



**HAL**  
open science

## Formulation de stratégies d'adaptation au changement climatique sur les territoires connectés au système NESTE

Eric Sauquet, Philippe Le Coent, Clotaire Catalogne, Peng Huang,  
Jean-Philippe Vidal

### ► To cite this version:

Eric Sauquet, Philippe Le Coent, Clotaire Catalogne, Peng Huang, Jean-Philippe Vidal. Formulation de stratégies d'adaptation au changement climatique sur les territoires connectés au système NESTE. [Rapport de recherche] INRAE RiverLy. 2022, pp.1-65. hal-03791357

**HAL Id: hal-03791357**

**<https://hal.inrae.fr/hal-03791357v1>**

Submitted on 3 Apr 2023

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

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



## **Formulation de stratégies d'adaptation au changement climatique sur les territoires connectés au système Nests**

Une étude pilote croisant trajectoires dynamiques  
d'adaptation et vulnérabilités

**Eric SAUQUET (INRAE), Philippe LE COËNT (BRGM),  
Clotaire CATALOGNE (ICARE<sup>2</sup>), Peng HUANG (INRAE),  
Jean-Philippe VIDAL (INRAE)**

# Table des matières

<b>1. Introduction.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Le système Neste.....</b>	<b>4</b>
2.1. Périmètre d'étude.....	4
2.2. Bref historique.....	4
2.3. Zoom sur les infrastructures en amont du Canal de la Neste.....	4
2.4. Gestion des réservoirs dans le système Neste.....	6
2.5. Hypothèses de modélisation.....	7
<b>3. Données.....</b>	<b>9</b>
3.1. Données des climats passé et futurs.....	9
3.2. Données hydrologiques.....	10
3.3. Données de gestion.....	11
<b>4. Modélisation de la gestion de l'eau.....</b>	<b>17</b>
4.1. Modélisation des ressources naturelles.....	17
4.1.1. Description.....	17
4.1.2. Résultats.....	17
4.2. Modélisation des usages.....	20
4.2.1. Demande en eau pour la production d'énergie.....	20
4.2.2. Demande en eau pour l'irrigation.....	22
4.2.3. Demande en eau pour l'eau potable.....	27
4.2.4. Demande en eau pour l'industrie.....	28
4.2.5. Demande en eau pour les milieux.....	28
4.2.6. Gestion.....	28
<b>5. Evolution des ressources et demandes en eau sous changement climatique.....</b>	<b>31</b>
5.1. Le climat.....	31
5.2. Les ressources naturelles.....	34
5.3. Les demandes en eau.....	37
5.3.1. Demande en eau pour la production d'énergie.....	37
5.3.2. Demande en eau pour l'irrigation.....	37
5.3.3. Demande en eau pour l'eau potable.....	39
5.3.4. Demande en eau pour l'industrie.....	39
5.3.5. Demande en eau pour les milieux.....	39
5.3.6. Gestion.....	41
<b>6. Mise au point et évaluation de scénarios d'adaptation.....</b>	<b>42</b>
6.1. Principe de la méthode TDPA et de son application au cas de la Neste.....	42
6.1.1. Présentation de la méthode TDPA.....	42
6.1.2. Application dans le cas du système Neste.....	43

6.2.	Expression de la vulnérabilité et de défaillance du système.....	43
6.2.1.	Indicateurs de suivi du Plan de Gestion des Etiages.....	43
6.2.2.	Courbes de risque de défaillance et volumes de stockage.....	45
6.2.3.	La défaillance du système selon les acteurs et les critères d'évaluation des trajectoires.....	45
6.2.4.	Choix de critères de défaillance pour l'évaluation des actions d'adaptation.....	46
6.3.	Leviers et scénarios d'adaptation potentiels.....	46
6.3.1.	Leviers d'adaptation identifiés par les acteurs.....	46
6.3.2.	Choix des actions d'adaptation à évaluer dans le cadre de la méthode TDPA.....	47
6.3.3.	Résultats sur l'identification de trajectoires d'adaptation.....	48
6.3.4.	Réflexion sur les potentialités de la méthode TDPA pour l'évaluation de stratégies d'adaptation à l'impact du changement climatique sur les ressources en eau.....	49
<b>7.</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>51</b>
<b>8.</b>	<b>Remerciements.....</b>	<b>53</b>
<b>9.</b>	<b>Références.....</b>	<b>54</b>
	<b>Annexe 1 : Compte-rendu de l'atelier du 05/11/2020 (réunion virtuelle, 13:00 - 17:00).....</b>	<b>57</b>
	<b>Annexe 2 : Liste des personnes contactées dans le cadre des entretiens individuels.....</b>	<b>62</b>



## 1. Introduction

L'Agence de l'Eau Adour-Garonne a, comme ses consœurs, publié une déclinaison locale du Plan National d'Adaptation au Changement Climatique, pour soutenir des actions visant à atténuer l'effet négatif des évolutions du climat. De nombreux projets de recherche (ex. Imagine2030 (Hnedrickx et Sauquet, 2013)) et études commandée par l'Agence ou par des EPTBs (ex. Garonne2050 (Lhuissier *et al.*, 2016)), Adour2050) ont permis de mieux cerner l'effet du changement climatique sur l'hydrologie ; il s'agit désormais d'avancer sur l'écriture de stratégies d'adaptation possibles et de leurs conséquences sur la gestion de l'eau. Le projet Interreg PIRAGUA (<https://www.opcc-ctp.org/fr/piragua>), récemment achevé, a eu pour objectif principal de caractériser le cycle de l'eau dans les Pyrénées afin d'améliorer la capacité d'adaptation des territoires au changement climatique et de soutenir les investissements pour l'adaptation au changement climatique dans la gestion des ressources en eau. Dans le cadre du projet PIRAGUA, des outils de simulation représentant les actions anthropiques sur les débits ont été mis en place et un territoire d'application dans les Pyrénées françaises a été choisi : il s'agit des vallées des Nestes d'Aure et du Louron dont les ouvrages alimentent le système Neste. Le projet PIRAGUA a permis d'initier des discussions avec les acteurs sur les vulnérabilités des territoires et sur des options locales d'adaptation. L'objectif de cette étude est de prolonger les travaux menés dans le projet PIRAGUA, c'est-à-dire élaborer des trajectoires d'adaptation possibles - mobilisant une ou plusieurs options - et en testant leur efficacité relative au regard des vulnérabilités exprimées par les parties prenantes, au travers des outils numériques développés dans le cadre du projet PIRAGUA.

Il est à noter que le travail de formulation et d'évaluation de stratégies d'adaptation présenté ici est une étude pilote ayant pour vocation de tester le potentiel de différentes méthodes innovantes. Cette étude n'a donc pas vocation à formuler une véritable stratégie d'adaptation pour le territoire mais à évaluer l'impact de mesures d'adaptations extrêmement simplifiées sur la réduction de la vulnérabilité du territoire. Cette étude n'a d'ailleurs impliqué qu'une partie des acteurs clés du territoire dans le suivi de l'étude.

## 2. Le système Neste

### 2.1. Périmètre d'étude

Cette étude concerne le « système Neste » (Figure 1). Il inclut la Neste en amont de Sarrancolin et les dix-sept rivières situées dans le Plateau de Lannemezan et réalimentées par les eaux dérivées de la Neste. Sont concernées les parties en amont des points de consigne du Plan de Gestion des Etiages de la Neste et des rivières de Gascogne. La Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG) gère la desserte en eau des rivières réalimentées depuis 1990. Plus en amont, des lacs-réservoirs dits « de haute montagne » (« Retenue d'alimentation du système Neste (SHEM) », en Figure 1), sont gérés par la Société Hydro-Electrique du Midi (SHEM) pour, d'une part, satisfaire des besoins en énergie et, d'autre part, des besoins en eau des différents usages sur les dix-sept rivières de Gascogne (ensemble désigné par « rivières de Gascogne » dans la suite). Les eaux de la Neste sont détournées au niveau de Sarrancolin, via le Canal de la Neste (mis en service en 1863). Des réservoirs de piedmont ont été construits pour compléter le dispositif et augmenter ainsi les volumes de stockage.

### 2.2. Bref historique

L'aménagement des vallées pyrénéennes des Nests d'Aure et du Louron débute au XIXe siècle, pour répondre notamment aux besoins en irrigation des cours d'eau des coteaux de Gascogne. Le barrage d'Orédon a été construit à l'initiative du ministère de l'Agriculture et mis en service en 1884 pour réguler et augmenter le débit du Canal de la Neste, et faciliter l'activité de flottage du bois. C'est ensuite l'électrification de lignes des chemins de fer (premier quart du XXe siècle) qui va impulser le développement de l'hydroélectricité et des aménagements dédiés (construction du barrage de l'Oule entre 1914 et 1922). Ce développement se poursuit dans les Pyrénées et s'accélère au lendemain de la seconde guerre mondiale. Tous les barrages des vallées des Nests d'Aure et du Louron, sauf Orédon, ont été réaménagés pour une utilisation hydroélectrique. Le dernier aménagement notable est la centrale mise en service en 1987 qui turbine les eaux du ruisseau d'Aube, affluent rive droite de la Neste du Louron.

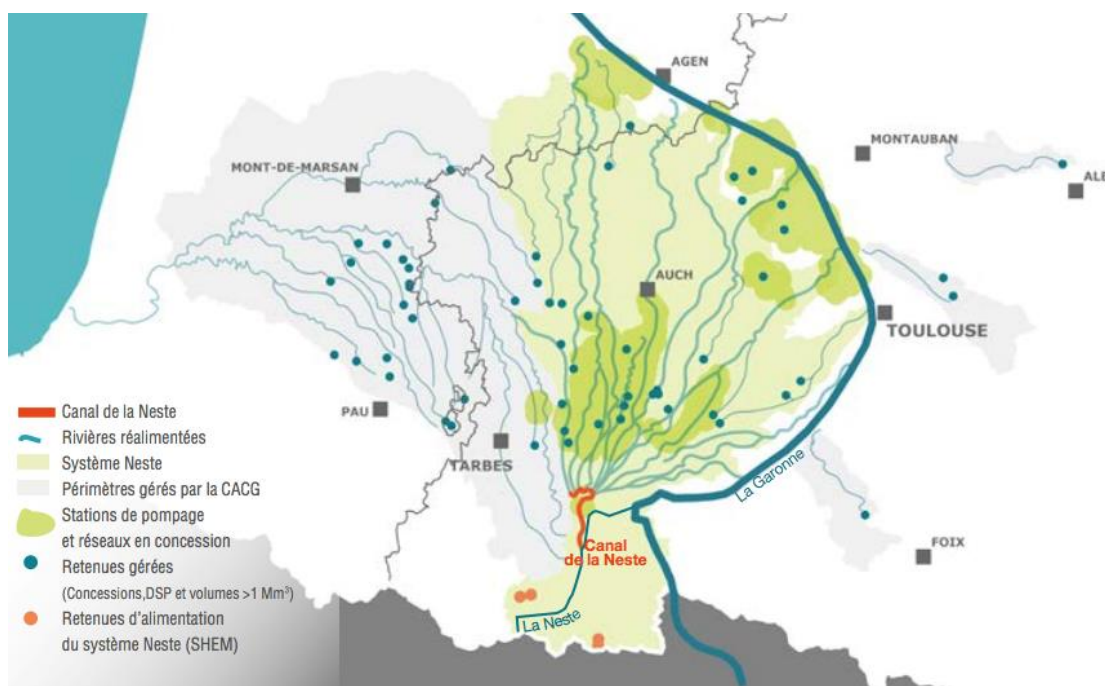


Figure 1: Domaine de gestion de la CACG. Les lacs-réservoirs de l'Oule, d'Orédon, de Caillaouas et de Pouchergues sont désignés sous le terme « Retenues d'alimentation du système Neste (SHEM) » (source : CACG)

### 2.3. Zoom sur les infrastructures en amont du Canal de la Neste

La Figure 2 positionne les lacs-réservoirs de haute montagne dans le réseau hydrographique en amont de Sarrancolin et leurs interactions avec d'autres aménagements. Les principales caractéristiques des réservoirs des deux vallées sont rappelées dans le Tableau 1.

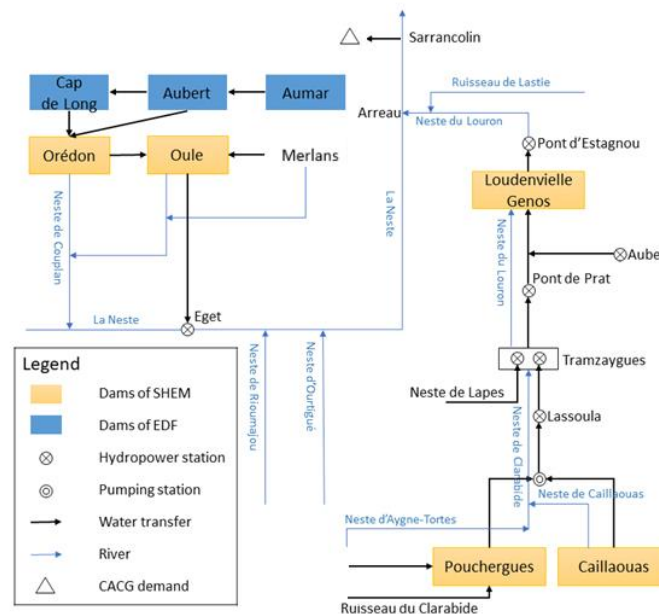


Figure 2 : Schéma synoptique des vallées des Nestes d'Aure et du Louron en amont de Sarrancolin

Vallée	Lac-réservoir	Capacité (Mm <sup>3</sup> )	Altitude (m)	Surface (km <sup>2</sup> )
Aure	Oule	16.6	1816	28.4
	Orédon	7.27	1849	13
Louron	Caillaouas	25.4	2172	6.7
	Pouchergues	0.83	2111	9.9

Tableau 1 : Descriptif des retenues de haute montagne (Source : Falgon et al. (2014))

Le plus ancien réservoir, celui d'Orédon, draine naturellement près de 30 km<sup>2</sup>. Cependant, une partie des eaux est détournée vers le Gave de Pau après avoir été turbinée par l'usine de Pragnères sous concession d'EDF, producteur concurrent de la SHEM. Cela concerne les volumes de la retenue de Cap de Long depuis 1953, auxquels s'ajoutent ceux stockés dans les retenues d'Aubert et d'Aumar, raccordées artificiellement à la retenue de Cap de Long depuis 1969. Seul demeure un apport résiduel, c'est-à-dire un débit réservé total de 48 l/s du 01/01 au 14/07 et 30 l/s du 15/07 au 31/12, défini par l'arrêté préfectoral du 22 mai 2013, sauf événement exceptionnel (ex. inspection décennale des aménagements, indisponibilité prolongée de l'usine de Pragnères, déversement des réservoirs d'Aubert et d'Aumar, etc.). La Neste d'Aure est donc privée d'une partie de ses apports naturels et les contours du bassin versant naturel (30 km<sup>2</sup>) ne coïncident pas avec ceux du bassin d'alimentation d'Orédon (13 km<sup>2</sup>). Les eaux en sortie du lac-réservoir d'Orédon se répartissent entre un débit réservé de 58 l/s vers la Neste de Couplan et l'alimentation du réservoir de l'Oule via un canal de transfert.

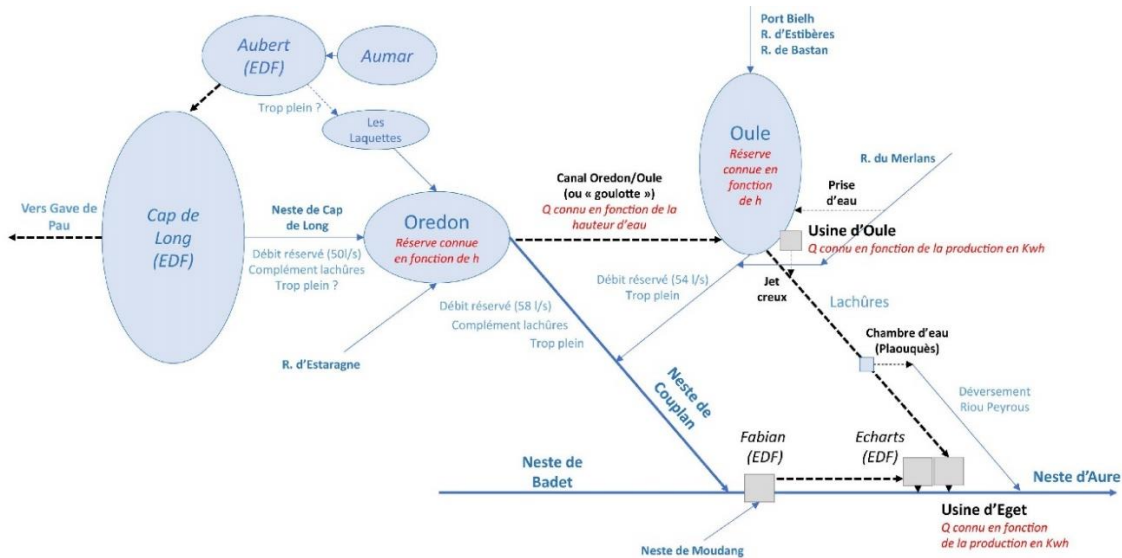


Figure 3 : Schéma synoptique de la vallée et des aménagements en amont de l'usine d'Eget (Catalogne, 2020)

Le lac-réservoir de l'Oule (Figure 3) draine environ 28.5 km<sup>2</sup>. Il reçoit les apports naturels de son bassin versant, des eaux détournées du ruisseau de Merlans et les apports en provenance du lac-réservoir d'Orédon. En fonctionnement normal, le débit réservé en aval de la retenue (54 l/s) est assuré par une partie des eaux du ruisseau de Merlans ne transitant pas par le réservoir. Une prise d'eau située à la base du barrage (dite « jet creux ») amène les eaux vers l'usine d'Eget pour y être turbinées, puis restituées à la Neste d'Aure en aval de l'usine d'Eget. Depuis 1983, une seconde usine (dite « usine d'Oule ») turbine les eaux du réservoir à partir d'une certaine côte de remplissage puis les dirige vers l'usine d'Eget via la galerie d'amenée.

L'équipement de la haute vallée du Louron entre en fonctionnement en 1938. Il se compose des lacs-réservoirs de Caillaouas et de Pouchergues. En 1951, la SHEM procède à la mise en service de la station de pompage de Pouchergues. Cette station pompe l'eau du lac de Pouchergues à 2111 m d'altitude afin de l'acheminer dans le lac de Caillaouas à 2172 m pour remplir ce dernier. Des débits transitent gravitairement et par pompage entre les lacs de Pouchergues et de Caillaouas. Le lac-réservoir de Pouchergues situé sur la Neste de Clarabide est alimenté par son bassin versant naturel et par plusieurs prises d'eau situées dans le vallon d'Aygues Tortes. Les eaux sont turbinées dans la centrale de Lassoula et plus en aval à l'usine de Tramezaygues. Il n'y pas de capacité de stockage notable à l'aval de Tramezaygues.

La gestion des lacs-réservoirs de haute montagne est confiée en concession à la SHEM depuis 2003.

A l'aval des deux vallées et en amont du système Neste, se situe Sarrancolin, point d'entrée du Canal de la Neste. La construction de ce canal s'est étalée entre 1848 et 1862. Sa capacité à sa mise en service en 1863 était de 7 m<sup>3</sup>/s ; depuis les années 1950, sa capacité a été relevée de 7 à 14 m<sup>3</sup>/s suite à des travaux d'agrandissement. La gestion du canal, de la prise d'eau de Sarrancolin et de la distribution des eaux en aval a été confiée par concession en 1990 à la CACG.

## 2.4. Gestion des réservoirs dans le système Neste

Les lacs-réservoirs des vallées des Nestes d'Aure et du Louron stockent les eaux issues de la fonte des neiges au printemps pour les restituer au moment jugé opportun (en période estivale pour répondre aux besoins d'irrigation et des milieux ; en hiver pour répondre aux besoins de production d'énergie). Des réservoirs de piedmont répartis sur différents bassins versants (cf. « retenues gérées » de la Figure 1) et connectés aux rivières de Gascogne viennent également soutenir la demande en eau hors énergie ; ils représentent 73 Mm<sup>3</sup>. Leur remplissage est assuré par les apports naturels aux bassins et par des eaux de la Neste détournées en période hivernale (la temporalité de remplissage n'est pas la même que celle des réservoirs de haute montagne du fait d'une contribution neigeuse ici réduite).

Le décret du 29 avril 1963 contraint l'exploitant, la SHEM depuis 2003, à optimiser la production électrique des concessions d'Eget (exploitant les lacs de l'Oule de d'Orédon) et de Lassoula-Tramezaygues (exploitant les lacs-réservoirs de Caillaouas et de Pouchergues) avec l'obligation d'alimentation du Canal de la Neste. Un volume total de 48 Mm<sup>3</sup> est ainsi réservé annuellement pour garantir les usages liés à l'irrigation, l'industrie, l'alimentation en eau potable et le bon état écologique des cours d'eau réalimentés du système Neste entre le 15 juin et le 1<sup>er</sup> mars de l'année suivante. Les volumes déstockés au fil de l'année sont désignés dans les textes réglementaires par « lâchures agricoles », même si l'agriculture n'est pas le seul bénéficiaire de ces eaux. Une convention spécifique lie EDF à la SHEM pour sécuriser les apports au système Neste, c'est-à-dire apporter un complément de débit dans la Neste destiné aux lâchures agricoles vers le système Neste en cas de volume

insuffisant dans les lacs-réservoirs. Les lacs-réservoirs de haute montagne sont donc des réservoirs multi-objectifs et les manœuvres de stockage et déstockage sont réalisés en coordination à l'échelle des deux vallées.

Une année typique se déroule comme suit :

- Phase de remplissage (avril – juin) : Les stocks dans les réservoirs sont au plus bas début mars. La phase de remplissage débute avec la fonte du manteau neigeux pour atteindre un stock égal au maximum de la capacité des retenues début juin pour le lac de l'Oule et en juillet pour les lacs de Pouchergues et Caillaouas, du fait d'altitudes différentes. Ce remplissage est maîtrisé pour limiter les risques de débordement (*a priori* plus importants pour l'Oule de capacité moindre que pour les retenues de la vallée du Louron).
- Déstockage pour les lâchures agricoles (juin – septembre) : La SHEM répond à l'obligation de fournir de l'eau au système Neste à hauteur de 48 Mm<sup>3</sup>. Ces volumes varient d'un jour à l'autre et sont délivrés en fonction de l'état hydrologique des cours d'eau alimentés par le Canal de la Neste et des besoins en eau exprimés par les milieux, pour l'alimentation en eau potable, l'industrie et l'irrigation. La CACG mobilise en premier les ressources internes (73 Mm<sup>3</sup> potentiellement stockables dans des réservoirs de piedmont). Le lac-réservoir de l'Oule est mobilisé ensuite avec en complément ceux de la vallée du Louron ou celui d'Orédon si la demande dépasse la débitance en sortie du lac-réservoir de l'Oule ou en cas d'incident technique. Les lâchures agricoles délivrées par les retenues des deux vallées augmentent rapidement pour atteindre un maximum de l'ordre de 8 m<sup>3</sup>/s à la mi-août et diminuer ensuite jusqu'à 2 m<sup>3</sup>/s en novembre. Ces eaux sont turbinées même si elles n'ont pas un grand intérêt économique.
- Usage énergétique (novembre – avril) : En fin de campagne de soutien d'étiage pour la CACG, la SHEM exploite l'eau restante pour produire de l'électricité. La demande d'énergie est forte pendant cette période avec cependant des variations d'un jour à l'autre. La SHEM va placer l'eau aux jours et horaires pendant lesquels les prix de l'énergie sont les plus élevés. Au 1er mars, les retenues sont à leur minimum.

La SHEM mobilise les stocks dans un réservoir plutôt qu'un autre selon des considérations économiques (rendement énergétique) et hydrologiques (niveau de remplissage); de même, la CACG fait appel aux ressources de montagne, notamment si la Neste à Sarrancolin et les réservoirs de piedmont ne sont pas en capacité de fournir naturellement l'eau nécessaire aux territoires desservis par le Canal de la Neste. De fait, la gestion des réservoirs est annuelle et fortement saisonnière.

