'eau. Au niveau d'autres portions telles que Alto Ebro, la demande en eau pourrait également augmenter significativement (+54 %) en lien avec une augmentation de la demande municipale et industrielle.

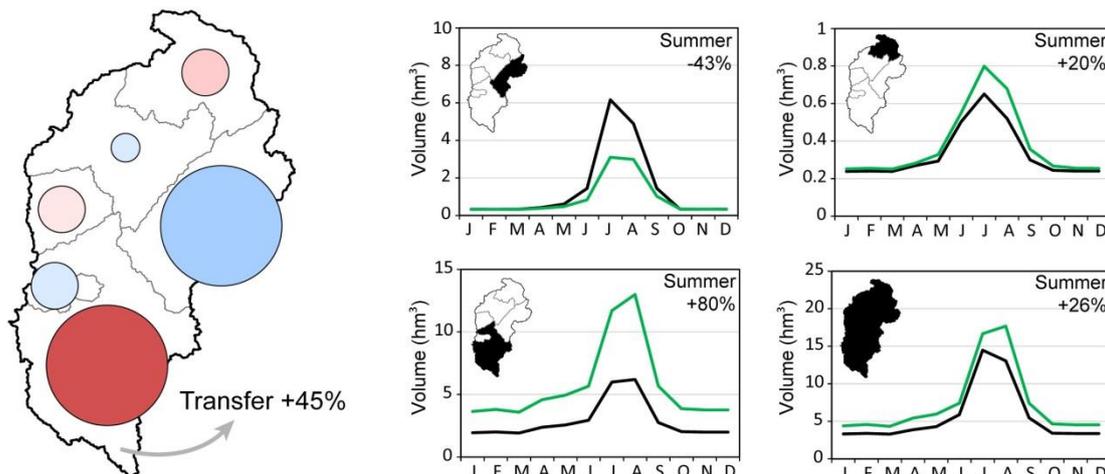
4.2. Sous changements climatiques seuls

L'impact possible du changement climatique sur la demande en eau a été estimé ici en prenant en compte les usages de l'eau actuels (décennie 2000) en fonction d'une gamme de conditions climatiques futures issues des simulations à l'horizon 2050 de 9 GCMs sous RCP8.5 (Figs. D.24a et D.25b). Conformément aux modèles de demandes en eau mise en œuvre, seule la demande en eau d'irrigation est impactée par ces changements. Les projections climatiques (Tableau D.6) montrent une augmentation significative des températures toute l'année et en particulier en été (de +1.4 °C à +4.2 °C sur le bassin de l'Hérault, et de +1.9 °C à +4.4 °C sur le bassin de l'Ebre). Les conditions évapotranspiratoires devraient augmenter significativement ce qui conduirait à une augmentation du besoin en eau des cultures. Les projections de précipitation sont moins claires même si des diminutions sont attendues au printemps et en été sur l'Hérault et sur l'Ebre.

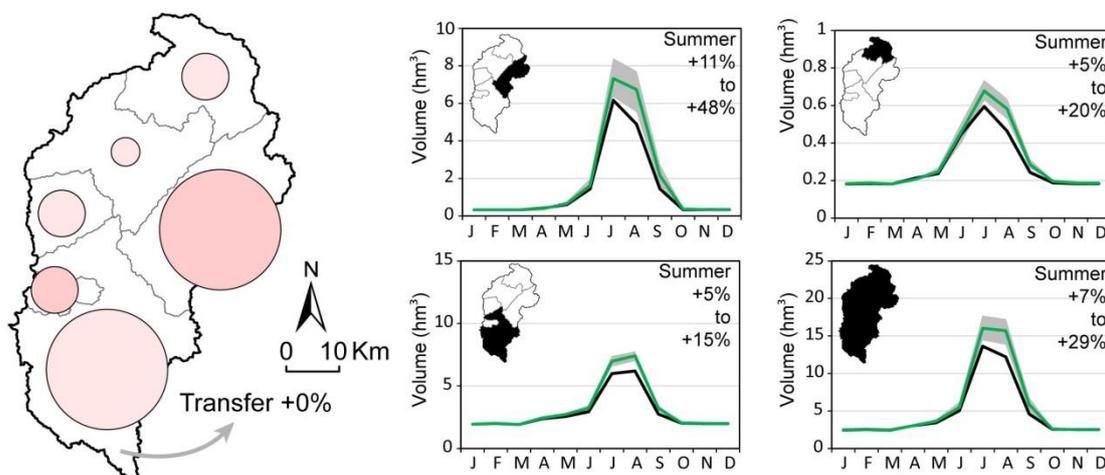
Sous ces conditions, la demande en eau des usages actuels augmenterait de 11 % (chiffre médian) pour atteindre 64 hm³/an à l'échelle du bassin de l'Hérault, avec une augmentation médiane de +5 % à +26 % selon les portions et leurs caractéristiques agricoles (surfaces irriguées et types de cultures). La portion qui pourrait ainsi connaître l'augmentation la plus importante est celle de Gignac avec une augmentation de la demande en eau estivale entre +11 % et +48 % en fonction des scénarios climatiques. Au niveau du bassin de l'Ebre, la demande totale en eau pourrait augmenter de 10 % (médiane des 9 scénarios climatiques) avec, comme au sein du bassin de l'Hérault, des variations entre portions en fonction de leurs caractéristiques agricoles et de la présence de surfaces irriguées.

¹ Dans cet exercice, seul l'impact des scénarios climatiques sous RCP8.5 (les plus pessimistes) est présenté au niveau des figures pour des raisons de clarté. 9 autres scénarios sous RCP4.5 ont été également utilisés dans la suite de l'étude.

(a) Under anthropogenic changes only



(b) Under climate changes only



(c) Under anthropogenic and climate changes

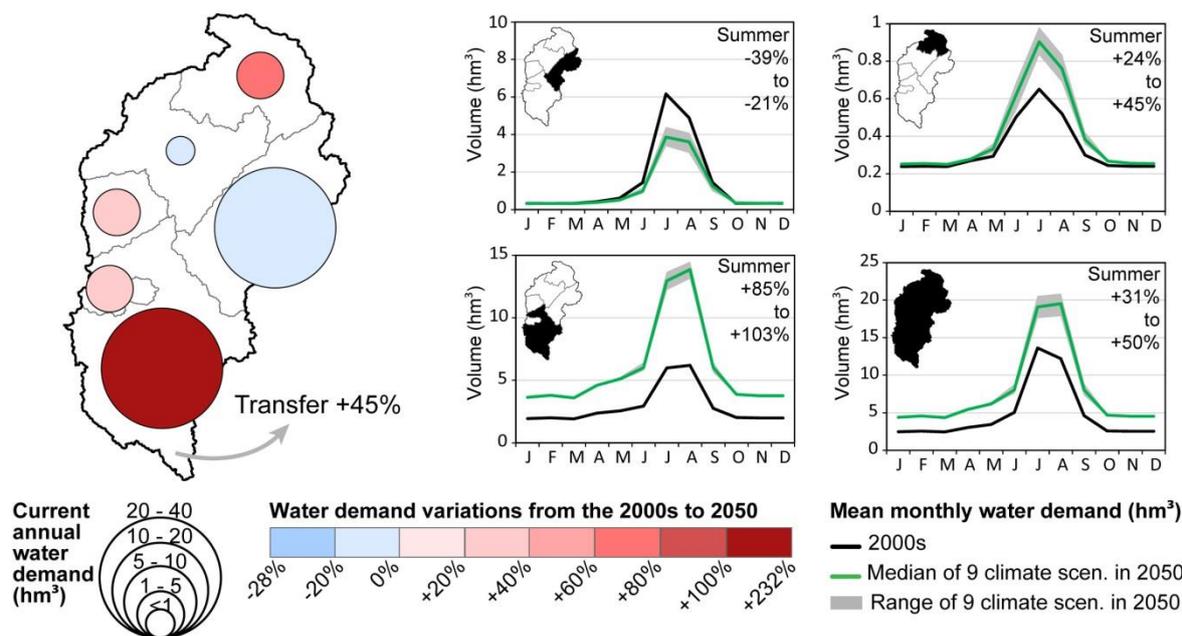
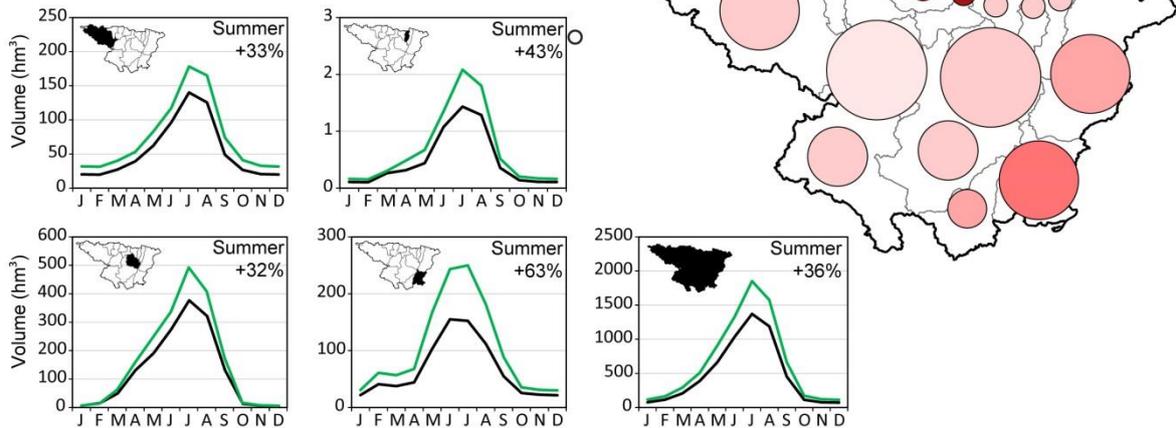
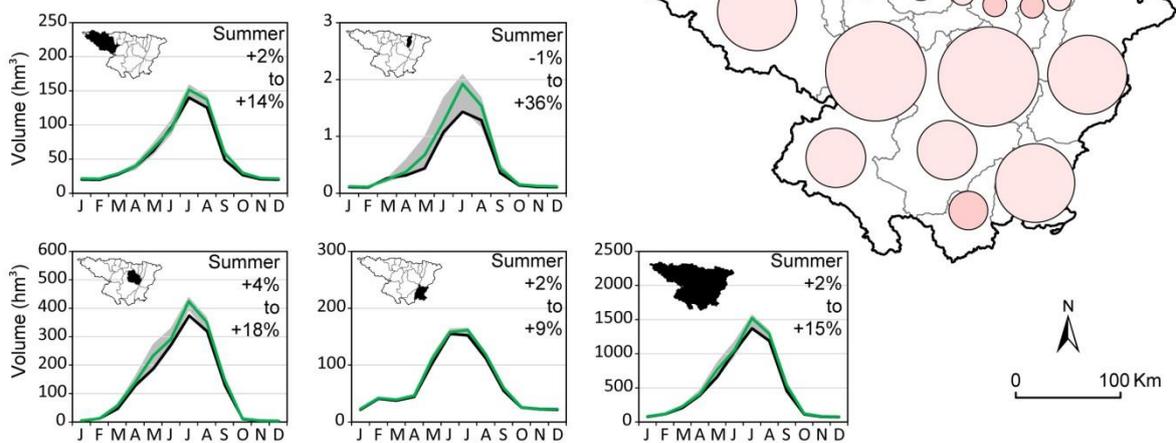


Figure D.24. Variations de la demande en eau à l'horizon 2050 sous scénario tendanciel d'usages de l'eau et/ou scénarios climatiques (9 GCMs sous RCP 8.5) dans le bassin de l'Hérault. ([ACL2]).

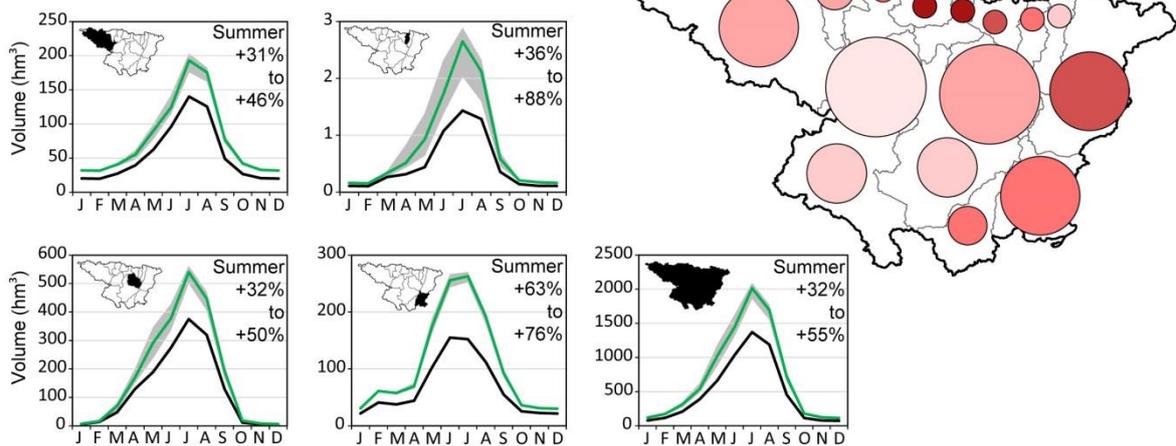
(a) Under anthropogenic changes only



(b) Under climate changes only



(c) Under anthropogenic and climate changes



Mean monthly water demand (hm³)
 — 2000s
 — Median of 9 climate scen. in 2050
 — Range of 9 climate scen. in 2050

Water demand variations from the 2000s to 2050

0% +20% +40% +60% +80% +100% +232%

Current annual water demand (hm³)

1000-1739
500-1000
100-500
50-100
≤50

Figure D.25. Variations de la demande en eau à l’horizon 2050 sous scénario tendanciel d’usages de l’eau et/ou scénarios climatiques (9 GCMs sous RCP 8.5) dans le bassin de l’Ebre. ([ACL2]).

4.3. Sous changements climatiques et anthropiques combinés

L'impact combiné des changements anthropiques (scénario tendanciel des usages de l'eau) et climatiques à l'horizon 2050 pourrait conduire à faire varier la demande en eau de -16 % au niveau de la portion de Gignac à +105 % au niveau de la portion d'Agde sur le bassin de l'Hérault (Fig. D.24c, médiane de 9 scénarios climatiques). Ainsi, au niveau de la portion d'Agde, alors que la demande en eau pourrait augmenter de 26 % sous changements climatiques médians, celle-ci diminuerait de 16 % quand on considère les améliorations projetées d'efficience d'irrigation sous les mêmes scénarios climatiques. Néanmoins, à l'échelle du bassin la tendance est à une nette augmentation de la demande en eau (de +31 % à +50 %) selon les scénarios climatiques.

La demande en eau augmenterait de +17 % à +232 % selon les portions du bassin de l'Ebre (Fig. D.25c, médiane de 9 scénarios climatiques), quels qu'y soient les usages prédominants (municipaux, industriels ou d'irrigation). Par exemple, au niveau de la basse vallée de l'Ebre (portion de Bajo Ebro), tandis que la demande en eau pourrait n'augmenter que de 4 % sous changement climatique (résultats médians à partir de 9 scénarios climatiques), celle-ci augmenterait de 70 % en considérant un développement démographique (notamment augmentation du transfert vers Tarragone) et une extension des surfaces irriguées sous les mêmes conditions climatiques futures. Cet exemple montre que l'impact du changement climatique se surimpose à un impact déjà très sensible de changements anthropiques sur la demande en eau.

5. Conclusion

Des séries temporelles de température et de précipitation ont été générées à partir de trois méthodes statistiques de désagrégation sur les bassins de l'Hérault et de l'Ebre. Deux de ces méthodes, un modèle stochastique et un modèle de correction de biais CDF-t avec calage mensuel, ont été retenues pour fournir des simulations climatiques sur une période de contrôle (1976–2005) et une période future (2036–2065) selon deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre (RCP4.5 et RCP8.5). Les températures sont bien représentées quel que soit le modèle utilisé mais les résultats médiocres concernant les précipitations ont contraint à envisager l'utilisation d'une méthode plus robuste pour s'affranchir des biais liés à la désagrégation statistique des sorties de modèles.

Afin de couvrir un large spectre de futurs possibles, 18 scénarios climatiques journaliers haute résolution (8 x 8 km) ont été générés en utilisant les sorties de 9 GCMs CMIP5 sous RCP4.5 et 8.5 et une méthode simple de perturbation. Les modèles climatiques représentent en effet la source majoritaire de dispersion des projections climatiques, devant d'autres sources d'incertitude comme la méthode de désagrégation du signal climatique (Wilby & Harris, 2006). De plus, à l'horizon 2050, la dispersion entre les différents modèles globaux reste supérieure à la dispersion entre scénarios d'émission de gaz à effet de serre ou de forçage radiatif, ceux-ci se différenciant davantage sur la fin du siècle (IPCC, 2013a). L'horizon d'étude à 2050 a permis de distinguer le signal changement climatique par rapport à la variabilité climatique, sans s'éloigner excessivement des horizons de planification et donc de perception des gestionnaires (qui ne dépassent en général pas 2030). L'analyse des projections climatiques montre que les bassins seraient soumis à des températures moyennes plus élevées (jusqu'à près de +5 °C en été sur les deux bassins) et à une baisse possible des précipitations annuelles moyennes selon une enveloppe d'incertitude de -13 % à +7 % sur l'Hérault et de -15 % à +5 % sur l'Ebre.

En parallèle, un scénario tendanciel 2050 d'usages de l'eau a été établi à l'échelle des différents nœuds de demande considérés. Ce scénario s'appuie sur les projections démographiques locales et sur la prolongation des projections 2030 fournies par les gestionnaires de bassin (SMBFH, 2005 ; CHE, 2011).

Les demandes municipales et d'irrigation pourraient augmenter sensiblement dans de nombreux secteurs où sont prévus un accroissement de la population et/ou une extension des surfaces irriguées. Les projections climatiques testées viennent généralement amplifier cette augmentation du fait de leur impact sur les besoins en eau des cultures. L'incertitude climatique reste néanmoins forte sur les bassins d'étude : si l'augmentation des températures fait peu de doute (dans une gamme assez large selon les scénarios), les projections de précipitation sont très contrastées. En conséquence, l'hétérogénéité de l'évolution la demande en eau projetée à l'horizon 2050, avec une tendance majoritairement à la hausse, pose la question de la disponibilité en eau pour assurer les équilibres ressource/demande sur les bassins, tout en considérant l'incertitude climatique.

Adéquation entre ressource et demande en eau à l'horizon 2050

1. Introduction

La Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCEE) (EC, 2000) impose aux bassins versants européens d'atteindre un équilibre entre les usages anthropiques de l'eau et la santé des écosystèmes. Dans ce cadre, des plans de partage des eaux sont en cours de définition dans de nombreux bassins versants, quand ils ne sont pas déjà actifs. Ces plans sont souvent élaborés pour des périodes compatibles avec cette directive, i.e. les horizons 2015, 2021 ou 2027 et ne prennent pas toujours en compte le changement climatique. Des projections d'équilibres ressource/demande sous différents changements anthropiques et climatiques ont donc été explorées.

Les incertitudes relatives aux changements anthropiques et climatiques ont été largement débattues dans la littérature. Tandis que certains auteurs font des recommandations pour améliorer la modélisation afin qu'elle soit plus utile à la prise de décisions (e.g. Milly *et al.*, 2008), d'autres ont souligné l'importance de considérer les incertitudes climatiques dans le processus de décision et de trouver des solutions d'adaptation en dépit de ces incertitudes (Patt *et al.*, 2005 ; Hallegatte, 2009 ; Wilby, 2010). Dessai & Hulme (2004) recommandent de tester la sensibilité des systèmes aux différentes probabilités de changements climatiques afin de guider l'adaptation. En suivant un cadre de prise de décision robuste (Dessai & Hulme, 2007 ; Dessai *et al.*, 2009 ; Wilby & Dessai, 2010), cette partie propose une approche qui englobe une gamme de scénarios climatiques possibles, basés sur une sélection de modèles climatiques globaux. Comme souligné par Räisänen (2007), la comparaison multi-modèles de projections climatiques semble être la voie la plus pertinente actuellement pour estimer cette incertitude.

L'objectif ici a donc été d'estimer la durabilité des usages de l'eau planifiés dans les bassins versants de l'Hérault et de l'Ebre soumis à de multiples scénarios de changement climatique en utilisant le cadre de modélisation intégrée présenté précédemment, et de déterminer les causes possibles d'instabilité des équilibres ressource/demande. Cette estimation s'est basée sur l'élaboration conjointe de scénarios avec les agences de gestion locales. Les résultats ont été analysés à partir d'indicateurs prenant en compte les objectifs de gestion ainsi que l'influence de l'incertitude climatique.

2. Utilisation de la chaîne intégrative de modélisation sous scénarios prospectifs

La chaîne intégrative de modélisation présentée précédemment (Fig. D.26) a été utilisée pour simuler les équilibres ressource/demande à l'horizon 2050 en se basant sur les scénarios présentés ci-après.

2.1. Prise en compte d'un débit environnemental minimum

Pour chaque nœud de demande, la demande en eau pour les usages anthropiques a été définie selon les méthodes synthétisées en Fig. D.7. La demande en eau environnementale a été ajoutée pour les scénarios prospectifs. Deux types de demandes environnementales ont été considérés dans cette étude. Le premier type de demande, appelé Q_{MIN} , a été défini comme le débit en-dessous duquel aucun prélèvement pour un usage anthropique n'est autorisé. Ce type de débit minimum peut également être défini en aval d'un barrage ou d'un site de prélèvement, par exemple, pour garantir la disponibilité pour d'autres usages de l'eau en aval et un débit minimum environnemental. Un second type de débit environnemental a été considéré, en accord avec la planification et les objectifs d'allocation : dans les plans de partage des eaux, le volume total alloué aux différents usagers peut être limité pour garantir un débit moyen mensuel minimum, appelé débit objectif (ou Q_{OBJ}) dans le projet. Ce débit minimum mensuel n'est pas imposé en tant que tel mais utilisé en tant qu'objectif de planification. Dans le bassin de l'Hérault, par exemple, les allocations en eau devront être ajustées de façon à respecter ce débit au moins 8 années sur 10.

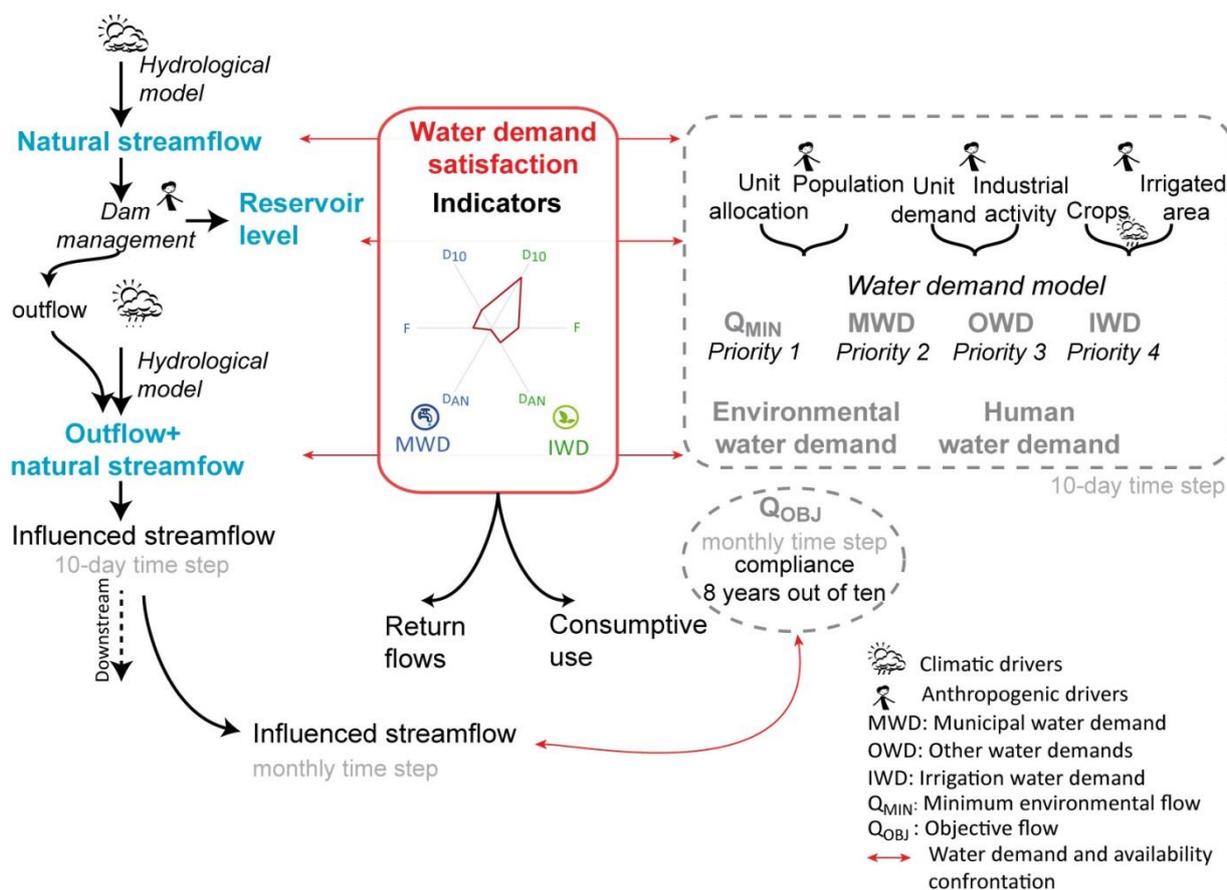


Figure D.26. Chaîne intégrative de modélisation appliquée à chaque nœud de disponibilité et de demande en eau sur les bassins de l'Hérault et de l'Ebre. Les demandes en eau et les débits naturels ont été simulés en tenant compte des contraintes climatiques et anthropiques. L'influence anthropique sur les débits a été évaluée grâce à la simulation des barrages-réservoirs pilotés par la demande et par la simulation des consommations nettes. La satisfaction des demandes a été évaluée en confrontant la demande à la disponibilité à travers des indicateurs de fréquence et d'intensité de restrictions. ([ACL5]).