## 2.5. Hypothèses de modélisation

De l'analyse du fonctionnement des réservoirs découle un certain nombre d'hypothèses de travail :

- L'ensemble des réservoirs des deux vallées sera examiné à un niveau d'agrégation suffisant pour répondre aux questions d'adaptation et cohérent en termes de gestion. Les lacs-réservoirs de Caillaouas et Pouchergues formeront un seul et même réservoir. Il est en effet difficile d'apprécier les échanges entre les deux réservoirs. Dans la suite du document, « Lassoula » désignera la vallée et les aménagements en amont de l'usine de Tramezaygues, incluant donc les deux lacs-réservoirs Caillaouas et Pouchergues,
- L'année 1983 marque la fin des grands équipements et donc le début du fonctionnement des aménagements dans sa configuration actuelle. Les périodes de référence privilégiées débiteront après 1983,
- La gestion des lacs alimentant l'usine de Pragnères affectant le lac-réservoir d'Orédon ne sera pas modélisée (*a priori* faible interaction avec le système Neste) et les obligations règlementaires (débits réservés) seront supposées parfaitement respectées,
- Le périmètre réalimenté par le Canal de la Neste géré par la CACG sera appréhendé à l'échelle globale, c'est-à-dire les modalités de prélèvement au niveau de Sarrancolin et la demande en eau exprimée). Seront modélisés les apports totaux aux points de consigne des cours d'eau réalimentés par le Canal de la Neste (le Bouès - seule rivière du bassin de l'Adour -, les Baises, le Gers, l'Arrats, la Gimone, la Save, la Louge, la Noue et le Lavet), définis dans le SDAGE Adour-Garonne 2016-2021,
- Les éléments modélisés (Figure 4) sont donc : 1 – Oule, 2 – Orédon, 3 – Pouchergues-Caillaouas, 4 – rivières de Gascogne, 5 – apports des bassins intermédiaires entre les exutoires des barrages et Sarrancolin. Est exclue la portion du bassin naturel de la Neste contribuant au Gave de Pau (6). A Sarrancolin, nous aurons accès aux débits en amont et en aval de la prise d'eau, qui correspond au point de consigne « Basse Neste » du Plan de Gestion des Etiages (CACG, 2019).

Ces hypothèses s'imposent par la complexité constatée du système et par l'absence de données.

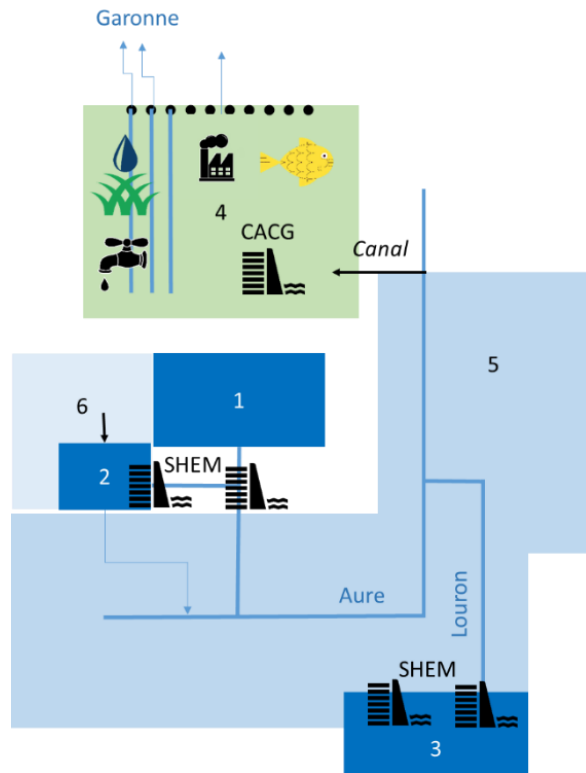


Figure 4 : Découpage du territoire pour la modélisation, usages de l'eau principaux et concessionnaires principaux impliqués dans la gestion des infrastructures



### 3. Données

Les données présentées ici sont celles qui sont en soutien aux exercices de modélisation qui concernent les ressources naturelles en eau et les besoins en eau.

#### 3.1. Données des climats passé et futurs

Les forçages météorologiques sont fournis par deux bases de données qui partagent la même méthode d'élaboration des forçages (Quintana-Seguí *et al.*, 2008 ; Vidal *et al.*, 2010 ; Quintana-Seguí *et al.*, 2017) : la réanalyse SAFRAN, produit de Météo-France, et la réanalyse baptisée « SAFRAN-PIRAGUA », élaborée pour les besoins du projet PIRAGUA.

Ces deux réanalyses fournissent des données de température, de précipitations solides et liquides et d'évapotranspiration de référence calculée selon la formule Penman-Monteith (Allan *et al.*, 1998), à des résolutions spatiales différentes (Figure 5), sur des territoires différents et avec des profondeurs temporelles différentes : 8 km x 8 km sur une grille régulière couvrant la France métropolitaine pour SAFRAN depuis 1958 et 2.5 km x 2.5 km sur une grille couvrant le domaine d'étude de PIRAGUA centré sur les Pyrénées entre 1979 et 2014. Pour son élaboration, la réanalyse SAFRAN-PIRAGUA reprend les éléments méthodologiques de la réanalyse SAFRAN.

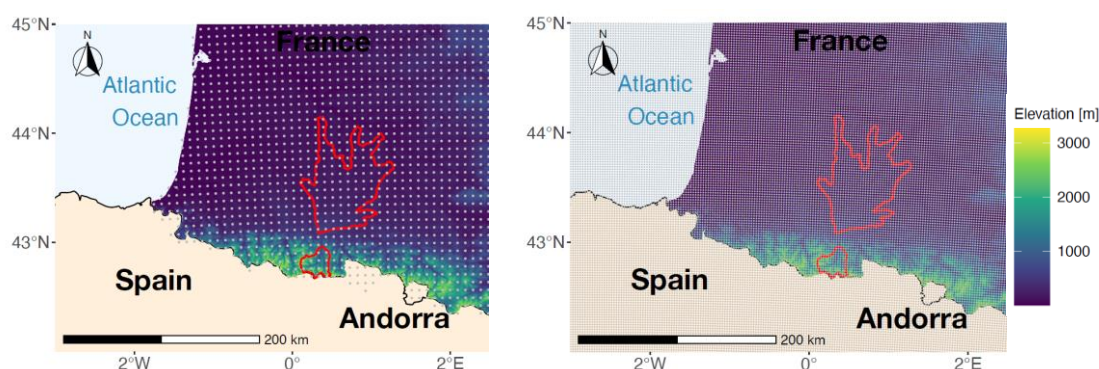


Figure 5 : Résolution spatiale des réanalyses SAFRAN et SAFRAN-PIRAGUA sur le secteur d'étude (contour en rouge)

La reconstruction élaborée par Gascoin *et al.* (2015) à partir des images satellites MODIS (<https://nsidc.org/data/modis>) qui permet de suivre l'évolution de la couverture de neige sur une grille régulière 0.5 km x 0.5 km dans les Pyrénées entre 2000 et 2018, a été exploitée pour renseigner la dynamique du manteau neigeux.

Les projections climatiques considérées proviennent d'un sous-ensemble de six modèles globaux issues de l'exercice CMIP5 (Tableau 2) parmi 24 sélectionnés précédemment pour évaluer les ressources en eau futures en Espagne (CEDEX/MAPAMA, 2017). Ce jeu de six projections est représentatif de la dispersion de l'ensemble des 24 projections (c'est-à-dire de « l'enveloppe maximale » des modèles). Ces projections grande échelle ont fait l'objet de descentes d'échelle par analogie sur les Pyrénées pour générer les précipitations totales quotidiennes, les températures maximales et minimales journalières dans le cadre du projet CLIMPY (Amblar-Francés *et al.*, 2020), et à l'échelle des mailles SAFRAN en proposant des valeurs d'ETP quotidiennes en cohérence avec les autres variables selon l'approche proposée par Clemins *et al.* (2019).

Acronyme, institut, pays	Référence
CNRM-CM5, CNRM, France	(Voldoire <i>et al.</i> , 2013)
MRI-CGM3, MRI, Japon	(Yukimoto <i>et al.</i> , 2012)
MPI-ESM-MR, MPI, Allemagne	(Giorgetta <i>et al.</i> , 2013)
MIROC-ESM AORI, NIES JAMSTEC, Japon	(Watanabe <i>et al.</i> , 2011)
inmcm4, INM, Russie	(Volodin <i>et al.</i> , 2010)
bcc-csm1.1, BCC, Chine	(Wu <i>et al.</i> , 2013)

Tableau 2 : Descriptif des modèles utilisés pour l'élaboration des projections climatiques

La température moyenne de la France a été calculée à partir des données SAFRAN pour le passé. Elle sera nécessaire pour le futur. Le domaine d'application des descentes d'échelle étant restreint aux Pyrénées, nous nous appuyons sur une relation empirique calée sur l'historique entre la température journalière moyenne sur l'ensemble des secteurs (1 à 5) du système Neste et la température moyenne pour la France ( $T_{moyFrance}$ ) (coefficient de détermination de 0.94).

## 3.2. Données hydrologiques

Le territoire d'étude est équipé de stations hydrométriques enregistrant des débits en différents points du réseau hydrographique. Ces mesures sont des débits influencés par les activités humaines.

Il n'y a pas de station hydrométrique à l'aval immédiat des lacs-réservoirs (exutoires des bassins 1, 2 et 3 de la Figure 4, page 8), mais des enregistrements de débits en sortie des différents organes des ouvrages (débits réservés, turbinés, déversés, etc.). La combinaison de ces mesures fournit une estimation du débit résultant à l'aval de l'ouvrage. En complément, des séries de débits naturels reconstitués ont été calculées par la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) depuis 1994 (Falgon, 2014).

Les apports naturels journaliers aux lacs-réservoirs ont été mis à disposition par la SHEM sur différentes périodes : 02/01/2001-11/04/2019 pour Oule ; 02/01/2001-26/11/2018 pour Orédon ; 02/01/1985-17/03/2019 pour Caillaouas et Pouchergues. Ces données propriétés de la SHEM seront les références pour le calage des modèles hydrologiques. Les autres estimations proposées par la CNR (avant 2001) ont été exploitées en complément pour mettre en perspective les résultats des simulations sur une profondeur temporelle plus grande. Les apports naturels ont été obtenus à partir des données de gestion (débits réservés, turbinés, déversés, transférés, variations des hauteurs converties en volume dans les retenues, etc.) avec une approche de type bilan au niveau de l'aménagement :

$$Q_{nat} = Exports - Apports + \Delta Stock \quad (1)$$

Des débits naturels reconstitués ont été également fournis par la CACG sur leur périmètre de gestion. Ils sont construits sur la base d'un bilan entrée-sortie du système à partir de la somme des débits mesurés aux points de consigne sur les principaux cours d'eau réalimentés par le Canal de la Neste du secteur 4 de la Figure 1 (page 4) :

- L'Osse à Andiran,
- Le Bouès à Beaumarchés,
- La Baise à Nérac,
- Le Gers à Montestruc-sur-Gers,
- L'Arrats à Saint-Antoine,
- La Gimone à Castelferrus,
- La Save à Larra,
- La Louge au Fousseret,
- La Noue à Laffitte,
- Le Lavet à la confluence avec la Garonne,

et des débits restitués par les réservoirs le jour précédent. Implicitement, on suppose que les débits fournis par les réservoirs de haute montagne et de piedmont expriment la demande entre le canal d'alimentation et les points de consigne.

Des observations de débit sont disponibles entre 1961 et 2001, et pour 2018 pour la Neste d'Aure à Sarrancolin (exutoire du bassin 5 de la Figure 4, page 8) dans la banque nationale de données HYDRO (<http://hydro.eaufrance.fr/>). Ces données ont été complétées par des débits journaliers mesurés par la CACG entre 1991 et 2019.

Il n'y a pas de mesure à l'exutoire naturel du lac-réservoir d'Orédon (2) ; nous supposons que le débit délivré dans la Neste de Couplan est égal au débit réservé.

D'autres sources ont pu être identifiées mais n'ont pas été exploitées dans l'exercice de modélisation. Des séries anciennes de débits journaliers ont ainsi été exhumées entre 1939 et 1983 des archives de la SHEM pour l'Oule et entre 1939 et 1970 pour Caillaouas. Ces débits sont décrits comme des « apports journaliers » ou « débits naturels moyens ». Les modes de calculs ne sont pas précisés et le bassin versant associé aux débits peut interroger (les tableaux les plus récents indiquent que les débits concernent les « apports Caillaouas » et les plus anciens « la Neste de Clarabide à Lassoula »). L'ensemble paraît hétérogène pour ce qui concerne les données attribuées à Caillaouas. La période de disponibilité des forçages météorologiques n'a pas pu être étendue. De ce fait, les observations anciennes n'ont pas participé à l'analyse des performances du modèle hydrologique calé sur des années récentes (1994-2017). D'autres types de document ont été identifiés par Catalogne (2020) : des registres d'exploitation entre 1924-2019 (avec une interruption entre 1975 et 1984) où est reporté le programme d'exploitation quotidien du lac-réservoir de l'Oule.

Les données exploitées sont présentées dans le Tableau 3.



Numéro	Cours d'eau / Ouvrage	Station de référence	Période de suivi	Représentativité	Source	Commentaires
1	Oule	Barrage	1994 – 2017	Influencé	SHEM	Reconstitué
	Oule	Barrage	1994 – 2017	Naturel	SHEM	Reconstitué
2	Orédon	Barrage	Non disponible	Influencé	SHEM	Considéré comme constant égal au débit réservé (58 l/s)
	Orédon	Barrage	2001 – 2018	Naturel	SHEM	Reconstitué
3	Pouchergue-Caillaouas	Barrage	1994 – 2017	Influencé	SHEM	Reconstitué
	Pouchergue-Caillaouas	Barrage	1994 – 2017	Naturel	SHEM	Reconstitué
4	Osse	Andiran	2018-2020	Influencé	HYDRO	Code : 06894610
	Bouès	Beaumarchés	1968-2002 2002-2020	Influencé	HYDRO	Code : Q0664010 Code : Q0664020
	Baise	Nérac	1965 – 2015 2018 – 2020	Influencé	HYDRO	Code : 06692910 Code : 06692960
	Gers	Montestruc-sur-Gers	1965 – 2020	Influencé	HYDRO	Code : 06312520
	Arrats	Saint-Antoine	1965 - 2020	Influencé	HYDRO	Code : 06094010
	Gimone	Castelferrus	1965 - 2020	Influencé	HYDRO	Code : 02883310
	Save	Larra	1965 - 2020	Influencé	HYDRO	Code : 02552910
	Louge	Le Fousseret	1970 - 2015	Influencé	HYDRO	Code : 00964030
	Noue	Laffitte	1968 - 2020	Influencé	HYDRO	Code : 00295310
	Lavet	Confluent Garonne (Lavet télémétrie)	2012 - 2020	Influencé	CACG	
	Ensemble des bassins réalimentés par le Canal de la Neste	Virtuel	2013 - 2019	Naturel	CACG	Ressource naturelle produite par les bassins réalimentés
5	Neste	Sarrancolin	1961 – 2019	Influencé	CACG	

Tableau 3 : Principales caractéristiques des données de débits aux points de calcul (interrogation des bases de données en septembre 2020)

### 3.3. Données de gestion

La collecte a été réalisée en parallèle de l'effort de modélisation pour retenir les données les plus pertinentes (résolutions spatiales et temporelles adaptées aux objectifs de test de stratégies d'adaptation). Ces données renseignent le fonctionnement des différentes composantes du système. Il s'agit, pour les réservoirs de la SHEM :

- Des données de suivi des lâchures (de type « agricole » ou « énergétique ») entre 2002 et 2020,
- Des principales données utilisées pour le calcul des débits naturels (débits transférés entre Orédon et Oule, débits turbinés, niveaux de remplissage des réservoirs, etc.) entre 1994 et 2020,

et pour le système Neste géré par la CACG :

- Des débits transitant dans le Canal de la Neste depuis 1961,
- Des débits d'entrée et de sortie des réservoirs de piedmont présents sur les bassins réalimentés par la Neste depuis 2013,
- Des débits en aval des bassins réalimentés depuis 2013,
- Des prélèvements hebdomadaires pour l'irrigation entre 1995 et 2019, agrégées sur le secteur.

Une partie des données d'usage est extraite de la Banque Nationale des Prélèvements quantitatifs en Eau (BNPE, <https://bnpe.eaufrance.fr>). Il s'agit des prélèvements annuels par usage (« eau turbinée (barrage) », « énergie », « eau potable », « industrie et activités économiques (hors irrigation, hors énergie) », « irrigation », « canaux »), par source (« souterrain », « surface continental ») géolocalisés. Les valeurs sont celles des déclarations annuelles de chaque préleveur, requises pour l'établissement de redevances auprès des agences de l'eau. Une partie des prélèvements n'est pas comptabilisée (en dessous des seuils d'obligation de transmission de l'information). Le dispositif demeure déclaratif (peu de contrôles terrains).

Les données de la SHEM sont pour une grande partie issues de la base de données réunies pour la naturalisation des débits par la Compagnie Nationale du Rhône (Falgon, 2014) et actualisées depuis.

Des données réglementaires ont également été collectées. Il s'agit des débits réservés à l'aval :

- Du lac-réservoir de Cap de Long et d'Aubert, vers le lac-réservoir d'Orédon : un total de 48 l/s du 01/01 au 14/07 et 30 l/s du 15/07 au 31/12,
- Du lac-réservoir de l'Oule : 30 l/s toute l'année avant mai 2014, 54 l/s après cette date,
- Du lac-réservoir d'Orédon, vers la Neste de Couplan : 58 l/s toute l'année,
- Du lac-réservoir de Caillaouas : 4 l/s toute l'année,
- Du lac-réservoir de Pouchergues : 21 l/s toute l'année.

La Figure 6 montre que pour toutes les années sauf 2015, l'ensemble des lacs-réservoirs répond à la demande en eau en aval exprimée par la CACG. La défaillance en 2015 est due à un accident sur la canalisation de la centrale de Lassoula (indisponibilité du système) et de ce fait une partie de la demande n'est pas satisfaite.

La Figure 7 et la Figure 8 montrent une variabilité interannuelle avec des demandes en eau réduites pour les années 2013 et 2014 relativement humides comparativement aux autres. Les données sont incomplètes pour 2017 et 2018. Les données SAFRAN sont affichées en illustration (SAFRAN-PIRAGUA n'est pas disponible sur cette fenêtre temporelle).

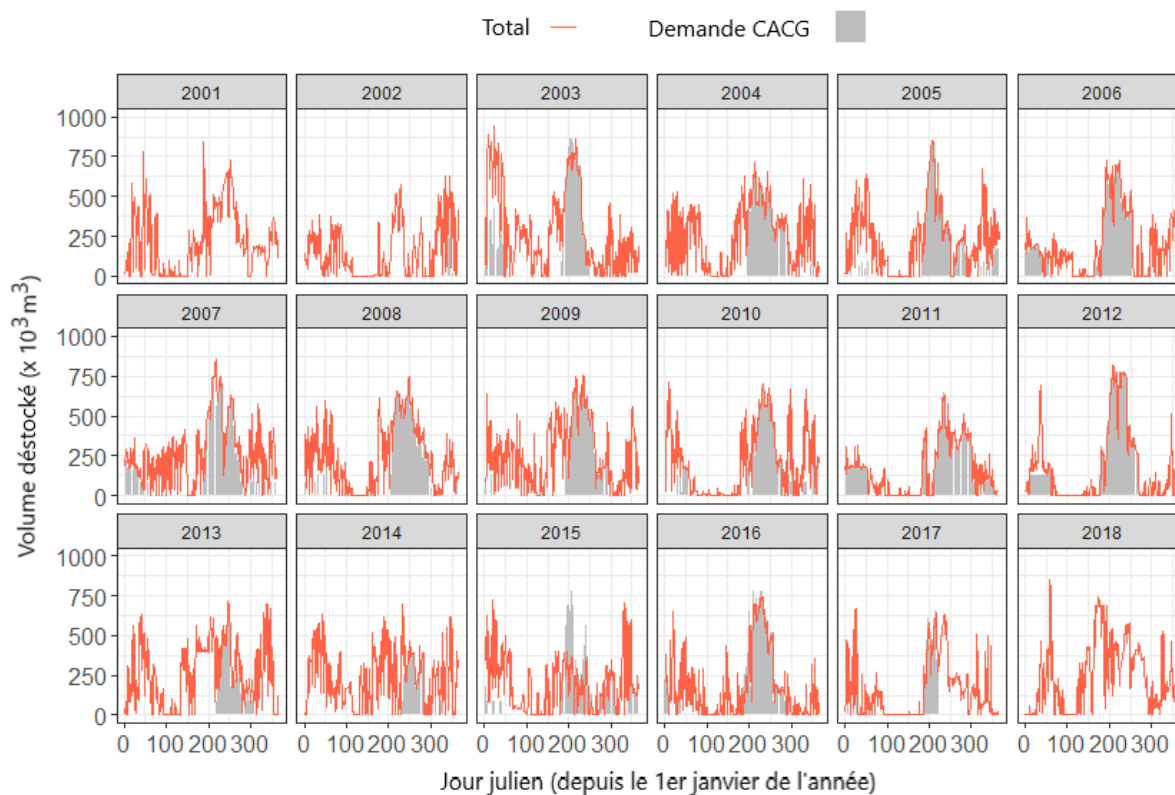


Figure 6 : Variation annuelle du volume déstocké total des lacs-réservoirs de haute montagne (en rouge) et de la demande en eau exprimée par la CACG (en grisé)

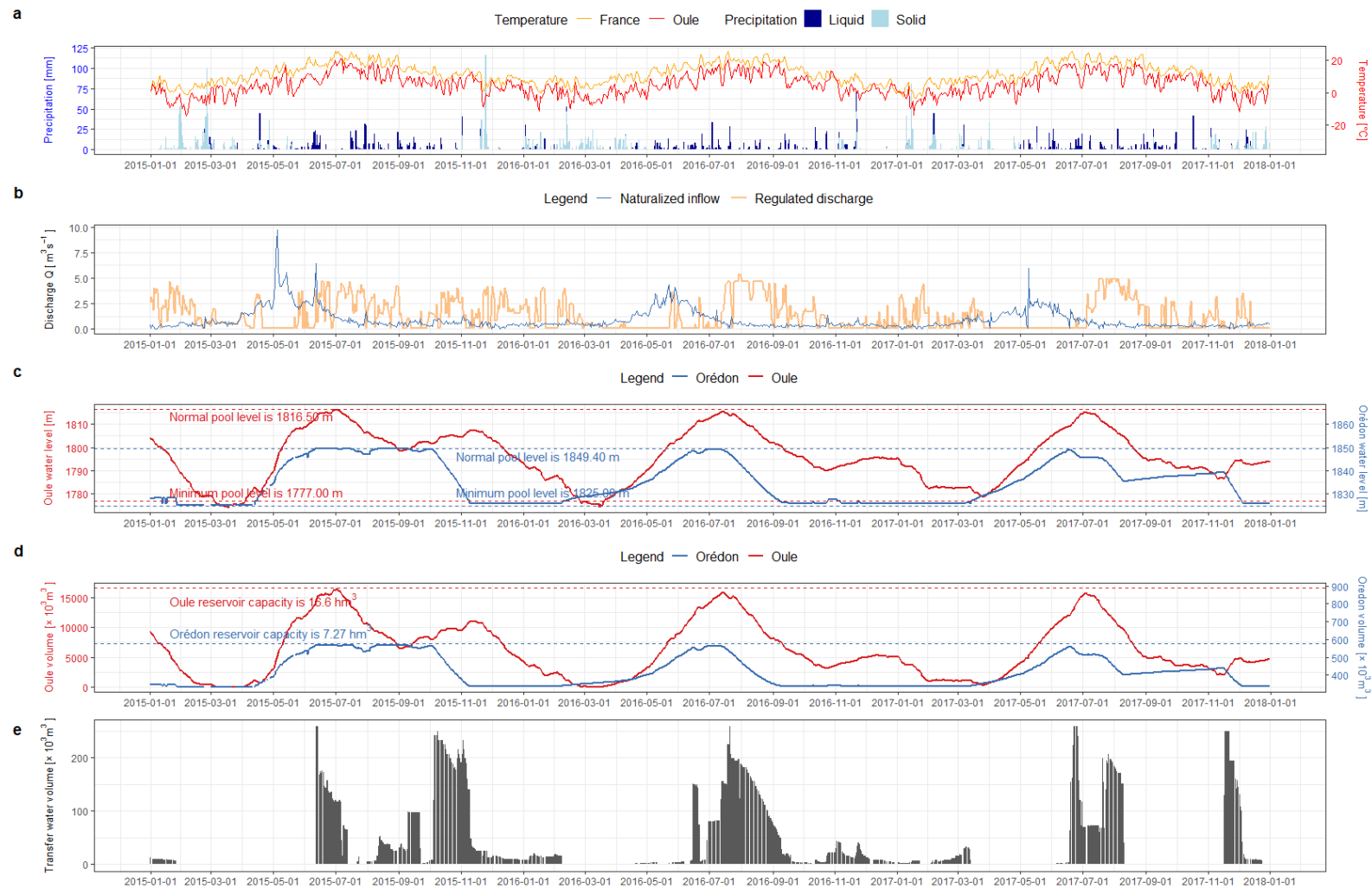


Figure 7 : Evolution des principales variables régissant la gestion du lac-réservoir de l'Oule sur la période 2015-2018 : forçages météorologiques issus de SAFRAN (a) ; débit entrant naturalisé et sortant influencé (b) ; niveau d'eau (c), volume stocké (d) dans les deux lacs-réservoirs de l'Oule et d'Orédon ; transfert d'eau Orédon-Oule (e)

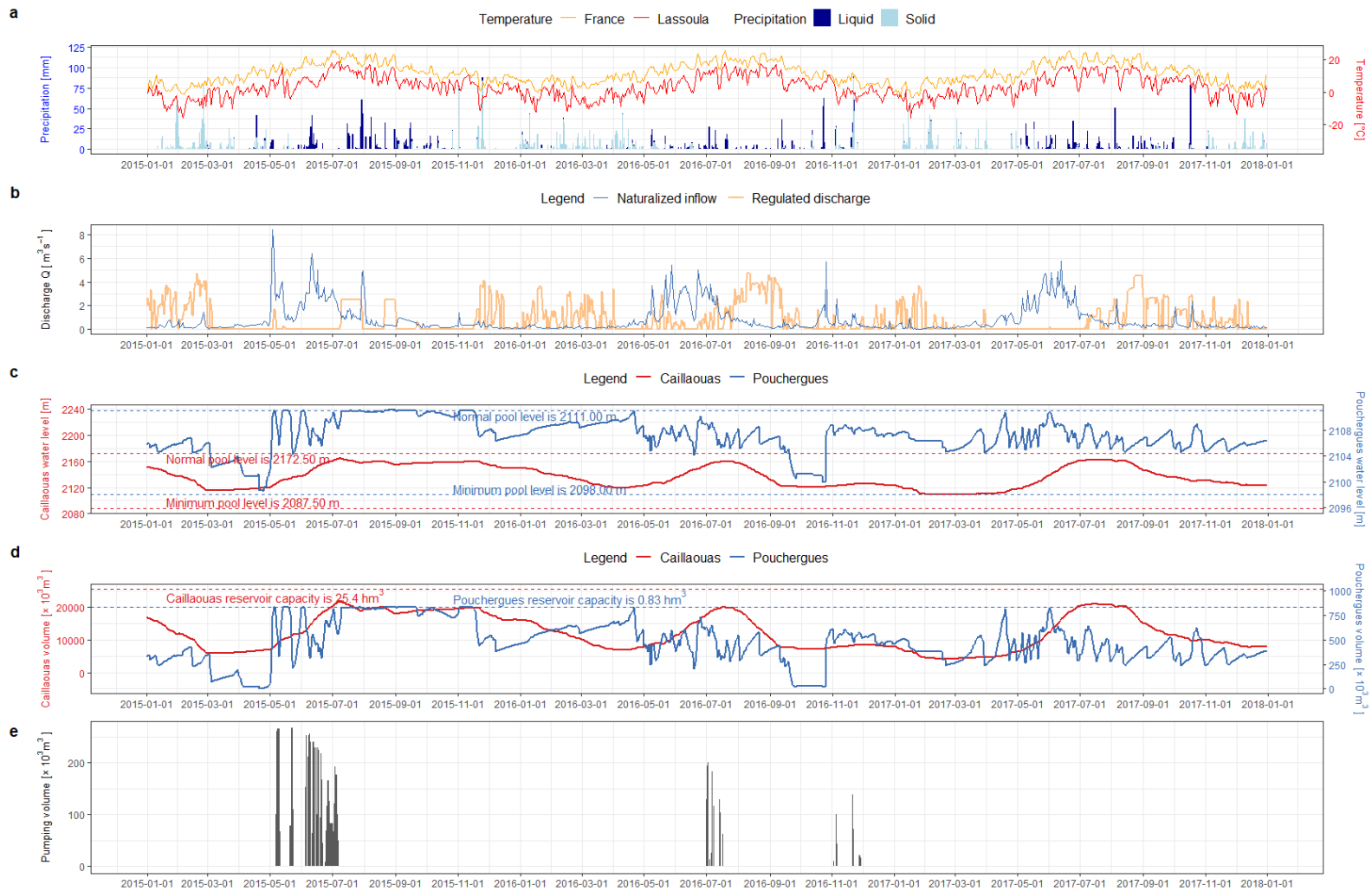


Figure 8 : Evolution des principales variables régissant la gestion des lacs-réservoirs de Pouchergues et Caillaouas sur la période 2015-2018 : forçages météorologiques issus de SAFRAN (a) ; débit entrant naturalisé et sortant influencé (b) ; niveau d'eau (c), volume stocké (d) dans les deux lacs-réservoirs du système Lassoula ; pompage de Pouchergues vers Caillaouas (e)

Les éléments de la Figure 9 montrent les débits naturels (« Nat ») et observés influencés (« Inf ») et par comparaison, l'effet des réservoirs sur le régime hydrologique naturel. Les actions de stockage-déstockage retardent les hautes eaux : naturellement les débits les plus forts sont observés au printemps, les actions humaines les placent au cœur de l'été. Les débits influencés pour Orédon (Figure 9-b) sont les transferts depuis ce lac-réservoir vers celui de l'Oule qui sont limités par la capacité de la galerie (débit maximal de 3 m<sup>3</sup>/s) et qui dépendent du niveau de remplissage du réservoir d'Orédon.

Dans ces figures et dans la suite, les courbes sont les statistiques calculées sur l'échantillon rassemblant les valeurs observées ou simulées pour chacun des 365 jours de l'année civile sur toutes les années disponibles. La courbe tracée en trait épais réunit les 365 moyennes ou médianes de ces 365 échantillons et les courbes enveloppes sont construits à partir des quantiles (les 1<sup>ers</sup> et derniers déciles sont respectivement les valeurs dépassées sur 90% et 10% de l'échantillon ou les 1<sup>ers</sup> et derniers quartiles sont respectivement les valeurs dépassées sur 75% et 25% de l'échantillon).

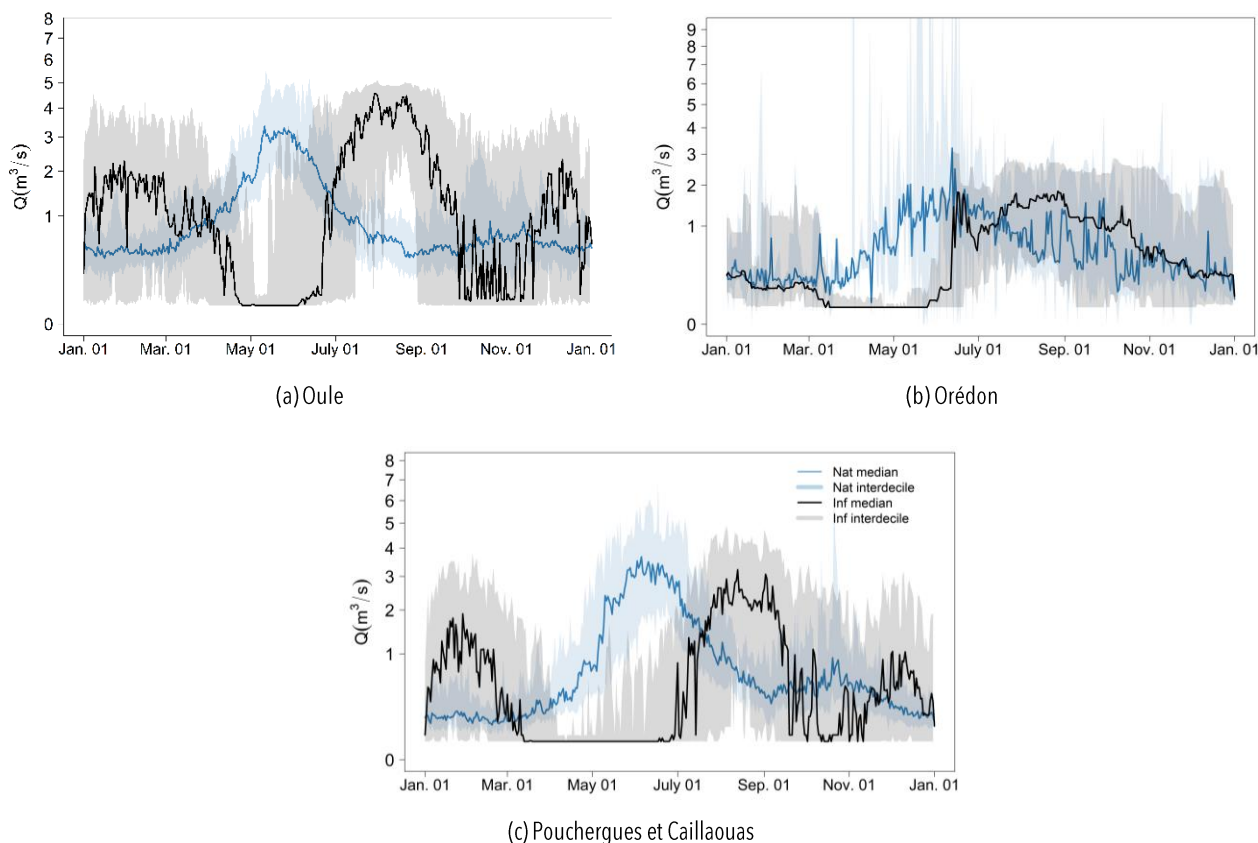


Figure 9 : Hydrogrammes médians et courbes enveloppes définies des débits en sortie des réservoirs par les premiers et derniers déciles sur la période 1994-2021 (en bleu : débits naturels ; en noir : débits influencés). L'échelle de l'axe des ordonnées n'est pas linéaire (définie par les racines carrées)

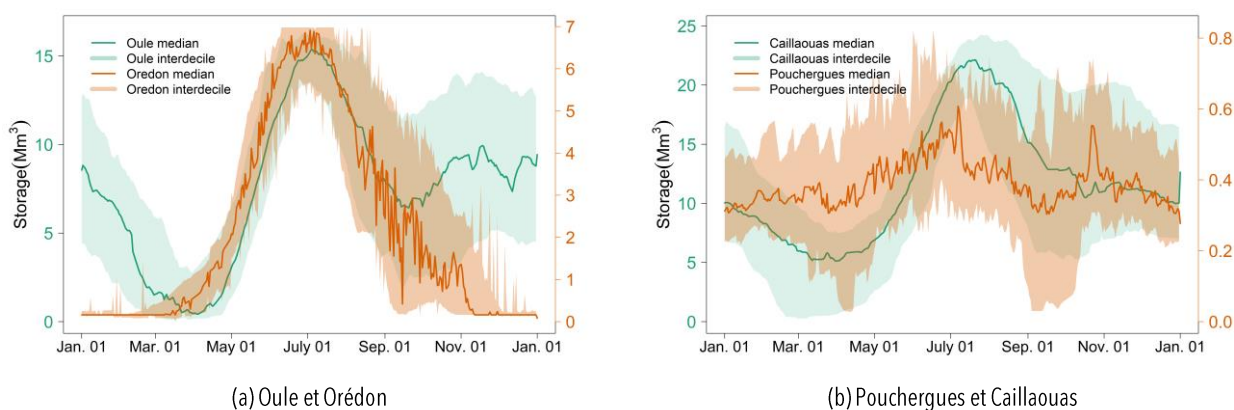
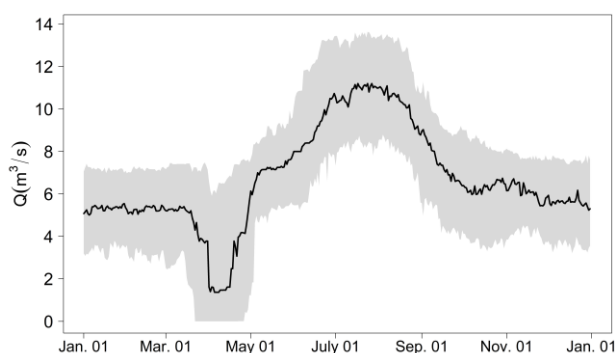


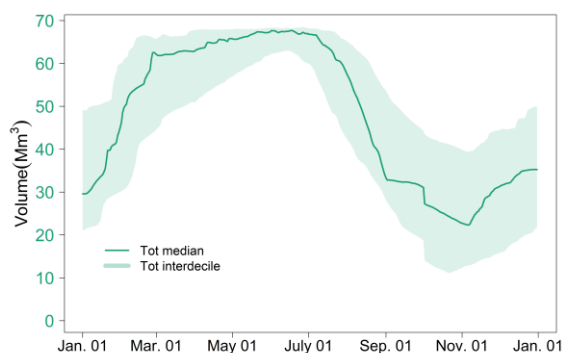
Figure 10 : Volumes médians et courbes enveloppes définies par les premiers et derniers déciles des lacs-réservoirs systèmes Eget et Luron sur la période 1994-2021

La Figure 10 montre la dynamique de remplissage et vidange des réservoirs. Les réservoirs voient leur stock augmenter pendant la période de fonte pour atteindre le maximum au début de l'été et la vidange a lieu pendant une grande partie de l'été et se prolonge en automne. Les stocks sont au plus bas en fin d'hiver. Les courbes des lacs-réservoirs d'Orédon et de Pouchergues sont très bruités du fait de lacunes nombreuses et, pour ce qui concerne le lac-réservoir de Pouchergues, des opérations de transfert avec le lac-réservoir de Caillaouas.

La Figure 11-a présente l'hydrogramme des débits transitant vers les rivières de Gascogne. Une période de chômage est manifeste en avril (période de débits faibles) pour l'entretien du canal de la Neste. Enfin, les actions de stockage et déstockage sur onze réservoirs de piedmont (Baradée, Miélan, Lizet, Puydarrieux, Lizon, Magnoac, Astarac, Gimone, Marcaoué, Saint-Frajou, Esparron), soit une capacité totale de 68.75 Mm<sup>3</sup> (sur les 73 Mm<sup>3</sup> des 15 réservoirs de piedmont principaux mentionnés dans les rapports de suivi annuel du Plan de Gestion des Etiages de la Neste et des rivières de Gascogne) sont décrites en Figure 11-b. La phase de remplissage est assurée en partie par les apports naturels des bassins amont des réservoirs et par le Canal de la Neste (dérivation d'eau lorsque les débits en amont de Sarrancolin sont supérieurs à 4 m<sup>3</sup>/s) en hiver et printemps et la vidange répond aux besoins des différents usages.



(a) Canal de la Neste (période 2013-2019)



(b) Réservoirs de piedmont (période 2012-2019)

*Figure 11 : Hydrogrammes transitant dans le canal de la Neste et volumes d'un ensemble de réservoirs en piedmont, médianes et courbes enveloppes définies par les premiers et derniers déciles*

Les graphiques présentent des variations saisonnières des débits et des volumes conformes au fonctionnement du système décrit dans la section « Gestion des réservoirs dans le système Neste » (page 6).

## 4. Modélisation de la gestion de l'eau

Examiner le devenir de la gestion de l'eau requiert des outils numériques qui simulent la ressource en eau disponible, la demande en eau des différents usages et les règles de partage de la ressource. Les modèles considérés ici et pris isolément ont déjà été éprouvés dans d'autres études et les applications antérieures sont un premier gage de confiance dans les résultats obtenus ; l'effort de recherche a porté sur le couplage des outils numériques au sein d'un modèle de gestion et l'adaptation au contexte local. Cette section présente les structures des modèles, les modalités de calage et l'analyse de leur performance sous climat passé.

### 4.1. Modélisation des ressources naturelles

#### 4.1.1. Description

Le modèle hydrologique utilisé est le modèle global pluie-débit GR6J à six paramètres fonctionnant au pas de temps journalier (Pushpalatha *et al.*, 2011). Ce modèle utilise en entrée des séries de température de l'air, de précipitations totales et d'évapotranspiration de référence. Les processus de constitution et de fonte du manteau neigeux sont représentés par la dernière version du modèle semi-distribué Cemaneige (Riboust *et al.*, 2019). Cette version exploite les données satellitaires de couverture de neige dans le processus de calage, intègre les processus d'hystérésis dans la constitution et la fonte de la neige, et nécessite *in fine* de caler quatre paramètres supplémentaires.

Le modèle est appliqué aux bassins d'alimentation des lacs réservoirs de l'Oule et d'Orédon et du réservoir global Lassoula, au bassin intermédiaire entre les sorties des réservoirs, baptisé « intermédiaire Sarrancolin » et Sarrancolin, et à l'ensemble des cours d'eau réalimentés par le système Neste (numérotés de 1 à 5 en Figure 4, page 8).

Les lacs-réservoirs de haute montagne bénéficient des données SAFRAN-PIRAGUA sur la période 1979-2014. Cependant, le lac-réservoir d'Orédon dispose de données naturalisées à partir de 2001 et jusque 2018 et ces dernières sont très incomplètes jusqu'à 2013. Les années les plus complètes se situent donc en dehors de la période couverte par SAFRAN-PIRAGUA et ceci a conduit à caler le modèle avec la réanalyse SAFRAN pour modéliser les apports. Le bassin intermédiaire Sarrancolin est en dehors de la zone de disponibilité de SAFRAN-PIRAGUA ; il sera également modélisé avec les données SAFRAN.

Les fractions de surface enneigée sur le bassin versant (SCA) estimées par les images satellite et les débits naturalisés sont les observations de référence pour décrire respectivement l'évolution du manteau neigeux et l'hydrologie naturelle.

Les exercices de modélisation sont contraints par la disponibilité des données pour le calage : ils sont effectués au mieux sur la période 2001-2014.

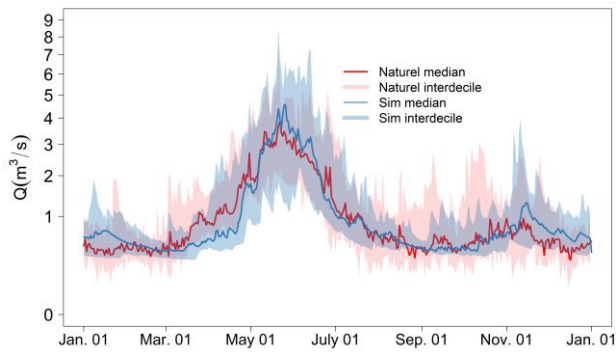
Le processus de calage automatique des paramètres de GR6J-Cemaneige s'appuie sur le critère global d'efficacité  $KGE'$  de Kling-Gupta (Gupta *et al.*, 2009 ; Kling *et al.*, 2012). Le modèle est parfait lorsque  $KGE'=1$  et, à l'inverse, médiocre quand  $KGE'$  s'approche de 0. La procédure de calage automatique cherche les valeurs des dix paramètres qui maximisent la somme pondérée des  $KGE'$  calculés sur la racine carrée des débits (0.75) et sur les valeurs de SCA sur cinq bandes d'altitude (0.05 par bande d'altitude). Cette pondération permet à l'algorithme de calage d'identifier des valeurs des paramètres qui assurent à la fois une reconstitution du régime hydrologique et une dynamique fidèle du manteau neigeux. Elle hérite d'une procédure de calage-contrôle sur des périodes indépendantes qui a testé différentes modalités et leur impact sur l'efficacité du modèle sur les débits et les stocks de neige. Le module de modélisation de la neige n'est pas activé pour modéliser les ressources naturelles des rivières de Gascogne (processus mineur sur ce territoire pour la période historique et le futur) et donc le calage s'effectue avec un  $KGE'$  calculé sur les seuls débits.

#### 4.1.2. Résultats

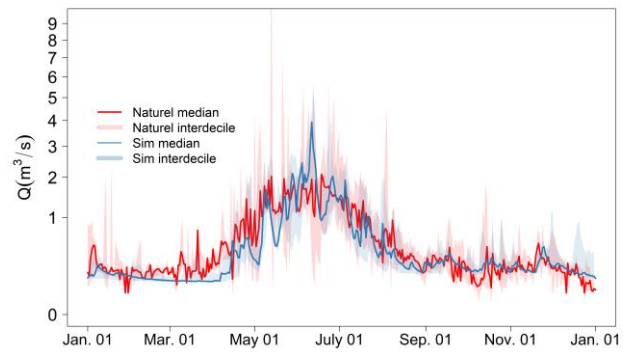
Les hydrogrammes de la Figure 12 permettent d'apprécier la qualité des simulations sur la période de disponibilité conjointe des observations et des données climatiques.

Les étiages et les hautes eaux sont bien reconstitués. Il faut noter cependant une fonte plus tardive et un pic plus marqué que dans la réalité sur le bassin versant de l'Oule et pour le bassin global de Lassoula.

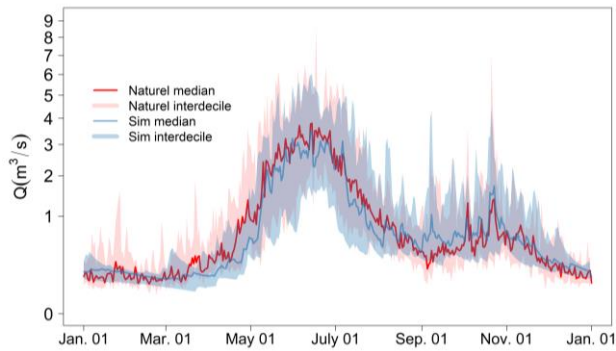




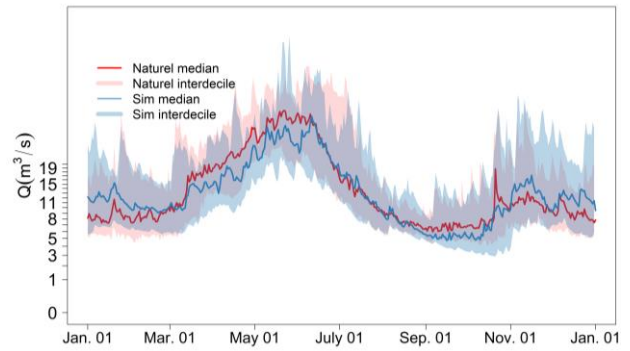
(a) Oule



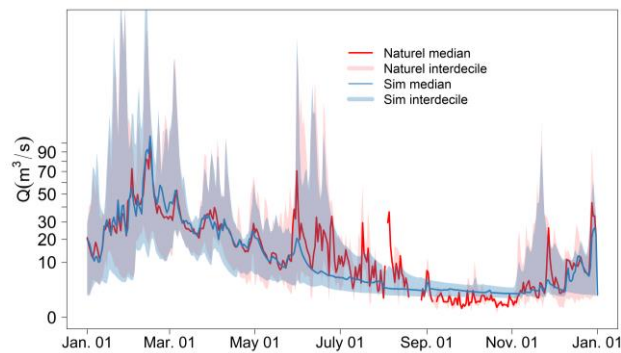
(b) Orédon



(c) Lassoula



(d) Intermédiaire Sarrancolin



(e) Rivières de Gascogne

Figure 12 : Hydrogrammes médians et courbes enveloppes définies par les premiers et derniers déciles sur la période 2001-2014 pour Oule et Lassoula, 2014-2018 pour Orédon, 2001-2014 pour le bassin intermédiaire Sarrancolin et 2013-2018 pour les rivières de Gascogne (en rouge : débits naturels reconstitués ; en bleu : débits simulés). L'échelle de l'axe des ordonnées n'est pas linéaire (définie par les racines carrées)

En complément, la bonne performance de la modélisation est confirmée en comparant les fractions de neige par tranche d'altitude simulées à celles déduites des images MODIS (exemple en Figure 13 pour le lac-réservoir de l'Oule).