Les valeurs Q_{MIN} ont été définies à l'exutoire de chaque sous-bassin, à l'aval des barrages-réservoirs et en des points spécifiques, comme notamment une contrainte de $30 \text{ m}^3/\text{s}$ au niveau de l'Ebre à Saragosse et de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ au niveau de l'Ebre à Tortosa comme le prévoit la CHE dans son plan de gestion (CHE, 2013). Les prélèvements ont été interdits en dessous de ces valeurs seuil pour lesquelles les méthodes de définition ont été différentes en fonction des règles de gestion locale des deux bassins. Dans le bassin de l'Hérault, les valeurs de Q_{MIN} et Q_{OBJ} ont été fixées par les gestionnaires locaux en se basant sur les variations autour du QMNA5, soit un débit mensuel minimum ayant une probabilité d'être dépassé 4 années sur 5 dans les observations hydrométriques. Ainsi, dans le projet, les débits influencés simulés par la chaîne de modélisation au niveau de chaque sous-bassin sur la période 1981–2009¹ ont été utilisés pour calculer les valeurs de QMNA5 et donc de Q_{MIN} et Q_{OBJ} . Par exemple, le débit minimum défini par les autorités locales à la station hydrométrique de Gignac correspond à 70 % du QMNA5 observé en cette station. Q_{MIN} a été fixé au niveau de ce point à une valeur correspondant à 70 % du QMNA5 simulé par la chaîne de modélisation à la station de Gignac sur la période 1981–2009. Au niveau du bassin de l'Ebre, les valeurs de Q_{MIN} et Q_{OBJ} (considéré égal à Q_{MIN}) ont été définies à l'exutoire de chaque sous-bassin comme correspondant à 10 % du débit naturel annuel moyen simulé sur la période 1981–2009 (ou 5 % de ce débit quand celui-ci dépassait $80 \text{ m}^3/\text{s}$).

¹ Plutôt que la période climatique de référence 1976–2005 retenue, la période 1981–2009 a été utilisée pour définir les valeurs de QMNA5 car elle correspondait mieux à la disponibilité d'observations hydrométriques et était déjà utilisée par le gestionnaire de bassin pour ses études sur les débits de référence.

2.2. Ordres de priorité d'allocation et restrictions

La disponibilité et la demande en eau ont été confrontées à chaque noeud de demande. Un ordre de priorité a été considéré entre les différents usages (débit environnemental réservé, demande en eau municipale, puis industrielle/énergétique et en fin d'irrigation, voir Fig. D.26). Si la disponibilité en eau est égale ou supérieure à la demande, alors les prélèvements autorisés correspondent à la demande en eau pour tous les types de demandes anthropiques. Sinon, des restrictions sont appliquées de manière à limiter les prélèvements pour les usages anthropiques. Les restrictions s'appliquent d'abord à la demande d'irrigation, puis aux autres demandes (industrielles/énergétiques) et enfin à la demande municipale. Aucune restriction n'a été appliquée aux demandes industrielles et municipales avant que les restrictions de prélèvements pour l'irrigation n'aient atteint 100 % de la demande. Les restrictions d'eau ont été calculées comme la différence entre les demandes en eau et les prélèvements en eau effectifs pour les satisfaire. Seulement une partie de l'eau prélevée a été considérée comme effectivement utilisée (consommation), la part restante revenant à l'exutoire du bassin comme un écoulement de retour (voir Fig. D.10). La chaîne de modélisation a ainsi permis de simuler :

- les écoulements naturels et leur disponibilité en considérant les règles de gestion de l'eau et les principales infrastructures de stockage-restitution ;
- la capacité à satisfaire les demandes en eau en différents nœuds des bassins d'étude ;
- les écoulements influencés sous contrainte de la variabilité des conditions hydro-climatiques et des pressions humaines (prélèvements, consommations, retours au réseau et gestion de barrages).

2.3. Combinaison des scénarios climatiques et d'usages de l'eau

La chaîne de modélisation a été appliquée selon quatre combinaisons de scénarios climatiques et d'usages de l'eau de manière à différencier les impacts des changements climatiques et anthropiques sur les équilibres entre disponibilité et demande en eau au sein des bassins. Ces combinaisons et leurs objectifs correspondants sont présentés dans le Tableau D.8.

Les écoulements naturels en climat de référence ont été simulés avec le modèle hydrologique à partir des forçages climatiques de la période 1976–2005. Les écoulements naturels en climat futur (2036–2065) ont été simulés avec les paramètres calés sur 1981–2009 (voir section « Modélisation intégrée des hydrosystèmes »), sous contrainte des 18 scénarios climatiques présentés au chapitre précédent.

Le modèle de gestion de barrage a été contraint avec les conditions hydro-climatiques et de demande en eau en lien avec chacune des combinaisons de scénarios. Dans cet exercice, le scénario tendanciel d'usages de l'eau a permis d'inclure également les changements projetés dans les modes de gestion de barrage, tels que le doublement de la capacité de stockage du barrage de Yesa (un projet actuellement en cours sur le bassin de l'Ebre). Ainsi, les objectifs de niveaux de réservoir ont été modifiés dans les combinaisons intégrant le scénario tendanciel d'usages de l'eau. Les niveaux objectif et minimum n'ont pas été modifiés pour les autres barrages.

Tableau D.8. Quatre combinaisons de scénarios climatiques et d'usages de l'eau appliqués au sein des bassins de l'Hérault et de l'Ebre.

Combinaison	Usages de l'eau	Climat	Objectif d'évaluation
Usages actuels sous climat de référence	Décennie 2000	1976–2005	Durabilité des usages actuels confrontés à la variabilité d'un climat de référence
Usages actuels sous climat futur	Décennie 2000	2036–2065	Durabilité des usages actuels sous changement climatique
Usages futurs sous climat de référence	2050	1976–2005	Durabilité des usages projetés confrontés à la variabilité d'un climat de référence
Usages futurs sous climat futur	2050	2036–2065	Durabilité des usages projetés sous changement climatique

2.4. Indicateurs de satisfaction de la demande en eau

Comme détaillé précédemment dans la section « Modélisation intégrée des hydrosystèmes », les restrictions d'eau ont été simulées au pas de temps décennaire en chaque noeud de demande pour chaque type de demande. La satisfaction des demandes en eau municipale et d'irrigation a ainsi été caractérisée par trois indicateurs :

- F : fréquence d'années avec au moins une restriction significative au pas de temps décadaire, soit une limitation de prélèvements de plus de 5 % de la demande municipale (MWD) ou d'irrigation (IWD¹) ;
- D₁₀ : déficit décadaire moyen (%) au moment des restrictions ;
- D_{AN} : déficit annuel moyen (%) occasionné par les restrictions.

Ces indicateurs caractérisent donc la fréquence et l'intensité des restrictions d'eau. D₁₀ est calculé en moyennant les déficits décadaires non nuls (soit une restriction exprimée comme un pourcentage de la demande en eau) sur l'ensemble de la période de simulation. Les restrictions d'eau ont été sommées pour chaque année et le déficit annuel moyen D_{AN} a été calculé à partir des années ayant connu au moins une restriction décadaire sur l'ensemble de la période de simulation. Ces trois indicateurs ont été calculés séparément pour la demande en eau municipale (MWD) et la demande en eau d'irrigation (IWD).

2.5. Evaluation de la pression anthropique sur les écoulements

Un niveau de pression anthropique sur les ressources eau a été également évalué pour chaque combinaison de scénarios, à travers la différence moyenne décadaire entre les écoulements naturels et influencés à l'exutoire de chaque bassin sur la période de simulation. Le niveau de pression anthropique a donc été exprimé comme un pourcentage des écoulements naturels simulés.

Par ailleurs, pour chaque combinaison de scénarios, les écoulements mensuels influencés ont été comparés aux débits mensuels environnementaux Q_{OBJ} afin de calculer la fréquence de non-respect de ces débits objectifs sur la période de simulation.

3. Résultats

3.1. Projections hydro-climatiques et de demandes en eau

3.1.1. Projections hydro-climatiques en 2050

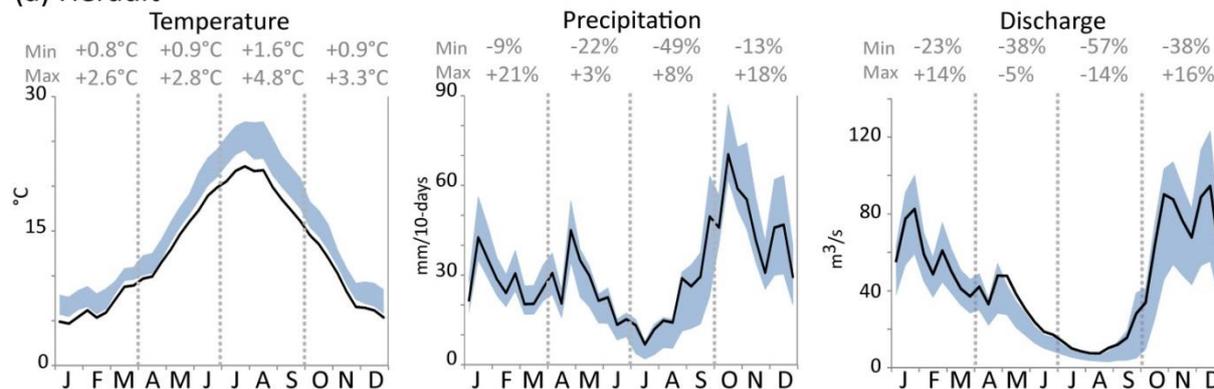
Les 18 scénarios climatiques établis au chapitre précédent à partir des simulations de 9 GCMs sous RCPs 4.5 et 8.5 à l'horizon 2050 (Fig. D.27) conduisent à des changements dans les écoulements naturels simulés par rapport à la période référence 1976–2005. Tandis que les résultats de simulation divergent en automne, en hiver, et au printemps, tous les scénarios hydrologiques s'accordent sur une diminution des écoulements en été, légèrement plus marquée sur le bassin de l'Hérault (de -14 % à -57 %) que sur le bassin de l'Ebre (de -4 % à -36 %). Au niveau du bassin de l'Ebre, bien qu'incertains, les changements projetés montrent une tendance assez claire à l'augmentation des débits en début de printemps (avril) en lien avec une fonte de neige plus précoce, tandis que tous les scénarios s'accordent sur une diminution des débits de printemps (de -5 % à -38 %) au niveau du bassin de l'Hérault.

3.1.2. Projections des demandes en eau en 2050

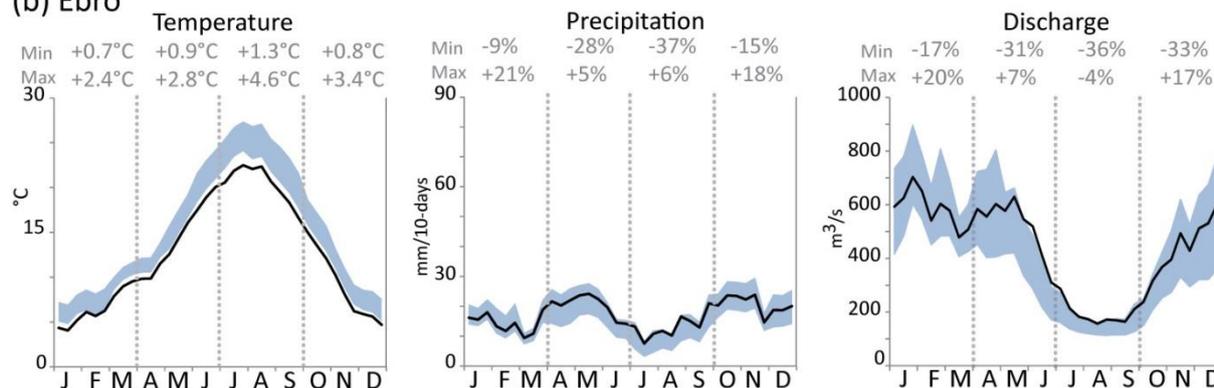
Au niveau du bassin de l'Hérault, les projections de demande en eau en 2050 sont contrastées entre les portions amont et aval (Fig. D.28a). Bien que certaines portions amont, telles que celle de Laroque et de Lodève, puissent voir leur demande en eau augmenter, les projections de demande en eau d'irrigation restent relativement faibles par rapport aux portions de Gignac et d'Agde. Dans la portion de Gignac, l'amélioration de l'efficacité hydraulique projetée dans le scénario tendanciel d'usages de l'eau conduit à une diminution de 50 % de la demande en eau d'irrigation malgré un accroissement de 65 % des surfaces irriguées. Par contre, la demande d'irrigation dans la portion d'Agde pourrait doubler du fait d'une extension de 90 % des surfaces irriguées. Dans les deux portions, l'impact du changement climatique projeté (selon les scénarios les plus pessimistes) sur la demande d'irrigation est du même ordre de grandeur que l'impact des changements anthropiques projetés. On observe également que la demande municipale (MWD) au niveau de la portion d'Agde pourrait augmenter de 57 % pour atteindre environ 40 hm³/an, dont 28 hm³/an seraient destinés à satisfaire les demandes en eau en augmentation également à l'extérieur du bassin. Sous scénario tendanciel d'usages de l'eau (indépendamment du changement climatique), la portion d'Agde concentrerait 83 % des demandes municipales en eau du bassin de l'Hérault.

¹ Dans la section « modélisation intégrée des hydrosystèmes », les restrictions sur les demandes en eau d'irrigation (IWD) avaient été considérées quand elles excédaient 50 % de la demande pour la simulation historique des restrictions d'eau sur la période 1971–2009.

(a) Hérault



(b) Ebro



— Average temperature, precipitation and natural discharge, 1976–2005

■ Average temperature, precipitation and natural discharge, 2036–2065 (18 climate change scenarios)

Figure D.27. Enveloppes de projections hydro-climatiques saisonnières moyennes selon 18 scénarios climatiques à l’horizon 2050 en comparaison avec les conditions de référence sur la période 1976–2005 au niveau des bassins (a) de l’Hérault et (b) de l’Ebre. Les écoulements naturels sont simulés avec le modèle hydrologique sur la période de référence et sur la période future – ([ACL5]).

Quels que soient les scénarios, la demande d’irrigation devrait augmenter au niveau de toutes les portions de l’Ebre, excepté au niveau des secteurs irrigués de Bardenas, Alto Aragon et Ebro Valley, où certains scénarios climatiques conduisent à une diminution de la demande d’irrigation avec les usages actuels. Avec le scénario tendanciel d’usages, les surfaces irriguées augmentent dans tous les bassins, notamment au niveau des portions de Segre et de Lower Ebro. Au niveau de ces portions, l’impact du scénario tendanciel est plus important que l’impact de la plupart des scénarios climatiques (Fig. D.28b). A l’inverse, les changements climatiques projetés ont plus d’impact sur la demande irrigation au niveau des secteurs de Bardenas, Aragon y Catalunya, Jalón et Guadalupe, par rapport au scénario tendanciel d’usages. L’incertitude associée à l’impact des scénarios climatiques sur la demande d’irrigation est particulièrement marquée au niveau des portions de Aragon y Catalunya et de Segre du fait de projections divergentes sur le signal de changement de précipitation. Bien que la demande d’irrigation reste largement dominante en 2050, la demande municipale et les autres demandes devraient augmenter dans tous les secteurs selon le scénario tendanciel d’usages. Les augmentations de demande municipale les plus marquées concernent les secteurs de Aragon y Catalunya (+30 %), Segre (+45 %) et Lower Ebro (+50 %). Les projections du scénario tendanciel conduisent à au moins un doublement des autres demandes (OWD) pour toutes les portions (entre +100 % pour Aragon y Catalunya jusqu’à +185 % pour Ebro Valley), excepté pour Segre et Lower Ebro où l’augmentation est plus modérée.

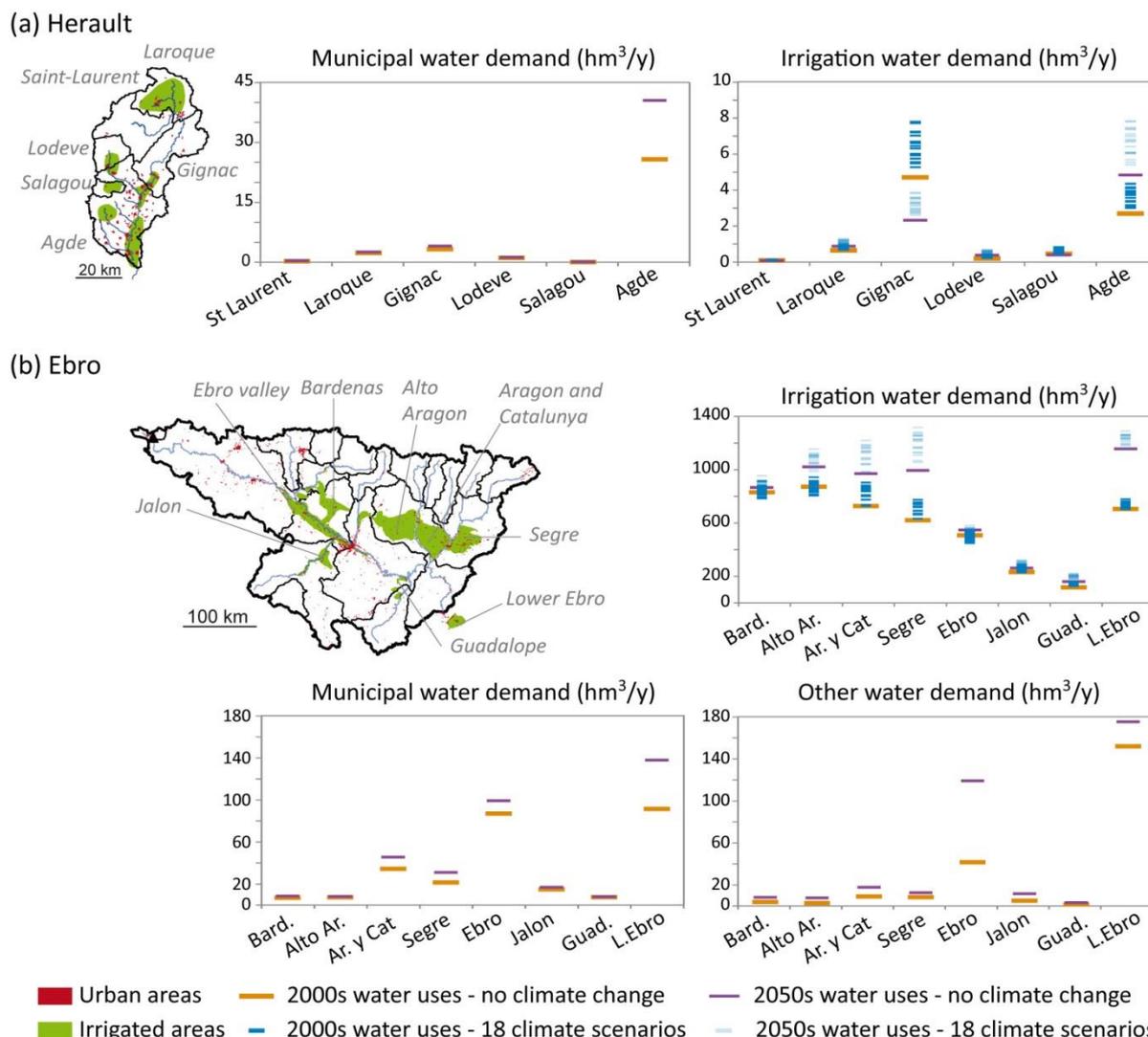


Figure D.28. Demande en eau pour les activités humaines selon quatre combinaisons de scénarios climatiques et d’usages de l’eau dans (a) le bassin de l’Hérault et (b) le bassin de l’Ebre. ([ACL2] ; [ACL5]).

3.2. Satisfaction de la demande en eau sous scénarios climatiques et d’usages de l’eau

La Figure D.29 présente les indicateurs de satisfaction des demandes en eau municipales (MWD) et d’irrigation (IWD) obtenus sous quatre combinaisons de scénarios climatiques et d’usages de l’eau au niveau des différents nœuds de demande/disponibilité des deux bassins d’étude. Les valeurs des trois indicateurs sont représentées sous forme de graphique radar pour faciliter la lecture et vont de 0 (aucun déficit, au centre du graphique) à 1 (déficit maximum en termes de fréquence ou d’intensité, aux bornes extérieures du graphique).

3.2.1. Satisfaction de la demande en eau sur le bassin de l’Hérault

Si l’on considère les usages de l’eau actuels soumis à la variabilité du climat de référence 1976–2005, les restrictions d’eau apparaissent moins d’une année sur cinq au niveau des nœuds de demande du bassin de l’Hérault à l’exception des secteurs de Gignac et d’Agde où les restrictions d’eau pour l’irrigation se produisent deux années sur cinq (Fig. D.29a). Au niveau des sections de Saint-Laurent, de Lodève et d’Agde, la moyenne des restrictions d’eau pour l’irrigation dépasse 70 % tandis que l’intensité moyenne des restrictions est moins marquée dans les autres sections, voire nulle (cas de la portion du Salagou). Le déficit annuel moyen le plus marqué concerne les portions de Saint-Laurent et d’Agde et représente environ 20 % de la demande d’irrigation quand l’année enregistre au moins une restriction décadaire.

Le scénario tendanciel d’usages de l’eau sous climat de référence impacte seulement la satisfaction de la demande d’irrigation au niveau de la portion d’Agde. Malgré une diminution marquée de la demande

d'irrigation dans le secteur de Gignac (en lien avec une nette amélioration de l'efficacité hydraulique malgré une extension des surfaces irriguées), la fréquence des restrictions de prélèvements ne diminue pas du fait d'une augmentation importante des demandes en eau municipales sur la portion d'Agde. En effet, la demande municipale a été considérée en première priorité sur la demande d'irrigation entre les deux portions : ainsi, si l'écoulement (avec un débit environnemental réservé) est insuffisant pour satisfaire la demande en eau municipale du sous-bassin aval, les prélèvements d'irrigation dans la portion de Gignac sont limités.

Si l'on considère les usages actuels sous scénarios de changement climatique, les équilibres disponibilité/demande sont détériorés au niveau de tous les nœuds de demande du bassin de l'Hérault. Cependant, les résultats sont très variables en fonction des scénarios climatiques, notamment en ce qui concerne la fréquence des restrictions. Ainsi, les restrictions d'irrigation au niveau de Gignac ont lieu entre trois et huit années sur dix selon les scénarios climatiques. Malgré l'augmentation sensible de la fréquence de restrictions, les déficits annuels moyens sont peu affectés par les changements climatiques projetés, à l'exception de la portion de Gignac, où les déficits annuels d'irrigation représentent environ 30 % de la demande avec les scénarios climatiques les plus pessimistes. Sous ces scénarios, des restrictions très fréquentes (6 à 7 années sur 10) apparaissent également au niveau de la portion d'Agde.

Enfin, les simulations sous contraintes combinées de changement climatique et anthropique montrent que les restrictions d'eau sont plus sensibles aux scénarios climatiques qu'au scénario tendanciel d'usages dans tous les secteurs de l'Hérault. Le scénario d'usages amplifie l'impact des scénarios de changement climatique sur les restrictions au niveau de la portion d'Agde.

3.2.2. Satisfaction de la demande en eau sur le bassin de l'Ebre

Si l'on considère les usages de l'eau actuels soumis à la variabilité du climat de référence, les secteurs de Bardenas, de la vallée de l'Ebre, du Jalón et de Guadalupe sont en déséquilibre avec des restrictions d'irrigation chaque année et des déficits annuels moyens de 30 % pour Bardenas et Ebro Valley, et de 60 à 70 % pour les secteurs du Jalón et de Guadalupe situés sur la rive droite (Fig. D.29b). Les secteurs de cette rive rencontrent d'ailleurs des restrictions décennales moyennes plus importantes. Des restrictions sur la demande en eau municipale apparaissent aussi fréquemment (plus d'une année sur deux) dans toutes ces portions.

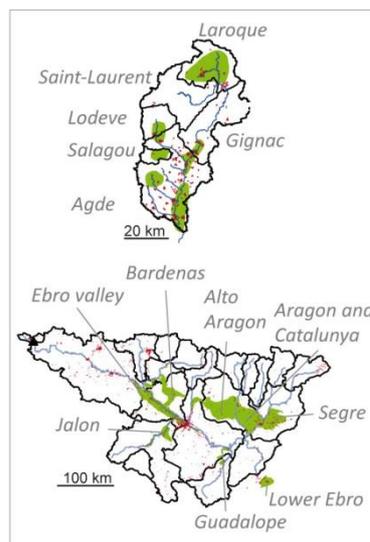
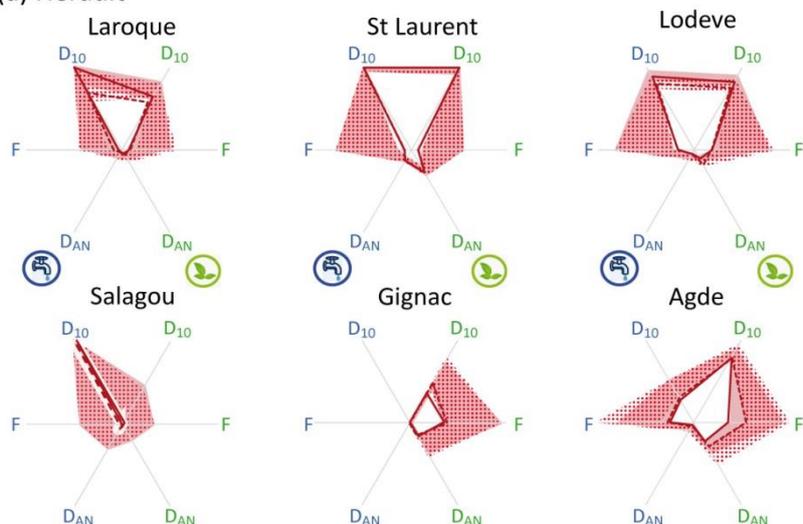
Le scénario tendanciel d'usages de l'eau sous climat de référence impacte peu les fréquences et intensités de restrictions d'eau par rapport aux usages actuels sous les mêmes conditions dans la plupart des portions sauf pour les secteurs de Bardenas et de Alto Aragon. Au niveau du secteur de Bardenas, le doublement de la capacité du barrage de Yesa conduit à diminuer la fréquence de restrictions sur la demande en eau municipale et d'irrigation, de chaque année à trois années sur dix. Par ailleurs, l'extension projetée des surfaces irriguées dans le secteur d'Alto Aragon rend les restrictions d'irrigation plus fréquentes.