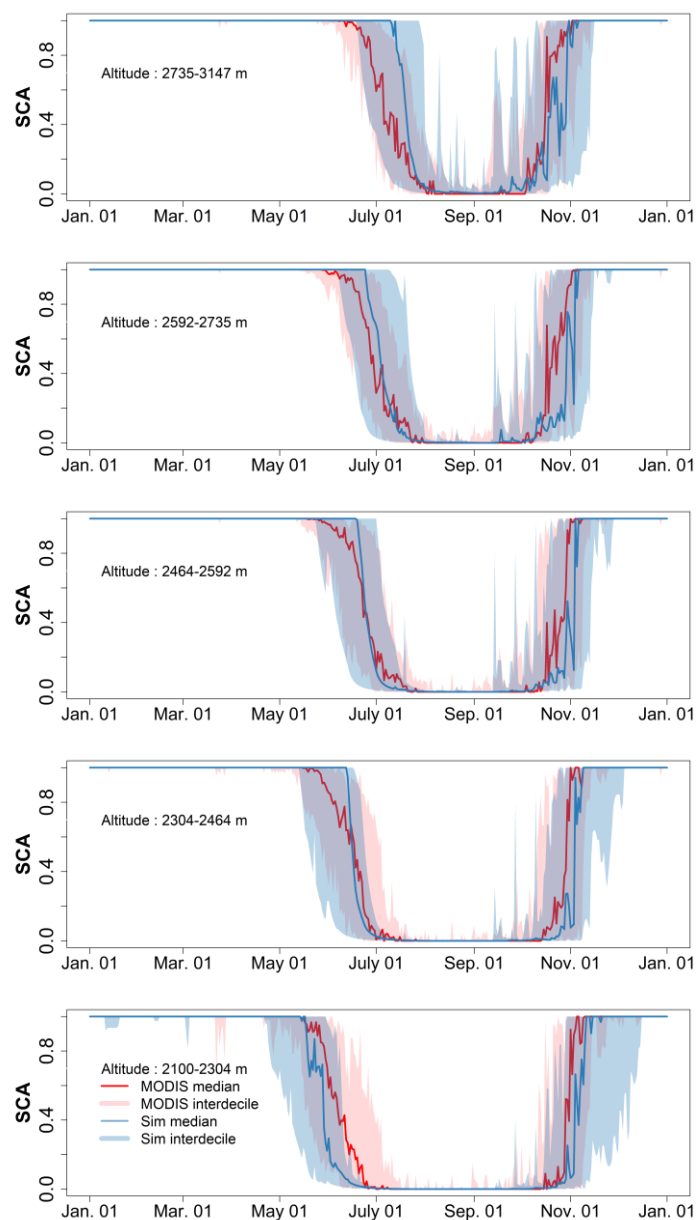


Figure 13 : Fractions de surface enneigée par tranche d'altitude sur le bassin versant de Lassoula observées et simulées sur la période 2001-2014

La combinaison des débits simulés sur les bassins de tête et la portion intermédiaire permet d'estimer les débits naturels à Sarrancolin. On perçoit l'effet des ouvrages entre juin et novembre (soutien d'étiage et régulation qui réduit la variabilité naturelle des débits).

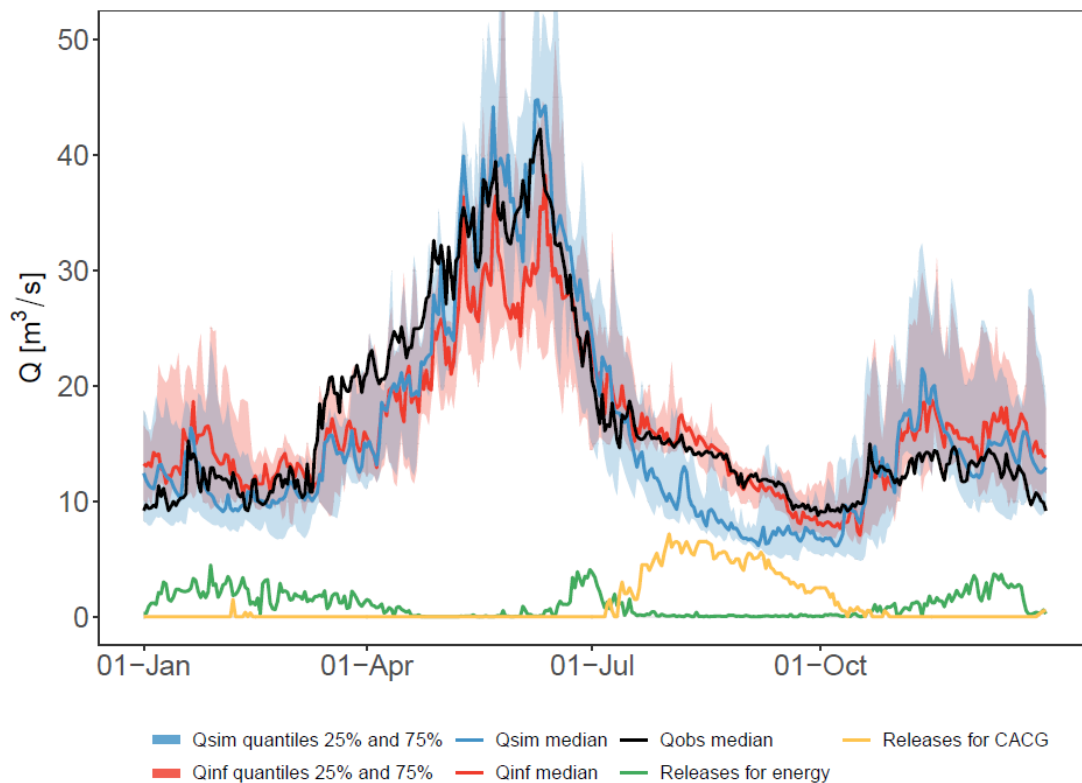


Figure 14: Hydrogrammes médians et courbes enveloppes définies par les premiers et derniers quantiles de la Neste à Sarrancolin – Comparaison aux débits turbinés et déstockés à la demande de la CACG sur la période 01/2002 -08/2014.

## 4.2. Modélisation des usages

### 4.2.1. Demande en eau pour la production d'énergie

La gestion de l'eau est fortement saisonnalisée et, en hiver, les débits sont conditionnés par la production d'hydroélectricité. La demande en énergie domestique d'un territoire est en partie corrélée à la température extérieure de l'air sur ce territoire (cf. étude antérieures à l'échelle européenne, ex. RTE, 2019, page 91). La mobilisation de l'hydroélectricité dépend alors des prix du marché (en général, élevés pendant cette période de forte demande) et de la disponibilité des autres moyens de production d'électricité en Europe (nucléaire, thermique, éolien, etc.).

En outre, la demande en énergie dépend des jours de la semaine ou des week-ends. Ces variations sont perceptibles en Figure 15 sur le total des volumes d'eau déstockés et l'énergie produite correspondante des deux systèmes Eget et Louron pour chaque jour de semaine de la saison hivernale de 2001 à 2014. Une plus grande quantité d'eau est libérée les jours de semaine que durant les week-ends, en raison d'une plus forte activité économique. Les opérateurs d'ENGIE (en charge du placement de l'énergie sur le marché pour la SHEM) ont indiqué que les jours autour de Noël présentent des déstockages et productions d'hydroélectricité similaires à ceux observés les weekends (communication personnelle).

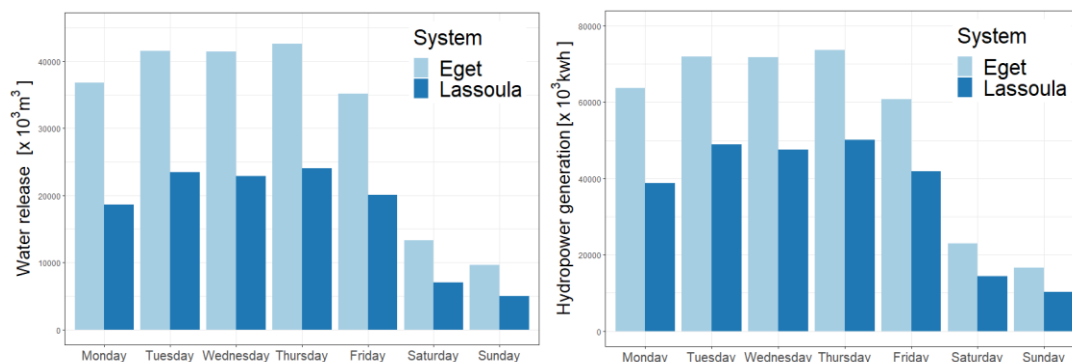


Figure 15: Volume d'eau déstocké (gauche) et énergie produite correspondante (droite) selon le jour de la semaine pendant l'hiver. Les statistiques sont déduites des données de gestion fournies par la SHEM de 2001 à 2014

Ces constats ont conduit à l'élaboration d'un modèle de demande en eau pour l'énergie paramétré différemment selon le jour de la semaine et son positionnement vis-à-vis de Noël, conditionné par la température de l'air.

Le modèle développé ici exploite un lien avec la variable degré-jour de chauffage (Heating Degree Day,  $HDD$ ) qui représente la part de la consommation induite par le chauffage :

$$HDD(j) = \max\{\tau - T_{moyFrance}(j); 0\} \quad (2)$$

où  $T_{moyFrance}(j)$  désigne la température moyenne en France journalière du jour  $j$  (°C). La variable  $\tau$  est usuellement fixée à 18°C (Gaudard *et al.*, 2013) ; ici, elle prend la valeur 15°C pertinente pour la France (Hendrickx et Sauquet, 2013).

En calage,  $T_{moyFrance}$  est calculée à partir des données SAFRAN. Comme attendu, la Figure 16 montre que la production hydroélectrique est liée à la variable  $HDD$ . Une tendance se dégage mais la forte dispersion est forte. Le degré-jour de chauffage - implicitement la température de l'air - est un facteur de contrôle qui explique près de 25% de la variance les jours ouvrés (Figure 16-b). La dispersion reste malgré tout forte. Une manière de décrire cette tendance et la dispersion est de s'appuyer sur la méthode « régression quantile ». Cette approche fournit une distribution conditionnelle de la variable d'intérêt, ici selon une variable explicative  $Y$  :

$$X_{F|Y} = a_F Y + b_F \quad (3)$$

où  $X_{F|Y}$  est le quantile conditionnel associé à la fréquence au dépassement  $F$ , de la variable  $X$  étant donnée la valeur prise par  $Y$  et les coefficients  $a_F$  et  $b_F$  sont calés pour chaque fréquence  $F$ . La variable  $X$  est la production hydroélectrique journalière et  $Y$  est la variable  $HDD$ . La Figure 16 présente les droites obtenues par cette méthode avec  $F = 25\%$ , 50% et 75% qui croisent le nuage de point.

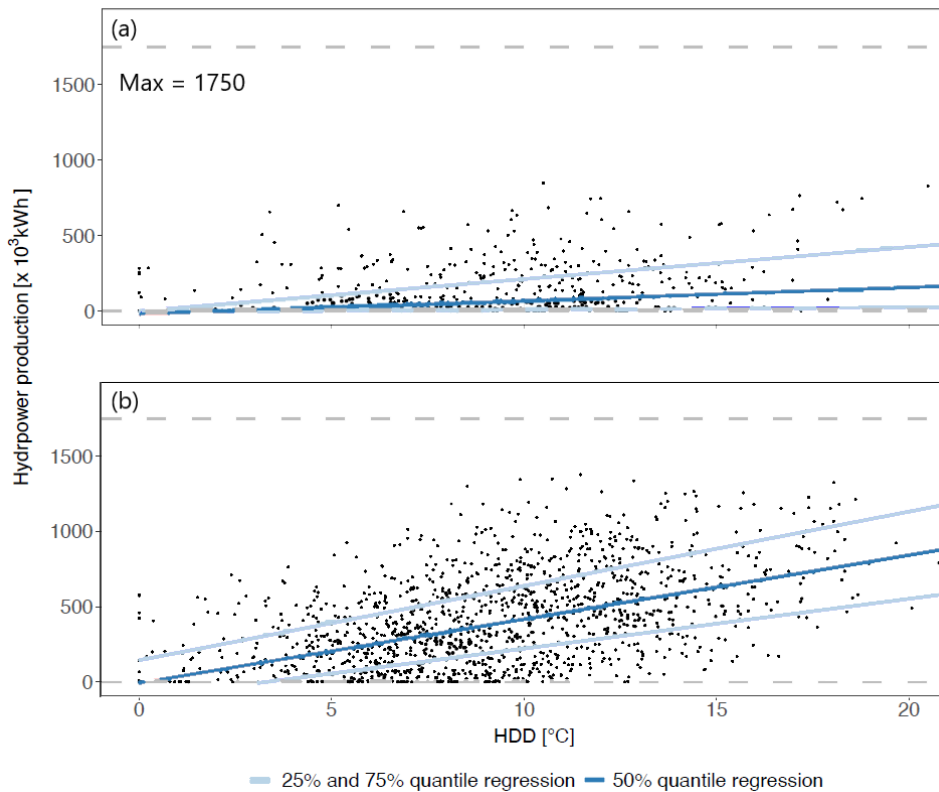


Figure 16 : Relation entre production d'hydroélectricité et degré-jour de chauffage en période de faible (a) et de forte (b) demande énergétique. Chaque point représente un jour de disponibilité des données de production et du climat

Ces régressions sont utilisées en simulation sur la période historique de la manière suivante : pour chaque jour  $j$ , on calcule la température moyenne en France journalière  $T(j)$  et  $HDD(j)$  ; on tire au hasard une valeur de  $F(j)$  dans la distribution uniforme entre 0 et 1 ; on extrait les valeurs de  $a_{F(j)}$  et  $b_{F(j)}$  calculées par la régression quantile sur les données historiques et finalement la production sera donnée par  $a_{F(j)} HDD(j) + b_{F(j)}$  (cf. Equation 3). On obtient ainsi une chronique de production d'hydroélectricité  $D^{ene}$ . Le coefficient de détermination étant faible, le modèle est pour une grande partie stochastique.

Le modèle de production en énergie est contrôlé en examinant la distribution des valeurs. La Figure 17 montre que les dix distributions statistiques issues de dix runs du modèle se superposent à celles construites avec les historiques de production

journalière. Par conséquent, le modèle semble apte à reproduire la production hydroélectrique. Cette production est exprimée en débit déstocké des lacs-réservoirs en considérant les rendements des usines.

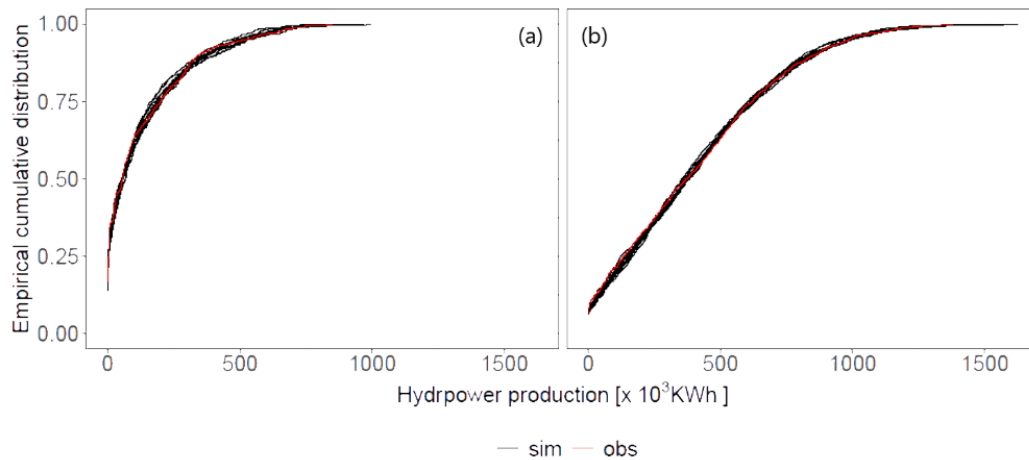


Figure 17 : Distributions empiriques des productions d'hydroélectricité pour 10 runs simulées comparées à celles établies sur les historiques de la SHEM en période de faible (a) et de forte (b) demande en énergie

#### 4.2.2. Demande en eau pour l'irrigation

Dans cette étude, l'évaluation de la demande en eau pour les besoins de l'irrigation s'appuie sur le formalisme du modèle ADEAUMIS, développé par Leenhardt *et al.* (2004a, b) sur le secteur des Baïses et en partie réadapté ici pour obtenir des résultats concordants avec les données à disposition sur l'ensemble des coteaux de Gascogne.

Le modèle ADEAUMIS est un modèle décisionnel destiné à reproduire les pratiques d'irrigation (dates et doses apportées) selon le stade de croissance des cultures et les conditions climatiques locales (pluie et évapotranspiration de référence journalières). Il restitue une chronique de demande en eau unitaire au pas de temps journalier (exprimée en mm, par unité de surface). De là, les volumes d'eau nécessaires à l'irrigation sont ensuite calculés par produit des demandes en eau unitaires avec les surfaces effectivement irriguées.

Dans sa version d'origine, les règles de décision du modèle (Tableau 4) ont été établies pour correspondre aux pratiques d'irrigation du maïs sur le territoire de la Baïse amont, sur la base d'enquêtes réalisées auprès des exploitants du territoire étudié (Maton, 2006). Le maïs constitue en effet la culture irriguée dominante sur ce secteur, et représente la plus grande part de la demande en eau d'irrigation. On signalera que le modèle est également utilisable dans le cas de la culture de soja dont les conditions d'irrigation s'apparentent fortement à celles du maïs. Il faut signaler que le modèle ne permet pas de moduler la dose apportée en fonction de la nature des sols cultivés.

En résumé, les règles de décision comprennent :

- Une règle pour l'estimation de la date de semis,
- Une règle pour définir la date de première irrigation,
- Une règle définissant la durée par défaut entre deux irrigations en l'absence de pluie significative,
- Un jeu de règles pour définir le report de l'irrigation en cas de pluies significatives et la durée de report associée,
- Une règle pour définir la date de la dernière irrigation.

Pour chaque date d'irrigation identifiée, la dose apportée (en mm) est définie dans le modèle en fonction du stade de croissance du maïs. Les stades de croissance sont évalués sur la base d'un cumul de températures journalières à partir de la date de semis tel que (modèle dit « degré-jour ») :

$$DJ = \sum_{j=t_0}^{t_f} T_{moy}(j) - T_{base} \quad (4)$$

où  $T_{moy}(j)$  est la température moyenne journalière du jour  $j$ ,  $T_{base}$  est la température de base en deçà de laquelle il n'y a pas de croissance (6°C pour le maïs),  $t_0$  est la date de semis et  $t_f$  la date pour laquelle la maturité est atteinte.

Règle	Si	Condition			Alors	Action	
		Indicateur	Opérateur	Seuil			Volume d'eau apporté
Déclenchement	et	Jour	≥	15 juin		Irrigation	20 mm
		Stade cultural	≥	10-11 feuilles			
	et	Pluie des 5 derniers jours	<	10 mm			
		ETP des 5 derniers jours	>	15 mm			
Retour (sans pluie)		Temps depuis la dernière irrigation	≥	10 jours		Irrigation	28 mm avant floraison, 34 mm pendant et après floraison, 32 mm à partir du début de la sénescence
Attente (en cas de pluie)		Cumul des pluies journalières (au-delà de 2 mm) sur les 5 derniers jours *	≥	16 mm		Pas d'irrigation avant min (7, CP <sub>5</sub> /5) jours	
Arrêt	et	Stade cultural	≥	50 % d'humidité du grain		Fin de l'irrigation	
		Pluie des 7 derniers jours	>	20 mm			
		ETP des 7 derniers jours	<	25 mm			
	Sinon						

\* Ce cumul est noté CP.

Tableau 4 : Spécification des règles de décision pour décrire une stratégie d'irrigation moyenne sur le secteur des Baises dans la version originale d'ADEAUMIS (extrait de Leenhardt et Trouvat, 2004)

Stade de développement	Température seuil (°C)
10 à 12 feuilles	650
Floraison	910
Début du développement des graines	1495
Maturation des graines (50 % d'humidité)	1630
Maturité	1990

Tableau 5 : Stades de croissance du maïs en fonction des degrés-jours

Le modèle ADEAUMIS décrit précédemment a été appliqué pour évaluer la demande en eau d'irrigation sur l'ensemble du secteur de gestion de la CACG. Il convient de rappeler que ce modèle dans cette application a pour objectif de reproduire les prélèvements en eau ; il intègre sans distinction le besoin des plantes, les pertes (infiltration, colature, etc.) et la stratégie de l'irrigant entre le point de prélèvement et la parcelle, entre les prélèvements bruts et les volumes irrigués effectifs.

Afin de restituer au mieux la variabilité géographique de la demande en eau d'irrigation, l'application a été réalisée de manière spatialisée, à l'aide des données journalières de la réanalyse SAFRAN, individuellement sur chacune des 126 mailles de 8 x 8 km<sup>2</sup> couvrant le secteur, disponibles entre 1958 et 2019. Nous précisons que le modèle a fait l'objet d'une première modification pour tenir compte de l'arrêt de la croissance du maïs en cas de températures trop élevées ( $T_{moy} > 27.5^{\circ}\text{C}$ , implémenté dans le calcul des degrés-jour) afin de restituer un rythme de croissance plus réaliste lors d'année particulièrement chaudes (ex. 2003).

La validation des résultats a ensuite reposé sur les données de prélèvements en eau pour l'irrigation fournies par la CACG au pas de temps hebdomadaire entre 1995 et 2019 et celles extraites de la BNPE à l'échelle annuelle entre 2008 et 2019.

Comme le montre la Figure 18, il y a parfois un désaccord significatif entre les deux bases de données à l'échelle annuelle sur la période commune. De fait, les valeurs des prélèvements restent malheureusement incertaines ce qui rend l'exercice de validation délicat (plus les données sont anciennes, plus elles sont incertaines ; les données de la BNPE sont des celles déclarées ; les données de la CACG sont issues d'un échantillon et extrapolées au périmètre de gestion).

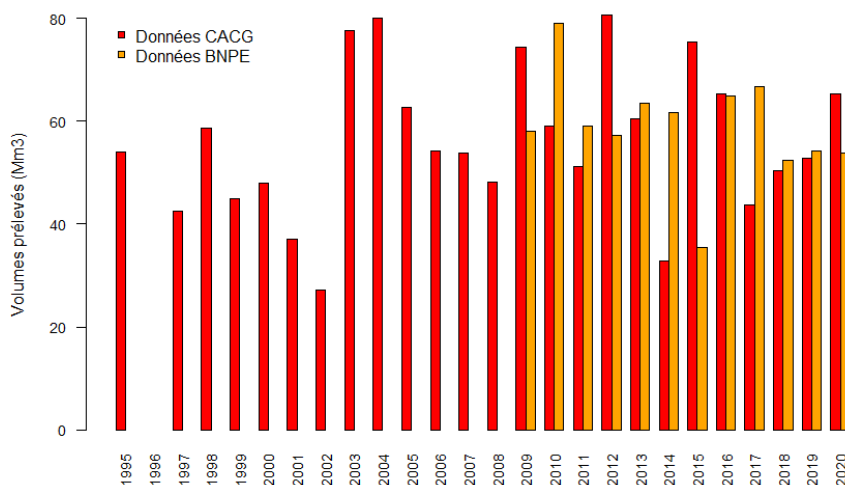


Figure 18 : Données de prélèvement à l'échelle annuelle entre 1995 et 2019 (données hebdomadaires de la CACG agrégées sur l'année) et entre 2008 et 2019 (données de la BNPE)

D'autre part, la connaissance des surfaces irriguées permettant de quantifier les volumes prélevés à partir des résultats du modèle a constitué une difficulté supplémentaire. En effet, les différentes bases de données Registre Parcellaire Graphique (RPG, <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/registre-parcellaire-graphique-rpg-contours-des-parcelles-et-ilots-cultureaux-et-leur-groupe-de-cultures-majoritaire/>) et Recensement agricole 2010, ou les résultats d'enquête disponibles auprès des OUGC n'ont pas permis de reconstituer avec certitude les surfaces irriguées de chaque culture sur l'ensemble des années étudiées. Une hypothèse sur la gamme de surface irriguée en maïs et soja sur l'ensemble du secteur a donc été proposée pour chaque année (entre 35 000 +/- 10 000 ha en 1995 et 25 000 +/- 5 000 ha en 2020) et utilisée pour calculer une fourchette de demandes en eau unitaires annuelles à partir des données de prélèvement présentées en Figure 19.

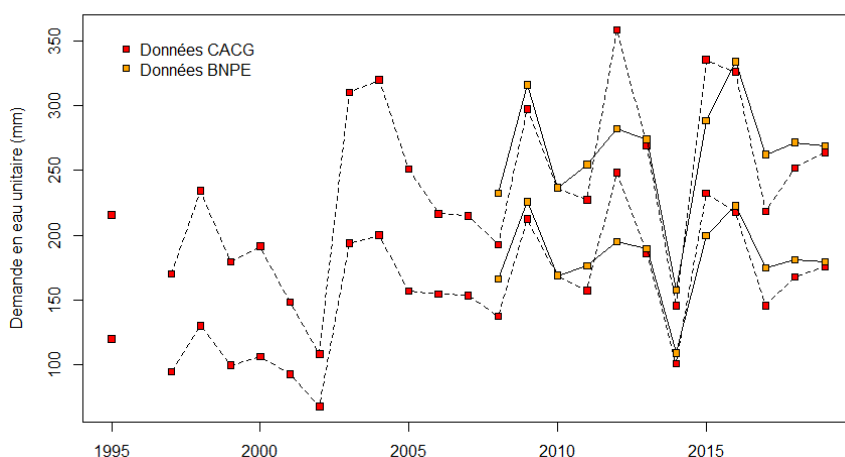


Figure 19 : Fourchette de demandes en eau unitaires déduites des données de prélèvement et d'une hypothèse sur la gamme des surfaces irriguées en maïs et soja sur le secteur d'étude

La confrontation des résultats fournis par le modèle avec les fourchettes de demande en eau unitaire montre que les ordres de grandeur sont bien respectés (215 mm/an en moyenne). Cependant, la variabilité interannuelle est mal restituée : le modèle semble fournir une plage de variation réduite (entre 175 et 240 mm/an), contrairement à ce qui est observé (entre 90 et 300 mm/an si l'on retient une valeur moyenne chaque année). De fait, l'examen détaillé des résultats montre que le nombre de tours d'eau modélisé est relativement similaire d'une année à l'autre avec :

- Une fréquence d'irrigation importante mais sur une période plus courte les années chaudes et sèches (stades de croissance plus rapidement atteints en raison des températures élevées),

- Une irrigation moins fréquente mais sur une saison qui se prolonge parfois jusqu'en septembre les années fraîches et humides (stades de croissance retardés en raison des températures modestes).

Il en résulte qu'avec des doses apportées relativement constantes (autour de 30 mm à chaque tour d'eau), les résultats varient peu face à la variabilité des conditions hydriques observées d'une année à l'autre, contrairement à ce que suggèrent les données (relation entre prélèvements et indicateur de besoins en eau sur la période estivale, Figure 20). Afin de corriger ce défaut, nous avons choisi de modifier les spécifications du modèle d'origine concernant les doses unitaires apportées à chaque irrigation. Pour cela, une formulation simplifiée des besoins en eau de la culture (équivalente à une évapotranspiration réelle) tenant compte du différentiel entre pluies et évapotranspiration de référence sur les cinq jours précédents l'irrigation a été retenue. Un facteur correctif  $k$  (équivalent d'un coefficient cultural), déterminé de manière empirique, est introduit dans la formule pour parvenir, en moyenne, à un résultat voisin des doses initialement définies dans le modèle ADEAUMIS. La quantité irriguée  $Dose$  (en mm) apportée à la date  $t$  est donnée par :

$$Dose(t) = k \cdot \left( \sum_{j=t-4}^{j=t} ETP(j) - \sum_{j=t-4}^{j=t} P(j) \right) \quad (5)$$

où  $ETP(j)$  est l'évapotranspiration du jour  $j$  (en mm),  $P(j)$  est la pluie du jour  $j$  (en mm) et, après réglages,  $k = 2$ . Par exemple, en conditions « normales » : la dose est de  $2 \times (20 - 5) = 30$  mm, en conditions « froides/humides » :  $2 \times (15 - 10) = 10$  mm et en conditions « chaudes/sèches » :  $2 \times (25 - 0) = 50$  mm.

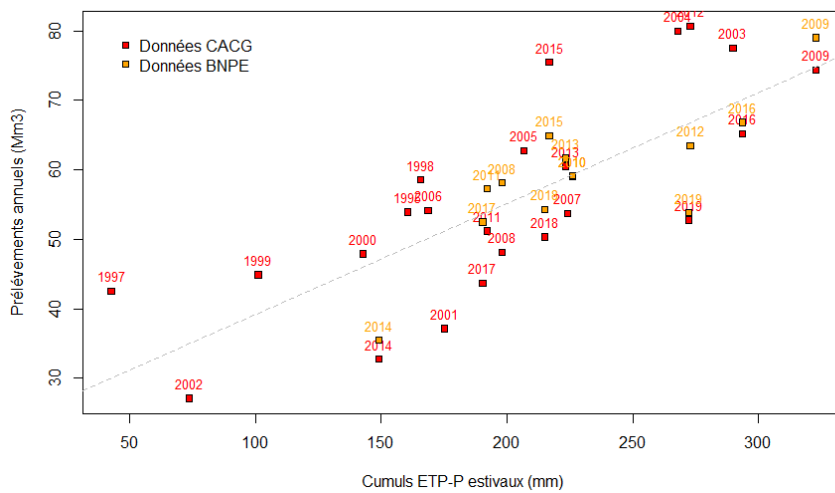
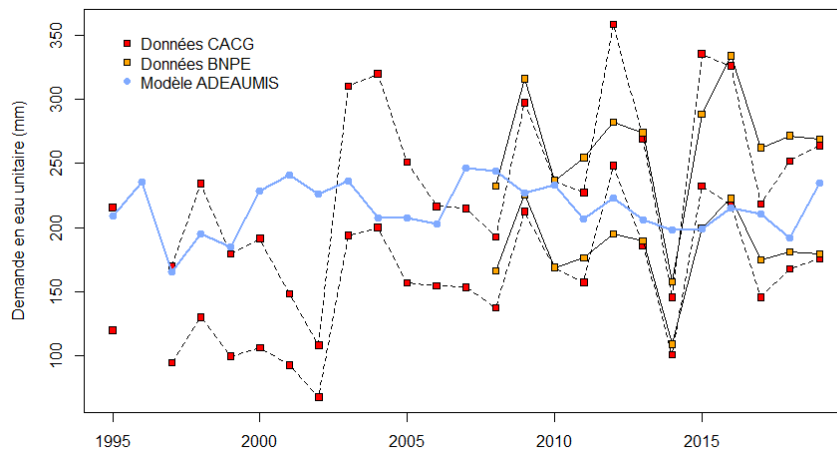
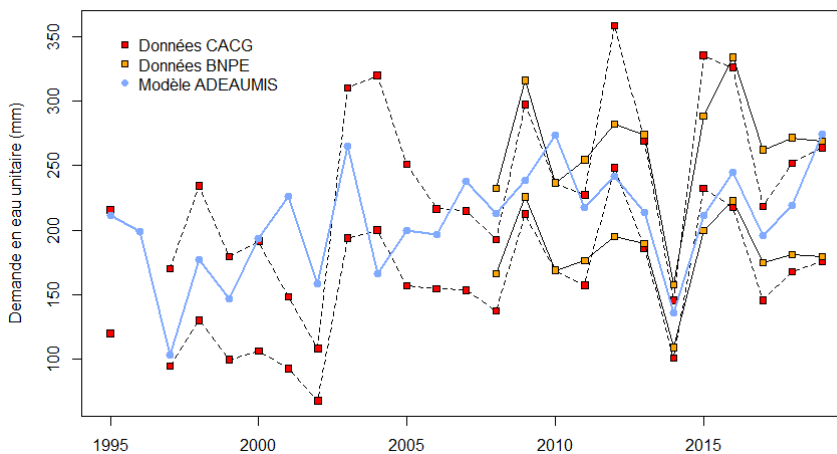


Figure 20: Relation entre volumes prélevés annuellement pour l'irrigation et le différentiel entre les cumuls d'évapotranspiration de référence et de pluie entre les mois de juin et septembre



(a)



(b)

Figure 21 : Confrontation des demandes en eau unitaires annuelles estimées par le modèle ADEAUMIS avec les fourchettes de demande en eau unitaires observées avant (en haut) et après (en bas) modification du modèle

La confrontation des résultats du modèle modifié avec la fourchette de demandes en eau unitaires observées montre une meilleure concordance, notamment sur les dernières années pour les données issues de la BNPE, avec une restitution plus réaliste de la variabilité interannuelle. Les estimations restent cependant douteuses dans un certain nombre de cas. Compte tenu des différentes sources d'incertitude, ce résultat à l'échelle annuel est tout de même jugé satisfaisant.

De là, la validation des résultats à l'échelle infra-annuelle s'est ensuite basée sur l'examen des données au pas de temps hebdomadaire fournies par la CACG. L'objectif est de déterminer si le modèle restitue correctement la dynamique de demande en eau au cours de la saison d'irrigation. Pour mettre en évidence la répartition des demandes et éliminer les effets d'échelles, ces dernières ont été rendues adimensionnelles en divisant par les volumes annuels. On signalera là encore que cette comparaison repose sur des données incertaines (ex. les données de l'année 2004 sont étrangement pratiquement identiques à celles de l'année 2003).



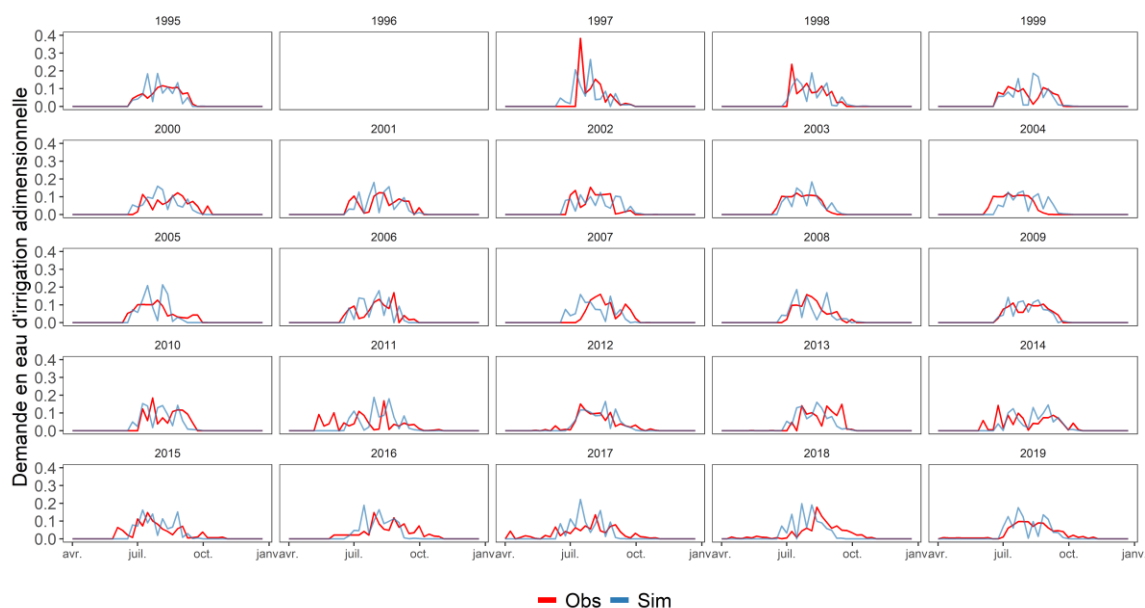


Figure 22 : Dynamiques des prélèvements rendus observés et simulés par ADEAUMIS (en rouge : simulations ; en bleu : observations)

On constate de manière générale que la concordance entre les pics de demande en eau observés et estimés est rarement satisfaisante (en temporel comme en intensité) ce qui montre à quel point l'exercice de modélisation des pratiques d'irrigation est délicat à pas de temps fin. On remarque en particulier des décalages parfois sensibles (plus de 15 jours) entre les périodes d'irrigation modélisées et observées (ex. 2007, peut-être attribué à une mauvaise estimation de la date des semis) mais également l'impossibilité de restituer certaines pratiques d'irrigations précoces (en mai et juin) ou tardives (en septembre et octobre) qui correspondent vraisemblablement à des irrigations sur des cultures d'hiver (comme le colza et le blé) et qui semblent apparaître à partir de 2010. Enfin, les écarts entre dynamiques constatées et modélisées pourraient être l'effet des mesures de restriction dont le modèle ne tient pas compte (c'est le cas sur l'année 2017 ; cette raison semble moins pertinente pour expliquer les écarts en 2016).

Les résultats obtenus avec cette version modifiée d'ADEAUMIS sont plus réalistes et plus satisfaisants que ceux du modèle initial mais le modèle reste imparfait avec une règle d'apport assez arbitraire mais qui répond cependant à une logique de bilan hydrique. Nous rappelons notamment que le modèle se limite aux demandes unitaires pour le maïs et le soja (alors que la comparaison porte sur les prélèvements « toutes cultures confondues »), qu'il n'intègre pas les règles d'anticipation (l'intégration des prévisions de pluies dans le comportement des irrigants) ou d'éventuelles mesures de restriction, etc. Notons que l'exercice de validation est également empreint d'incertitudes qui persistent sur les données de référence (prélèvements et surfaces irriguées) ainsi que sur l'évolution des types de culture dans la sole irriguée.

#### 4.2.3. Demande en eau pour l'eau potable

La modélisation des prélèvements pour l'Alimentation en Eau Potable (AEP) reprend une approche classique : la demande totale pour l'AEP est le produit d'un coefficient de rendement du réseau, de la population desservie et par la consommation unitaire par habitant. Dequesne et Portela (2019) ont rapporté que le rendement du réseau du département du Gers dans lequel les rivières de Gascogne coulent, est de l'ordre de 70-75%. Ici, nous avons fixé l'efficacité du réseau à 75 %. La population totale de toutes communes desservies par le système Neste (i.e. dans les bassins versants des rivières de Gascogne) a été déduite des recensements de l'INSEE (évaluée entre 184 000 et 200 000 habitants entre 2006 et 2017) et les prélèvements pour l'AEP de la BNPE sur la même période 2006-2017 (évalués entre 9 et 11.5 Mm<sup>3</sup> par an entre 2006 et 2017). Finalement, la demande unitaire moyenne sur 2006-2017 atteint : 39.4 m<sup>3</sup>/an/hab ou 108 l/jour/hab. Dans la suite, le modèle pour décrire la demande en AEP du jour  $j$  (en m<sup>3</sup>/s) est :

$$AEP(j) = 0.108/0.75/24/3600 \text{ Pop}(a) \quad (6)$$

où  $\text{Pop}(a)$  désigne la population desservie l'année  $a$  du jour  $j$ .

#### 4.2.4. Demande en eau pour l'industrie

Le prélèvement principal en eau industrielle est celui de la société ARKEMIA (industrie chimique) à Barthe de Neste (65). Le prélèvement est relativement stable dans le temps. Dans la modélisation, le prélèvement pour l'industrie est considéré constant et égal à 0.338 m<sup>3</sup>/s.

#### 4.2.5. Demande en eau pour les milieux

La demande en eau pour les milieux est intégrée dans les volumes nécessaires pour garantir les débits d'objectif d'étiage (DOE) sur les rivières réalimentées par le Canal de la Neste au droit des points de consigne des rivières réalimentées et de Sarrancolin pour la Neste. Cette demande se traduit par un soutien d'étiage et vise des objectifs de qualité des milieux depuis les têtes de bassin jusqu'aux points de consigne. Dans cet exercice, les rivières réalimentées ne seront pas modélisées individuellement mais globalement. Le débit simulé à l'exutoire des rivières de Gascogne (p.m. secteur 4 en Figure 4, page 8) est la somme des débits des rivières réalimentées et on appréciera la demande des milieux par comparaison à la somme des DOE imposés sur ce même ensemble de rivières (Tableau 6).

Cours d'eau	Station de référence	DOE (m <sup>3</sup> /s) en étiage	DOE (m <sup>3</sup> /s) hors-étiage
Save	Larra	0,67	1,005
Gimone	Castelferrus	0,4	0,480
Arrats	Saint-Antoine	0,27	0,405
Gers	Montastruc	2,12	2,120
Baise	Nérac	1,11	1,620
Osse	Andiran	0,37	0,550
Bouès	Beaumarchés	0,212	0,300
Longe	Le Fousseret	0,19	0,285
Lavet	Confluent Garonne	0,05	0,050
Noues	Laffitte	0,1	0,150
Somme		5.492	6.965

Tableau 6 : Débits réglementaires sur les rivières de Gascogne

Le DOE à l'aval de Sarrancolin est fixé à 4 m<sup>3</sup>/s. Toutefois, il est possible de déroger à cette règle en abaissant la contrainte à 3 m<sup>3</sup>/s jusqu'à 90 jours par an.

#### 4.2.6. Gestion

La SHEM gère les réservoirs de manière déterministe, sur la base d'une prévision des apports dans les réservoirs, d'une demande en eau aval exprimée par la CACG et des prix de l'électricité sur le marché européen, à partir d'une expertise et d'outils numériques développés en interne. Les stocks des lacs-réservoirs des systèmes Eget et Lassoula sont gérés de manière coordonnée pour subvenir à des usages multiples. Vers la fin du mois de mars, les réservoirs sont vidés afin de pouvoir contenir l'eau de la fonte des neiges. La gestion des lacs-réservoirs reste globalement identique depuis l'ouverture du marché français de l'électricité aux producteurs européens à partir de 1999. En mode opérationnel, un modèle hydrologique prédit les apports aux réservoirs. En revanche les projections des prix du marché sont incertaines : le prix de l'électricité sur les marchés fluctue en fonction du contexte météorologique et d'autres facteurs externes (ex. prix du gaz, équilibre offre-demande). Les plans de production sont le résultat d'une optimisation économique sous contraintes multiples sur la base d'information disponibles au moment du placement de l'énergie :

- Les prix du marché de l'électricité,
- Le respect de la demande contractuelle de la CACG (48 Mm<sup>3</sup>),
- L'indisponibilité de groupes en cours ou prévue (ex. incidents techniques, vidange des réservoirs, maintenance d'installations),
- Le non-déversement des réservoirs.

La procédure d'optimisation choisit les meilleurs jours et heures de production en fonction de la « valeur de l'eau » (€/m<sup>3</sup>) estimée par la SHEM. L'eau dans les réservoirs est libérée pour produire de l'énergie lorsque le prix réel du marché est

supérieur à cette « valeur de l'eau » ; sinon, l'eau est conservée dans les réservoirs (elle a plus de valeur dans le stock). Des lâchures mixtes répondant aux besoins d'énergie et à ceux de la CACG peuvent avoir lieu.

Les turbines qui ont la plus grande hauteur de chute sont celles du système Lassoula en raison des centrales en cascade. Ainsi, 1 m<sup>3</sup> d'eau dans le système Lassoula produit plus d'énergie que dans le système Eget.

Un modèle de gestion de l'eau a été créé par Huang (2022) sur la base des règles mentionnées ci-dessus. Le pas de temps choisi est le pas de temps journalier afin d'utiliser pleinement les données disponibles et de s'affranchir de la complexité d'une modélisation du placement des volumes turbinés dans la journée. Les prix du marché de l'électricité et la disponibilité des groupes ne sont pas considérés en l'absence de données les renseignant. L'élément déclencheur de la production d'énergie utilisé est « l'intérêt à turbiner » : plus il est grand, plus la SHEM sera enclin à déstocker l'eau pour un usage énergétique.

La demande en eau totale des bassins des rivières de Gascogne est assurée par les eaux de la Neste et par les ressources naturelles ou captées par les réservoirs. Des modèles ont été développés pour décrire le fonctionnement des réservoirs de piedmont et du Canal de la Neste (sous contrainte de respect du DOE de 4 m<sup>3</sup>/s en aval du point de prélèvement). Il n'a pas été possible de représenter de manière aussi fine et explicite les fonctionnements de ces ouvrages. Nous avons opté pour des modèles empiriques faisant sens (explicitant des liens avec des variables supposées intervenir dans les règles de décision des gestionnaires). Ainsi,

- Les débits dans le canal sont estimés par des régressions quantiles calées indépendamment sur chaque saison,
- Les variations de stockage dans les réservoirs de piedmont sont données par une régression linéaire (avec ordonnée à l'origine nulle) faisant appel au débit transitant dans le canal de la Neste, à la somme des débits naturels générés par les rivières de Gascogne, et à la demande totale (AEP, irrigation, industrie, respect des DOE) des usages connectés aux rivières de Gascogne.

La Figure 23 permet d'apprécier la performance des modèles : elle semble acceptable sur le peu d'années disponibles et restitue les comportements saisonniers.

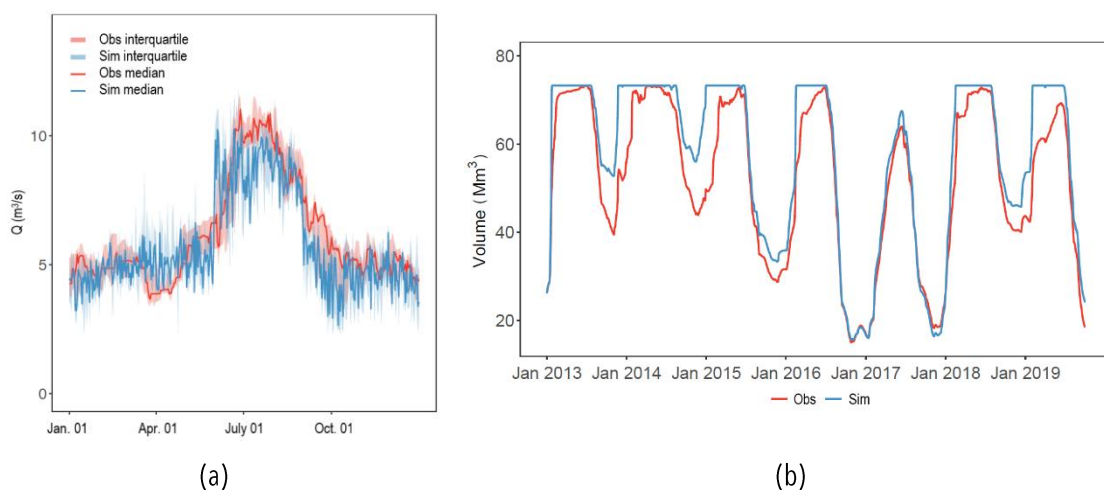


Figure 23 : Débits transitant dans le Canal de la Neste observés et simulés (a) et volumes dans les réservoirs de piedmont observés et simulés (b) sur la période 2013-2019

Le modèle de gestion de Huang a été validé sur une période de disponibilité des données. L'évolution simulée des stocks dans les lacs-réservoirs (Figure 24) semble suivre celle des historiques. Les résultats sont issus d'un processus d'optimisation, qui identifie la meilleure stratégie de gestion de l'eau. De fait, cette stratégie optimale s'écarte des observations, car la gestion se construit jour après jour et les débits sont tributaires d'aléas (cf. indisponibilité en 2015 des lacs-réservoirs en Figure 6) et des incertitudes dans les prévisions météorologiques et économiques. Globalement les résultats sont conformes aux observations et les variations saisonnières sont bien reproduites.

Cependant, les règles et contraintes pesant sur la gestion du canal et des réservoirs de piedmont n'ont pu être intégrés explicitement dans le modèle de Huang et l'optimisation (c'est-à-dire le placement de l'eau) est un processus itératif (convergence numérique pour atteindre une cohérence interne entre toutes les composantes du système Neste). Ce processus itératif n'est pas adapté à la simulation de multiples scénarios d'adaptation (temps de calcul long, notamment). Dans les parties suivantes, nous reprendrons les briques de ce modèle et nous nous ne chercherons pas à placer l'eau. Nous

avons choisi d'identifier les incompatibilités entre les demandes des différents usagers (*i.e.* volumes requis et respect de débits réglementaires) et la ressource disponible, que nous qualifierons de défaillances.