La combinaison des usages actuels sous scénarios de changement climatique conduit à augmenter la fréquence des restrictions d'irrigation dans tous les secteurs où cette fréquence n'était pas déjà maximale avec les mêmes usages sous climat de référence, à l'exception d'Alto Aragon, un secteur où les usages actuels sous conditions climatiques passées sont en relatif équilibre et où certains scénarios climatiques prévoyant une augmentation des précipitations annuelles pourraient conduire à une diminution des restrictions d'irrigation. Cette combinaison conduit également à accroître les fréquences de restrictions concernant la demande municipale de plusieurs portions (Bardenas, Ebro Valley, Guadalupe) ainsi qu'à amplifier les déficits décennaux et annuels moyens. Les changements climatiques appliqués aux usages actuels n'impactent pas la satisfaction de la demande au niveau de la portion de Segre et peu au niveau des portions de Alto Aragon, Aragon y Catalunya et Lower Ebro.

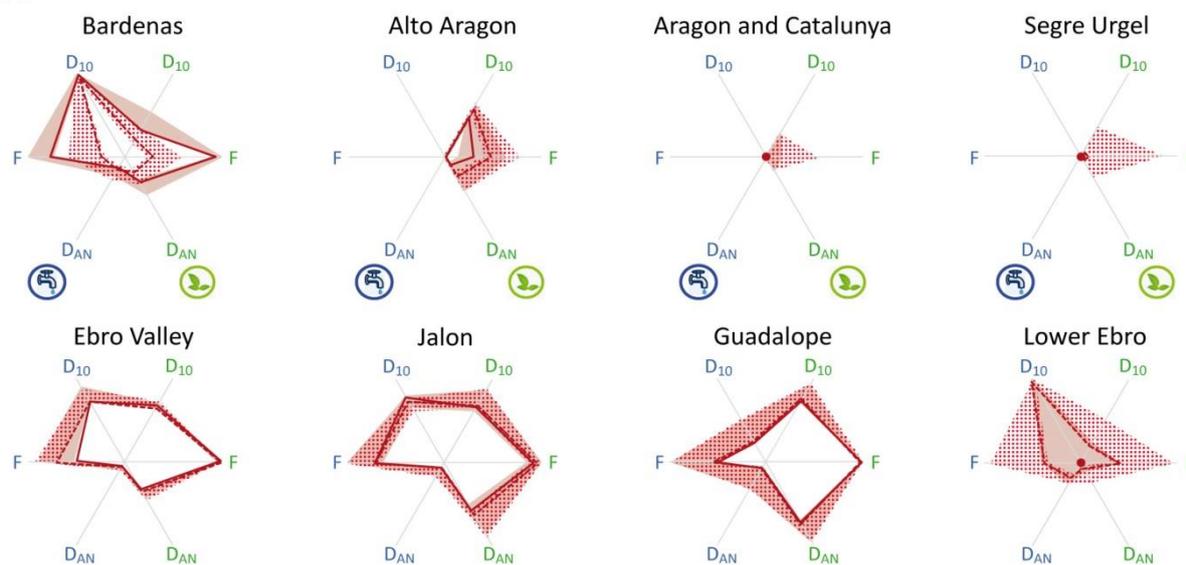
Enfin, les simulations sous contraintes combinées de changement climatique et anthropique conduisent à une augmentation des restrictions d'eau dans toutes les portions du bassin par rapport aux usages actuels sous climat de référence. La seule exception concerne le secteur de Bardenas pour lequel le doublement de la capacité de stockage (considéré dans le scénario tendanciel au niveau du barrage de Yesa) permet de réduire les restrictions de manière plus ou moins marquée selon les scénarios climatiques, ce qui rend d'ailleurs l'efficacité de cette stratégie relativement incertaine. Dans les portions du Jalón et de Guadalupe, les changements climatiques et anthropiques projetés conduisent à une augmentation de l'intensité des restrictions d'irrigation et de la fréquence des restrictions concernant la demande municipale. Cependant, dans ces secteurs, l'inadéquation entre la disponibilité et la demande en eau avec les usages actuels sous climat de référence est déjà très marquée et la combinaison de changements climatiques et d'usages de l'eau amplifie seulement des déficits structurels. Cette combinaison entraîne des restrictions fréquentes d'irrigation (de l'ordre de 8 à 9 années sur 10) au niveau de secteurs qui étaient peu impactés par les autres combinaisons de scénarios. En particulier, dans les conditions projetées, le secteur de Lower Ebro situé en aval de l'hydrosystème Ebre voit apparaître des restrictions très fréquentes (8 années sur 10)

quoiqu'assez ponctuelles au sein de l'année (déficit décadaire moyen important mais déficit annuel moyen faible) concernant la demande municipale. La conjugaison de conditions climatiques projetées généralement plus déficitaires avec une extension des surfaces irriguées sur l'ensemble du bassin semblent rendre cette portion située en aval de l'hydrosystème plus sensible aux restrictions que dans d'autres scénarios d'évolution (climatiques seuls ou usages seuls).

(a) Hérault



(b) Ebro



Water demand satisfaction indicators

- 2000s water uses Reference climate
- 2050s water uses Reference climate
- 2000s water uses 18 climate scenarios
- 2050s water uses 18 climate scenarios
- 🏠 Municipal water demand
- 🌱 Irrigation water demand
- D₁₀: average 10-day deficit
- F: Frequency of years with deficit
- D_{AN}: average annual deficit

Figure D.29. Indicateurs de satisfaction des demandes en eau municipales et d'irrigation sous quatre combinaisons de scénarios climatiques et d'usages de l'eau dans (a) le bassin de l'Hérault et (b) le bassin de l'Ebre. Les valeurs des trois indicateurs vont de 0 (aucun déficit) à 1 (déficit maximum en termes de fréquence ou d'intensité). ([ACL5]).

3.3. Pression anthropique sur les écoulements

Dans le bassin de l'Hérault, la pression anthropique sur les ressources en eau reste faible à l'échelle annuelle : elle passe de 2 % à 3 % des écoulements naturels entre les usages actuels (2000s) et le scénario tendanciel d'usages sous climat de référence, et atteint 2 à 3 % avec les usages actuels sous changement climatique, ou encore 3 à 4 % en combinant les scénarios climatiques avec le scénario tendanciel d'usages (Fig. D.30a). Néanmoins, ces chiffres masquent une pression croissante au moment des étiages. Alors que celle-ci représente 20 % des écoulements naturels totaux du bassin à la fin de juillet avec les usages actuels sous climat de référence, elle passe à 27 % avec les usages projetés sous les mêmes conditions climatiques. Sous scénarios de changement climatique, la consommation s'accroît encore et pourrait se produire un peu plus tôt au mois de juillet avec un pic atteignant 25 % à 45 % (selon les scénarios climatiques) avec les usages actuels sous changement climatique, et de 30 % à 50 % sous scénarios climatiques et d'usages de l'eau.

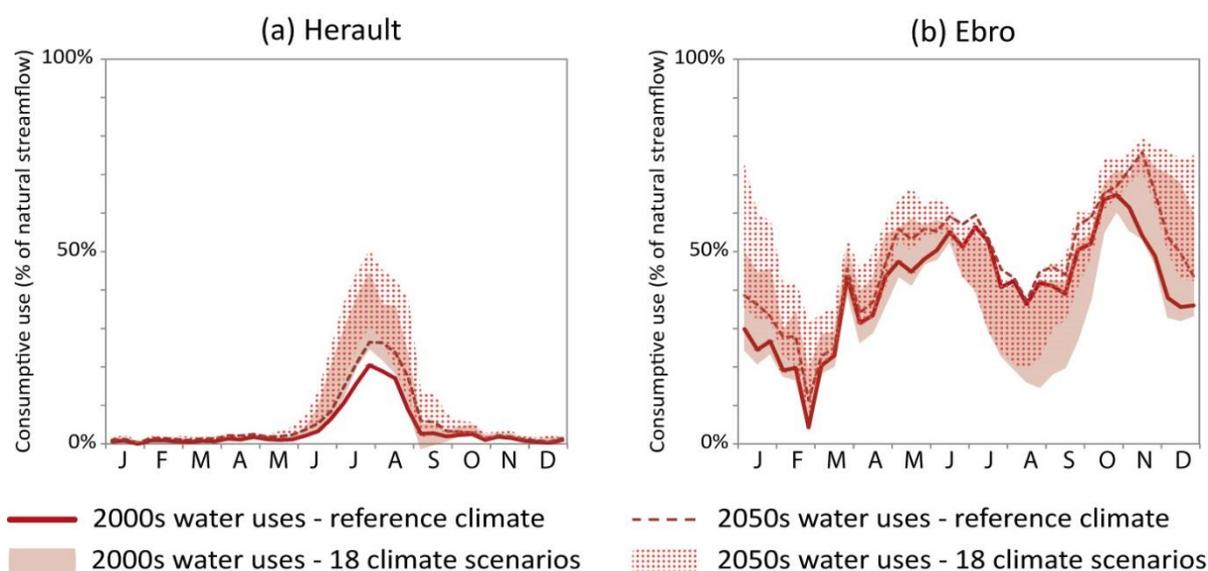
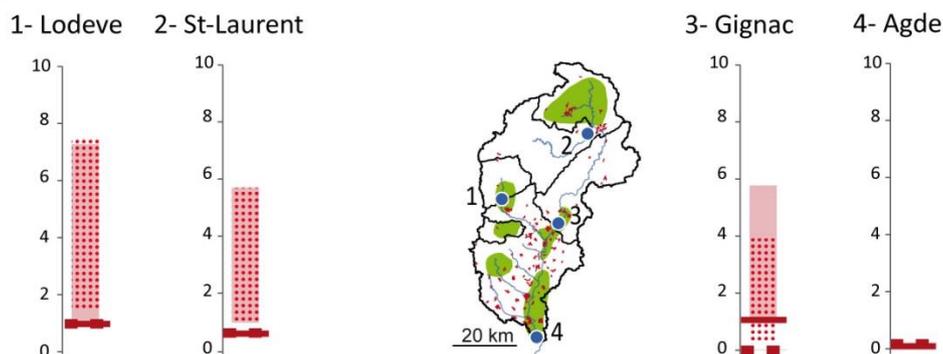


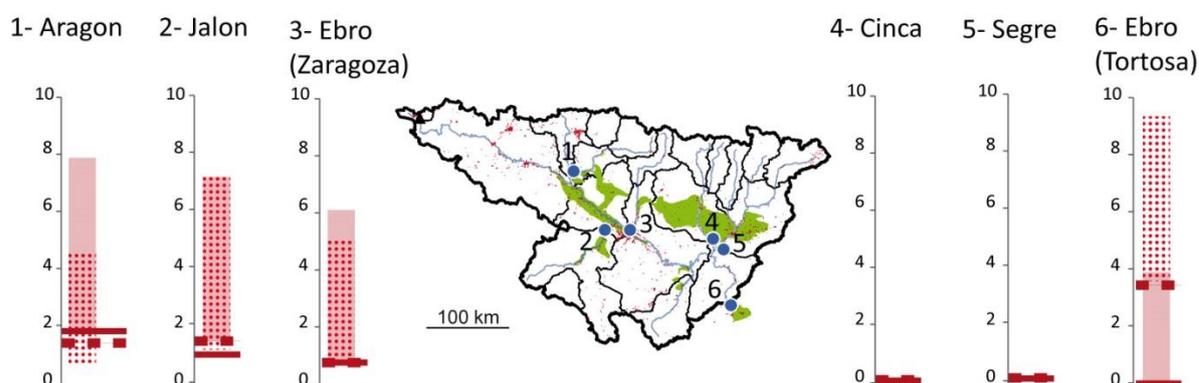
Figure D.30. Pressions anthropiques saisonnières moyennes sur les ressources en eau selon quatre combinaisons de scénarios climatiques et d'usages de l'eau dans le bassin (a) de l'Hérault et (b) de l'Ebre. La pression anthropique est estimée à travers la différence (exprimée en %) entre les écoulements naturels et influencés simulés à l'exutoire des bassins. ([ACL5]).

La Figure D.30b montre l'impact significatif du stockage sur les écoulements du bassin de l'Ebre. L'impact anthropique est particulièrement marqué au printemps et en automne et diminue paradoxalement l'été au moment où les prélèvements (notamment d'irrigation) sont les plus importants. Ceci s'explique par le fait que les prélèvements sont assurés principalement à travers les canaux d'irrigation alimentés par les lâchers de barrage ainsi que par la gestion des barrages de Mequinenza, Ribaraja et Flix (voir Fig. D.4) qui vise à assurer un débit minimum de sécurité de 100 m³/s pour le delta de l'Ebre. Cette contrainte de débit environnemental imposé dans les scénarios d'usages explique également la diminution de l'impact anthropique sur les écoulements estivaux sous changement climatique. En effet, bien que les écoulements naturels d'été diminuent sous changement climatique (voir Fig. D.27b), les sorties de barrages ont été fixées pour maintenir un débit d'au moins 100 m³/s à l'exutoire du bassin, ce qui assure des écoulements relativement conséquents. Par ailleurs, l'augmentation projetée des écoulements naturels en automne et en hiver (voir Fig. D.27b également) sous certains scénarios climatiques permet d'alimenter les réserves de barrage pour assurer des demandes estivales en augmentation sous changements climatiques et anthropiques. La pression anthropique sur les ressources en eau est néanmoins très élevée : elle représente 38 % des écoulements annuels moyens avec les usages actuels sous climat de référence et 45 % avec les usages futurs sous les mêmes conditions climatiques. Les scénarios de changement climatique conduisent à une augmentation de cette pression, allant de 36 % à 44 % avec les usages actuels, et de 43 % à 52 % quand ils sont combinés avec le scénario tendanciel d'usages de l'eau sur le bassin.

(a) Herault



(b) Ebro



Frequency of non-respect of monthly environmental flows (years out of 10)



Figure D.31. Fréquence moyenne d'années (sur 10 ans) avec un débit influencé mensuel inférieur au débit environnemental mensuel objectif Q_{OBJ} au sein du bassin (a) de l'Hérault et (b) de l'Ebre. Les fréquences sont jugées acceptables en dessous de deux années sur dix. ([ACL5]).

La Figure D.31 montre que les débits environnementaux mensuels objectif (Q_{OBJ}) sont assurés plus de huit années sur dix au niveau de tous les sous-bassins de l'Hérault et de l'Ebre selon les simulations basées sur les usages actuels soumis aux conditions climatiques passées de référence. On observe également que le scénario tendanciel d'usages sous les mêmes conditions climatiques conduit à diminuer la fréquence d'années satisfaites (seulement 3 à 4 années sur 10) à l'exutoire du bassin de l'Ebre. En revanche, il permet d'améliorer le respect des débits environnementaux sur le secteur de Gignac (Fig. D.31a) en lien avec les améliorations d'efficacité projetées concernant le réseau d'irrigation. Les scénarios climatiques conduisent généralement à une non-satisfaction (plus de 2 années sur 10) des débits environnementaux mensuels au niveau des portions de Lodève, Saint-Laurent et Gignac sur le bassin de l'Hérault, et dans tous les secteurs du bassin de l'Ebre exceptés les sous-bassins de Cinca et de Segre. Enfin, la combinaison des scénarios climatiques avec le scénario tendanciel d'usages de l'eau conduit à dégrader significativement la satisfaction des débits environnementaux au niveau de l'Ebre à Tortosa, avec néanmoins une forte incertitude (insatisfaction moyenne entre 4 et 9 années sur 10 selon les scénarios climatiques).

4. Conclusion

L'application de la chaîne intégrative de modélisation selon différentes combinaisons de scénarios climatiques et d'usages de l'eau a permis d'explorer l'évolution des équilibres entre disponibilité et demande à travers

plusieurs indicateurs visant à exprimer les fréquences et intensités des restrictions d'eau. L'impact des changements climatiques testés sur la disponibilité et la demande amène à s'interroger sur la pertinence des usages et des contraintes environnementales actuellement projetées pour les prochaines décennies sur les deux bassins. En effet, sous contrainte conjuguée de changements climatiques et anthropiques, les restrictions d'eau pour les activités humaines pourraient devenir plus fréquentes et plus sévères, et la pression sur la ressource en eau et les écosystèmes aquatiques pourrait s'intensifier.

Ces résultats appellent à tester de possibles mesures d'adaptation pour maintenir la viabilité des usages au sein de chaque bassin. Dans le bassin de l'Hérault, les gestionnaires de l'eau devront répondre à l'enjeu de la satisfaction de la demande en eau municipale (à l'intérieur et à l'extérieur du bassin) tout en prenant en compte les interactions entre les différents usages et entre l'amont et l'aval, et en garantissant des débits environnementaux minimum. Par exemple, il a été montré que les efforts planifiés concernant l'efficacité d'irrigation dans le secteur de Gignac n'entraîneraient pas nécessairement une augmentation de la satisfaction de la demande locale d'irrigation du fait de la priorité donnée à la satisfaction de la demande en eau municipale plus en aval. Dans le bassin de l'Ebre, l'adaptation concernera plus vraisemblablement la demande en eau d'irrigation. La stratégie de stockage et de régulation déjà largement exploitée sur le bassin avec de très nombreux barrages-réservoirs constitue un moyen pour maintenir les équilibres ressource-demande. Cependant, la prudence doit être de mise concernant l'accroissement des capacités de stockage, qui pourrait s'avérer inefficace sur le long terme sous conditions climatiques non-stationnaires. Ainsi, par exemple, le stockage supplémentaire apporté par le projet d'élargissement du barrage de Yesa dans le secteur de Bardenas ne pourrait pas nécessairement être alimenté par les écoulements amont sous certains scénarios climatiques, ce qui réduirait considérablement les bénéfices attendus de l'investissement.

L'étape suivante a donc consisté à évaluer la sensibilité des évolutions de satisfaction de la demande aux variations des principaux déterminants mobilisés dans le scénario tendanciel d'usages de l'eau de manière à évaluer l'efficacité et la robustesse de certaines mesures d'adaptation sur les territoires étudiés.

Efficacité et robustesse de stratégies d'adaptation

1. Introduction

La partie précédente a montré que les projections d'usages de l'eau dans les bassins de l'Hérault et de l'Ebre présentaient un risque très important de non viabilité sous les scénarios de changement climatique testés : la demande en eau anthropique (notamment municipale et d'irrigation) serait fréquemment insatisfaite et les débits environnementaux ne seraient pas respectés. C'est pourquoi des changements pourraient être envisagés dans les plans de gestions locaux afin de s'adapter aux changements climatiques possibles, et atteindre ainsi un équilibre durable entre les demandes et les ressources en eau disponibles. Lorsque des déséquilibres entre demande et disponibilité en eau apparaissent, deux options se présentent pour réduire les déficits : réduire la demande ou augmenter la disponibilité. L'adaptation telle que considérée dans le projet REMedHE, concerne un ajustement des plans locaux, afin de déterminer si des modifications de ces plans pourraient conduire à limiter durablement les restrictions d'eau et la pression anthropique sur les ressources et les milieux aquatiques. Pour cela, chaque élément du scénario tendanciel d'usages de l'eau a été considéré séparément afin de déterminer son impact spécifique sur les fréquences et intensités de restrictions.

Une stratégie d'adaptation peut être jugée efficace si elle présente une certaine robustesse dans un cadre de projection incertain (Olmstead, 2014). Cette question de l'incertitude a été abordée ici en évaluant la sensibilité des équilibres ressource-demande aux variations de certains facteurs clefs d'évolution des territoires et de leur mode de gestion sous contrainte des 18 scénarios climatiques établis précédemment. Une méthode a ainsi été proposée pour appréhender l'efficacité et la robustesse de mesures d'adaptation considérées séparément ainsi que l'effet d'une combinaison possible de ces mesures pour les bassins de l'Hérault et de l'Ebre.

2. Tests de sensibilité

2.1. Variables d'ajustement pour l'adaptation

2.1.1. Sensibilité de la satisfaction de la demande en eau aux principales variables

Dans un premier temps, des options visant à restreindre les augmentations simulées des demandes en eau municipales (MWD) et d'irrigation (IWD) dans le scénario tendanciel ont été testées. Les variables prises en compte dans le modèle de simulation des demandes en eau sont la population permanente, l'allocation unitaire, la population saisonnière et l'efficacité des réseaux d'adduction d'eau potable, pour la MWD, ainsi que les superficies irriguées et l'efficacité d'irrigation pour l'IWD¹. La sensibilité de la satisfaction des demandes en eau aux variations de chacune de ces variables a été testée. En dehors de l'efficacité des réseaux d'adduction et de l'efficacité d'irrigation, on s'attend à une augmentation de toutes les autres variables dans le scénario tendanciel. La réduction de ces augmentations a donc été testée variable par variable. L'augmentation prévue a été réduite graduellement par pas de 10 % jusqu'à 100 % (100 % de réduction de l'augmentation correspondant donc à annuler l'augmentation et à garder la variable à son niveau selon les usages actuels).

2.1.2. Sensibilité aux variations des débits environnementaux minimum

Dans le scénario tendanciel, les débits environnementaux ont été gardés constants. Considérant que les débits naturels d'étiages seraient appelés à diminuer dans les deux bassins sous contrainte des 18 scénarios climatiques testés, une réduction des débits environnementaux par pas de 10 % a également été testée, jusqu'à atteindre 100 % (ce qui revient à annuler la contrainte des débits environnementaux). Cependant, pour le bassin de l'Ebre, seuls les débits environnementaux liés à des écoulements naturels ont été modifiés : les contraintes de débit réservé de 30 m³/s à Saragosse et de 100 m³/s à l'exutoire du bassin ont ainsi été maintenues.

2.1.3. Sensibilité aux variations de gestion des barrages-réservoirs

Des changements de gestion des barrages-réservoirs peuvent également être testés en modifiant les niveaux minimum et objectifs des réservoirs, en modifiant les priorités sur les demandes ou même en modifiant leur capacité de stockage. La sensibilité des équilibres ressource-demande aux variations du mode de gestion des barrages est illustrée ici en prenant l'exemple du barrage du Salagou dans le bassin de l'Hérault.

Actuellement, le débit turbiné par la centrale hydroélectrique du Salagou est de 0.5 m³/s. Ce débit turbiné est la seule sortie du barrage durant les mois d'été. Des ajustements de cette règle de gestion ont été testés afin d'assurer un soutien d'étiage au fleuve Hérault pendant les mois de juillet et août. Ces débits ont été augmentés par pas de 0.1 m³/s de 0.5 à 1.5 m³/s. Cependant, dans les conditions de gestion actuelle, la cote minimale requise limite fortement les possibilités de lâcher ces débits durant les mois d'été. Ainsi, l'augmentation des débits lâchés durant l'été implique forcément une baisse de la cote minimale de gestion du barrage. Afin de pouvoir tester la sensibilité à l'augmentation du soutien d'étiage, le niveau minimum du réservoir a donc été fixé à 80 hm³ (au lieu de 89 hm³ selon les usages actuels), indépendamment de l'acceptabilité politique et sociale d'un tel changement.

Il est à noter que les changements de gestion du barrage du Salagou peuvent impacter les équilibres ressource-demande aussi bien dans les zones alimentées par un pompage dans le réservoir du barrage qu'au niveau des zones aval de Gignac et d'Agde. Bien que la prise d'eau du canal de Gignac soit située en amont de la confluence de l'Hérault et de la Lergue (dans laquelle se jettent les sorties du barrage du Salagou), le soutien d'étiage de l'Hérault apporté par les nouvelles règles de gestion est à même d'améliorer la satisfaction des demandes en eau municipale de la zone d'Agde, permettant ainsi aux irrigants en amont d'augmenter leurs prélèvements.

¹ Comme pour le scénario tendanciel, les types de cultures pour chaque secteur irrigué sont les mêmes que pour les usages actuels de manière à limiter l'analyse à des adaptations non-structurelles des caractéristiques d'aménagement actuel des territoires. Des modifications substantielles des types de cultures pourraient néanmoins être testées avec la chaîne de modélisation mise en œuvre à l'occasion du projet.

2.2. Evaluation de l'efficacité et de la robustesse des mesures d'adaptation

2.2.1. Sensibilité aux mesures individuelles

La sensibilité des équilibres ressource-demande à chaque mesure individuelle a donc été évaluée par l'intermédiaire de leur impact sur la fréquence d'années en déficit (indicateur F, voir indicateurs dans la section « Adéquation des équilibres ressource/demande à l'horizon 2050 »). Anticiper l'adaptation à des changements climatiques largement incertains nécessite de mettre en place des mesures qui ne soient pas seulement efficaces (i.e. qui permettent d'assurer les équilibres ressource-demande) dans un scénario climatique donné, mais également robustes au regard des incertitudes du changement climatique (i.e. qui soient efficaces avec un grand nombre de scénarios climatiques différents). L'efficacité de l'adaptation a été mesurée par la baisse moyenne de la fréquence de déficit induite par la mesure sous les 18 scénarios de changement climatique, tandis que la robustesse a été évaluée par le nombre de scénarios climatiques dans lesquels la mesure engendrait une baisse de la fréquence de déficit. Les variations des variables clefs de la demande en eau et les ajustements des débits environnementaux ont été appliqués de manière homogène et simultanée à tous les nœuds de demande et de disponibilité. L'impact de chaque mesure d'adaptation a donc été évalué à l'échelle de tous les sous-bassins versants.

2.2.2. Sensibilité à des mesures d'adaptation combinées

Finalement, une combinaison de mesures a été proposée en se basant sur les tests individuels de sensibilité et sur la connaissance des gestionnaires locaux. La chaîne intégrative de modélisation a été utilisée pour simuler ces nouveaux scénarios et les indicateurs de satisfaction (voir indicateurs dans la section « Adéquation des équilibres ressource/demande à l'horizon 2050 ») ont été calculés pour chacun des 18 scénarios climatiques. La variation de pression anthropique sur les ressources en eau entre le scénario tendanciel et le scénario d'adaptation a également été évaluée. Ces pressions anthropiques ont été calculées, comme dans la Figure D.30, en comparant les débits influencés et naturels simulés à l'exutoire de chaque bassin.

3. Résultats

Bien que le modèle intégré ait fonctionné sur l'ensemble des sous-bassins et des nœuds de demande de l'Hérault et de l'Ebre, pour des raisons de clarté du propos et de concision, nous ne présentons ici les résultats que pour quatre nœuds de demandes représentatifs pour chaque bassin versant : les zones de Laroque, Salagou, Gignac et Agde pour le bassin de l'Hérault, et les zones de Bardenas, Alto Aragon, Jalón et Lower Ebro pour le bassin de l'Ebre.

3.1. Sensibilité des demandes en eau municipales et d'irrigation à des mesures individuelles

3.1.1. Contraintes sur l'augmentation de la population

Au niveau du bassin de l'Hérault, la demande municipale en eau (MWD) est principalement concentrée dans le sous-bassin d'Agde. Dans ce secteur, la demande serait de l'ordre d'environ 40 hm³/an si l'on considère la population permanente et saisonnière projetée en 2050 (voir Fig. D.32a). Rappelons que 60 à 70 % de cette demande visent à satisfaire les demandes de communes alimentées par transfert à l'extérieur du bassin. Sans considérer la demande en eau supplémentaire liée au tourisme, la MWD pourrait atteindre plus de 30 hm³/an en lien avec les projections de population permanente à l'horizon 2050 dans le secteur. Limiter l'augmentation de la population permanente pourrait donc avoir plus d'impact sur la diminution de la demande que limiter la population touristique, qui, bien que non-négligeable, contribue à une part plus faible de la MWD.

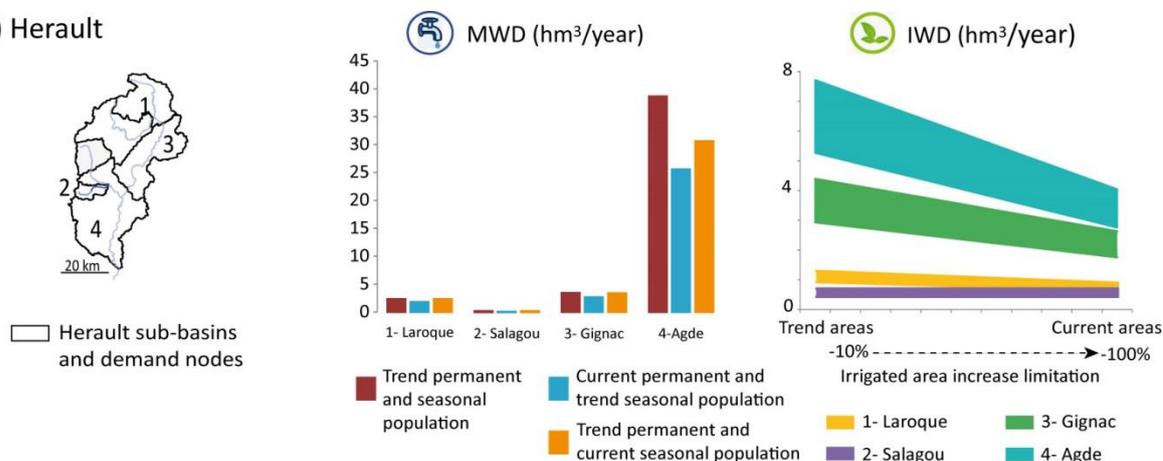
Dans le bassin de l'Ebre, la demande municipale en eau est particulièrement marquée dans la basse vallée de l'Ebre (Lower Ebro), où il est prévu que la population augmente plus fortement que dans les autres zones du bassin versant (Fig. D.32b).

3.1.2. Contraintes sur l'augmentation des surfaces irriguées

La Figure D.32 montre que la demande d'irrigation peut être significativement réduite pour les nœuds de demande où d'importantes augmentations de surfaces irriguées sont prévues (Gignac et Agde dans le bassin de l'Hérault et Alto Aragon et Lower Ebro dans le bassin de l'Ebre). Il est à noter que pour le bassin de l'Hérault, la réduction des surfaces irriguées projetées pourrait également limiter la marge d'incertitude liée aux différents scénarios climatiques. Dans la zone Bardenas du bassin de l'Ebre, le scénario tendanciel ne projette qu'une augmentation de 10 % des surfaces irriguées. L'adaptation par le contrôle des surfaces irriguées dans cette

zone est donc légèrement biaisée sauf si on envisage une réduction en deçà de la surface actuellement irriguée. De grandes améliorations d'efficacité d'irrigation (réseau d'adduction et techniques d'irrigation) sont projetées dans le scénario tendanciel du bassin de l'Hérault, particulièrement dans la zone de Gignac où l'efficacité devrait passer de 22 % actuellement à 70 % à l'horizon 2050. Cela aboutirait à une réduction par trois de la demande d'irrigation si les surfaces irriguées restent constantes.

(a) Herault



(b) Ebro

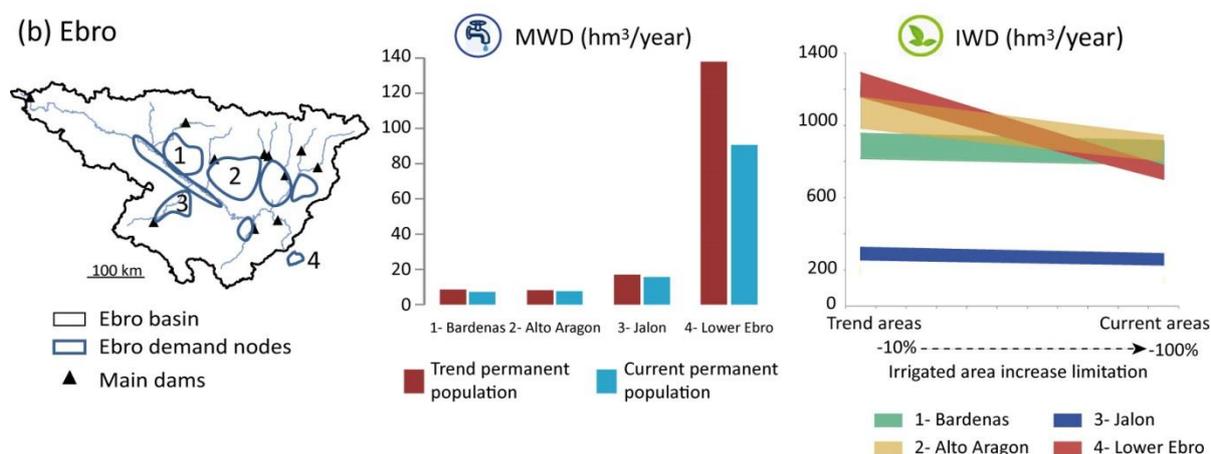


Figure D.32. Impacts des variations des variables principales de la demande en eau (population permanente et saisonnière, surfaces irriguées) sur la demande en eau municipale (MWD) et d'irrigation (IWD) dans quatre zones du bassin (a) de l'Hérault et (b) de l'Ebre. Les simulations de demande en eau d'irrigation (IWD) prennent en compte un faisceau d'incertitude de 18 scénarios climatiques. ([ACT5] ; [ACL6] ; [MEM3]).

3.2. Efficacité et robustesse de mesures individuelles pour réduire les fréquences de restrictions

3.2.1. Limiter l'augmentation de la demande en eau municipale et d'irrigation

Dans le bassin de l'Hérault, limiter l'augmentation de la population permanente et touristique ne contribue à diminuer la fréquence des restrictions en eau municipale et d'irrigation que dans les portions aval de Gignac et Agde (Fig. D.33). Ces mesures d'adaptation ont un impact très limité dans les portions amont (Laroque par exemple). Dans les deux portions de Gignac et Agde, la limitation de l'augmentation de la population permanente a un impact plus important que la limitation de l'augmentation de la population saisonnière liée au tourisme. Cependant, l'efficacité de ces mesures est faible quand on les considère individuellement : bien que la limitation de l'augmentation de population soit efficace pour réduire le déficit en eau municipale dans la portion d'Agde, une limitation stricte de cette augmentation (i.e. un scénario improbable de population constante) ne ferait baisser la fréquence moyenne de restrictions que de 0.65 à 0.56 (soit de 7 à 6 années sur 10 environ).

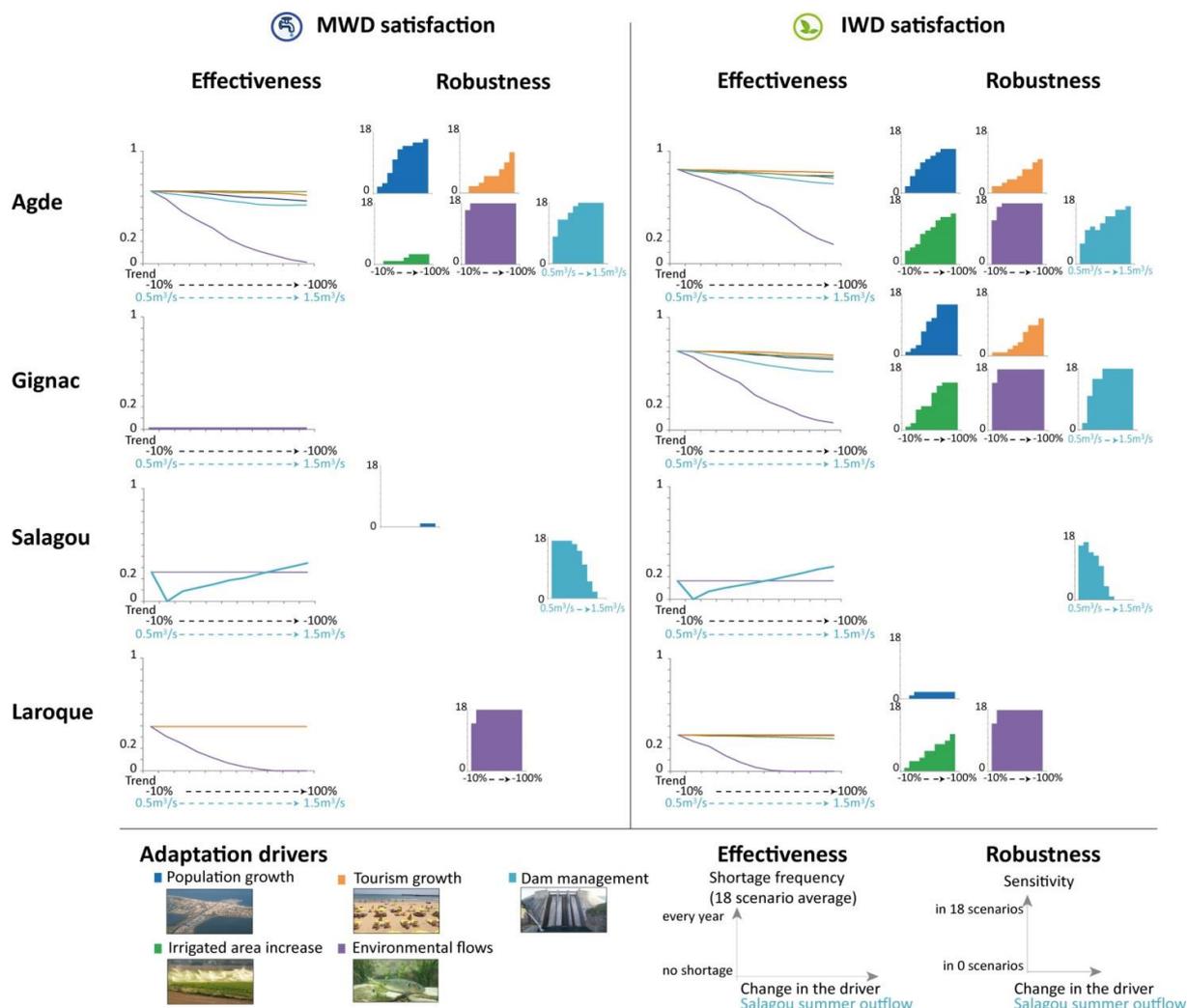


Figure D.33. Efficacité et robustesse de mesures individuelles pour réduire les fréquences de restrictions au niveau de quatre secteurs du bassin de l'Hérault. L'efficacité est estimée à travers les changements de fréquences de restrictions en eau (moyennés selon 18 scénarios climatiques) La robustesse est estimée à travers le nombre de scénarios climatiques pour lesquels la fréquence de restriction est réduite. ([ACT5] ; [ACL6] ; [MEM3]).

La Figure D.33 montre également la robustesse de chaque mesure individuelle d'adaptation pour réduire les fréquences de restriction sur la demande en eau municipale et d'irrigation. Si la fréquence de restriction est sensible à la réduction d'une évolution tendancielle d'un déterminant donné avec de nombreux scénarios climatiques, alors la mesure d'adaptation est considérée robuste dans les conditions testées. Par exemple, les résultats au niveau de la portion d'Agde montrent que la fréquence de restriction concernant la demande municipale est sensible à un accroissement de population limité à 50 % (par rapport au scénario tendanciel 2050) sous 16 scénarios climatiques sur 18, tandis que l'augmentation touristique prévue doit être drastiquement limitée avant de déclencher une réduction des fréquences de restriction avec de nombreux scénarios climatiques. Ainsi, au niveau des portions d'Agde et de Gignac, limiter l'accroissement de la population peut être considéré plus robuste à l'incertitude climatique que limiter l'augmentation de fréquentation touristique.

Dans le bassin de l'Hérault, limiter l'extension projetée des surfaces irriguées a principalement un impact sur la satisfaction de la demande en eau d'irrigation dans les secteurs de Gignac et d'Agde (Fig. D.33). Cet impact est néanmoins très faible, toute chose étant égale par ailleurs, car les projections de population dans et en dehors du bassin conduisent à prioriser les prélèvements pour la demande en eau municipale et rendent les restrictions déjà très fréquentes. Réduire l'extension des surfaces irriguées serait aussi efficace pour réduire les restrictions d'irrigation que de limiter l'accroissement de population pour ce qui concerne la portion d'Agde. Par ailleurs, aucune de ces mesures seules ne permet d'obtenir une efficacité significative sur les fréquences de restrictions.

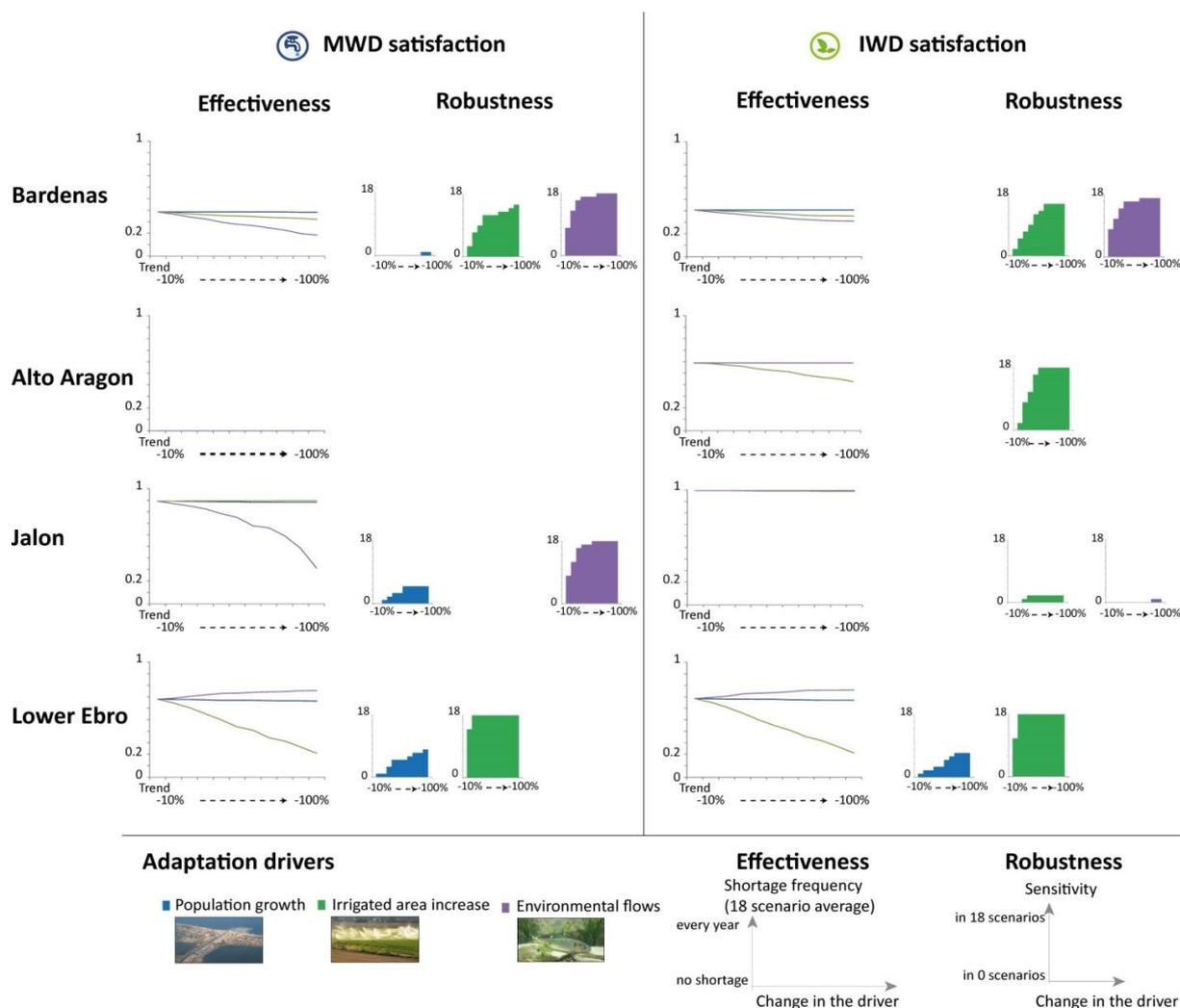


Figure D.34. Efficacité et robustesse de mesures individuelles pour réduire les fréquences de restrictions au niveau de quatre secteurs du bassin de l'Ebre. L'efficacité est estimée à travers les changements de fréquences de restrictions en eau (moyennés selon 18 scénarios climatiques) La robustesse est estimée à travers le nombre de scénarios climatiques pour lesquels la fréquence de restriction est réduite. ([ACT5] ; [ACL6] ; [MEM3]).

Au niveau du bassin de l'Ebre (Fig. D.34), limiter l'accroissement de la population n'est ni efficace pour réduire les fréquences de restrictions, ni robuste aux incertitudes climatiques. Autrement dit, cette mesure n'aurait aucun impact sur la satisfaction des demandes en eau d'irrigation dans les différents secteurs. A l'inverse, réduire l'extension projetée des surfaces irriguées pourrait avoir un impact significatif sur les fréquences de restrictions d'eau concernant la demande municipale et d'irrigation dans les secteurs de Bardenas, Alto Aragon, et surtout de Lower Ebro (en aval du bassin de l'Ebre), où la mesure semble très efficace et également robuste aux incertitudes climatiques. Seul le secteur de Jalón ne montre aucune sensibilité à cette mesure. On peut noter que, contrairement au bassin de l'Hérault, limiter la demande en eau d'irrigation (par limitation de l'accroissement des surfaces irriguées) pourrait améliorer la satisfaction des demandes en eau municipale dans le bassin de l'Ebre, alors même que la demande municipale est prioritaire en termes d'allocation. Ceci peut s'expliquer par le recours très important au stockage dans le bassin de l'Ebre. En effet, là où les prélèvements en eau sont assurés par les barrages, une demande d'irrigation importante peut conduire à vider les réservoirs plus tôt dans la saison, laissant alors moins d'eau disponible pour l'allocation en eau municipale à la fin de la saison. A l'inverse, une plus faible consommation en eau induite par une diminution de la demande en eau d'irrigation dans les secteurs amont laisse plus d'eau disponible pour les utilisateurs situés en aval.

3.2.2. Ajuster les débits environnementaux minimum

L'ajustement des débits environnementaux apparaît comme la mesure individuelle la plus efficace et la plus robuste pour limiter les fréquences de restrictions dans le bassin de l'Hérault (Fig. D.33). Ainsi, baisser le débit environnemental minimum de 50 % au niveau de la portion d'Agde pourrait amener la fréquence de

restrictions d'eau municipale à 0.2 (soit 2 années sur 10) en moyenne selon les 18 scénarios climatiques. Quelle que soit l'ajustement opéré (de -10 % à -100 % par rapport aux contraintes de débits du scénario tendanciel), la mesure est robuste avec tous les scénarios climatiques. Parmi les facteurs d'adaptation testés, c'est aussi la seule mesure qui pourrait avoir un impact sur la réduction des fréquences de restrictions dans les parties amont du bassin, comme au niveau de Laroque.

L'impact au niveau du bassin de l'Ebre est plus contrasté (Fig. D.34). Si la réduction du débit environnemental conduit à réduire assez significativement les fréquences de restrictions d'eau municipale sur les secteurs de Bardenas et du Jalón, et d'eau d'irrigation sur le secteur de Bardenas, il n'en est pas de même sur le secteur d'Alto Aragon (aucune sensibilité) et surtout sur le secteur de Lower Ebro où les fréquences augmentent avec cette mesure. En effet, avec des débits environnementaux minimum plus faibles au niveau des sous-bassins amont, la contribution totale des écoulements est réduite, ce qui rend la contrainte stricte d'un débit réservé de 100 m³/s à l'exutoire du secteur Lower Ebro plus difficile à respecter, et donc accroît les restrictions pour les usages anthropiques dans le secteur. On note également que si baisser le débit environnemental minimum au niveau du sous-bassin du Jalón pourrait réduire les fréquences de restrictions sur la demande municipale, la mesure n'aurait aucun effet sur les restrictions d'eau d'irrigation dans un secteur déjà particulièrement soumis au stress hydrique.

3.2.3. Modifier des règles de gestion de barrages-réservoirs

Augmenter les lâchers du barrage du Salagou en juillet et août pourrait réduire significativement les fréquences de restrictions concernant la demande en eau municipale et d'irrigation dans les secteurs de Gignac et d'Agde. Les résultats montrent que la mesure est d'autant plus robuste aux incertitudes climatiques que le débit lâché est important avec une robustesse à partir de 1 m³/s avec tous les scénarios climatiques pour réduire les fréquences de restrictions municipales dans la portion d'Agde et d'irrigation dans la portion de Gignac. Néanmoins, on observe également qu'au-delà d'un certain débit de sortie, cette mesure conduit aussi à augmenter les fréquences de restrictions au niveau du secteur du Salagou. En effet quand le débit de sortie du barrage est légèrement augmenté, la nouvelle contrainte de cote de réserve imposée est suffisante pour permettre de satisfaire complètement les demandes en eau du secteur. Par contre, si le débit augmente encore, des restrictions apparaissent du fait de l'atteinte fréquente du seuil minimum imposé pour le réservoir. Quand le débit est fixé à 1 m³/s en juillet et août (seuil efficace et robuste pour améliorer la satisfaction des demandes aval de Gignac et d'Agde), les restrictions d'eau d'irrigation sur le secteur du Salagou ne sont pas plus fréquentes en moyenne que dans le scénario tendanciel d'usages avec une valeur de 0.2, soit une année sur cinq.

3.3. Efficacité et robustesse de scénarios d'adaptation

3.3.1. Scénarios d'adaptation retenus

Les analyses de sensibilité précédentes ont permis d'explorer l'efficacité de mesures individuelles d'adaptation, indépendamment de leur réalisme ou de leur faisabilité. Bien que certaines mesures se soient révélées plus efficaces et plus robustes aux incertitudes climatiques que d'autres, aucune ne semble à même de limiter seule drastiquement les fréquences de restrictions de demande en eau sous les changements climatiques et anthropiques projetés sur les territoires d'étude. En conséquence, différentes mesures pourraient être combinées de manière à proposer des scénarios alternatifs pour l'horizon 2050, appelés ici scénarios d'adaptation. A partir des analyses de sensibilité précédentes et de la connaissance locale des gestionnaires de bassin, un exemple de scénario d'adaptation a été proposé spécifiquement pour le bassin de l'Hérault et le bassin de l'Ebre (Tableau D.9).

Les surfaces irriguées ont été fixées à leur niveau actuel dans chacun des secteurs irrigués. Les scénarios tendanciels de population ont été maintenus sur les deux bassins en plafonnant néanmoins la population desservie par le transfert de Florensac sur l'Hérault. Le projet Aqua Domitia, qui prévoit de transférer de l'eau depuis le Rhône au niveau d'une zone en cours de discussion au Sud de l'Hérault, pourrait ainsi contribuer à assurer l'allocation de la population additionnelle hors du bassin. Considérant que les débits naturels d'étiage pourraient diminuer de 15 % à 60 % sur le bassin de l'Hérault et de 5 % à 35 % sur le bassin de l'Ebre (voir résultats de simulations en Figure D.27), les seuils de débits environnementaux ont été baissés de 20 % par rapport au scénario tendanciel. Finalement, en lien avec les analyses de sensibilité précédentes, les sorties du barrage du Salagou dans le bassin de l'Hérault ont été fixées selon un seuil minimal de 1 m³/s en juillet et août, avec un niveau minimal de réserve fixé à 136 m (soit un stockage minimal de 82 hm³).

Tableau D.9. Deux scénarios d'adaptation proposés respectivement sur le bassin de l'Hérault et le bassin de l'Ebre. Les pourcentages sont exprimés en comparaison du scénario tendanciel d'usages de l'eau à l'horizon 2050, excepté pour les chiffres d'efficacité d'irrigation.

		Hérault	Ebre
IWD (Demande d'irrigation)	Surfaces irriguées Efficacité d'irrigation	Pas d'augmentation Scénario tendanciel	Pas d'augmentation Irrigation gravitaire convertie à l'aspersion (50%) et au goutte-à- goutte (50%)
MWD (Demande municipale)	Population <i>dans le bassin</i> <i>transferts</i> Allocation unitaire Efficacité Population touristique	Scénario tendanciel Pas d'augmentation -30 % Scénario tendanciel Pas d'augmentation	Scénario tendanciel Scénario tendanciel -30 % Scénario tendanciel NA
OWD (Autres demandes)	Activité industrielle	NA	Scénario tendanciel
Débits environnementaux	Q_{MIN}	-20 %	30 m ³ /s à Zaragoza Conservés à 100 m ³ /s à Tortosa -20 % ailleurs

3.3.2. Impacts sur la satisfaction de la demande en eau

La Figure D.35 montre les gammes de variations obtenues concernant les indicateurs de satisfaction de la demande en eau selon les 18 scénarios climatiques avec le scénario tendanciel d'usages de l'eau et le scénario d'adaptation sur chaque bassin.

Au niveau des nœuds de demande de l'Hérault (Fig. D.35a), le scénario d'adaptation pourrait ramener les restrictions de demande municipale à une fréquence acceptable (moins de 2 ans sur 10) sous tous les scénarios climatiques (excepté pour la portion du Salagou) : le scénario d'adaptation testé permettrait ainsi de réduire la vulnérabilité des usages urbains au changement climatique et leur sensibilité à l'incertitude climatique. La fréquence de restrictions d'irrigation pourrait également être réduite, même si l'impact de l'incertitude climatique sur les résultats est important et conduit à des fréquences de restrictions supérieures à 0,2 avec plusieurs scénarios climatiques. Les déficits annuels d'irrigation pourraient être sensiblement réduits au niveau des secteurs d'Agde et de Gignac, et les déficits décennaux moyens également dans le secteur de Gignac.