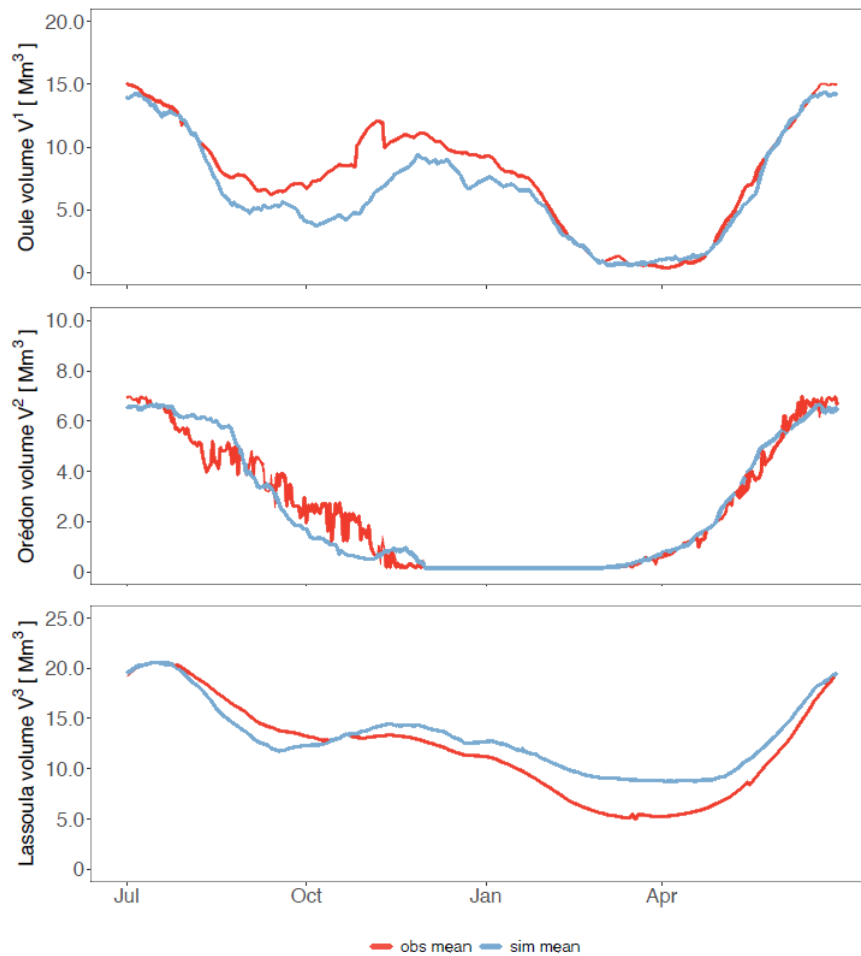


Figure 24 : Volumes observés (en rouge) et simulés par le modèle de gestion de Huang (en bleu) alimenté par les demandes historiques des bases de données de la SHEM et de la CACG et les débits naturels estimés par le modèle hydrologique, sur la période 2002-2014

## 5. Evolution des ressources et demandes en eau sous changement climatique

Cette section fournit de manière synthétique les changements attendus en termes de climat, ressource en eau et demande en eau pour les usages sous scénarios « business as usual », c'est-à-dire sans changement de pratiques, à différents horizons. Les outils présentés dans les sections précédentes ont montré une performance acceptable pour la reconstitution du passé ; ils ont été appliqués tels quels sans modification de paramètres.

Nous privilégions dans les analyses les deux horizons de milieu de siècle 2041-2060 (nommé 2050) et fin de siècle 2081-2100 (nommé 2090). La fenêtre temporelle de référence est 1985-2014 (nommé 2000). Le découpage en saison est celui considéré par les climatologues : DJF = décembre à février inclus (hiver), MAM = mars à mai inclus (printemps), JJA = juin à août inclus (été) et SON = septembre à novembre inclus (automne). Dans la suite, HIST fait référence aux projections RCP4.5 et RCP8.5 de la période 1985-2015. L'évolution du climat est caractérisée par les six projections produites par CLIMPY régionalisées (Tableau 2, page 9).

### 5.1. Le climat

Le changement climatique est illustré sur deux secteurs : le bassin de l'Oule et celui des rivières de Gascogne, considérés comme représentatifs pour caractériser l'évolution des variables clefs du cycle de l'eau. Nous donnons ici les statistiques (minimum, médiane et maximum) calculées sur les six projections (Tableau 7, Figure 25, Figure 26), agrégées à l'échelle de ces deux entités.

Oule		PA (mm)			ETPA (mm)			TA (°C)		
		min	médiane	max	min	médiane	max	min	médiane	max
SAFRAN	2000	1597			705			3.6		
HIST		1287	1357	1392	636	648	672	3	3.25	3.6
RCP4.5	2050	1129	1210	1237	672	703	771	3.7	4.3	5.8
	2090	1052	1139	1262	696	721	798	4.4	4.8	6.6
RCP8.5	2050	963	1151	1298	684	737	812	4.2	5.1	6.9
	2090	633	853	1162	763	844	967	6	7.6	10.6

Rivières de Gascogne		PA (mm)			ETPA (mm)			TA (°C)		
		min	médiane	max	min	médiane	max	min	médiane	max
SAFRAN	2000	777			763			12.7		
HIST		739	772	791	684	703	722	12	12.5	12.7
RCP4.5	2050	638	688	698	717	749	830	13	13.4	15
	2090	620	636	710	753	766	860	13	14	15.9
RCP8.5	2050	539	643	716	738	792	876	13	14.2	16
	2090	379	490	633	825	900	1051	15	16.5	19.7

Tableau 7 : Evolution des moyennes interannuelles de précipitations totales annuelles (PA), d'évapotranspiration de référence annuelle (ETPA) et de température annuelle (TA) sur le bassin de l'Oule et les rivières de Gascogne à différents horizons et pour les deux RCPs 4.5 et 8.5

Conformément aux résultats et conclusions du GIECC, l'ensemble des projections suggèrent une hausse des températures et l'intensité du changement est corrélée avec la teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre (la hausse de température en fin de siècle sous RCP8.5 est globalement plus forte que celle projetée sous RCP4.5). L'évapotranspiration suit l'évolution de la température car elle lui est, pour partie, liée. La hausse de l'évapotranspiration de référence induira une augmentation des besoins en eau des plantes. Les précipitations s'effondrent, conformément aux résultats d'études récentes en France (cf.

Figures 17 et 18, du rapport DRIAS 2020 (Soubeyrou *et al.*, 2020)) et en Europe (<https://interactive-atlas.ipcc.ch>). Ces tendances sont partagées par l'ensemble des secteurs examinés (1 à 5) avec des intensités de changement différenciées.

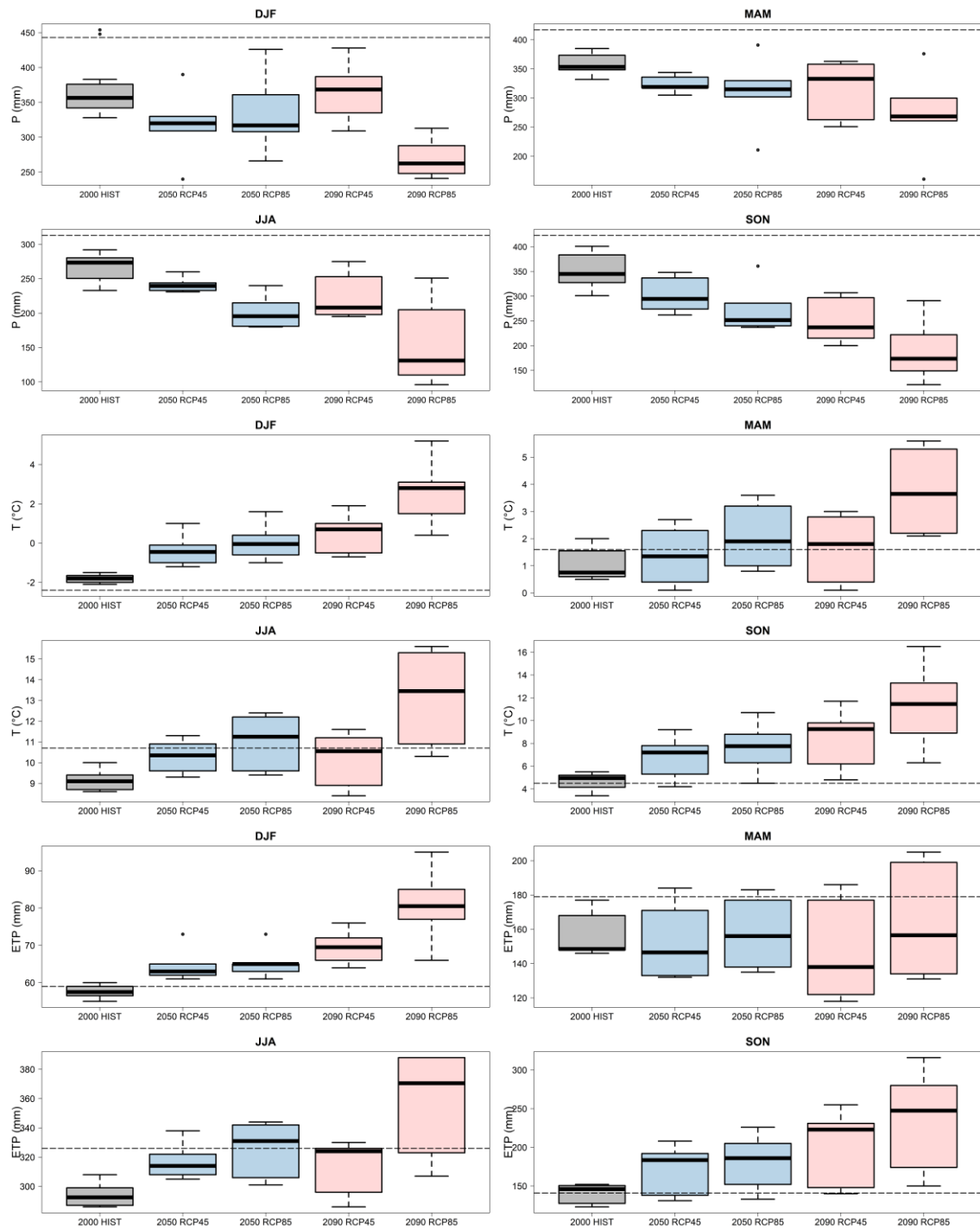


Figure 25: Evolution des moyennes interannuelles saisonnières de précipitations totales (P), de température (T) et d'évapotranspiration de référence (ETP) sur le bassin de l'Oule à différents horizons et pour les deux RCPs 4.5 et 8.5 (les droites en pointillé indiquent les valeurs extraites de la réanalyse SAFRAN-PIRAGUA)

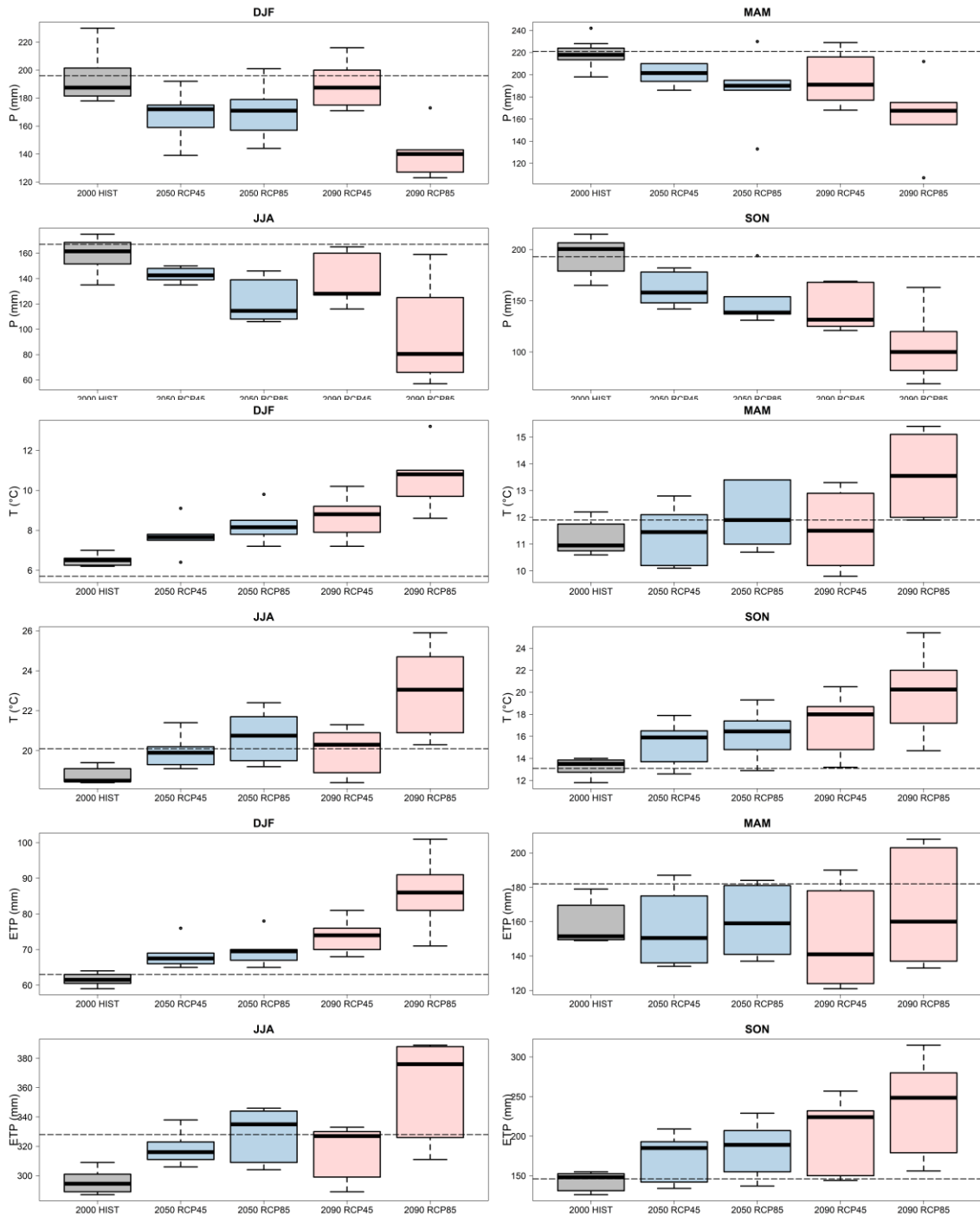


Figure 26 : Evolution des moyennes interannuelles saisonnières de précipitations totales (P), de température (T) et d'évapotranspiration de référence (ETP) sur les rivières de Gascogne à différents horizons et pour les deux RCPs 4.5 et 8.5 (les droites en pointillé indiquent les valeurs extraites de la réanalyse SAFRAN)

La comparaison entre la réanalyse SAFRAN (ou SAFRAN-PIRAGUA) aux reconstitutions historiques 2000 HIST montre une dynamique saisonnière conforme aux observations mais des biais dans les forçages climatiques utilisés par la suite. La méthode de régionalisation pour la production de ces forçages à partir des sorties de modèles climatiques (3.1, page 9) sous-estime les précipitations sous climat présent sur les bassins de montagne (en amont de Sarrancolin, sous bassin 1, 2, 3, et 5) et conduit à des températures moins extrêmes en hiver et en été sur tous les bassins. En supposant ce biais systématique, on peut considérer que les précipitations futures sont également sous estimées mais qu'elles suivent la tendance à la baisse.

## 5.2. Les ressources naturelles

Nous reprenons le bassin de l'Oule et les rivières de Gascogne, à titre d'illustration pour caractériser l'évolution des débits exprimés en lame d'eau (mm) avec un focus sur les statistiques moyennes par année (Tableau 8) et par saison (Figure 27, Figure 28). Les biais constatés se propagent sur les débits simulés. Ainsi le biais sur les précipitations est de l'ordre de 200 mm à l'échelle annuelle constaté sur le bassin de l'Oule se propage aux débits quasi intégralement mais la dynamique saisonnière des écoulements est correctement reproduite (occurrence des basses et hautes eaux dans l'année).

En cohérence avec la baisse des précipitations et la hausse de l'évapotranspiration sur le XXI<sup>e</sup> siècle, les débits annuels diminuent et cette diminution est plus sensible avec le RCP8.5. La diminution est partagée par tous les sous bassins versants. Les rivières de Gascogne perdraient 50% de leurs ressources en fin de siècle sous RCP8.5 par rapport aux années 2000 avec la projection la plus optimiste (cf. colonne max).

		Oule			Orédon			Lassoula		
		min	médiane	max	min	médiane	max	min	médiane	max
SAFRAN	2000	1290			1478			1866		
HIST		1036	1105.5	1146	1169	1229.5	1272	1565	1649.5	1688
RCP4.5	2050	845	925	971	1014	1085	1108	1401	1521	1558
	2090	741	855	1000	904	1019	1150	1331	1361	1619
RCP8.5	2050	663	889	1031	832	1042	1177	1241	1374	1633
	2090	402	575	874	592	755	1051	892	1100	1477

		Intermédiaire Sarrancolin			Rivières de Gascogne		
		min	médiane	max	min	médiane	max
SAFRAN	2000	925			173		
HIST		683	723	781	170	178.5	199
RCP4.5	2050	484	562	618	92	123	144
	2090	368	449	653	85	115	144
RCP8.5	2050	271	494	655	59	107	147
	2090	16	146	491	19	44	92

Tableau 8 : Evolution des moyennes interannuelles des lames d'eau annuelles (en mm) par sous bassin versant à différents horizons et pour les deux RCPs 4.5 et 8.5



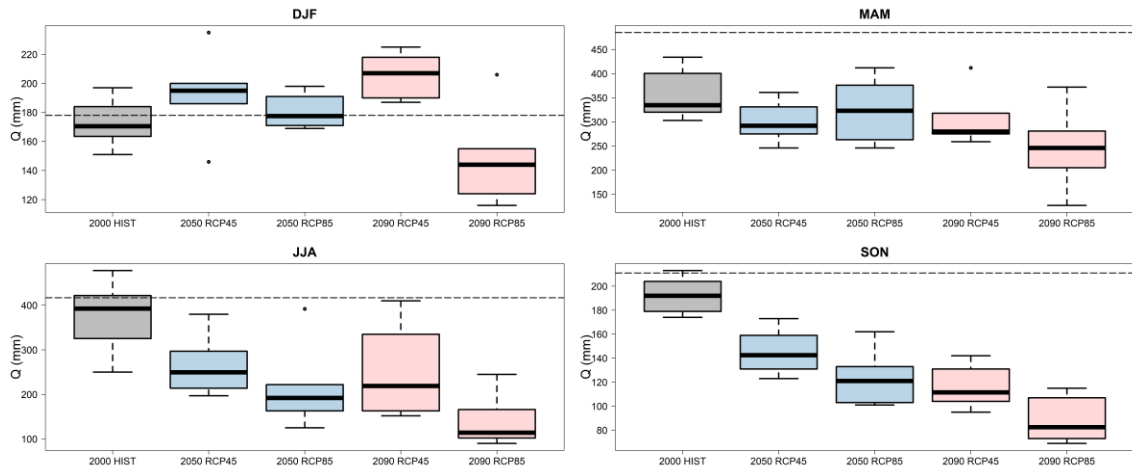


Figure 27 : Evolution des moyennes interannuelles des lames d'eau saisonnières sur le bassin de l'Oule à différents horizons et pour les deux RCPs 4.5 et 8.5 (les droites en pointillé indiquent les valeurs simulées avec les données de la réanalyse SAFRAN-PIRAGUA)

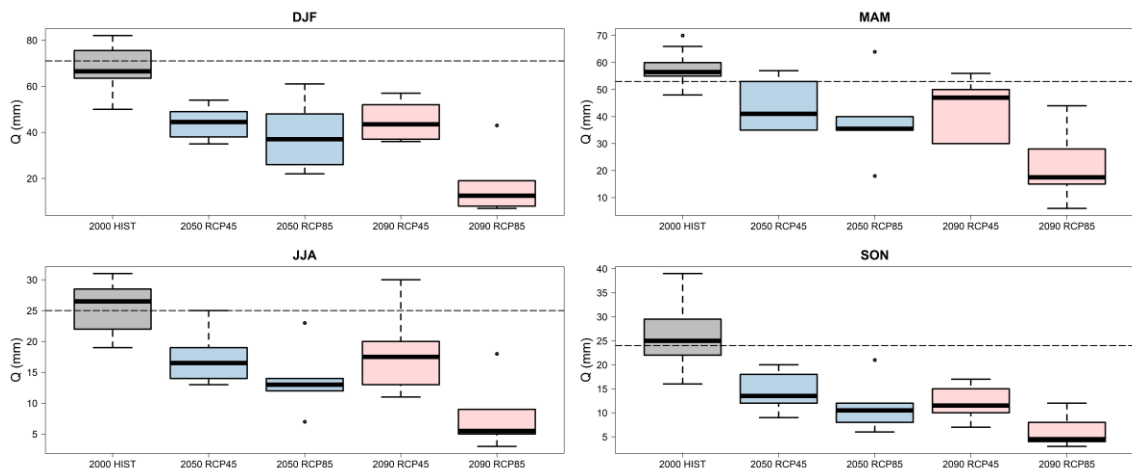


Figure 28 : Evolution des moyennes interannuelles des lames d'eau saisonnières sur les rivières de Gascogne à différents horizons et pour les deux RCPs 4.5 et 8.5 (les droites en pointillé indiquent les valeurs simulées avec les données de la réanalyse SAFRAN)

Les hydrogrammes représentés en Figure 29 et en Figure 30 illustrent l'évolution du régime hydrologique des bassins versants entre le climat récent et la fin de siècle. Chaque simulation issue des six projections climatiques est résumée par un hydrogramme médian reliant les médianes journalières sur les périodes historiques et futures, tracé en noir et accompagné d'une enveloppe. Les six projections viennent se superposer et croiser l'hydrogramme représentatif des simulations obtenues avec les réanalyses SAFRAN ou SAFRAN-PIRAGUA, tracé en bleu. Les biais de modélisation identifiés à l'échelle saisonnière en temps présent (HIST 2000) apparaissent de façon manifeste sur le bassin de l'Oule. Un des effets du changement climatique partagé par les bassins de montagne est la réduction de l'onde de fonte. Les contrastes entre saison sont ainsi atténués en fin de siècle. Pour les rivières de Gascogne, le régime pluvial des cours d'eau est maintenu mais les étiages sont plus sévères et les débits hivernaux réduits. Les résultats obtenus s'inscrivent dans la continuité des travaux antérieurs sur l'impact du changement climatique sur l'hydrologie du bassin versant de la Garonne (Chauveau *et al.*, 2013, Hendrickx et Sauquet, 2013 ; Dayon *et al.*, 2018) : les évolutions de l'hydrologie sont très marquées sur ce bassin, comparativement aux autres grands fleuves français, avec une réduction notable de la ressource en eau (ex. une diminution d'environ -20% du module de la Garonne sous RCP8.5 en fin de siècle selon Dayon *et al.* (2018)).