Au niveau des nœuds de demande de l'Ebre (Fig. D.35b), le scénario d'adaptation pourrait conduire à des fréquences de restrictions acceptables dans les secteurs de Bardenas et de Lower Ebro. Il conduirait aussi à réduire considérablement les déficits annuels d'irrigation ainsi que la sensibilité de ces déficits à l'incertitude climatique. Au niveau du système irrigué d'Alto Aragon, la fréquence de restrictions d'irrigation ne serait acceptable (moins de 2 années sur 10) que sous deux scénarios climatiques sur les 18 testés. Les résultats obtenus au niveau du sous-bassin du Jalón sont représentatifs de la rive droite du bassin de l'Ebre, où le scénario d'adaptation aurait peu d'effet sur les restrictions d'usages.

3.3.3. Impacts sur le niveau de pression anthropique

Les simulations avec le scénario tendanciel d'usages de l'eau sous contrainte de 18 scénarios climatiques à l'horizon 2050 montrent que les pressions anthropiques sur les écoulements des bassins de l'Hérault et de l'Ebre pourraient augmenter significativement par rapport aux usages actuels confrontés au climat de référence (Figs. D.30 et D.36). La consommation annuelle moyenne pourrait ainsi représenter 3 à 4 % des écoulements naturels dans le bassin de l'Hérault et 43 à 52 % dans le bassin de l'Ebre. Le scénario d'adaptation testé sous changement climatique pourrait contribuer à diminuer le niveau de pression anthropique sur les écoulements par rapport au scénario tendanciel, avec une consommation annuelle moyenne représentant 1 à 3 % des écoulements naturels dans le bassin de l'Hérault, et 31 à 40 % dans le bassin de l'Ebre (Fig. D.36). Cependant, le bénéfice du scénario d'adaptation sur la réduction du niveau de pression sur les écoulements reste très dépendant de l'incertitude induite par les divergences entre projections climatiques (notamment concernant les précipitations). Ainsi, dans le bassin de l'Hérault, la consommation moyenne en eau à la fin de juillet pourraient représenter de 7 à 45 % des écoulements naturels (31 à 50 % avec le scénario tendanciel) en fonction du scénario de changement climatique.

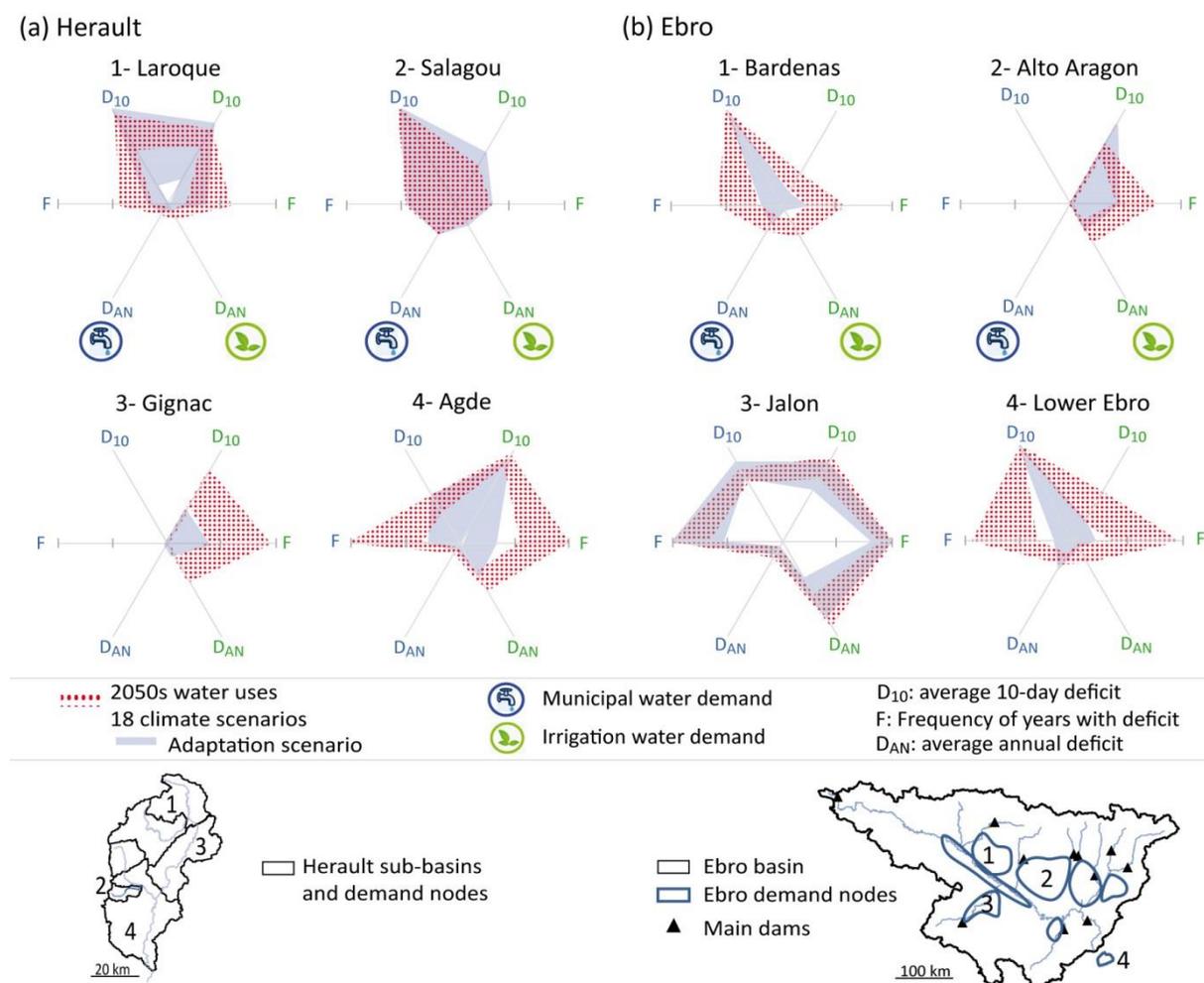


Figure D.35. Indicateurs de satisfaction des demandes en eau municipale et d'irrigation sous scénarios de changement climatique combinés avec un scénario tendanciel d'usages de l'eau et un scénario d'adaptation pour quatre nœuds de demande des bassins (a) de l'Hérault et (b) de l'Ebre. Les valeurs des trois indicateurs vont de 0 (aucun déficit) à 1 (déficit maximum en termes de fréquence ou d'intensité). ([ACT5] ; [ACL6])

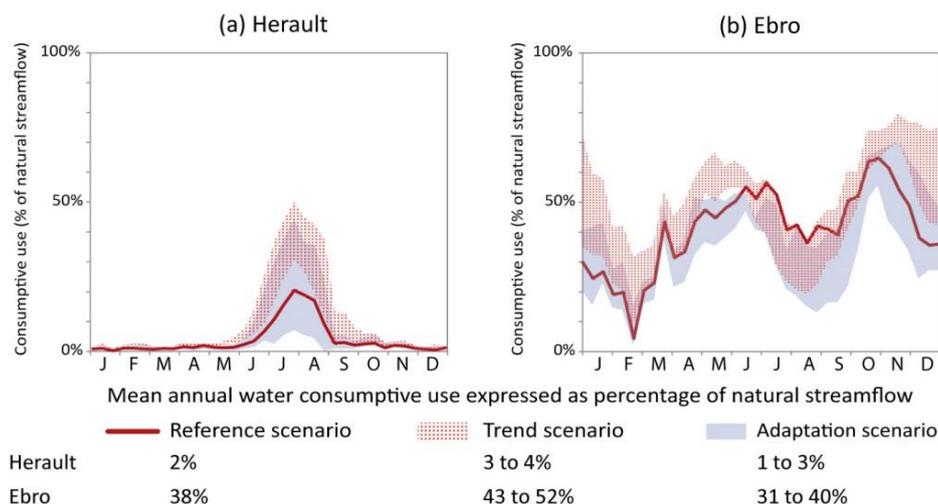


Figure D.36. Pressions anthropiques saisonnières moyennes sur les ressources en eau avec les usages actuels sous climat de référence (1976–2005), ainsi qu'avec le scénario tendanciel d'usages de l'eau et le scénario d'adaptation sous changement climatique (18 scénarios climatiques 2050) dans le bassin (a) de l'Hérault et (b) de l'Ebre. La pression anthropique est estimée à travers la différence (exprimée en %) entre les écoulements naturels et influencés simulés à l'exutoire des bassins. ([ACT5] ; [ACL6])

4. Conclusion

Ces exemples de simulation montrent comment la chaîne intégrative de modélisation développée dans le projet peut être utilisée pour évaluer des options d'adaptation visant à rétablir un équilibre entre ressources et demandes en sous contraintes de scénarios climatiques et d'usages de l'eau. Une méthode originale a été proposée pour évaluer l'efficacité de mesures d'adaptation et leur robustesse en simulant l'impact de chaque mesure individuelle sous 18 scénarios climatiques de l'exercice CMIP5 de manière à couvrir un large spectre d'incertitudes climatiques. L'efficacité est évaluée au regard de l'évolution de la moyenne des fréquences de restrictions, tandis que la robustesse est exprimée comme le nombre de projections climatiques pour lesquels un impact positif est constaté.

Une étude de sensibilité à l'augmentation de la population permanente et touristique, à l'extension des surfaces irriguées, aux niveaux des débits environnementaux et, pour le bassin de l'Hérault, au débit imposé en sortie de barrage du Salagou (et corrélativement une réduction de la cote minimale autorisée) a ainsi d'abord été menée indépendamment sur chaque paramètre selon une approche incrémentale (les valeurs d'entrées dans le modèle sont modifiées par étapes).

Cette approche originale, testée au niveau de chacun des deux bassins, permet de montrer par exemple que dans les secteurs d'Agde et de Gignac dans la partie aval de l'Hérault, c'est clairement le paramètre « évolution de la population résidente » qui a un impact sur la demande en eau future, alors que la demande en eau pour la population touristique impacte relativement peu le stress hydrique. Au niveau du bassin de l'Ebre, une forte sensibilité du stress hydrique à la réduction des surfaces irriguées projetées dans le scénario tendanciel a été relevée. Les simulations permettent également de mesurer le rôle des modifications des valeurs de débits environnementaux sur la réduction des restrictions. C'est un des leviers qui apparaît comme le plus efficace et robuste pour limiter les restrictions, notamment au niveau du bassin de l'Hérault, indépendamment de toute notion de faisabilité politique ou d'acceptabilité sociale et environnementale.

Des scénarios d'adaptation combinant les leviers les plus sensibles ont alors été construits à titre d'exemple et testés avec l'ensemble de la chaîne de modélisation. Ils incluent notamment un maintien des surfaces irriguées dans les deux bassins, une stagnation de la population desservie par le transfert d'eau hors du bassin de l'Hérault, une baisse de 30 % de la demande domestique unitaire, et une baisse de 20 % des débits seuils environnementaux.

Ces scénarios pourraient réduire sensiblement le stress hydrique par rapport au scénario tendanciel. En plus d'une réduction de la fréquence et de l'intensité concernant la restriction des prélèvements, les scénarios d'adaptation mènent à une baisse de la consommation nette (et donc de la pression anthropique sur les milieux) en pourcentage des écoulements naturels, malgré la baisse des débits seuils environnementaux. Néanmoins, leur robustesse semble insuffisante au regard des incertitudes liées aux projections de changement climatique testées.

Challenges scientifiques relevés : apports et limites pour la gestion de l'eau

1. Introduction

Le projet proposait d'élaborer une méthodologie pour évaluer les évolutions des équilibres entre disponibilité et demande en eau au sein de deux bassins méditerranéens sous contrainte de changements climatiques et anthropiques. Cette méthode devait permettre d'explorer les restrictions d'eau passées et futures en prenant en compte les dynamiques climatiques et d'usages de l'eau dans le temps et dans l'espace. Son implémentation sur deux bassins de tailles différentes et avec des caractéristiques physiques et humaines contrastées visait à tester sa robustesse et sa généralité. Cette approche devait permettre de répondre aux questions suivantes sur les bassins étudiés : l'évolution attendue en termes d'usages de l'eau est-elle compatible avec les changements climatiques projetés ? Les demandes en eau seront-elles satisfaites dans le futur ? Quel pourrait être l'impact de stratégies d'adaptation sur l'amélioration de la capacité d'allocation en eau à l'horizon 2050 ?

Bien que tributaire de nombreuses limites et incertitudes, le projet GICC REMedHE a produit un grand nombre de développements qui pourront inspirer les chercheurs impliqués dans les études d'impact et des

résultats exploitables par les acteurs des territoires. Les apports, limites et perspectives de ces développements sont discutés dans les sections suivantes.

2. Avancées méthodologiques pour l'évaluation du stress hydrique dans des hydrosystèmes complexes

Les avancées méthodologiques du projet concernent la **représentation des liens entre ressource et demande en eau dans des hydrosystèmes complexes**, ainsi que la **prise en compte des dynamiques spatio-temporelles multi-décennales des déterminants climatiques et anthropiques**. Le développement et l'application d'une chaîne intégrative de modélisation sur deux hydrosystèmes contrastés ont permis de montrer la généricité et la transposabilité des méthodes proposés pour évaluer l'évolution des équilibres ressource-demande.

2.1. Intégration de variables climatiques et anthropiques sur une longue période passée

Une chaîne intégrative de modélisation combinant des données hydro-climatiques et socio-économiques a ainsi été développée pour simuler les risques de restrictions d'eau au sein des bassins. La chaîne de modélisation a été calée et validée sur une période passée de 40 ans, ce qui a permis d'analyser les évolutions passées des équilibres ressource-demande.

Une contribution majeure du projet a donc consisté à reconstruire la demande en eau historique sur plusieurs décennies au sein des deux bassins. Cette profondeur temporelle peu classique a permis de mettre en évidence les tendances et les discontinuités concernant les dynamiques spatio-temporelles de la demande en eau sous contrainte combinée de la variabilité climatique et des usages de l'eau. Elle s'est révélée essentielle notamment pour estimer l'impact de la variabilité climatique sur la demande d'irrigation mais également pour capturer l'effet de changements anthropiques en lien avec les évolutions de population, de types de cultures, de surfaces irriguées, etc. Cette reconstruction multi-décennale de la demande en eau a également pris en compte des évolutions de déterminants tels que la demande unitaire ou les techniques principales d'irrigation et leur efficacité hydraulique associée. Elle a donc permis d'identifier les déterminants principaux de la demande locale en eau et leur variabilité inter-annuelle pour (i) simuler les évolutions passées des équilibres ressource-demande, et (ii) proposer un scénario tendanciel d'usages de l'eau à l'horizon 2050 au sein des deux bassins.

Ainsi, la chaîne de modélisation a permis de simuler avec réalisme au pas de temps décadaire les équilibres disponibilité-demande au sein des deux hydrosystèmes sur la période 1971–2009. La qualité des résultats s'exprime à travers des reproductions correctes des débits observés influencés et, plus généralement, des fréquences et intensités de restrictions d'eau à long terme, ce qui a constitué un préalable essentiel à l'utilisation prospective de la chaîne. En effet, comme l'indiquent Krol *et al.* (2006), une compréhension correcte de la dynamique d'un système est préférable à une compréhension statique excellente de ce même système. Les résultats du projet se distinguent donc par une analyse rétrospective des évolutions disponibilité-demande sur une longue période historique. Ainsi, le modèle hydrologique a été calé en de nombreux points amont à partir de chroniques de débits naturels observés de près de 30 ans (1981–2009) et validé avec succès sur une période caractérisée par des conditions climatiques moyennes plus froides et plus humides (1971–1980). Plus encore, c'est la reproduction très satisfaisante des débits influencés (par les prélèvements et les barrages-réservoirs) sur toute la période 1971–2009 à l'exutoire des bassins et en de nombreux points intermédiaires qui témoigne de la capacité de la chaîne de modélisation à représenter avec réalisme les dynamiques au sein des hydrosystèmes de l'Hérault et de l'Ebre.

Les évolutions des restrictions d'eau sur la période de simulation ont été estimées à partir de la modélisation des écoulements (et de leur perturbation) et de la demande en eau. Ainsi, la chaîne permet de considérer l'influence conjuguée des déterminants climatiques (précipitation, température) et anthropiques sur les restrictions. L'influence des activités humaines sur la disponibilité en eau a été prise en compte à travers la simulation du fonctionnement des barrages-réservoirs principaux, les transferts d'eau hors des bassins et les consommations liées aux demandes en eau (municipale, d'irrigation ou autres). Pour ce faire, la reconstruction des changements passés concernant la demande en eau sous contrainte d'évolutions socio-économiques et climatiques s'est avérée essentielle pour reconstituer des séries de débits naturels en l'absence de données précises sur les prélèvements en eau sur des périodes passées et à un pas de temps plus fin qu'à l'échelle annuelle. Cette lacune a évidemment rendu également difficile la reconstruction historique de la demande d'eau.

2.2. Schématisation des nœuds de disponibilité et de demande au sein des hydrosystèmes

Un autre défi relevé par le projet a consisté à considérer la complexité de la gestion de l'eau au sein de deux hydrosystèmes de méso- et large échelle en proposant des représentations adaptées de la disponibilité et de la demande en eau, tout en considérant l'influence anthropique sur les écoulements. Les hétérogénéités d'usages de l'eau dans les bassins de l'Hérault et de l'Ebre ont ainsi été prises en compte à travers une schématisation fonctionnelle de nœuds principaux de ressource et de demande. Cette schématisation a nécessité de nombreuses informations (cartes, bases de données, plans de gestion de l'eau, rapports techniques) et une collaboration étroite avec les gestionnaires locaux. La définition des nœuds de ressource et de demande en eau au sein des bassins a donc reposé sur un compromis entre la disponibilité de données de contrôle (stations hydrométriques), la localisation des principaux barrages-réservoirs et canaux d'irrigation, et la connaissance des grands secteurs irrigués. Cette définition a été particulièrement ardue au sein du bassin de l'Ebre où de nombreux transferts existent entre sous-bassins et où certains barrages-réservoirs sont pilotés par la demande et les écoulements plusieurs centaines de kilomètres en aval (cas du barrage de l'Ebre par exemple). La définition des nœuds stratégiques de ressource et de demande et la compréhension de la gestion de canaux multiples (parfois réversibles) n'a donc été possible qu'en visitant le terrain et en parcourant la littérature grise.

Cette schématisation a servi de base pour analyser l'influence anthropique sur les écoulements au sein des bassins à partir de la simulation des écoulements naturels et des perturbations causées par les usages de l'eau, telles que les opérations de stockage et de restitution, ou encore la consommation en eau. L'estimation des évolutions d'eau consommée a ainsi apporté un éclairage utile à l'analyse des changements concernant les équilibres offre-demande. Elle a notamment permis d'évaluer l'impact de la pression anthropique sur la baisse observée des débits dans les deux bassins. Eu égard à leur méconnaissance dans l'espace et dans le temps, elle a aussi contraint à des hypothèses fortes concernant les efficacités hydrauliques, les taux de pertes, consommations et retours pour les usages municipaux et d'irrigation (voir Fig. D.10).

2.3. Transférabilité de la chaîne de modélisation

La mise en œuvre d'une chaîne intégrative de modélisation sur deux hydrosystèmes contrastés visait notamment à tester sa généricité et sa transférabilité. Ainsi, les cas d'études de l'Hérault et de l'Ebre représentaient des contextes très différents, que ce soit en termes de types de données disponibles, de caractéristiques géographiques ou d'enjeux de gestion. Pourtant, une méthodologie commune a pu être mise en place sur les deux bassins grâce aux gestionnaires de bassin qui ont mis à disposition du projet toutes les données hydrologiques et socio-économiques ainsi que les documents techniques nécessaires au projet de recherche. De la même manière, les services météorologiques nationaux (Météo-France et AEMET, *Agencia Estatal de Meteorología*) ont fourni gracieusement les chroniques de variables climatiques en leur possession (température, précipitation, vitesse du vent, humidité, radiation, etc.). Pour la constitution des forçages climatiques sur la période 1969–2009, un traitement supplémentaire a été nécessaire sur le bassin de l'Ebre pour sélectionner les mesures de température et de précipitation en vue d'interpoler les séries temporelles selon une grille haute-résolution 8 x 8 km équivalente à la grille de réanalyse SAFRAN disponible sur le bassin de l'Hérault. Une telle réanalyse est en cours de constitution sur le bassin de l'Ebre (Quintana-Seguí *et al.*, 2015), mais jusqu'à présent seule une année pilote a été validée. Par ailleurs, contrairement au bassin de l'Hérault, comme des données météorologiques additionnelles telles que la vitesse du vent et l'humidité relative étaient trop lacunaires pour calculer une ET_0 Penman-Monteith sur le bassin de l'Ebre, la formule empirique de Hargreaves (Hargreaves & Samani, 1985) a été utilisée pour estimer l'évapotranspiration journalière sur la période 1969–2009.

La simulation des écoulements naturels au sein des deux bassins a reposé sur la même méthode (calage sur des périodes considérées comme non-influencées par les prélèvements et naturalisation des stockages-restitution de barrages-réservoirs). Néanmoins, cette approche pourrait difficilement être appliquée à certains régimes hydrologiques tels que ceux caractérisés par une fonte prépondérante de neige ou de glace, et où le pic de débit se produit en été en même temps que le pic de demande en eau. En effet, dans ce cas, les crues ne peuvent pas être utilisées pour caler le modèle car les écoulements risquent d'être trop influencés par les prélèvements. Pour le bassin de l'Ebre, les sous-bassins amont à régime nival n'ont pas été considérés comme influencés par les usages de l'eau (car la demande y est très faible, voir Fig. D.12) : le calage du modèle hydrologique y a donc été réalisé à partir de toutes les données disponibles de débit.

Comme cela a déjà été évoqué, la schématisation fonctionnelle des principaux nœuds de ressource et de demande en eau constitue une étape stratégique pour la modélisation d'hydrosystèmes contrastés caractérisés par des tailles et des complexités différentes. Dans ce cadre, la disponibilité des données représente une contrainte forte pour la définition de la résolution spatiale et la profondeur temporelle de

l'étude. Par exemple, la modélisation du bassin de l'Ebre a nécessité que soient pris en compte à la fois un système complexe opérationnel en temps réel et des considérations de planification à long terme. Les simulations dans cet hydrosystème ont été conduites selon une représentation fonctionnelle dont le choix a été principalement guidé par l'existence de grands secteurs irrigués et par la régulation des écoulements à travers un système de barrages-réservoirs et de canaux. Cette représentation a été possible du fait de la disponibilité de longues chroniques temporelles sur les débits et les fonctionnements des réservoirs (débits sortants, niveaux des réserves, caractéristiques techniques). La gestion de l'eau dans le bassin de l'Hérault est moins centralisée : les prélèvements y sont plus diffus et les usages de l'eau plus diversifiés. Certains enjeux spécifiques de gestion ont du y être considérés comme l'intégration de la demande en eau saisonnière liée au tourisme et la prise en compte de contraintes environnementales marquées.

3. Incertitudes et limites de l'utilisation prospective de la chaîne de modélisation

3.1. Calage et de validation de la chaîne de modélisation

Du fait du manque de données d'observation et de barrières méthodologiques, un certain nombre de limites existent concernant le calage et la validation de la chaîne de modélisation mise en œuvre.

D'abord, la simulation des écoulements a été contrainte par des informations parfois incomplètes, peu précises, voire inexistantes concernant la régulation des écoulements et les prélèvements, qui auraient rendu possible une reconstruction plus rigoureuse des écoulements naturels. Néanmoins, la méthode proposée pour simuler les écoulements naturels en calant le modèle hydrologique uniquement sur les périodes où la consommation nette a été considérée comme négligeable est originale. La plupart du temps, les écoulements naturels sont uniquement simulés à l'amont des ouvrages de régulation et des prélèvements en eau (e.g. López-Moreno *et al.*, 2014). Dans d'autres cas, un modèle hydrologique est calé à partir de données de débit sur des périodes anciennes moins soumises à la pression anthropique et/ou en transférant les paramètres de calage obtenus sur des secteurs amont non-influencés. C'est la technique qui a été utilisée par exemple avec le modèle SIMPA (Monreal *et al.*, 1999) pour évaluer les écoulements naturels présentés dans le livre blanc espagnol sur l'eau (MMA, 2000). Le modèle a ainsi été calé au pas de temps mensuel sur la période 1940–1995 en utilisant seulement des stations hydrométriques non-influencés par les usages de l'eau. Cette méthode conduit à des approximations notamment concernant les écoulements spécifiques dans les secteurs aval dont les simulations reposent sur des paramètres obtenus dans des secteurs amont aux caractéristiques physiques généralement très différentes. C'est pourquoi, le modèle a été calé à partir des débits spécifiques de tous les secteurs (amont et aval). Dans les secteurs aval, cela implique de soustraire les débits de lâchers de barrage aux débits exutoires et de caler le modèle principalement sur les débits moyens et forts, les périodes d'étiage étant éliminées du fait qu'elles correspondent aux prélèvements susceptibles d'influencer les écoulements. Ceci constitue d'évidence une source d'erreur dans l'évaluation précise des écoulements naturels. Dans l'Hérault, les débits d'étiage sont en effet alimentés en grande partie par des sources karstiques, comme la résurgence de la rivière de la Vis avec une contribution typique de 1,5 à 2 m³/s durant les mois d'été, ou encore la source des Cents Fonts situés dans la vallée de l'Hérault en amont de Gignac avec une contribution aux étiages de l'ordre de 350 à 500 l/s (Ladouche *et al.*, 2006). Sans contrainte sur les étiages lors du calage dans ces secteurs, le modèle ne peut pas reproduire de manière réaliste la contribution de ces sources, ce qui limite sa robustesse en vue d'une utilisation prospective. Dans le bassin de l'Ebre, la pression anthropique intensive notamment liée à l'irrigation laisse peu de données¹ pour le calage du modèle dans les secteurs semi-arides, ce qui limite grandement la reproduction réaliste des écoulements spécifiques dans ces secteurs. Malgré ces difficultés, on a pu montrer que la reproduction des débits influencés à l'exutoire des deux bassins était très correcte, notamment au niveau du bassin de l'Ebre où une succession de barrages et autres prélèvements perturbent fortement les écoulements. Par ailleurs, pour limiter le biais d'analyse, les écoulements (naturels et influencés) simulés sur la période historique ont été pris comme référence pour les analyses prospectives sous contraintes de scénarios climatiques et d'usages de l'eau.

Une autre limite concernant la validité de la chaîne de modélisation doit être soulignée. Elle concerne la validation précise des simulations de demande en eau qui n'a pas été possible du fait d'un manque de

¹ Dans certains secteurs, la technique a conduit à n'utiliser que 3 à 4 mois de données sur les années hydrologiques, période sur laquelle la demande agricole simulée est supérieure à 0.1 hm³/décade et donc considérée comme non-influencée par les prélèvements.

données spatio-temporelles appropriées sur les prélèvements au sein des territoires étudiés. Les données prélèvements en eau pour l'usage domestique ne sont disponibles au mieux qu'à l'échelle mensuelle et sur des périodes de temps limitées, tandis que les prélèvements en eau pour l'irrigation sont rarement mesurés. Par exemple, l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse fournit des informations annuelles sur les prélèvements à partir de 1987 à l'échelle communale sur son territoire. Ces informations sont liées aux redevances payées par les usagers et ne peuvent être représentatives de l'utilisation réelle de l'eau¹. Le manque de données, mais aussi la nécessité de simuler les évolutions futures de la demande en eau selon les variations de déterminants principaux, ont donc conduit à mobiliser des modèles d'estimation de la demande en eau. Malgré une validation limitée des simulations, il est intéressant de noter que la demande en eau totale simulée à l'échelle des bassins sur la période récente est de l'ordre de grandeur des prélèvements annuels moyens estimés par les gestionnaires. Ainsi, la demande annuelle moyenne en eau simulée dans les années 2000 dans le bassin de l'Hérault (55 hm³/an) est très proche de l'estimation (56 hm³/an) réalisée à partir des données de prélèvements recensés sur le territoire hors transfert par le gestionnaire de bassin (SMBFH, 2005). Dans le bassin de l'Ebre, la demande annuelle moyenne en eau simulée représente 6 340 hm³/an tandis que les prélèvements estimés en 2005 par le gestionnaire de bassins représentaient 7 914 hm³/an (CHE, 2013). La différence vient probablement du fait que la méthode d'évaluation de la CHE a été basée sur les droits en eau pour la demande d'irrigation, qui ne sont pas directement liés aux besoins théoriques des plantes comme c'est le cas dans la méthode proposée dans le projet.

Enfin, les simulations hydrologiques se sont appuyées sur un calage des retours à travers un pourcentage d'eau prélevée qui retourne au réseau. Ce calage ne repose sur aucune réalité physique ni sur aucune mesure, et les retours simulés peuvent compenser d'autres biais de la chaîne de modélisation comme la simulation des écoulements naturels et des demandes en eau. Cela peut se produire par exemple quand les étiages naturels sont sous-estimés (cas d'une représentation imprécise du fonctionnement des sources karstiques en particulier) ou quand les demandes sont surestimées (notamment pour la demande d'irrigation de la vigne qui est pilotée en réalité plus par des considérations de production qualitative que quantitative). Par ailleurs, cette méthode conduit à considérer que tous les retours au réseau se font à l'exutoire du sous-bassin comme un écoulement de surface à l'échelle du pas de temps décadaire d'analyse, ce qui n'est certainement pas réaliste.

3.2. Incertitudes de modélisation sous conditions non-stationnaires

Au-delà de la validation partielle de la chaîne de modélisation, l'utilisation prospective de modèles hydrologiques avec des paramètres calés à partir d'observations historiques est discutable. De nombreuses études ont ainsi montré récemment que les modèles hydrologiques présentaient une transférabilité limitée en conditions climatiques non-stationnaires (e.g. Vaze *et al.*, 2010 ; Coron *et al.*, 2012 ; Brigode *et al.*, 2013 ; Ruelland *et al.*, 2015). Une étude spécifique sur des bassins amont de l'Hérault et de l'Ebre a montré que si le modèle hydrologique arrivait à reproduire de manière satisfaisante les écoulements naturels (crues, étiages, volumes écoulés) l'incertitude structurale liée à son optimisation au regard de différents fonctions objectif et à sa transférabilité à des conditions hydro-climatiques contrastées (années sèches versus années humides) pouvait être très importante (voir Fig. D.37). Dès lors, l'utilisation de paramètres calés sur une période historique avec des conditions climatiques futures constitue une source d'incertitude non-négligeable pour l'évaluation prospective des écoulements.

Une autre source d'incertitude vient de la qualité des données d'entrée dans la chaîne de modélisation. En particulier, les forçages climatiques établis pour le bassin de l'Ebre reposent sur une densité assez faible de stations pluviométriques dans certains secteurs de la chaîne pyrénéenne, ce qui peut conduire à des simulations médiocres localement (voir e.g. Fig. D.37 au niveau du bassin du Segre). L'estimation de l'évapo-transpiration à partir de formules empiriques constitue également une source d'incertitude. Contrairement à la formule de Penman-Monteith utilisée sur le bassin de l'Hérault, la formule de Hargreaves utilisée sur le bassin de l'Ebre s'appuie uniquement sur la température avec un facteur empirique de vent appliqué de façon constante en fonction des secteurs géographiques. Or, la demande d'évapotranspiration est également tributaire de la radiation solaire, de l'humidité relative et de la vitesse du vent : autant de variables qui ont changé sur les dernières décennies et pourraient également évoluer du fait du changement climatique (Donohue *et al.*, 2010). Plusieurs études ont ainsi montré que l'évaporation avait baissé dans certaines régions du globe du fait d'une diminution de la vitesse du vent (Donohue *et al.*, 2010 ; McVicar *et al.*, 2012).

¹ L'Agence RMC en appelle elle-même à la prudence quant à l'utilisation de ces données pour l'évaluation des ressources en eau (AERM, 2014b).

La non-stationnarité hydrologique s'exprime aussi à travers l'évolution des usages de l'eau. La variabilité de la demande en eau sur la période 1971–2009 et l'impact marqué des usages sur les écoulements montrent, s'il en était besoin, combien il est important de prendre en compte la non-stationnarité des usages de l'eau en modélisation hydrologique. Malgré l'effort d'intégration et de reconstruction historique réalisé à l'occasion du projet REMedHE, les simulations ne peuvent être complètement satisfaisantes du fait d'une prise en compte non-exhaustive des barrages-réservoirs et d'une connaissance limitée sur les prélèvements, qui ont conduit à une validation partielle des demandes en eau simulées ainsi qu'à des hypothèses discutables concernant la modélisation des écoulements naturels.

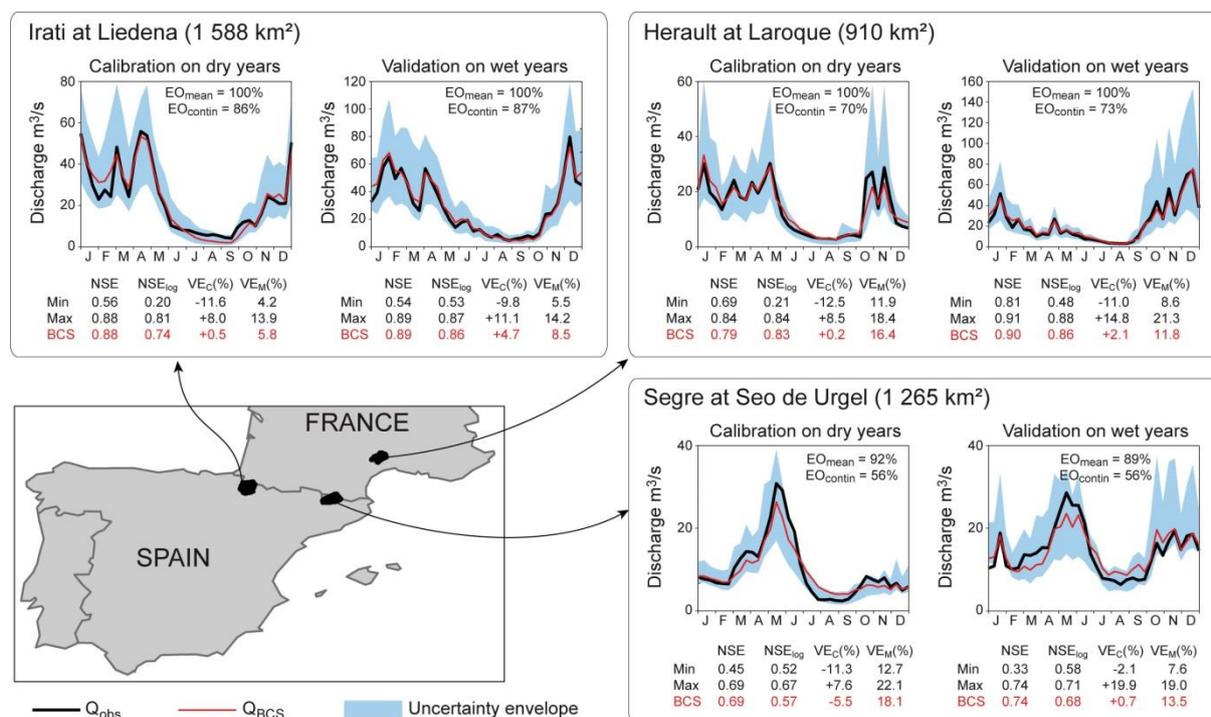


Figure D.37. Enveloppes d'incertitudes hydrologiques en calage (années sèches) et validation (années humides) sur la période 1986–2005. Les valeurs min et max de chaque critère sont extraites des solutions Pareto-optimales retenues pour composer les enveloppes. BCS représente la solution de compromis minimisant une fonction d'agrégation des critères parmi les solutions Pareto-optimales. EC représente la proportion d'observations incluses dans les enveloppes sur les périodes pluri-annuelles. ([ACT1]).

3.3. Intégration limitée des déterminants physiques et humains du stress hydrique

Les facteurs de changement concernant les ressources en eau disponibles prises en compte dans le projet ont été principalement climatiques même si les pressions anthropiques sur les écoulements d'amont en aval ont pu être en partie considérées. Ainsi, les relations pluie-débit ont été considérées inchangées dans les modélisations prospectives, avec la conservation des paramètres de calage du modèle hydrologique. D'autres facteurs comme l'évolution de l'occupation du sol peuvent néanmoins affecter ces relations pluie-débit. Par exemple, Gallart & Llorens (2003) ont montré que la diminution des écoulements observés dans le bassin de l'Ebre sur les 50 dernières années pourrait s'expliquer en partie par une augmentation des couverts forestiers dans les bassins amont. Ils ont estimé qu'un tiers de la diminution observée ne pouvait pas s'expliquer par la consommation liée aux usages anthropiques ou par la variabilité climatique, et était liée à l'augmentation évapotranspiratoire consécutive à la reforestation des têtes de bassin. Cependant, dans un climat méditerranéen typique comme celui du bassin de l'Hérault, ce type de reforestation (également observé bien que dans des proportions assez faibles, voir [ACL8]) est susceptible d'avoir moins d'impact sur les ressources en eau. L'impact des forêts sur les écoulements renvoie en effet à une utilisation plus prononcée des réserves d'humidité du sol pendant l'été et une augmentation de l'interception de la pluie incidente. Les sols peu profonds du bassin de l'Hérault et les événements orageux de forte intensité constituent ainsi des conditions moins propices à ce type d'impact (Cosandey *et al.*, 2005).

Une autre limite concernant l'intégration des déterminants concernant l'évolution de la disponibilité en eau est l'absence de simulation des ressources en eau souterraines et des échanges surface-souterrain. Des modèles représentant explicitement ces compartiments et ces échanges existent bien-sûr (e.g. Pulido-Velazquez *et al.*, 2007 ; 2012), mais leur mise en œuvre à l'échelle de bassins comme l'Hérault et l'Ebre reste extrêmement complexe du fait de l'hétérogénéité des contextes hydrogéologiques et de la disponibilité de données piezométriques trop faible dans le temps et dans l'espace pour permettre des procédures rigoureuses de calage-validation sur des périodes multi-décennales.

Plusieurs facteurs physiques et anthropiques susceptibles d'avoir un effet sur la demande en eau n'ont pas été pris en compte. Par exemple, davantage de processus physiques pourraient être inclus dans le modèle de demande d'irrigation. Une approche répandue pour estimer la demande évapotranspiratoire de cultures irriguées consiste à multiplier une évapotranspiration potentielle calculée pour un gazon de référence (ET_0) par un coefficient de culture (K_C) variant suivant le type de couvert considéré et les stades de développement végétatif (généralement estimé pour une saison moyenne à partir d'abaques). En raison de sa simplicité, c'est l'approche qui a été privilégiée dans le projet REMedHE pour estimer les besoins en eau des cultures à travers des coefficients culturaux mensuels constants sur toute la période d'étude. L'approche pose néanmoins un problème de transposabilité en cas d'augmentation des températures (voire de la concentration en CO_2 atmosphérique) qui peut accélérer la croissance des plantes (e.g. Meza *et al.*, 2008) et donc modifier les calendriers culturaux. Dans des études ultérieures, on pourra chercher à remédier à ces limites en faisant dépendre le K_C de l'accumulation de degré-jours au cours de la saison (e.g. Hublart *et al.*, 2015). D'autres facteurs environnementaux, comme le niveau d'humidité des sols, peuvent impacter la demande évapotranspiratoire des cultures, calculée ici dans des conditions de disponibilité optimale en eau. Ainsi l'évapotranspiration peut être réduite en cas de stress hydrique (Allen *et al.*, 1998) ou de stress thermique (Woznicki *et al.*, 2015).

Par ailleurs, le modèle de demande en eau d'irrigation est basé sur les besoins théoriques en eau pour atteindre des rendements optimaux. Cependant, la décision d'irrigation et les volumes d'eau appliqués dépendent d'autres facteurs. Les tours d'eau sont une pratique de gestion très répandue pour les canaux d'irrigation traditionnels, chaque utilisateur étant autorisé à prélever de l'eau du canal pendant un certain nombre d'heures par semaine. Cette pratique correspond à une technique d'irrigation par inondation où le volume d'eau appliqué au champ dépend du niveau de stress hydrique mais aussi des tours d'eau. De plus, l'objectif d'irrigation n'est pas nécessairement de maximiser le rendement des cultures et dépend de considérations économiques comme le coût d'irrigation ou l'atteinte d'une production qualitative plutôt que quantitative (cas de la vigne par exemple).

En ce qui concerne le modèle de demande en eau municipale, les informations d'allocation unitaire ont été utilisées sans prendre en compte les facteurs de leur variation. Pourtant, les usages domestiques de l'eau peuvent être dépendants des revenus par habitant, des améliorations technologiques ou des politiques de tarification de l'eau (Hejazi *et al.*, 2014). De plus, les utilisations extérieures de l'eau (arrosages des jardins, alimentation des piscines, etc.) peuvent être extrêmement variables en fonction des conditions climatiques et peuvent donc impacter les allocations unitaires. Ainsi, en dehors de l'estimation des baisses éventuelles d'allocation unitaire dans le scénario d'adaptation, la chaîne de modélisation n'a pas été utilisée pour évaluer quantitativement l'efficacité des politiques de gestion de la demande, telles que la tarification de l'eau ou la modernisation technologique, à réduire l'écart entre la disponibilité et la demande en eau. Enfin, les facteurs d'évolution de la demande en eau pour la production industrielle et énergétique n'ont été pas explicitement pris en compte dans l'étude.

4. Des nouvelles connaissances pour la gestion de l'eau

4.1. Connaissance sur les processus menant au stress hydrique

La simulation de l'évolution des équilibres entre disponibilité et demande en eau sur une période multi-décennale a permis de mieux comprendre les processus conduisant à des situations de stress hydrique, avant d'envisager les évolutions possibles sous scénarios climatiques et d'usages de l'eau.

En simulant dynamiquement dans le temps et dans l'espace tous les composants des équilibres ressources-demandes en réponse aux forçages climatiques et anthropiques (écoulements naturels, demande en eau, gestion de barrages, prélèvements et retours, consommation et écoulements influencés résultants), le projet a permis une compréhension objective des évolutions passées concernant la satisfaction des demandes en eau et la modification des écoulements.

En premier lieu, les résultats montrent des évolutions hétérogènes du stress hydrique dans l'espace avec certains secteurs (principalement les secteurs aval) ayant connu une augmentation du stress hydrique, tandis que d'autres témoignent d'un équilibre plus stable entre la disponibilité et la demande. En comparant la simulation des restrictions théoriques en eau sous contrainte des usages actuels soumis à la variabilité climatique 1971–2009 avec la reconstruction des restrictions d'eau sur la même période, on observe que les conditions plus chaudes et plus sèches des années récentes ont affecté la satisfaction de la demande en eau dans certains secteurs amont de l'Hérault et de l'Ebre. A l'inverse, au niveau de certains grands systèmes irrigués du bassin de l'Ebre et de la basse vallée de l'Hérault (secteur d'Agde), c'est surtout l'extension des surfaces irriguées et l'augmentation de la population qui ont contribué à augmenter les fréquences de restrictions en eau. Bien que la capacité de stockage du bassin de l'Ebre semble offrir une résilience à la variabilité climatique observée et à un certain niveau d'augmentation de la demande, les résultats n'ont pas montré de claires distinctions dans les causes de restrictions d'eau entre les bassins de l'Hérault et de l'Ebre. Les causes d'évolution du stress hydrique sont aussi variées entre les sous-bassins d'un même hydrosystème qu'entre les deux hydrosystèmes étudiés. Néanmoins, une différence nette entre les deux hydrosystèmes est que les principales évolutions de demande en eau concernent les usages domestiques pour le bassin de l'Hérault et l'irrigation pour le bassin de l'Ebre.

Ensuite, la comparaison des débits naturels *versus* influencés simulés avec la chaîne de modélisation a permis de comparer l'impact relatif des facteurs climatiques et anthropiques dans la baisse des débits observée dans les deux bassins (-40 % environ entre 1971–1980 et 1981–2009 à l'exutoire des deux bassins). Les pressions anthropiques à travers la consommation nette expliqueraient ainsi 3 % et 20 % de la baisse de débits observée après 1980 sur l'Hérault et l'Ebre respectivement.

4.2. Projections de stress hydrique et options d'adaptation

Le projet a permis d'évaluer l'évolution possible du stress hydrique en utilisant la chaîne de modélisation sous changements climatiques et socio-économiques au travers de projections élaborées à partir de l'exercice CMIP5 et de scénarios d'évolution des territoires à l'horizon 2050. Les simulations ont été obtenues en intégrant les évolutions des deux composantes (climatique et anthropique) ou une seule. Le plan d'expérience a ainsi permis d'identifier les sensibilités relatives aux types de changements. L'incertitude liée aux GCMs a été appréhendée grâce à 18 projections haute-résolution élaborées à partir de 9 projections basse-résolution sous deux scénarios de forçage radiatif (RCP4.5 et RCP8.5). Des débits seuils ont été définis pour rendre compte d'objectifs environnementaux. Les restrictions d'eau ont été caractérisées en termes de fréquence et d'intensité, aux pas de temps annuel et décadaire.

4.2.1. Evolution de la disponibilité en eau

Les projections de températures à l'horizon 2050 montrent une tendance claire à l'augmentation (entre +1 °C et 3,3 °C à l'échelle annuelle sur les deux bassins), particulièrement marquée en été (jusqu'à +4,8 °C sur le bassin de l'Hérault et +4,6 °C sur le bassin de l'Ebre). Les projections de précipitation sont plus incertaines et diffèrent significativement entre les 18 scénarios climatiques. En fonction des scénarios climatiques, les changements de précipitation annuelle vont ainsi de -13 % à +7 % sur l'Hérault et de -15 % à +5 % sur l'Ebre. Néanmoins, les projections de précipitations printanières et estivales montrent une tendance assez claire à la diminution sur les deux bassins : ainsi, au niveau des mois d'été, la plupart des scénarios projettent une diminution sensible des précipitations, de l'ordre de -20 % et -18 % en valeurs médianes sur les bassins de l'Hérault et de l'Ebre respectivement.

Les changements climatiques projetés ont pour conséquence des évolutions dans les débits naturels simulés : alors que les scénarios hydrologiques divergent pour l'automne, l'hiver et le printemps, ils convergent vers une baisse des débits d'été allant de -15 à -55 % sur l'Hérault et de -5 à -35 % sur l'Ebre. Au niveau du bassin de l'Ebre, bien qu'incertains, les changements projetés montrent une tendance assez claire à l'augmentation des débits en début de printemps (avril) en lien avec une fonte de neige plus précoce, tandis que tous les scénarios s'accordent sur une diminution des débits de printemps (de -5 % à -38 %) au niveau du bassin de l'Hérault.

4.2.2. Evolution des demandes en eau

En parallèle, indépendamment du changement climatique, la demande en eau devrait augmenter au niveau des hydrosystèmes. Les projections de demandes sur le bassin de l'Hérault sont contrastées entre les zones amont et aval. Malgré une hausse de la demande d'irrigation dans certaines zones amont, celle-ci resterait faible comparativement aux zones aval de la vallée de l'Hérault. L'amélioration de l'efficacité de l'irrigation

dans le secteur de Gignac permet une baisse de 50 % de la demande actuelle d'irrigation malgré une augmentation de 65 % des surfaces irriguées dans le scénario tendanciel. Par contre, la demande d'irrigation dans la portion d'Agde pourrait doubler du fait d'un accroissement de 90 % des surfaces irriguées. Dans ce secteur, la demande en eau municipale, liée pour une large part à un transfert d'eau hors bassin, pourrait également augmenter de 57 %, pour atteindre 40 hm³/an (dont 28 hm³/an pour le transfert) en 2050, du fait de l'augmentation projetée de population. Dans le bassin de l'Ebre, le scénario tendanciel d'usages prévoit une extension des surfaces irriguées au niveau de tous les secteurs, soit une augmentation de 46 % par rapport aux 660 000 ha irrigués actuellement.

L'effet du changement climatique induit une augmentation de la demande agricole ; il n'affecte pas la demande en eau municipale (modèle construit sans lien avec des facteurs climatiques). Les volumes supplémentaires requis pour l'irrigation sont conséquents, bien que variables selon les scénarios climatiques, et concernent quasiment tous les sous-bassins, à l'exception du secteur irrigué de Gignac dans le bassin de l'Hérault, où les efforts de rénovation hydraulique permettraient de réduire sensiblement les prélèvements malgré une demande évapotranspiratoire plus importante sous changement climatique.

4.2.3. Evolution de la satisfaction des demandes en eau

Si l'on considère les usages de l'eau actuels soumis à la variabilité climatique de référence, les débits mensuels objectifs pourraient être respectés dans les deux bassins, impliquant néanmoins des restrictions fréquentes sur les prélèvements d'irrigation au niveau de plusieurs noeuds de demande. Les restrictions d'eau apparaissent moins d'une année sur cinq au niveau des portions du bassin de l'Hérault à l'exception des secteurs de Gignac et d'Agde, où les restrictions pour l'irrigation se produisent deux années sur cinq avec déficits annuels d'environ 10 à 20 % quand l'année enregistre au moins une restriction décadaire. Dans ces conditions, plusieurs secteurs de l'Ebre seraient en déséquilibre avec des restrictions d'irrigation chaque année et des déficits annuels moyens de 30 % pour Bardenas et la vallée de l'Ebre, et de 60 à 70 % pour les secteurs du Jalón et de Guadalupe situés sur la rive droite.

En comparaison, le scénario tendanciel d'usages de l'eau sous le même climat de référence a un impact limité sur l'augmentation des fréquences et intensités de restrictions au niveau des deux hydrosystèmes. Dans l'Hérault, seule la satisfaction de la demande en eau d'irrigation sur le secteur d'Agde semble sensible à ce scénario avec des fréquences de restrictions passant de 4 à 5 années sur 10, et des déficits annuels moyens qui restent inférieurs à 20 %. Dans l'Ebre, le doublement de la capacité du barrage de Yesa conduit même à améliorer la satisfaction d'irrigation dans le secteur de Bardenas et seul le secteur d'Alto Aragon enregistre des restrictions d'irrigation plus fréquentes en lien avec l'augmentation projetées des surfaces irriguées.

En revanche, l'impact des changements climatiques testés sur la ressource et la demande en eau amène à s'interroger sur la pertinence des usages et des contraintes environnementales actuellement projetées pour les prochaines décennies sur les deux bassins. En effet, sous contrainte conjuguée de changements climatiques et anthropiques, les restrictions d'eau pour les activités humaines pourraient devenir plus fréquentes et plus sévères, et la pression sur les écoulements et les écosystèmes aquatiques pourrait s'intensifier. Les résultats sont soumis à une forte incertitude climatique, notamment liée aux projections divergentes de précipitation dans les 18 scénarios climatiques utilisés. Néanmoins, avec les scénarios climatiques les plus pessimistes, les usages actuels et projetés ne seraient pas viables et d'importants déséquilibres quantitatifs apparaîtraient au sein des deux hydrosystèmes avec des débits environnementaux ne pouvant pas être respectés plus de une année sur deux dans de nombreux secteurs, et des restrictions plus fréquentes et intenses sur les demandes en eau municipale et d'irrigation. Non seulement les prélèvements en eau seraient limités plus d'une année sur cinq, soit beaucoup plus fréquemment que les objectifs de gestion, mais l'impact des usages de l'eau sur les écoulements pourraient s'aggraver significativement.

La pression anthropique semble contenue sur l'Hérault si on l'examine par la différence entre débits annuels naturels et influencés, rapportée au débit annuel (inférieur à 4 %), mais est notable en été avec une consommation nette pouvant représenter jusqu'à 50 % des écoulements naturels au mois de juillet selon les scénarios les plus pessimistes. La tension est plus forte sur l'Ebre puisque la consommation représente près de 40 % des écoulements à l'échelle annuelle avec les usages actuels sous climat de référence. Celle-ci pourrait atteindre près de 50 % en combinant le scénario tendanciel d'usages avec les scénarios climatiques les plus pessimistes. Néanmoins, du fait de l'importante capacité de stockage dans le bassin de l'Ebre, les changements climatiques et d'usages de l'eau pourraient conduire à augmenter le stockage en automne, en hiver et au printemps (une plus grande proportion d'écoulement naturel étant stocké dans les réservoirs) et à réduire l'impact sur les écoulements en été du fait du soutien d'étiage assuré par les barrages. Ceci diffère beaucoup

avec le bassin de l'Hérault, où la consommation nette pourrait doubler (en proportion des écoulements naturels) durant les mois d'été du fait de capacités de stockage et de soutien limitées.