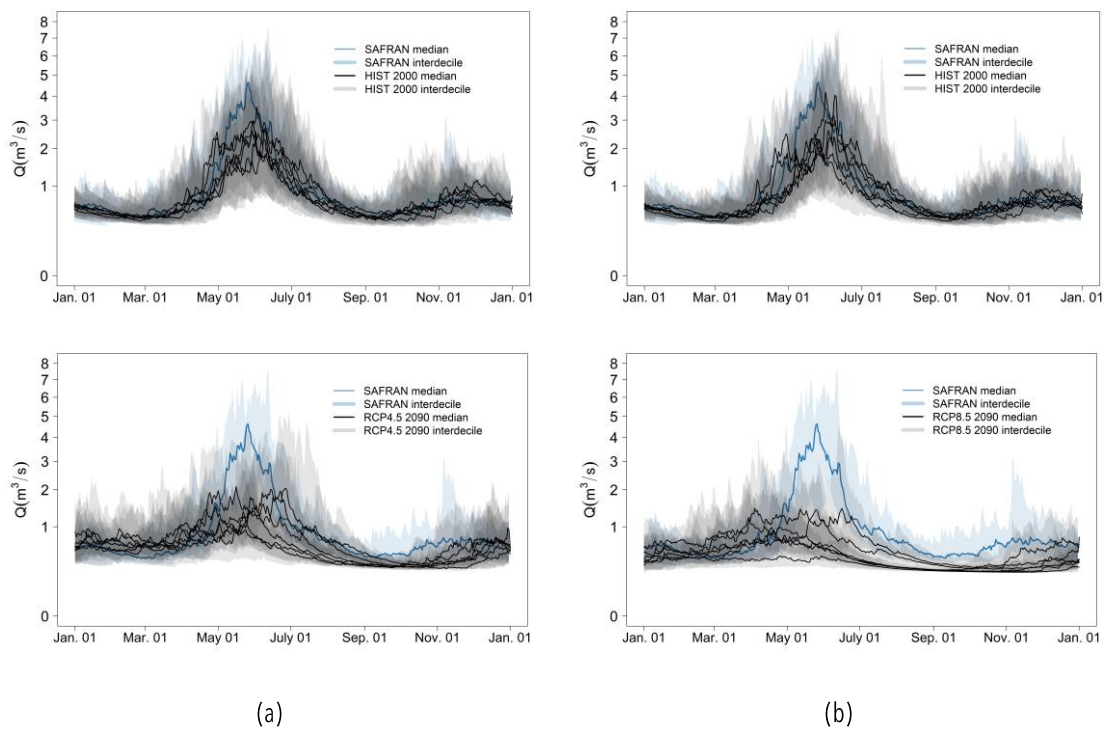


Figure 29 : Hydrogrammes médians et courbes enveloppes définies par les premiers et derniers déciles sur le bassin de l'Oule à différents horizons et pour les deux RCPs 4.5 (a) et 8.5 (b). L'échelle de l'axe des ordonnées n'est pas linéaire (définie par les racines carrées)

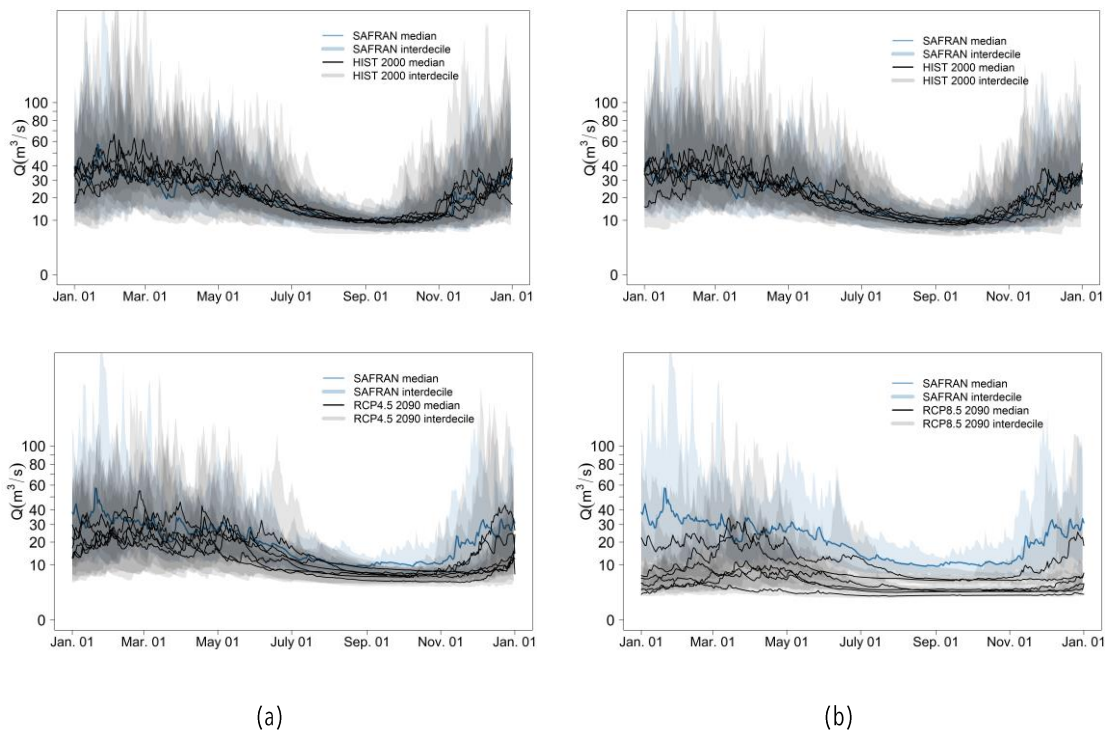


Figure 30 : Hydrogrammes médians et courbes enveloppes définies par les premiers et derniers déciles sur les rivières de Gascogne à différents horizons et pour les deux RCPs 4.5 (a) et 8.5 (b). L'échelle de l'axe des ordonnées n'est pas linéaire (définie par les racines carrées)

## 5.3. Les demandes en eau

### 5.3.1. Demande en eau pour la production d'énergie

L'hypothèse adoptée ici est celle de l'évolution de la demande conditionnée par les températures d'hiver (donc le chauffage). L'intérêt à turbiner est d'autant plus grand que l'écart *HDD* entre la température moyenne en France *TmoyFrance* et 15°C est important (cf. équation (2)). Le nombre de jours avec *HDD*>0 est un indicateur d'évolution de la demande en production d'hydroélectricité. Six chroniques de température *TmoyFrance* ont été produites à partir des six projections de température journalière disponibles sur le territoire d'étude selon une formulation empirique (cf. 3.1, page 9) avant de calculer la variable degré-jour de chauffage *HDD* et d'en déduire les fréquences annuelles de jours avec *HDD*>0. La fréquence annuelle de jours avec *HDD*>0 diminue suite à la hausse des températures projetée sur le territoire. L'ampleur de la diminution varie en fonction des projections. Le nombre annuel de jours avec *HDD*>0 est de l'ordre de 250-325 jours sur la période historique. Sous RCP 4.5, la fréquence se situe entre 200 et 300 jours/an (resp. 200 et 275 jours/an), toutes projections confondues en milieu de siècle (resp. en fin de siècle). Les diminutions de fréquence annuelle de jours avec *HDD*>0 les plus significatives concernent les projections en fin de siècle sous RCP 8.5 avec, pour le contexte le plus extrême décrit par la projection MIROC-ESM-AORI (Tableau 2, page 9), une fréquence réduite à 125-175 jours/an.

Toutes choses égales par ailleurs, la demande en hydroélectricité pendant la période hivernale devrait diminuer sensiblement du fait de la hausse des températures.

### 5.3.2. Demande en eau pour l'irrigation

Le modèle ADEAUMIS a été appliqué tel quel, avec pour données d'entrée les six projections climatiques pour estimer les demandes en eau unitaires et des surface irriguées maintenues au niveau actuel et estimées à 265 km<sup>2</sup> (moyenne des volumes prélevés selon la BNPE divisés par les demandes unitaires modélisées sur la période 2009-2019). Le modèle permet d'apprécier l'évolution :

- De la date de semis,
- De la durée de croissance (nombre de jours entre le stade de la plante de 10 à 12 feuilles et le stade de maturation des grain (humidité de grain de 50% atteinte) et la durée totale de la saison d'irrigation,
- Des dates et doses apportées (tours d'eau).

Ici, nous avons opté pour une période en temps présent différente des analyses précédentes, du fait de la disponibilité des données de la BNPE et d'un exercice de modélisation engagé plus récemment que celui concernant l'hydrologie. La période historique couvre la période 2000-2019 (baptisé « 2010 » dans la suite). Les horizons choisis pour le futur restent identiques. Le Tableau 9 fournit des statistiques sur les volumes annuels et leur variabilité interannuelle et la Figure 33 leur répartition durant la campagne d'irrigation. Les statistiques sont des statistiques temporelles (minimum, médiane et maximum sont calculés sur les 20 valeurs, correspondant aux 20 années des périodes considérées).

La confrontation des données de la CACG et de la BNPE aux résultats d'ADEAUMIS alimenté par SAFRAN et les modèles climatiques désagrégés, permet de vérifier la cohérence des valeurs estimées en temps présent à l'échelle de la campagne d'irrigation (à noter une légère tendance à une sous-estimation des demandes en eau par ADEAUMIS). Les simulations montrent des évolutions sensibles des demandes en eau pour l'irrigation : les hausses sont de l'ordre de 10% pour les modèles sous RCP4.5 aux deux horizons, tandis que les projections sous RCP8.5 suggèrent une augmentation de 10% en milieu de siècle qui se poursuit pour atteindre 20% en fin de siècle. La répartition de la demande saisonnière n'évolue pas sensiblement avec un pic en août.

	2010			2050			2090		
	min	médiane	max	min	médiane	max	min	médiane	max
CACG	27.1	53.9	80.7						
BNPE	35.5	58.6	79.0						
SAFRAN	36.1	57.2	72.7						
CNRM-CM5	36.8	50	71.6	38.7	54.1	64	43.3	56	73.6
MIROC-ESM AORI	34.5	53.9	71.1	41.1	62.9	97.1	34.4	50.5	85.6
MRI-CGCM3	38.2	55.5	68.4	38.1	54.5	86.1	46.4	58.1	67.6
bcc-csm1.1	36.8	50.4	71.8	41.9	54.3	75.9	29.6	55.6	68.1
inmcm4	35.6	52.2	70.2	29.8	55.1	70.8	42	57.3	71.8
MPI-ESM-MR	37.8	56	71	45.7	56.1	84.4	44.9	54.9	73.3
CNRM-CM5	36.8	54.6	77.8	37.9	55.4	76.4	36.7	63.2	100.4
MIROC-ESM AORI	36	54.7	75.5	30.2	68.1	121.7	32.8	63.3	109.3
MRI-CGCM3	39.8	56.4	64.3	34.7	55.8	69.8	43.4	58.8	85.9
bcc-csm1.1	36.8	54.7	81.2	37.2	59.6	88.8	36.2	67.5	95.9
inmcm4	41	53.8	79.3	36.3	57.5	78.4	42.1	58.2	72.1
MPI-ESM-MR	37.8	53.7	83.3	43.1	62.8	121.2	47.9	68.8	120

Tableau 9 : Statistiques de volumes annuels de demande en eau pour l'irrigation aux différents horizons et pour les différentes projections

Sous climat modifié, il n'y a pas d'évolution notable de la date de semis (ceci étant lié en partie aux valeurs prescrites dans le modèle) : elles évoluent entre le 20 avril et le 20 mai quels que soient l'horizon et le RCP considérés. Par comparaison des résultats 2010 à ceux obtenus aux deux horizons pour les deux RCPs, on observe une tendance à la diminution de la durée de croissance et corrélativement de la durée de la saison d'irrigation, du fait de l'élévation des températures. Enfin, ADEAUMIS suggère un début d'irrigation plus précoce, une durée de la campagne d'irrigation plus courte et une demande en eau d'irrigation plus élevée. Le début plus précoce des activités d'irrigation est dû à un climat plus chaud dans le futur qui fait que le maïs atteint le stade de 10-12 feuilles (le point de départ de l'irrigation) plus rapidement que dans la période historique. L'augmentation de la demande en eau d'irrigation est attribuée à la diminution projetée des précipitations en été et à l'augmentation de l'évapotranspiration de référence qui rend le maïs plus exigeant en eau. Le cycle végétatif est quant à lui raccourci jusqu'à une certaine limite (la croissance pour le maïs est bornée lorsque la température excède 31°C) et cette réduction ne compense pas les besoins induit par des déficits hydriques (précipitation – ETP) accrus. In fine, les demandes en eau unitaires sur l'année sont en hausse.

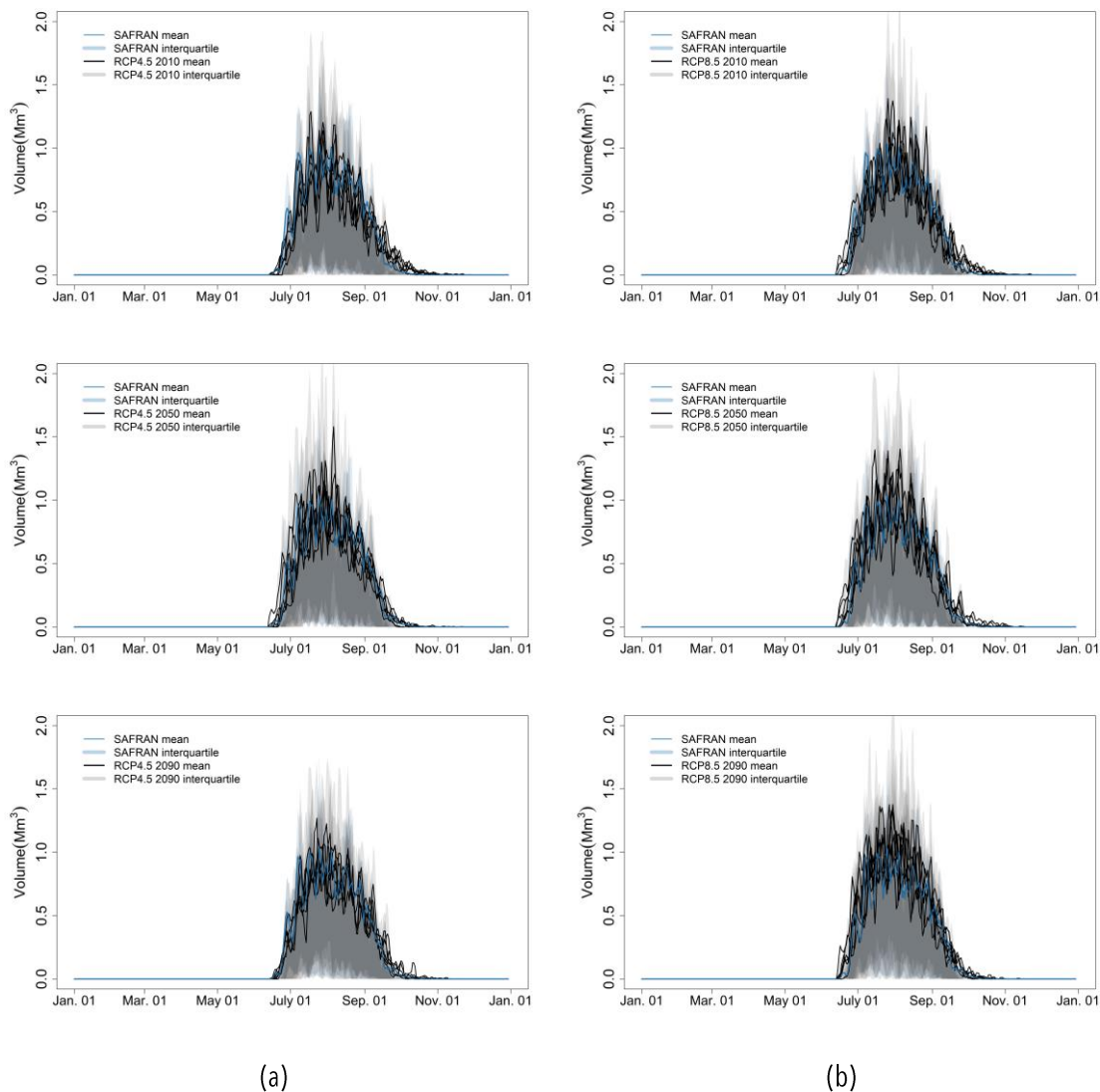


Figure 31 : Evolution de la demande totale en eau d'irrigation des rivières de Gascogne estimée par ADEAUMIS alimenté par SAFRAN et à différents horizons et pour les deux RCPs 4.5 (a) et 8.5 (b)

### 5.3.3. Demande en eau pour l'eau potable

Nous supposons que la demande unitaire et le rendement des réseaux n'évoluent pas et donc que la demande en AEP est uniquement conditionnée par la démographie et les travaux de l'INSEE. Nous avons repris le scénario central d'évolution de la population (<https://www.insee.fr/fr/statistiques/2859843>) et appliqué les tendances envisagées sur le département du Gers entre 2013 et 2050 (évolution de 190 000 à 217 000 habitants entre 2013 et 2050). Rétrospectivement, la tendance de population a été prolongée aux années avant 2013 de manière totalement subjective. Au-delà de 2050, nous considérons une population stabilisée même si un infléchissement est suggéré dans (<https://www.insee.fr/fr/statistiques/5893969>). Finalement, la demande en eau totale des rivières de Gascogne augmente de manière linéaire entre 0.25 m<sup>3</sup>/s en 1961 à 0.36 m<sup>3</sup>/s en 2050 et au-delà. En 2021, ce prélèvement est estimé à 0.3 m<sup>3</sup>/s.

### 5.3.4. Demande en eau pour l'industrie

Le prélèvement principal en eau industrielle actuel est celui de la société ARKEMIA. Nous supposons que ce prélèvement sera le seul significatif et qu'il perdurera à hauteur de 0.338 m<sup>3</sup>/s.

### 5.3.5. Demande en eau pour les milieux

La demande environnementale s'exprime majoritairement par le différentiel entre le débit naturel produit par les rivières de Gascogne et la somme des DOE.

D'autres contraintes environnementales existent, celles liées à la gestion des réservoirs de piedmont. Les volumes requis sont déduits des données fournies par la CACG et estimés par des régressions quantiles ajustées indépendamment pour chaque saison. Les variables explicatives sont le volume total dans les réservoirs de piedmont et le débit naturel produit par les rivières de Gascogne.

La chronique de demande en eau est construite à partir du maximum entre le différentiel et le débit exprimant la contrainte environnementale au niveau des réservoirs de piedmont.

La Figure 32 illustre la demande annuelle moyenne pour chaque horizon et le Tableau 10 la dispersion induite par les six projections climatiques. La demande environnementale croît avec l'horizon. En fin de siècle, la hausse reste contenue à 20% avec le RCP4.5 et elle double quasiment pour le RCP8.5. Les graphiques de la Figure 33 représentent la demande moyenne pour chacun des 365 jours de l'année pour chaque modèle climatique et l'enveloppe caractérise la variabilité temporelle aux différents horizons temporels pour les deux RCPs. Les graphiques montrent qu'en fin de siècle la demande environnementale est quasi égale à la somme des DOE (5.5 m<sup>3</sup>/s) en été et s'en approche (7.0 m<sup>3</sup>/s) en hiver, en cohérence avec des débits naturels très faibles (Figure 30, page 36) ; cela signifie que les DOE ne peuvent être garantis que si les apports des différents réservoirs sont suffisants.

		min	médiane	max
SAFRAN	2000	2		
HIST		1.82	1.91	2.15
RCP4.5	2050	2.17	2.32	2.74
	2090	2.17	2.40	2.78
RCP8.5	2050	2.16	2.66	3.21
	2090	2.62	3.93	4.39

Tableau 10: Evolution des moyennes interannuelles des débits annuels nécessaires pour garantir la demande environnementale à différents horizons et pour les deux RCPs 4.5 et 8.5

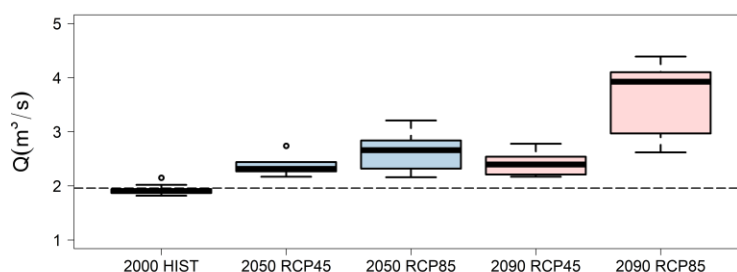


Figure 32: Evolution des moyennes interannuelles des débits annuels nécessaires pour garantir la demande environnementale à différents horizons et pour les deux RCPs 4.5 et 8.5 (les droites en pointillé indiquent les valeurs extraites de la réanalyse SAFRAN)

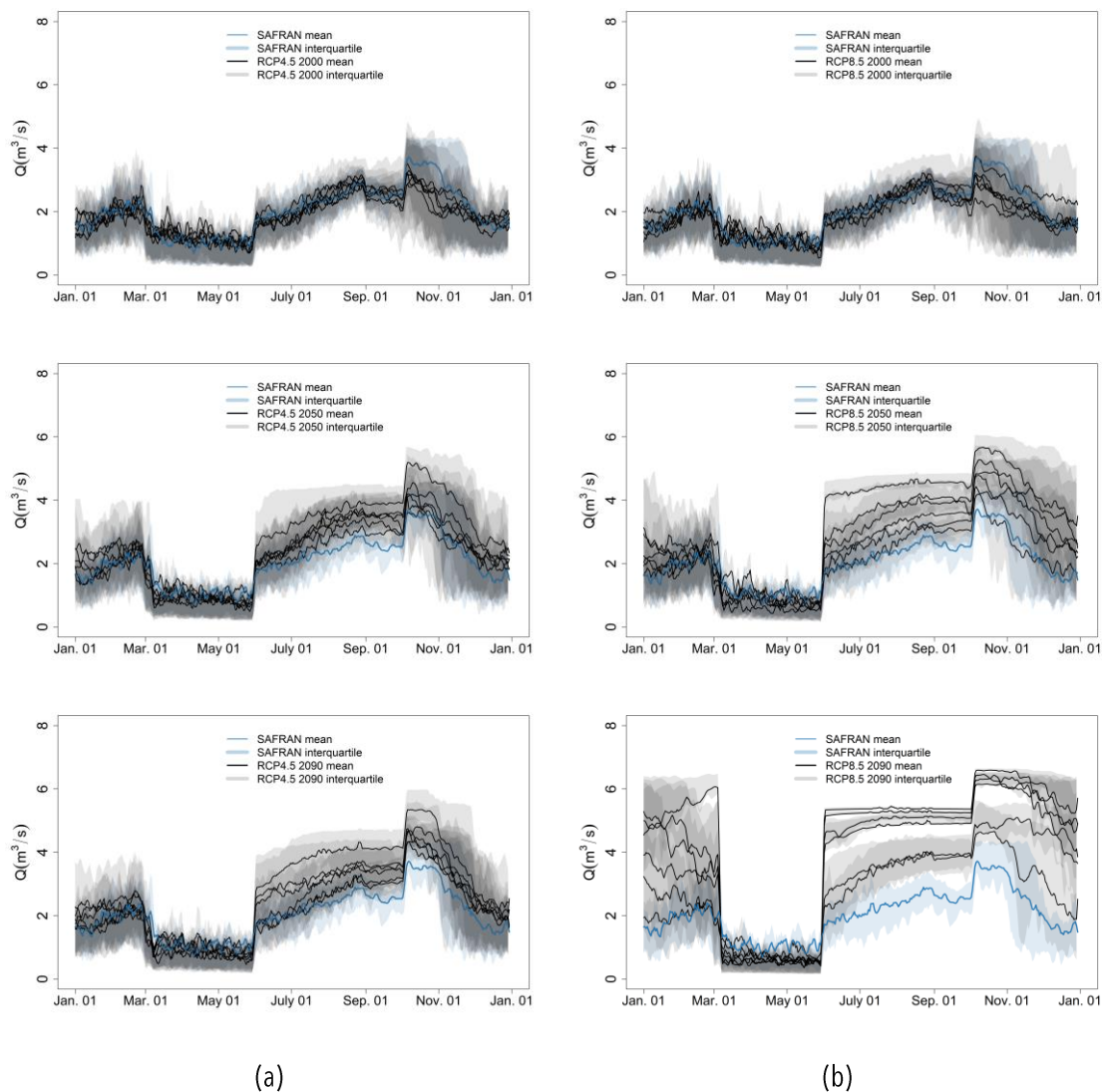


Figure 33 : Evolution de la demande totale en eau pour le respect des débits réglementaires à différents horizons et pour les deux RCPs 4.5 (a) et 8.5 (b)

### 5.3.6. Gestion

Les demandes et ressources en eau futures sont fortement impactées par le changement climatique, ce qui va mettre à rude épreuve la gestion de l'eau sur le système Neste. Les briques du modèle de gestion développé par Huang (2022) ont été reprises sans modification des paramètres. Dans la suite du document, nous désignerons un mode de gestion de référence sous la dénomination **G-0 M-0 DOE100** ; d'autres contextes envisagés après discussion avec les acteurs seront envisagés, pour mesurer l'effet de leviers.



## 6. Mise au point et évaluation de scénarios d'adaptation

La formulation de stratégies d'adaptation au changement climatique est particulièrement difficile du fait notamment des incertitudes associées à ces phénomènes. En effet, les incertitudes relatives à l'ampleur des changements climatiques en fonction des scénarios d'émission et leurs impacts sur les précipitations et l'hydrologie, sont très importantes. Il est par conséquent difficile d'identifier les meilleures actions sachant que certaines actions pourraient notamment s'avérer inefficaces si les conditions attendues ne se réalisent finalement pas ou se réalisent plus ou moins tardivement dans le temps. Il est de plus difficile de se projeter sur des stratégies de long terme (+ de 20 ans) et d'envisager la mise en œuvre d'actions de rupture qui peuvent être nécessaires à l'adaptation à certains scénarios climatiques. La plupart des documents stratégiques d'adaptation restent d'ailleurs d'une dimension temporelle courte peu compatible avec la temporalité du changement climatique. La planification à des échelles temporelles plus longues peut néanmoins s'avérer nécessaire étant donné les coûts associés à certains investissements, la durée de leur exploitation, etc.

Différentes méthodes ont été proposées pour formuler des stratégies d'adaptation en contexte d'incertitude. Dans le cadre de ce projet, il a été décidé de tester de façon pilote la méthode des « Trajectoires Dynamiques de Politiques Adaptatives » (TDPA) (Hasnoot, 2013).