4.2.4. Capacité d'adaptation aux changements

Les projections d'usages de l'eau dans les bassins de l'Hérault et de l'Ebre présentent donc un risque très important de non viabilité sous scénarios de changement climatique. La chaîne de modélisation a donc été utilisée pour évaluer des options d'adaptations visant à réduire les déséquilibres entre disponibilité et demande en eau.

Pour évaluer les mesures possibles d'adaptation, une analyse de sensibilité des fréquences de restrictions aux débits environnementaux seuils, aux principaux facteurs d'évolution de la demande et aux règles de gestion des barrages a été réalisée. Des scénarios d'adaptation combinant les leviers les plus sensibles ont également été construits à titre d'exemple et testés. Ils incluent notamment un maintien des surfaces irriguées actuelles dans les deux bassins, une stagnation de la population desservie par le transfert d'eau hors du bassin de l'Hérault, une baisse de 30 % de l'allocation domestique unitaire, une baisse de 20 % des débits seuils environnementaux, et une modification des règles de gestion du barrage du Salagou dans l'Hérault.

Ces scénarios pourraient permettre de réduire sensiblement le stress hydrique par rapport au scénario tendanciel. En plus d'une réduction de la fréquence et de l'intensité concernant la restriction des prélèvements, les scénarios d'adaptation mènent à une baisse de la consommation nette (et donc de la pression anthropique sur les milieux) en pourcentage des écoulements naturels, malgré la baisse des débits seuils environnementaux. Néanmoins, leur robustesse semble insuffisante au regard des incertitudes liées aux projections de changement climatique testées (Fig. D.35). Ces résultats suggèrent des mesures plus drastiques de réduction de la demande et d'augmentation de la disponibilité en eau dans le cas des scénarios climatiques les plus pessimistes (jusqu'à +3.3 °C d'augmentation des températures annuelles moyennes et -15 % de diminution des précipitations annuelles). Ces mesures conduiraient alors à faire évoluer de manière sensible les modes de gestion actuels ou envisagés sur les deux bassins. Les leviers à mobiliser concernant la disponibilité en eau seraient d'envisager des transferts d'eau vers le bassin (e.g. projet Aqua Domitia à l'étude dans l'Hérault), d'augmenter la capacité de stockage (e.g. projets de barrage-réservoir dans le bassin de l'Ebre ou modification de la gestion du barrage du Salagou dans l'Hérault), d'exploiter de nouveaux prélèvements (e.g. sources karstiques dans le bassin de l'Hérault). Concernant la réduction des demandes en eau, les leviers possibles concernent la réduction des surfaces irriguées, les changements de types ou variétés de cultures, les économies d'eau par réfection des réseaux, la maîtrise de la demande AEP par une politique incitative de tarification de l'eau et/ou une sensibilisation de la population aux consommations, une modulation des contraintes environnementales envisagées, etc. Ces mesures pourraient être testées de manière individuelle ou combinée dans la chaîne de modélisation REMedHE mais leur application dépend évidemment de choix de planification et de décisions politiques.

4.3. Indicateurs de restrictions d'eau sous incertitude climatique : apports et limites

Face à la complexité de représentation des équilibres entre disponibilité et demande en eau, des indicateurs de stress hydrique sont nécessaires pour synthétiser l'information et permettre les comparaisons entre différents scénarios. Le projet REMedHE a permis de proposer des indicateurs originaux de stress hydrique caractérisés par des valeurs de durée, fréquence et amplitude des restrictions de demande en eau à différentes échelles de temps (décadaire et annuelle) en lien avec les besoins de planification et de gestion de l'eau.

La reconstruction historique des restrictions d'eau par simulation des équilibres disponibilité-demande sur la période 1971–2009 (Fig. D.15) a ainsi fourni des éléments de connaissance originaux sur les déterminants du stress hydrique au sein des deux hydrosystèmes étudiés. Cette reconstruction chronologique a permis de mettre en évidence une pression accrue sur la ressource due à des changements progressifs (population, surfaces irriguées, etc.) ou soudains (mise en place d'un nouveau barrage, réfection de certains réseaux, etc.) tout en identifiant des périodes de déficits chroniques en lien avec des conditions climatiques plus sévères certaines années. Néanmoins, ce type de représentation chronologique fait peu de sens sous contrainte de scénarios climatiques et d'usages de l'eau, dès lors que la variabilité climatique future reste la même en étant simplement perturbée par un signal de changement dans les scénarios climatiques et que les projections d'usages ne sont pas conçues comme une évolution progressive des territoires. Par ailleurs, les tentatives pour intégrer d'autres indicateurs complémentaires issus de la littérature (Asefa *et al.*, 2014 ; Hashimoto *et al.*, 1982 ; Fowler *et al.*, 2003) en lien avec la restriction maximale, la fiabilité et la résilience (voir Fig. D.5) se sont traduites par des résultats difficiles à interpréter et à communiquer. Ces raisons, mais aussi la nécessité de

considérer l'incertitude climatique à travers l'intégration de plusieurs projections climatiques dans les analyses prospectives, ont conduit à simplifier la représentation graphique des restrictions d'eau selon des diagrammes radars exprimant les fréquences et intensités d'insatisfaction de la demande en eau municipale et d'irrigation à l'échelle décennale et annuelle.

Bien que cette représentation des fréquences et intensités de restrictions se soit révélée pertinente pour l'analyse des équilibres disponibilité/demande, l'interprétation et la communication des résultats reste complexe et les comparaisons entre différents scénarios difficiles. Certains auteurs (e.g. Molle & Mollinga, 2003 ; Hinkel, 2011) mettent d'ailleurs en doute l'utilisation d'indicateurs pour évaluer le stress hydrique en faisant valoir que ceux-ci ont tendance à agréger la réalité notamment en masquant certaines hétérogénéités spatio-temporelles au sein des territoires. Dans le projet REMedHE, les indicateurs ont été utilisés pour faciliter la comparaison entre différentes combinaisons de scénarios climatiques et d'usages de l'eau. Plutôt que les valeurs absolues de fréquence et d'intensité des restrictions, ce sont les changements relatifs de valeurs entre les différents scénarios qui importent le plus. Néanmoins, l'utilisation de ces indicateurs pour représenter la vulnérabilité des hydrosystèmes au stress hydrique reste critiquable. Si ces indicateurs permettent de quantifier les changements de fréquence et d'intensité des restrictions sur la demande en eau, ils ne peuvent à eux seuls représenter la vulnérabilité des usages de l'eau aux changements. D'autres indicateurs pourraient être mobilisés pour caractériser le stress hydrique et ses changements. Par exemple, le niveau de remplissage des réservoirs pourrait indiquer si les ouvrages existants ou planifiés sont adaptés aux changements possibles des écoulements. Des indicateurs sur le stress hydrique des cultures irriguées permettraient également de mettre en perspective les restrictions, en évaluant, par exemple quel pourcentage de l'évapotranspiration optimale ces restrictions représentent.

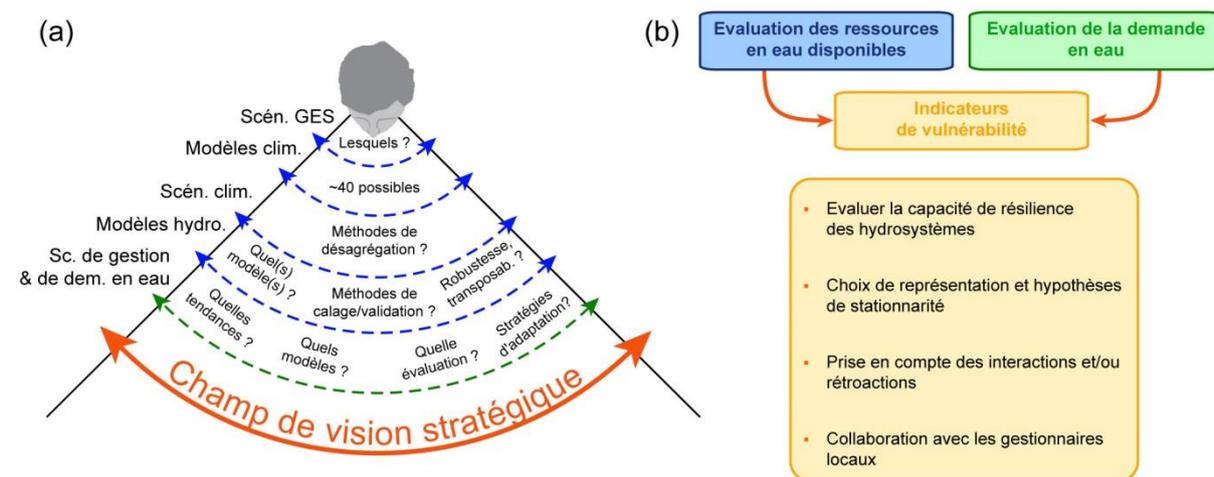


Figure D.38. Défis méthodologiques associés à l'analyse de l'évolution des équilibres entre usages et ressources en eau à l'échelle d'hydrosystèmes anthropisés : (a) incertitudes, propagation et champ de vision stratégique ; (b) principes généraux pour l'élaboration de scénarios prospectifs complexes à travers des indicateurs de vulnérabilité sur les équilibres entre ressource et demande en eau. ([MEM1]).

Le projet a également montré que les incertitudes étaient un élément clef à prendre compte dans l'élaboration de stratégies d'adaptation. Walker *et al.* (2003) distinguent deux classes d'incertitude : les incertitudes épistémiques, qui découlent d'une compréhension insuffisante du système représenté, et les incertitudes liées à la variabilité naturelle (nature chaotique ou difficilement prévisible du système étudié). En d'autres termes, les incertitudes peuvent provenir des données (qualité et interprétation), des modèles utilisés (biais de représentation, sensibilité de la paramétrisation, validation limitée, etc.), mais aussi de l'élaboration de scénarios, qui dépendent d'évolutions de variables physiques et humaines difficiles à prévoir (Fig. D.38). Alors que les efforts doivent être maintenus pour améliorer les modèles en vue d'apporter des éléments d'aide à la décision (e.g. Sivapalan *et al.*, 2012 ; Montanari *et al.*, 2014), les incertitudes de modélisation et de prédiction ne seront pas réduites avant que les choix d'adaptation aux changements climatiques possibles n'aient à être pris (Wilby, 2010). C'est pourquoi il est nécessaire de considérer ce qu'impliquent les incertitudes climatiques sur la gestion de l'eau. C'est ce que le projet REMedHE s'est attaché à faire en prenant en compte une gamme variées de scénarios de changement climatique issus de l'exercice récent CMIP5 et en évaluant l'impact des incertitudes climatiques sur la disponibilité, la demande en eau et finalement sur les risques de restrictions. Par

ailleurs, la robustesse aux incertitudes climatiques des mesures d'adaptation a été évaluée comme le nombre de scénarios climatiques pour lesquels un impact positif était constaté sur la diminution des restrictions d'eau. Cependant, l'élaboration de stratégies d'adaptation à un contexte futur plus chaud, plus variable et qui devrait soumettre les ressources disponibles à des pressions d'usage plus importantes se heurte à la propagation de nombreuses autres incertitudes associées aux modélisations des processus hydrologiques, de l'évolution de la société et des modes de gestion. Comme cela a déjà été évoqué, toutes ces incertitudes n'ont pas été considérées dans le projet.

5. Réflexions et perspectives sur la vulnérabilité des usages de l'eau

Si le projet a permis de fournir des éléments de connaissance originaux sur la vulnérabilité des usages de l'eau aux changements climatiques et anthropiques au sein des bassins de l'Hérault et de l'Ebre, il n'a pas pu appréhender toutes les facettes de la durabilité de la gestion de l'eau. En effet, des facteurs autres que la présence ou non de restrictions peuvent conditionner la durabilité de la gestion de l'eau, comme les modes de gestion des pénuries d'eau et notamment la mise en place de mécanismes socio-économiques qui permettent de gérer de manière équitable les restrictions. Ainsi, l'étude n'a pas du tout pris en compte la composante économique, et très peu la composante sociale, de la gestion de l'eau. Des études complémentaires sur la vulnérabilité sociale et la capacité d'adaptation seraient donc nécessaires.

La fréquence et l'intensité des restrictions ne suffisent pas à caractériser la vulnérabilité des usages. La reconstruction historique des restrictions d'eau (Fig. D.15) a permis de mettre en évidence des restrictions fréquentes et intenses sur les 40 dernières années, notamment au niveau du secteur de Gignac dans le bassin de l'Hérault et des secteurs de la rive droite (Jalón et Guadalupe) dans le bassin de l'Ebre. Ces restrictions sont susceptibles de refléter des situations très différentes en terme de dommage économique et pourraient masquer des adaptations locales, qui n'ont pas été prises en compte dans les simulations. Nonobstant la surestimation possible des restrictions du fait des incertitudes de modélisation déjà évoquées, les restrictions semblent avoir été particulièrement intenses et fréquentes sur la rive droite de l'Ebre. Une analyse plus précise de cette zone serait nécessaire pour identifier et caractériser les possibles adaptations locales (e.g. puits ou réserves privés, dessalement de l'eau saumâtre, pratiques agricoles adaptées comme l'irrigation déficitaire) et pour comprendre l'impact économique et social de ces restrictions. Des visites sur le bassin de l'Hérault ont permis de révéler des problématiques liées aux systèmes traditionnels d'irrigation, qui utilisent des canaux gravitaires pour extraire des volumes importants d'eau des rivières pendant l'été. Bien que cette technique implique des retours importants au milieu, les prélèvements occasionnés peuvent perturber significativement les débits d'étiage et créer des tensions locales. Ces systèmes traditionnels ont néanmoins tendance à être convertis en systèmes par aspersion ou goutte à goutte, avec la mise en place de retenues collinaires pour soulager la pression sur les débits d'étiage.

L'exploitation de certains résultats intermédiaires de la chaîne de modélisation pourrait également aider à évaluer la vulnérabilité des usages de l'eau au changement climatique. Par exemple, l'occurrence des restrictions d'eau pourrait être mieux caractérisée : les pénuries ont-elles tendance à se produire plus fréquemment après un hiver sec ou lors d'un été particulièrement chaud ? Sont-elles liées à une succession de saisons sèches ou principalement liées aux précipitations estivales ? Une connaissance approfondie des causes de pénuries pourrait, en effet, aider à mieux les anticiper.

Enfin, en termes d'options d'adaptation, de nombreuses autres mesures pourraient être envisagées pour évaluer la capacité des usages de l'eau à faire face à la diminution des ressources en eau. De nombreux ajustements des pratiques agricoles locales peuvent être mis en œuvre par les agriculteurs pour s'adapter à des conditions plus chaudes et plus sèches (e.g. Meza *et al.*, 2008 ; Molle *et al.*, 2010 ; Woznicki *et al.*, 2015). Devant la nécessité d'améliorer la résilience des systèmes agricoles face à la variabilité climatique, la distinction stricte entre agriculture pluviale et agriculture irriguée pourrait être ainsi reconsidérée (Vidal *et al.*, 2009). D'après ces auteurs, des productivités élevées et stables sous conditions de pénuries d'eau peuvent être atteintes grâce à une meilleure gestion du continuum entre l'eau verte et l'eau bleue.

Ces analyses complémentaires sur la vulnérabilité et les capacités d'adaptation doivent être menées localement, à une échelle plus fine que les plans de gestion des bassins. Ainsi, pour atteindre un équilibre durable entre la disponibilité et la demande en eau et pour réduire la vulnérabilité des usages de l'eau au changement climatique, une complémentarité doit être trouvée entre les études quantitatives sur le stress hydrique à l'échelle des hydrosystèmes, comme celle menée dans le projet GICC REMedHE, et des évaluations locales sur la vulnérabilité et l'adaptation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AERMC – Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse (2014a). Plan de bassin d'adaptation au changement climatique dans le domaine de l'eau. bassin rhône-méditerranée. www.eaurmc.fr. last access: June 2015.
- AERMC – Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse. Catalogue des données techniques issues des processus redevances (2014b). sierm.eaurmc.fr/telechargement/donnees.CAT_prelevement.pdf. last access: Sept. 2015.
- Alcamo, J., Döll, P., Henrichs, T., Kaspar, F., Lehner, B., Rosch, T. & Siebert, S. (2003). Global estimates of water withdrawals and availability under current and future “business-as-usual” conditions. *Hydrol. Sc. J.*, 48, 339–348.
- Alcamo, J., Flörke, M. & Märker, M. (2007). Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes. *Hydrol. Sci. J.*, 52:247–275.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration—Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Irrigation and Drain, Paper No. 56* FAO, Rome, Italy 300 pp.
- Arnell, N.W. (1999) Climate change and global water resources. *Global Env. Change*, 9, 831–849.
- Arnell, N.W. (2004) Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Env. Change*, 14, 31–52.
- Asefa, T., Clayton, J., Adams, A. & Anderson, D. (2014). Performance evaluation of a water resources system under varying climatic conditions: Reliability, Resilience, Vulnerability and beyond. *J. Hydrol.* 508, 53–65.
- Bao C. & Fang C. (2007). Water resources constraint force on urbanization in water deficient regions: a case study of the Hexi Corridor, arid area of NW China. *Ecol. Econ.*, 62, 508–517.
- Barnett T. P., Pierce D. W. & Schur R. (2001). Detection of anthropogenic climate change in the world’s oceans. *Science*, 92, 270-274.
- Bejarano, M.D., Marchamalo, M., García de Jalón, D. & González del Tánago, M. (2010). Flow regime patterns and their controlling factors in the Ebro basin (Spain). *J. Hydrol.*, 385, 323–335.
- Bloom D. E. & Sachs J. D. (1998). Geography, demography and economic growth in Africa. *Brookings Papers on Economic Activity*, 2, 207–273.
- Boithias, L., Acuña, V., Vergoñós, L., Ziv, G., Marcé, R. & Sabater, S. (2014). Assessment of the water supply: demand ratios in a Mediterranean basin under different global change scenarios and mitigation alternatives. *Sci. Tot. Env.*, 470–471, 567–577.
- Brigode, P., Oudin, L. & Perrin, C. (2013). Hydrological model parameter instability: A source of additional uncertainty in estimating the hydrological impacts of climate change? *J. Hydrol.*, 476:410–425.
- Burak, S., Dogan, E. & Gazioglu, C. (2004). Impact of urbanization and tourism on coastal environment. *Ocean & Coastal Management*, 47, 515–527.
- Cavazos, T. & Hewitson, B.C. (2005). Performance of NCEP-NCAR reanalysis variables in statistical downscaling of daily precipitation. *Clim. Res.*, 28, 95–107
- CEDEX – Centro de estudios y experimentacion de obras publicas, 2012. Anuario de Afors. <http://www.hercules.cedex.es/anuarioafors/default.asp> (accessed August 2013).
- Chandler, R.E. & Wheeler, H.S. (2002). Analysis of rainfall variability using generalized linear models: a case study from the west of Ireland. *Water Resour. Res.*, 38:1192, doi:10.1029/2001 WR000906.
- Chazot, S., Terrasson, I. & Drocourt, A. (2012). Ressources et besoins en eau en France à l'horizon 2030. Rapport technique, BRL Ingénierie.
- CHE – Confederación Hidrográfica del Ebro (2013). Propuesta de proyecto de plan hidrológico de la cuenca del Ebro. Memoria. www.chebro.es. last access: Oct. 2014.
- Collet, L., Ruelland, D., Borrell-Estupina, V. & Servat, E. (2014). Assessing the long-term impact of climatic variability and human activities on the water resources of a meso-scale Mediterranean catchment. *Hydrol. Sci. J.*, 59, 1457–1469.
- Collet, L., Ruelland, D., Borrell-Estupina, V., Dezetter, A. & Servat, E. (2013). Integrated modelling to assess long-term water supply capacity on a meso-scale Mediterranean catchment. *Sci. Tot. Env.*, 461–462, 528–540.
- Collins, W., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., Hughes, J., Jones, C., Joshi, M., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J., Senior, C., Sitch, S., Totterdell, I., Wiltshire, A., & Woodward, S. (2011). Development and evaluation of an earth-system model—HadGEM2. *Geoscientific Model Development*, 4:1051–1075.
- Coron, L., Andréassian, V., Perrin, C., Lerat, J., Vaze, J., Bourqui, M. & Hendrickx, F. (2012). Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions : an experiment on 216 Australian catchments. *Water Resour. Res.*, 48. doi: 10.1029/2011WR011721.
- Cosandey, C., Andréassian, V., Martin, C., Didon-Lescot, J., Lavabre, J., Folton, N., Mathys, N. & Richard, D. The hydrological impact of Mediterranean forest: a review of French research. *J. Hydrol.*, 301:235–249, 2005.
- Crawford, T. et al. (2007). GCM grid-box choice and predictor selection associated with statistical downscaling of daily precipitation over Northern Ireland. *Clim. Res.*, 34, 145–160.
- Dessai, S. & Hulme, M. (2004). Does climate adaptation policy need probabilities? *Climate Policy*, 4.

- Dessai, S. & Hulme, M. (2007). Assessing the robustness of adaptation decisions to climate change uncertainties: A case study of water resources management in the East of England. *Global Env. Change*, 17, 59–72.
- Dessai, S., Hulme, M., Lempert, R. & Pielke, R. (2009). Climate prediction: a limit to adaptation? In: Adger, N., Lorenzoni, I., O'Brien, K.L. *Adapting to Climate Change: Thresholds, Values, Governance*. Cambridge University Press.
- Donohue, R., McVicar, T. & Roderick, M. (2010). Assessing the ability of potential evaporation formulations to capture the dynamics in evaporative demand within a changing climate. *J. Hydrol.*, 386:186–197.
- Dufresne, J., Foujols, M., Denvil, S., Caubel, A., Marti, O., Aumont, O., Balkanski, Y., Bekki, S., Bellenger, H., Benschila, R., Bony, S., Bopp, L., Braconnot, P., Brockmann, P., Cadule, P., Cheruy, F., Codron, F., Cozic, A., Cugnet, D., de Noblet, N., Duvel, J., Ethé, C., Fairhead, L., Fichet, T., Flavoni, S., Friedlingstein, P., Grandpeix, J., Guez, L., Guilyardi, E., Hauglustaine, D., Hourdin, F., Idelkadi, A., Ghattas, J., Joussaume, S., Kageyama, M., Krinner, G., Labetoulle, S., Lahellec, A., Lefebvre, M., Lefevre, F., Levy, C., Li, Z., Lloyd, J., Lott, F., Madec, G., Mancip, M., Marchand, M., Masson, S., Meurdesoif, Y., Mignot, J., Musat, I., Parouty, S., Polcher, J., Rio, C., Schulz, M., Swingedouw, D., Szopa, S., Talandier, C., Terray, P., Viovy, N. & Vuichard, N. (2013). Climate change projections using the IPSL-CM5 earth system model: from CMIP3 to CMIP5. *Climate Dynamics*, 40: 2123–2165.
- Dunne, J., John, J., Adcroft, A., Griffies, S., Hallberg, R., Shevliakova, E., Stouffer, R., Cooke, W., Dunne, K., Harrison, M., Krasting, J., S.L. Malyshev, d. P. M., Philipps, P., Sentman, L., Samuels, B., Spelman, M., Winton, M., Wittenberg, A. & Zadeh, N. (2012). GFDL's ESM2 global coupled climate-carbon earth system models. part I: physical formulation and baseline simulation characteristics. *J. Climate*, 25:6646–6665.
- EC – European Commission. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the Community action in the field of water policy, 2000.
- EC – European Commission. European Soil Database (distribution version V2.0), 2004.
- Foster S.S.D. (2001). The interdependence of groundwater and urbanization in rapidly developing cities. *Urban Water*, 3, 185–192.
- Fowler, H., Kilsby, C. & O'Connel, P. (2003). Modeling the impacts of climatic change and variability on the reliability, resilience, and vulnerability of a water resource system. *Water Resour. Res.*, 39(8). doi: 10.1029/2002WR001778.
- Frich P., Alexander L.V., Della-Marta P., Gleason B., Haylock M., Klein Tank A.M.G & Peterson T. (2002). Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Clim. Res.*, 19, 193–212.
- Fujihara, Y., Tanaka, K., Watanabe, T., Nagano, T. & Kojiri, T. (2008) Assessing the impacts of climate change on the water resources of the Seyhan River Basin in Turkey: Use of dynamically downscaled data for hydrologic simulations. *J. Hydrol.*, 353, 33–48.
- Gallart, F. & Llorens, P. (2003). Catchment management under environmental change: Impact of land cover change on water resources. *Water Int.*, 28:334–340.
- Gallup J. L., Sachs J. D. & Mellinger A. D. (1999). Geography and economic development. *Int. Reg. Sci. Rev.*, 22(2), 179–232.
- García-Vera, M. (2013) The application of hydrological planning as a climate change adaptation tool in the Ebro basin. *Int. J. Water Resour. Dev.*, 29:219–236.
- García-Vera, M.A. & Martínez-Cob, A. (2004). Revisión de las necesidades hídricas netas de los cultivos de la Cuenca del Ebro. Zaragoza, Confederación Hidrográfica del Ebro. Informe. Trabajo de consultoría y asistencia - Convenio Colaboración CSIC-CHE. 8 vols.
- Giorgi F. (2005). Climate change hot-spots. *Geophys. Res. Lett.*, 33(8), L08707. 4 pp.
- Gober, P. (2010). Desert urbanization and the challenges of water sustainability, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2, 144–150.
- Hallegratte, S. (2009). Strategies to adapt to an uncertain climate change. *Global Env. Change* 19, 240–247.
- Hargreaves, G.H. & Samani, Z.A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Eng. Agric.*, 1, 96–99.
- Hashimoto, T., Stedinger, J.R. & Loucks, D.P. (1982). Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resources system performance evaluation. *Water Resour. Res.*, 10, 14–20.
- Hastie, T. J. & Tibshirani, R. J. (1990). *Generalized Additive Models*, New York: Chapman & Hall.
- Hejazi, M., Edmonds, J., Clarke, L., Kyle, P., Davies, E., Chaturvedi, V., Wise, M., Patel, P., Eom, J., Calvin, K., Moss, R. & Kim, S. (2014). Long-term global water projections using six socioeconomic scenarios in an integrated assessment modeling framework. *Technological Forecasting and Social Change*, 81, 205–226.
- Hinkel, J. (2011). Indicators of vulnerability and adaptive capacity: towards a clarification of the science-policy interface. *Global Environ. Change*, 21:198–208.
- Hublart, P., Ruelland, D., Garcia de Cortázar Aauri, I. & Ibacache, A. (2015). Assessing the reliability of conceptual hydrological modeling in a cultivated, drought-prone catchment of the Chilean Andes. In: *Hydrologic non-stationarity and extrapolating models to predict the future*. PIAHS, 371, 203–209.
- IPCC (2013a). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC (2013b). *Summary for Policymakers*. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basins*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D., Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Jeffries, N., & Pfeiffer, R. (2000). A mixture model for the probability distribution of rain rate. *Environmetrics*, 12, 1–10.

- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R. & Joseph, D. (1996). The NMC/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437–471.
- Krol, M., Jaeger, A., Bronstert, A. & Güntner, A. (2006). Integrated modeling of climate, water, soil, agricultural and socio-economic processes: A general introduction of the methodology and some exemplary results from the semi-arid north-east of Brazil. *J. Hydrol.*, 328, 417–431.
- Ladouche, B., Maréchal, J., Dörfli, N. & Lachassagne, P. (2006). Système karstique des Cent Fonts. simulation de scénarios d'exploitation et de gestion de la ressource. Technical Report BRGM/RP-54865-FR, BRGM.
- Le Moigne, P. (2002). Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système SAFRAN. Technical report, Centre National de Recherches Météorologiques, Météo-France.
- Lecina, S. & Playán, E. (2002). Mejora del regadío de la Comunidad de Regantes V del Canal de Bardenas. In: *Actas del XX Congreso Nacional de Riegos y Drenajes (AERYD)*, Ciudad Real., 99–101.
- Lecina, S., Isidoro, D., Playán, E. & Aragües, R. (2010). Irrigation modernization and water conservation in Spain: The case of Riegos del Alto Aragón. *Agric. Water Manag.*, 97, 1663–1675.
- Levitus S., Antonov J. I., Wang J., Delworth T. L., Dixon K. W. & Broccoli A. J. (2001). Anthropogenic warming of Earth's climate system. *Science*, 292, 267–270.
- López-Moreno, J.I., Zabalza, J., Vicente-Serrano, S.M., Revuelto, J., Gilaberte, M., Azorin-Molina, C., Morán-Tejeda, E., García-Ruiz, J.M. & Tague, C. (2014). Impact of climate and land use change on water availability and reservoir management: Scenarios in the Upper Aragón River, Spanish Pyrenees. *Sci. Tot. Env.*, 493, 1222–1231.
- Martin, G. M., Bellouin, N., Collins, W., Culverwell, I., Halloran, P., Hardiman, S., Hinton, T., Jones, C., McDonald, R., McLaren, A., O'Connor, F., Roberts, M., Rodriguez, J., Woodward, S., Best, M., Brooks, M., Brown, A., Butchart, N., Dearden, C., Derbyshire, S., Dharssi, I., Doutriaux-Boucher, M., Edwards, J., Falloon, P., Gedney, N., Gray, L., Hewitt, H., Hobson, M., Huddleston, M., Hughes, J., Ineson, S., Ingram, W., James, P., Johns, T., Johnson, C., Jones, A., Jones, C., Joshi, M., Keen, A., Liddicoat, S., Lock, A., Maidens, A., Manners, J., Milton, S., Rae, J., Ridley, J., Sellar, A., Senior, C., Totterdell, I., Verhoef, A., Vidale, P. & Wiltshire, A. (2011). The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. *Geoscientific Model Development*, 4:723–757.
- Martínez-Cob, A. & Tejero-Juste, M. (2004). A wind-based qualitative calibration of the Hargreaves ETO estimation equation in semiarid regions. *Agricul. Water Manag.*, 64, 251–264.
- McVicar, T., Roderick, M., Donohue, R., Li, L., Niel, T. V., Thomas, A., Grieser, J., Jhajharia, D., Himri, Y., Mahowald, N., Mescherskaya, A., Kruger, A., Rehman, S. & Dinpashoh, Y. (2012). Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation. *J. Hydrol.*, 416–417:182–205.
- MEDDE – Ministère de l'Écologie du Développement Durable et de l'Énergie. Banque Hydro. URL: <http://www.hydro.eaufrance.fr/selection.php>. Last access : October 2010.
- Menzel, L. & Matovelle, A. (2010). Current state and future development of blue water availability and blue water demand: A view at seven case studies. *J. Hydrol.*, 384:245–263.
- Meza, F., Silva, D. & Vigil, H. (2008). Climate change impacts on irrigated maize in Mediterranean climates: evaluation of double cropping as an emerging adaptation alternative. *Agric. Syst.*, 98:21–30.
- Michelangeli, P.-A., Vrac, M. & Loukos, H. (2009). Probabilistic downscaling approaches: Application to wind cumulative distribution functions. *Geophysical Research Letters*, 36, L11708, doi:10.1029/2009GL038401.
- Milano, M., Ruelland, D., Fernandez, S., Dezetter, A., Fabre, J. & Servat, E. (2012). Facing global changes in the Mediterranean basin: How could the current water stress evolve by the medium-term? *C. R. Geoscience* 344, 432–440.
- Milano, M., Ruelland, D., Dezetter, A., Fabre, J., Ardoin-Bardin, S. & Servat, E. (2013) Modeling the current and future capacity of water resources to meet water demands over the Ebro basin. *J. Hydrol.*, 500, 114-126.
- Milly P. C. D., Dunne K. A. & Vecchia A. V. (2005). Global patterns of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438, 347–350.
- Milly, P., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R., Kundzewicz, Z. & Lettenmaier, D. (2008). Stationarity is dead: Whither water management? *Science*, 319:573–574.
- MMA – Ministerio de Medio Ambiente (2000). Libro blanco del agua en España.
- Molle, F. & Mollinga, P. (2003). Water poverty indicators: conceptual problems and policy issues. *Water Policy*, 5:529–544, 2003.
- Molle, F., Venot, J., Lannerstad, M. & Hoogesteger, J. (2010). Villains or heroes? farmers' adjustments to water scarcity. *Irrig. and Drain.*, 59:419–431.
- Monreal, T., Calvo-Rubio, F. & Lorenzo, F. (1999). Evaluación de los recursos hídricos en el Libro Blanco del Agua en España. *El Libro Blanco del Agua*, 6:125–138.
- Montanari, A., Young, G., Savenije, H.H.G., Hughes, D., Wagener, T., Ren, L.L., Koutsoyiannis, D., Cudennec, C., Toth, E., Grimaldi, S., Blöschl, G., Sivapalan, M., Beven, K., Gupta, H., Hipsey, M., Schaeffli, B., Arheimer, B., Boegh, E., Schymanski, S.J., Di Baldassarre, G., Yu, B., Hubert, P., Huang, Y., Schumann, A., Post, D., Srinivasan, V., Harman, C., Thompson, S., Rogger, M., Viglione, A., McMillan, H., Characklis, G., Pang, Z., Belyaev (2014) – “Panta Rhei – Everything Flows”: Change in hydrology and society – The IAHS Scientific Decade 2013–2022. *Hydrolog Sci J.*, 58,j 1256–1275.
- Oki T., Agata Y., Kanae S., Saruhasi T. & Musiake K. (2003). Global water resources assessment under climatic changes in 2050 using TRIP. In: *Water Resources Systems – Water Availability and Global Change*. IAHS. Publ., 280, 124–133.

- Olmstead, S. (2014). Climate change adaptation and water resources management: A review of the literature. *Energy Econ.*, 46, 500–509.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F. & Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 2 – Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *J. Hydrol.*, 303, 290–306.
- Patt, A., Klein, R. & de la Vega-Leinert, A. (2005). Taking the uncertainty in climate change vulnerability assessments seriously. *C.R. Geosci.*, 337, 411–424.
- Perrin, C., Michel, C. & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J. Hydrol.*, 279, 275–289.
- Portmann, F. T., Siebert, S. & Döll, P. (2010). MIRCA2000 – Global monthly irrigated and rainfed crop areas around the year 2000: A new high-resolution data set for agricultural and hydrological modeling. *Global Biogeochemical Cycles*, 24.
- Pulido-Velazquez, D., Sahuquillo, A. & Andreu, J. (2012). A conceptual-numerical model to simulate hydraulic head in aquifers that are hydraulically connected to surface water bodies. *Hydrol Process* 26, 1435–1448.
- Pulido-Velazquez, D., Sahuquillo, A., Andreu, J. & Pulido-Velazquez, M (2007). An efficient conceptual model to simulate water body-aquifer interaction in Conjunctive Use Management Model. *Water Resour Res* 43: W07407, doi: 0.1029/2006WR005064
- Quintana-Segui, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L. & Morel, S. (2008). Analysis of near-surface atmospheric variables: validation of the SAFRAN analysis over France. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, 47, 92–107.
- Quintana-Seguí, P., Míguez-Macho, G. & Llasat, M. d. C. (2015). Extending the SAFRAN meteorological analysis system to the Iberian Peninsula and the Balearic Islands. Analysis of its performance and applications. In *EGU General Assembly Conference Abstracts 2015*, 17, 3854.
- Räisänen, J. (2007). How reliable are climate models? *Tellus*, 59A:2–29.
- Rinaudo, J.-D. (2011) *Urbanisme, habitat et demande en eau potable - Scénarios 2030 pour le Pays Cœur d'Hérault*. BRGM/RP-60358-FR.
- Rinaudo, J.-D. (2013). Prévoir la demande en eau potable : une comparaison des méthodes utilisées en France et en Californie. *Sciences Eaux & Territoires* 10, 78–85.
- Rotstayn, L. D., Jeffrey, S. J., Collier, M. A., Dravitzki, S. M., Hirst, A. C., Syktus, J. I. & Wong, K. K. (2012). Aerosol- and greenhouse gas-induced changes in summer rainfall and circulation in the australasian region: a study using single-forcing climate simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12:6377–6404.
- Ruelland, D., Brisset, N., Jourde, H. & Oyarzun, R. (2011). Modeling the impact of climatic variability on the groundwater and surface flows from a mountainous catchment in the Chilean Andes. In: *Cold regions hydrology in a changing climate*. IAHS Publ., 346, 171–179.
- Ruelland, D., Ardoin-Bardin, S., Collet, L. & Roucou, P. (2012). Simulating future trends in hydrological regime of a large Sudano-Sahelian catchment under climate change. *J. Hydrol.*, 424–425, 207–216.
- Ruelland, D., Dezetter, A. & Hublart, P. (2014). Sensitivity analysis of hydrological modeling to climate forcing in a semi-arid mountainous catchment. In: *Hydrology in a changing world: environmental and human dimensions*. IAHS Publ., 363, 145–150.
- Ruelland, D., Hublart, P. & Trambly, Y. (2015). Assessing uncertainties in climate change impacts on runoff in western Mediterranean basins. In: *Hydrologic non-stationarity and extrapolating models to predict the future*. IAHS Publ., 371, 75–81
- SAGE du bassin du fleuve Hérault (2005). *Cahier numéro 3, Gestion quantitative de la ressource, état des lieux*. Version 4, présenté à la CLE du 29 juin 2005. 52 p.
- Salvador, R., Martínez-Cob, A., Cavero, J. & Playán, E. (2011). Seasonal on-farm irrigation performance in the Ebro basin (Spain): Crops and irrigation systems. *Agricul. Water Manag.*, 98, 577–587.
- Shen Y., Oki T., Utsumi N., Kanae S. & Hanasaki N. (2008). Projection of future world water resources under SRES scenarios: water withdrawal. *Hydrol. Sc. J.*, 53(1), 11–33.
- Sivapalan, M., Savenije, H. H. & Blöschl, G. (2012). Socio-hydrology: A new science of people and water. *Hydrol. Process.*, 26, 1270–1276.
- SMBFH – Syndicat Mixte du Bassin du Fleuve Hérault (2005). *Gestion quantitative de la ressource. Etat des lieux version 4*. SAGE du bassin du Fleuve Hérault, juin 2005. URL : www.sage.herault.fr (last access: August 2014).
- Stevens, B., Giorgetta, M., Esch, M., Mauritsen, T., Crueger, T., Rast, S., Salzmann, M., Schmidt, H., Bader, J., Block, K., Brokopf, R., Fast, I., Kinne, S., Kornblueh, L., Lohmann, U., Pincus, R., Reichler, T. & Roeckner, E. (2013). Atmospheric component of the MPI-M Earth System Model: ECHAM6. *J. Adv. Model. Earth. Syst.*, 5, 146–172.
- Vaze, J., Post, D., Chiew, F., Perraud, J., Viney, N. & Teng, J. (2010). Climate non-stationarity – validity of calibrated rainfall-runoff models for use in climate change studies. *J. Hydrol.*, 394, 447–457.
- Vicente-Serrano, S. & López-Moreno, J.I. (2006) Influence of atmospheric circulation at different spatial scales on winter drought variability through a semiarid climatic gradient in North-East Spain. *Int J. Climatol.*, 26, 1427–1453.
- Vidal, A., van Koppen, B. & Blake, D. (2009). The green-to-blue water continuum: An approach to improve agricultural systems' resilience to water scarcity. *On the Water Front*, 66–72.
- Vidal, J., Martin, E., Franchisteguy, L., Baillon, M. & Soubeyroux, J. (2010). A 50-year highresolution atmospheric reanalysis over france with the SAFRAN system. *Int. J. Climatol.*, 30, 1627–1644.

- Voltaire, A., Sanchez-Gomez, E., Salas y Mélia, D., Decharme, B., Cassou, C., Sénési, S., Valcke, S., Beau, I., Alias, A., Chevallier, M., Déqué, M., Deshayes, J., Douville, H., Fernandez, E., Madec, G., Maisonnave, E., Moine, M.-P., Planton, S., Saint-Martin, D., Szopa, S., Tyteca, S., Alkama, R., Belamari, S., Braun, A., Coquart, L. & Chauvin, F. (2013). The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation. *Climate Dynamics*, 40, 2091–2121.
- von Salzen, K., Scinocca, J. F., McFarlane, N. A., Li, J., Cole, J. N. S., Plummer, D., Verseghy, D., Reader, M. C., Ma, X., Lazare, M. & Solheim, L. (2013). The Canadian fourth generation atmospheric global climate model (CanAM4). part i: Representation of physical processes. *Atmosphere-Ocean*, 51, 104–125.
- Vörösmarty, C., Green, P., Salisbury, J., and Lammers, R. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 289:284–288, 2000.
- Vose R. S., Karl T. R., Easterling D. R., Williams C. N. & Menne M. J. (2004). Impact of land-use change on climate. *Nature*, 427, 213–214.
- Vrac, M. & Naveau, P. (2007). Stochastic downscaling of precipitation: From dry events to heavy rainfalls. *Water Resources Research*, 43, W07402, doi:10.1029/2006WR005308.
- Vrac, M. & Yiou, P. (2010). Weather regimes designed for local precipitation modelling: Application to the Mediterranean basin. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 115, D12103, doi:10.1029/2009JD012871.
- Vrac, M., Drobinski, P., Merlo, A., Herrmann, M., Lavaysse, C., Li, L. & Somot, S. (2012). Dynamical and statistical downscaling of the French Mediterranean climate: uncertainty assessment. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 2769–2784.
- Walker, W. E., Harremoës, P., Rotmans, J., van der Sluijs, J. P., van Asselt, M. B., Janssen, P. & Kreyer von Krauss, M. P. (2003). Defining uncertainty: a conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support. *Integrated Assessment*, 4(1), 5–17.
- Watanabe, M., Suzuki, T., O’ishi, R., Komuro, Y., Watanabe, S., Emori, S., Takemura, T., Chikira, M., Ogura, T., Sekiguchi, M., Takata, K., Yamazaki, D., Yokohata, T., Nozawa, T., Hasumi, H., Tatebe, H. & Kimoto, M. (2010). Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *J. Climate*, 23:6312–6335.
- Wilby, R. (2010). Evaluating climate model outputs for hydrological applications. *Hydrol. Sci. J.*, 55:1090–1093.
- Wilby, R. (2011). Imagine a world without climate models, 2011. URL pielkeclimatesci.wordpress.com/2011/01/17/imagine-a-world-without-climate-models-by-rob-wilby-of-loughborough-university/. Last access: Sept. 2015.
- Wilby, R.L. & Harris, I. (2006). A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Res. Research*, 42, W02419.
- Wilby, R.L. & Wigley, T.M.L. (2000). Precipitation predictors for downscaling: Observed and general circulation model relationships. *Int. J. Climatol.*, 20, 641–661.
- Wilby, R.L., Dessai, S. (2010) – Robust adaptation to climate change. *Weather*, 65, 180–185.
- Woznicki, S., Nejadhashemi, A. & Parsinejad, M. (2015). Climate change and irrigation demand: Uncertainty and adaptation. *J. Hydrol. Reg. Stud.*, 3:247–264.

ANNEXES

Le rapport final du projet GICC REMedHE s'appuie largement sur des publications dans des revues indexées et actes de colloques internationaux listées dans la section « valorisation ». Ces articles sont facilement accessibles dans la littérature et peuvent également être obtenus sur demande par courriel (denis.ruelland@um2.fr) au coordinateur de projet. En conséquence, les annexes suivantes renvoient à des communications courtes de vulgarisation autour du projet GICC REMedHE :

Annexe 1 : Le projet GICC REMedHE : Equilibres entre ressources en eau et usages : les besoins futurs seront-ils satisfaits ? Dossier Agropolis International, « Changement climatique : impacts et adaptation », 20, p. 12.

Annexe 2 : Le bassin de l'Hérault à l'horizon 2050. Interview par la journaliste Idelette Fritsch dans la revue Objectif Languedoc-Roussillon n°72, janvier 2016.

les dossiers
d'**AGROPOLIS**
INTERNATIONAL

*Compétences de la communauté scientifique
en région Languedoc-Roussillon*

Changement climatique :
impacts et adaptations

Équilibre entre ressources en eau et usages : les besoins futurs seront-ils satisfaits ?

Le projet GICC REMedHE 2012-2015 (« Gestion et Impacts du Changement Climatique — Impacts du changement climatique sur la gestion intégrée des Ressources en Eau en Méditerranée : évaluation comparative Hérault-Ebre ») associe des scientifiques de HSM et du Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE, CEA, CNRS, UVSQ) et des gestionnaires de bassin (syndicat mixte du bassin du fleuve Hérault, confédération hydrographique de l'Ebre).

Il vise à évaluer les impacts potentiels d'évolutions climatiques et anthropiques à l'horizon 2050 sur les régimes hydrologiques et les demandes en eau au sein des bassins de l'Hérault (2 500 km², France) et de l'Ebre (85 000 km², Espagne) afin de proposer différentes stratégies de gestion de la ressource pour le maintien des équilibres entre disponibilité et demande en eau. Ces questions sont appréhendées à travers le développement d'une chaîne de modélisation intégratrice préalablement calée et validée sur une période rétrospective de quatre décennies. La modélisation comporte trois étapes :

- la simulation des ressources en eau (écoulements naturels et perturbation par les barrages et canaux) ;
- la représentation de la dynamique spatio-temporelle des usages (domestiques, agricoles, industriels et énergétiques) et des demandes en eau associées ;

- et l'évaluation des équilibres usages/ressources en eau, au travers d'indicateurs de vulnérabilité.

Des scénarios prospectifs complexes ont été formalisés à partir des dernières simulations climatiques du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) et de scénarios socioéconomiques locaux établis en concertation avec les gestionnaires. Les premiers résultats montrent que les bassins seraient soumis à des conditions climatiques plus déficitaires (augmentation des températures associée à une diminution des précipitations printanières et estivales) et à des pressions anthropiques croissantes (augmentation de la population et des surfaces irriguées).

La combinaison de ces conditions devrait entraîner une diminution sensible de la ressource en eau disponible, ainsi qu'une augmentation des besoins domestiques et d'irrigation, fragilisant ainsi les équilibres futurs entre ressources et demandes. Des stratégies d'adaptation visant à réduire la demande en eau (amélioration de l'efficacité, changements de pratiques agricoles) ou à augmenter la disponibilité (gestion alternative des barrages, transferts d'eau inter-bassins) sont donc actuellement testées dans la chaîne de modélisation. L'objectif est d'explorer la viabilité de trajectoires qui s'inscrivent dans un avenir incertain.

Contact : Denis Ruelland, denis.ruelland@um2.fr

Pour plus d'informations : www.remedhe.org

Recherche et formation en sciences de l'eau

Le laboratoire « *HydroSciences Montpellier* » (UMR HSM – IRD, UM, CNRS) est une unité mixte de recherche qui s'investit pleinement dans les recherches en sciences de l'eau. Son périmètre de travail couvre un large éventail de domaines allant de la biogéochimie aux événements extrêmes, en passant par la microbiologie, l'étude des eaux souterraines et celle du cycle hydrologique. Il développe l'essentiel de son activité scientifique dans les régions méditerranéennes et tropicales.

HydroSciences est organisé autour de quatre axes scientifiques :

- Transferts, contaminants, pathogènes, environnement, santé
- Eau, changements environnementaux et sociétaux
- Transferts dans les éco-hydrosystèmes
- Karsts, milieux hétérogènes et événements extrêmes

Deux ateliers transversaux à vocation méthodologique complètent l'organisation du laboratoire : « ATHYS » (atelier en hydrologie spatialisée) et « Traceurs dans l'hydrosphère » (atelier favorisant l'utilisation des techniques

analytiques de traçage de transferts ou de processus hydrologiques).

HydroSciences Montpellier a une très forte implication dans le domaine de l'enseignement et de la formation par la recherche. Les formations portées par le laboratoire (Masters « Eau », « Ingénierie de la Santé », « Polytech'Montpellier-Sciences et Technologies de l'Eau ») attirent des étudiants issus de tout le territoire français, mais aussi de l'étranger et notamment des pays du Sud. L'UMR s'implique également du niveau Licence au Doctorat.

Le laboratoire est membre de l'Observatoire des sciences de l'univers OREME (Observatoire de recherche méditerranéen de l'environnement). Il appuie ses recherches sur des dispositifs techniques importants tels que le Grand plateau technique régional « Analyse des Éléments en Trace dans l'Environnement » (GPTR AETE) et le Laboratoire mutualisé d'analyse des isotopes stables de l'eau (LAMA).

L'un des points forts d'HydroSciences est son rayonnement, qui se mesure par son implication dans de nombreux projets nationaux et internationaux, par la reconnaissance de plusieurs de ses thématiques au meilleur niveau international, et par

un important réseau de collaborations avec des laboratoires et institutions de recherche dans de nombreuses régions du monde, au Nord comme au Sud.

L'UMR HSM travaille également avec des partenaires publics tels que la Direction régionale de l'environnement, l'Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses), des collectivités territoriales (communautés de communes ou d'agglomérations, syndicats mixtes de bassin), des bureaux d'études et de nombreuses entreprises privées (SDEI, Bio-U, SOMEZ, etc.). Soucieuse de s'impliquer dans le domaine de la valorisation, l'unité a déposé des brevets (en particulier dans le domaine de la métrologie) et elle a développé des logiciels à destination des professionnels (« progiciels », notamment autour des bases de données). L'un des domaines d'excellence d'HSM — les contaminants organiques — fait l'objet d'une chaire de formation et de recherche, en partenariat avec Veolia, intitulée « Analyse des risques liés aux contaminants émergents en milieu aquatique ». En outre, l'UMR est engagée dans le cadre des pôles de compétitivité « Eau » (à vocation mondiale) et « Gestion des risques et vulnérabilité des territoires ».

Le bassin de l'Hérault à l'horizon 2050

Quel sera l'impact du changement climatique sur la disponibilité en eau du bassin de l'Hérault, à l'horizon 2050 ? Grâce à une chaîne de modélisation intégratrice, une équipe de chercheurs de Montpellier prédit les futurs possibles de notre région sous scénario climatique contraignant.

Pourra-t-on encore, en 2050, faire du canoë dans la vallée de l'Hérault, de la planche à voile sur le Salagou, irriguer sa vigne, ou alimenter en eau les communes de l'ouest montpelliérain ? « *Le système de gestion pratiqué aujourd'hui pourrait ne plus être viable sous certains scénarios climatiques* », avance Denis Ruelland, chercheur au CNRS. Au terme de quatre années de recherche, son équipe du laboratoire Hydrosociétés Montpellier s'apprête à publier en 2016 une étude évaluant l'impact des changements climatiques sur les équilibres entre disponibilité et demande en eau, dans les bassins versants de l'Hérault (2 500 m²) et de l'Ebre (85 000 m²) en Espagne*. Financée par le ministère de l'Écologie, cette étude s'appuie sur une chaîne de modélisation qui a été préalablement testée sur les quarante dernières années (1970-2009) en intégrant la variabilité du climat et des usages de l'eau (démographie, occupation des sols, pratiques agricoles, principaux ouvrages hydrauliques, etc.).

Résultats concrets

Ce « super modèle » a ensuite été soumis à 18 scénarios climatiques à l'horizon 2050. « *Nous avons utilisé les simulations de neuf modèles climatiques contraints par deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre parmi les projections du GIEC.* » Publiés en juin, les premiers résultats de l'étude confirment, à l'horizon 2050, une augmentation annuelle des températures sur le bassin de l'Hérault, entre +1 et +3°C, et « *une possible baisse des précipitations annuelles, avec une enveloppe d'incertitude de -13 à +7 %* ». Concrètement, il faut s'attendre pour l'ave-



Denis Ruelland, chercheur au CNRS

© Edoüard Hamoteaux

nir à « *des restrictions d'eau, la demande domestique étant prioritaire* (elle représente 60 % de la demande en eau sur le bassin de l'Hérault, du fait de la pression urbaine, NDLR). *Les usages de l'eau projetés pourraient être viables sous climat d'aujourd'hui, mais plus nécessairement sous scénario de changement climatique* », explique Denis Ruelland, dont la dernière phase de l'étude intègre des stratégies d'adaptation : « *Si ce futur se produisait, il faudra soit limiter la demande en eau en changeant par exemple nos modes de consommation (consommation unitaire, irrigation) et de gestion de l'eau (contraintes environnementales) ; soit augmenter la disponibilité de la ressource avec des apports extérieurs d'eau comme celui du projet Aqua domitia, ou en installant de nouveaux ouvrages de stockage.* » Ces trajectoires possibles, qui sont autant de « *jeux de réflexion prospectifs* », appellent des décisions fortes en termes de politiques publiques. ■

IDELETTE FRITSCH

* Le projet GICC REMedHE 2012-2015 associe des scientifiques d'HydroSciences Montpellier (CNRS, IRD, UM) et du Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement ainsi que des gestionnaires de bassin (syndicat mixte du bassin du fleuve Hérault, confédération hydrographique de l'Ebre).