### 6.1. Principe de la méthode TDPA et de son application au cas de la Neste

#### 6.1.1. Présentation de la méthode TDPA

La méthode TDPA a pour objectif de formuler des stratégies d'adaptation de long terme en situation d'incertitude. Son objectif est d'appuyer les décideurs à identifier des actions d'adaptation de court terme et des actions potentielles de long terme en caractérisant bien les seuils à partir desquels il est nécessaire de basculer d'une action à une autre, que nous appellerons ici critères de défaillance. Ce travail permet de mettre au point un plan qui caractérise les futurs possibles et les trajectoires d'actions qui peuvent être empruntées pour s'y adapter. Ce plan se traduit par une représentation visuelle des trajectoires qui facilite les interactions avec les acteurs (Figure 34).

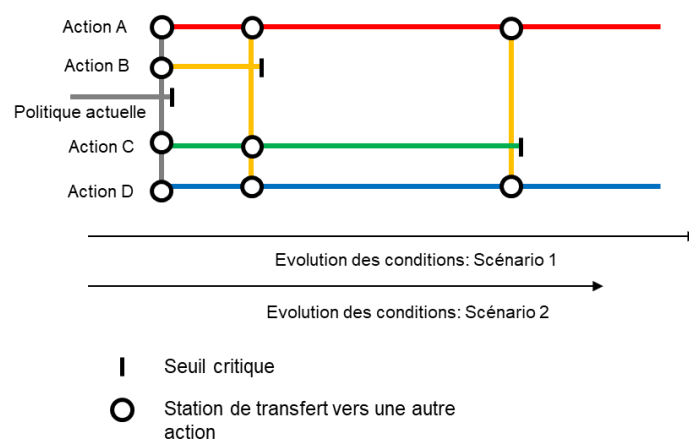


Figure 34 : Exemple de graphe de restitution de la méthode TDPA

Chaque action est évaluée en fonction de sa capacité à éviter l'atteinte d'un critère de défaillance du système (symbolisé par une barre qui termine le chemin). Une action qui atteint un critère de défaillance doit donc être abandonnée ou combinée à une autre avant l'atteinte de ce seuil. La séquence d'actions dans le temps représente une trajectoire d'adaptation. Ces actions sont évaluées selon différents scénarios (axes horizontaux) qui représentent l'évolution dans le temps des conditions du système. Dans le cas de l'adaptation au changement climatique, ces scénarios représentent généralement différents scénarios d'évolution du climat : plus le scénario est pessimiste plus les critères de défaillance sont atteints tôt dans le temps.

Les trajectoires qui satisfont le ou les critères de défaillance, peuvent également être évalués selon des critères d'évaluation combinés dans une approche multicritère. On pourra en effet préférer une solution plus coûteuse si elle permet par ailleurs de réduire les déficits entre DOE et débit.

Les étapes de la mise en œuvre de la méthode sont normalement les suivantes :

1. Description du système, des principaux objectifs de gestion et identification des sources d'incertitude à combiner sous forme de scénarios,

2. Identification des critères de défaillance et des critères d'évaluation des actions et trajectoires,
3. Caractérisation de la vulnérabilité actuelle du système selon les critères de défaillance et les différents scénarios,
4. Identification des actions d'adaptation possibles,
5. Evaluation des actions selon les critères de défaillance et les critères d'évaluation,
6. Mise au point des trajectoires possibles (qui satisfont la non atteinte des critères de défaillance) en identifiant les combinaisons d'actions possibles et les délais nécessaires pour passer d'une action à une autre,
7. Sélection de trajectoires préférées selon les critères d'évaluation et formulation d'un plan d'adaptation avec indicateurs de suivi permettant d'anticiper l'arrivée éventuelle des seuils de défaillance,
8. Mise en place d'un plan adaptatif.

Ces différentes étapes impliquent une participation des acteurs qui représentent les différents intérêts du territoire à l'ensemble des étapes du processus. Il est à noter que les étapes 3 et 5 requièrent des capacités de modélisation importante afin de caractériser la vulnérabilité actuelle et future du système et l'impact des actions sur cette vulnérabilité ainsi que sur les critères d'évaluation. Une partie des critères peut être toutefois évaluée à dire d'expert.

### 6.1.2. Application dans le cas du système Neste

Comme mentionné précédemment l'ambition de ce projet était de réaliser une étude pilote afin de tester les potentialités de la méthode TDPA. Cette étude était également de dimension limitée en terme de financement. Afin d'adapter la méthode, les choix suivants ont donc été réalisés :

- Implication d'un nombre limité d'acteurs. Afin de faciliter le travail de concertation et étant donné le caractère exploratoire de l'étude, il a été décidé d'impliquer des acteurs ayant une bonne expertise sur le territoire mais d'éviter la participation de groupes d'intérêts,
- Exigences de la modélisation. La modélisation de la gestion du système Neste représente une complexité forte due à la diversité des usages du territoire et aux modalités de gestion associées. Cette difficulté a conduit à se focaliser uniquement sur l'évaluation des critères de défaillance sans possibilité de caractériser les critères d'évaluation. Seule une partie des actions d'adaptation a été choisie afin de pouvoir modéliser leurs impacts,
- Seules les étapes 1 à 5 ont pu être réalisées et partiellement l'étape 6 étant donné les contraintes énoncées plus haut.

La consultation des acteurs a porté essentiellement sur la compréhension des enjeux du système, l'identification des critères de défaillance et l'identification des actions d'adaptation.

Il était initialement prévu de réaliser deux ateliers en présentiel mais suite à la crise COVID, une première série de cinq entretiens a été réalisée de mars à juin 2020 (AEAG, SHEMA, OFB, CACG, CG32) suivie d'un atelier en distanciel le 5 novembre 2020 (compte-rendu en Annexe 1). Trois entretiens ciblés sur des aspects techniques ont été réalisés en 2021 avec la CACG et INRAE. La liste des entretiens est présentée en Annexe 2. Un atelier de restitution des résultats doit encore être réalisé en 2022.

## 6.2. Expression de la vulnérabilité et de défaillance du système

Cette section cherche à identifier des indicateurs pouvant exprimer les défaillances de la gestion de l'eau dans le système Neste. Certains sont facilement accessibles : ceux à portée réglementaire. D'autres ont pu être récoltés après enquêtes et discussions auprès des acteurs du territoire.

### 6.2.1. Indicateurs de suivi du Plan de Gestion des Etiages

Les indicateurs (Tableau 11) utilisés et calculés annuellement caractérisent la campagne de soutien d'étiage et sont présentés dans un rapport technique annuel produit par la CACG. Inscrits, dans le cahier des charges relatif au suivi et à l'évaluation des Plans de Gestion d'Etiage (PGE) édités par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, ils font, pour certains, référence à des débits de consigne (valeurs seuils qui caractérisent les cours d'eau vis-à-vis de la sévérité des étiages, Tableau 12). Ces indicateurs renseignent les conditions climatiques et hydrologiques, la pression sur la ressource en eau et le niveau de défaillance constaté par rapport aux exigences de gestion énoncées dans le Plan de Gestion des Etiages.

Indicateur	Définition	Mode de calcul
C1	La pluviométrie de pré-étiage (de novembre à mai inclus) explicative des conditions de reconstitution des ressources	Rapport à la moyenne transformé en quantiles répartis de 0 à 5 par classe équiprobable de 20%
C2	La pluviométrie d'étiage (juin à octobre inclus) explicative de la sévérité des étiages	Rapport à la moyenne transformé en quantiles répartis de 0 à 5 par classe équiprobable de 20%
C3	Le différentiel ETP-P (juin à septembre inclus) caractérisant l'importance de la demande agronomique susceptible d'être couverte par des apports d'irrigation	Rapport à la moyenne transformé en quantiles répartis de 0 à 5 par classe équiprobable de 20%
ISE	Indice de sévérité d'étiage Neste et rivières de Gascogne juin à octobre	Quantiles répartis de 0 à 5
C4	Le volume mobilisable en Mm <sup>3</sup> (début campagne)	Quantiles répartis de 0 à 5
C5	Le niveau des réservoirs (volume total sur la capacité totale en %)	Quantiles répartis de 0 à 5
C8	Les surfaces irriguées et assolements	Quantiles répartis de 0 à 5
R1	Le nombre de jours au cours desquels le débit moyen journalier mesuré a été inférieur au débit objectif (DOE, Débit Objectif Complémentaire DOC ou Débit Seuil de Gestion DSG)	La valeur maximale de 5 est attribuée si aucun dépassement de DOE n'est observé. La répartition est faite entre 4 et 5
R2a	Le nombre de jours au cours desquels le débit moyen journalier mesuré est inférieur à 80 % du DOE ou du DSG	La valeur maximale de 4 est attribuée si aucun dépassement de 80% de DOE n'est observé mais que des dépassements de DOE ont été observés. La répartition est faite entre 3 et 4.
R2b	Le nombre de jours au cours desquels le débit moyen journalier mesuré est inférieur au Débit De Crise DCR ou équivalent	La valeur est de 5 si aucun dépassement de DOE n'est observé. Dans le cas contraire la valeur est de 4 si aucun dépassement de 80% du DOE n'est observé. La répartition est faite entre trois classes équiprobable 33%.
R3	Le débit minimal sur 10 jours consécutifs (VCN10) sur l'année	
R4	Le déficit cumulé ou volume manquant pour combler la différence entre débit mesuré et les débits objectifs (DOE ou DSG) sur la période de gestion	
R9	Les prélèvements autorisés en volume et débit	
R11	Les prélèvements agricoles contractualisés l'année considérée	
R12	Les prélèvements réels mesurés	
R14	Les dépassements des quotas contractuels	
R15	Les prélèvements Eau Potable	
R16	Les prélèvements industriels	

*Tableau 11: Liste des indicateurs retenus pour le suivi du Plan de Gestion des Etiages de la Neste et des rivières de Gascogne. Les Débits Objectifs Complémentaires (DOC) sont des débits de référence fixés par le PGE en plus des points nodaux du SDAGE*

Cours d'eau	Station de référence	DOE (m <sup>3</sup> /s) Étiage	DOE (m <sup>3</sup> /s) Hiver	QAR* (m <sup>3</sup> /s) Étiage	DCR** (m <sup>3</sup> /s)
Osse	Andiran	0.37	0.550	0.30	0.26
Bouès	Beaumarchés	0.212	0.300	0.1	0.14
Baïse	Nérac	1.11	1.620	0.80	0.65
Gers	Montestruc-sur-Gers	2.12	2.120	1.34	0.95
Arrats	Saint-Antoine	0.27	0.405	0.24	0.22
Gimone	Castelferrus	0.40	0.480	0.32	0.28
Save	Larra	0.67	1.005	0.51	0.43
Louge	Le Fousseret	0.19	0.285		0.1
Noue	Laffitte	0.10	0.150		0.18
Lavet	Confluent Garonne (Lavet télé mesure)	0.05	0.050		0.04
Basse Neste	Sarrancolin	4	4		3

Tableau 12: Points et débits de consigne (extrait de CACG, 2019) \* QAR = Débit d'Alerte Renforcé, \*\* DCR = Débit de CRise

## 6.2.2. Courbes de risque de défaillance et volumes de stockage

Les courbes de risque de défaillance définissent le risque de ne pas subvenir aux besoins jusqu'à la fin de campagne de soutien d'étiage avec le volume stocké au jour considéré dans l'année. L'État intervient pour baisser les quotas attribués aux usagers en cas de franchissement des valeurs seuils. Deux courbes-références, construites de manière empirique à partir d'un historique, sont considérées :

- La courbe CR1. Si le volume est sous cette courbe CR1, il y a une probabilité de 1 sur 3 de ne pas assurer les besoins pendant la campagne de soutien d'étiage. Son franchissement entraîne une réunion de la Commission Neste visant à prendre des mesures de gestion adaptées de nature à réduire ce risque sur les 2 à 3 semaines suivantes,
- La courbe CR2. Le principe est le même : la première étape a consisté à estimer le volume pour chaque jour de l'année sous lequel il y a une probabilité de 1 sur 2 de ne pas assurer les besoins pendant la campagne de soutien d'étiage et ces valeurs sont ensuite diminuées de 20%. Son franchissement entraîne, de la part des services de l'État, des mesures d'interdiction des prélèvements.

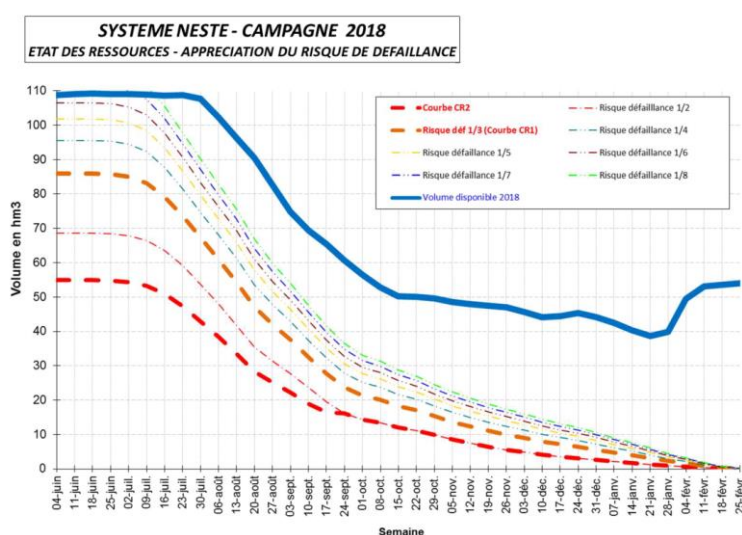


Figure 35 : État des ressources au sein du Système Neste durant la campagne 2018, extrait de (CACG, 2019)

## 6.2.3. La défaillance du système selon les acteurs et les critères d'évaluation des trajectoires

Les entretiens individuels réalisés en 2020 avaient conduit à l'identification d'une série d'indicateurs de défaillance. Ces indicateurs ont été mis en débat lors de l'atelier du 5 novembre 2020, puis affinés en une liste d'indicateurs potentiels de défaillance :

- **Débit de crise des rivières de Gascogne.** Maintien de débits au-dessus des débits de crise DCR dans les cours d'eau

de Gascogne, tels que définis dans l'arrêté interdépartemental de 2014 fixant un plan de crise pour la préservation de la ressource en eau sur le bassin de la Neste et les rivières de Gascogne ainsi que le débit de 4m<sup>3</sup>/s dans la basse Neste (3 m<sup>3</sup>/s pendant 90 jours maximum) et les besoins en eau potable. Il est admis que le critère devrait s'appuyer normalement sur les débits individuels de chaque rivière ; toutefois étant donné la capacité de modélisation, ce critère a été fixé sur la somme des débits de crise des rivières de Gascogne soit 3.25 m<sup>3</sup>/s en période d'étiage.

- **Volume minimal de remplissage des réservoirs de haute montagne et de piedmont.** Une fréquence de dépassement de CR<CR2 pendant plus de 50% de l'étiage plus de 1 année sur 2 a été initialement identifiée comme un bon indicateur de crise du système. En effet, l'atteinte de ce seuil conduirait à des restrictions, notamment agricoles, d'une ampleur telle qu'elle remettrait en cause la possibilité de maintenir une agriculture irriguée sur le système Neste et indirectement de maintenir le fonctionnement économique du périmètre irrigué. Les courbes CR1 et CR2 sont toutefois en cours de réexamen. Au final, l'absence de dépassement du seuil limite de 15 Mm<sup>3</sup> stockés dans les réservoirs au 15/09 (10 Mm<sup>3</sup> dans les réservoirs de haute montagne et 5 Mm<sup>3</sup> dans les réservoirs de Piémont) est considéré comme un bon indicateur de défaillance dans la mesure il permet d'assurer les besoins automne-hiver du système Neste en décennal sec. Il intervient de plus en fin de saison et témoigne d'une bonne gestion des réservoirs pendant l'étiage.
- **Volume minimal turbiné pour la production hydroélectrique** au cours de l'année permettant de générer les revenus nécessaires à la maintenance des réservoirs et barrages de haute montagne. Cet indicateur a été considéré important pour maintenir la pérennité du système Neste. Des gammes de volume annuel ont été fournies par la SHEM et ENGIE, mais ces chiffres sont incertains étant donné la fluctuation du prix de l'énergie.

Les critères d'évaluation permettant d'évaluer la préférence pour les différentes trajectoires ont également été identifiés :

- **Respect du DOE dans les rivières de Gascogne réalimentés** mesuré par le nombre de jours où les débits sont inférieurs au DOE durant la période d'étiage. La remarque sur la somme des débits, comme sur les débits de crise, s'applique également.
- **Satisfaction des besoins en irrigation.** Ce critère met l'accent sur la satisfaction des besoins agricoles sans la nécessité de mise en place de mesures. Dans la mesure où des restrictions sont mises en place dès l'atteinte de CR1, le nombre de jours en dessous de CR1 peut-être un bon moyen d'évaluer ce critère.
- **Indicateur biologique de la qualité des cours d'eau.** Bien que nous soyons dans l'incapacité de mesurer ces éléments dans le cadre du projet, ce type d'indicateur a été identifié comme important pour évaluer la gestion du système.
- **Valorisation économique des usages productifs de l'eau** (hydroélectricité et irrigation). Cet indicateur permet d'évaluer l'impact économique des actions d'adaptation.

## 6.2.4. Choix de critères de défaillance pour l'évaluation des actions d'adaptation

Sur la base de ces éléments, l'équipe de projet a fait des choix parmi les critères de défaillance identifiés basés principalement sur la faisabilité de la modélisation.

Les deux critères de défaillance qui ont été choisis sont :

- C1 : moins de 10 Mm<sup>3</sup> dans les réservoirs de montagne au 15 septembre,
- C2 : débit Objectif d'Etiage (DOE) en aval de la prise du Canal de la Neste non respecté pendant plus de 90 jours (moins de 3 Mm<sup>3</sup>).

Le seuil de défaillance a été fixé comme la dernière année T<sub>D</sub> de la première fenêtre mobile de 10 ans contenant deux défaillances. Ce seuil est calculé pour les six projections climatiques utilisées. La valeur médiane est finalement utilisée pour caractériser la défaillance masquant ainsi l'incertitude inter-modèle. Les indicateurs de défaillance basés sur le débit dans le système Neste n'ont pas pu être intégrés dans la modélisation. L'indicateur de volume minimal hydroélectrique a, quant à lui, été considéré d'une part comme trop fluctuant et d'autre part comme lié à une vision présente de la gestion du système Neste, la rentabilité du système pouvant être obtenue par d'autres biais dans le futur.

## 6.3. Leviers et scénarios d'adaptation potentiels

### 6.3.1. Leviers d'adaptation identifiés par les acteurs

Les entretiens ont permis d'identifier un nombre important d'actions d'adaptation possibles :

- Mesures agricoles

- **Action 1** : Substitution du maïs par rotation blé-tournesol,
- **Action 2** : Remplacement des variétés de maïs par des variétés plus précoces,
- **Action 3** : Révision à la baisse des volumes prélevables,
- **Action 4** : Développement des cultures de forte valeur ajoutée (semences, culture maraîchère) en substitution du maïs et soja,
- **Action 5** : Développement de l'agriculture de conservation,
- **Action 6** : Arrêt de l'agriculture irriguée,
- Mesures réglementaires
  - **Action 7** : Baisse des DOE sur le système Neste,
- Mesures économiques
  - **Action 8** : Paiement du soutien d'étiage environnemental aux hydroélectriciens,
  - **Action 9** : Rétribution des agriculteurs pour diminuer la consommation d'eau,
  - **Action 10** : Augmentation du prix de l'eau pour irrigation,
- Transferts
  - **Action 11** : Evolution de la gouvernance interbassin et transferts en situation de crise si disponibilité sur l'axe Garonne,
  - **Action 12**: Modification des transferts vers Cap de Long,
  - **Action 13** : Transferts d'eau entre usagers (marché de l'eau),
- Augmentation des ressources disponibles
  - **Action 14** : Valorisation des retenues d'eau existantes sous ou non utilisées,
  - **Action 15** : Améliorer la débitance des rigoles afin de faciliter le remplissage des retenues de piémont hors étiage,
  - **Action 16** : Création de nouvelles réserves ou augmentation de la capacité des réserves existantes.

Ces mesures n'ont cependant pas fait consensus lors de l'atelier du 5 novembre 2020. Il a ainsi été suggéré de travailler sur des familles d'action en fonction de leur impact sur la vulnérabilité et d'identifier les actions possibles à engager pour parvenir à ces impacts dans un deuxième temps. Les types d'impacts recherchés sont :

- Modification de la fonction « demande en eau » : atténuation du pic de demande en période d'étiage, baisse de la demande totale sans modification de la répartition... (actions associées : modifications des cultures, des variétés...),
- Augmentation des ressources totales par l'augmentation de la capacité de stockage (création de nouveaux réservoirs ou valorisation de réservoirs non exploités), la modification des transferts interbassins ou la capacité à remplir les réservoirs de piémont (débitance des rigoles),
- Modification de la répartition des ressources dédiées aux différents usages conduisant également à une modification de la fonction de demande (modification volumes prélevables, modification des prix de l'eau...).

### 6.3.2. Choix des actions d'adaptation à évaluer dans le cadre de la méthode TDPA

Dans cet exercice, nous avons pu évaluer l'impact d'un nombre limité d'actions d'adaptation, étant donné la complexité de la modélisation. Nous avons d'abord simulé l'impact de la gestion de crise simplifiée en cours de discussion dans le cadre des réflexions sur le Sage Neste et Rivières de Gascogne.

Deux actions relatives à la **gestion de crise** ont été testées :

- L'absence de mesure de gestion (**G-0**), le système garantit la fourniture de 48 Mm<sup>3</sup> dans le système Neste. Il s'agit d'un benchmark qui ne représente pas la situation actuelle.
- Les mesures de gestion de crise (**G-1**) simulées comprennent :
  - La diminution de la demande CACG auprès de la SHEMA de 20% si le volume des réservoirs de haute montagne ( $V$ ) est inférieur à 32 Mm<sup>3</sup> entre le 1er juin et le 31 juillet ou si  $V < 10$  Mm<sup>3</sup> après le 1er août. Les



diminutions sont obtenues par la réduction des quotas d'irrigation et/ou l'instauration de tours d'eau (impact des mesures précises non simulé),

- La dérogation DOE à Sarrancolin (3 m<sup>3</sup>/s) si  $V < 32 \text{ Mm}^3$  entre le 1<sup>er</sup> juin et le 31 juillet ou si  $V < 10 \text{ Mm}^3$  après le 1<sup>er</sup> août,
- L'arrêt de la production SHEM au 1<sup>er</sup> avril si  $V < 25 \text{ Mm}^3$ .

La dernière mesure a été intégrée dans la gestion de crise bien qu'il s'agisse en réalité d'une mesure non mise en œuvre actuellement et qui relève plutôt d'une forme d'adaptation. En effet, en raison du décalage temporel et de l'atténuation de l'onde de fonte, la gestion du remplissage des réservoirs SHEM sera forcément amenée à évoluer dans le futur (moins de turbinage en hiver et au début de printemps pour maintenir des volumes suffisant en début de période d'étiage). Cette mesure nécessiterait un travail d'investigation future.

Par ailleurs, **les actions d'adaptation** suivantes ont été testées :

- **Substitution** d'une part plus ou moins importante des surfaces de **maïs** par des surfaces de **tournesol** : le scénario **[M-0]** étant l'assolement agricole actuel versus **[M-50 et M-100]** correspondant à une baisse de la sole maïs au profit du tournesol de 50 et 100% respectivement. Pour ce faire, nous nous sommes inspirés des règles implémentées dans la plateforme MAELIA ; l'irrigation du tournesol est calculée sur celle du maïs durant le mois de juillet et nulle le reste du temps. Ainsi, le calcul de demande en eau pour l'irrigation en dehors de juillet reprend la demande en eau unitaire calculée par ADEAUMIS multipliée par la surface irriguée affectée d'un coefficient  $(1-X/100)$  avant le 1<sup>er</sup> juillet et après le 1<sup>er</sup> août, avec X le pourcentage de substitution par le tournesol,
- Baisse des exigences environnementales en matière de DOE sur les rivières du système Neste :
  - **[DOE-100]** Respect des DOE actuel,
  - **[DOE-80]** Baisse des exigences environnementales sur les rivières de Gascogne réalimentées de 20%.

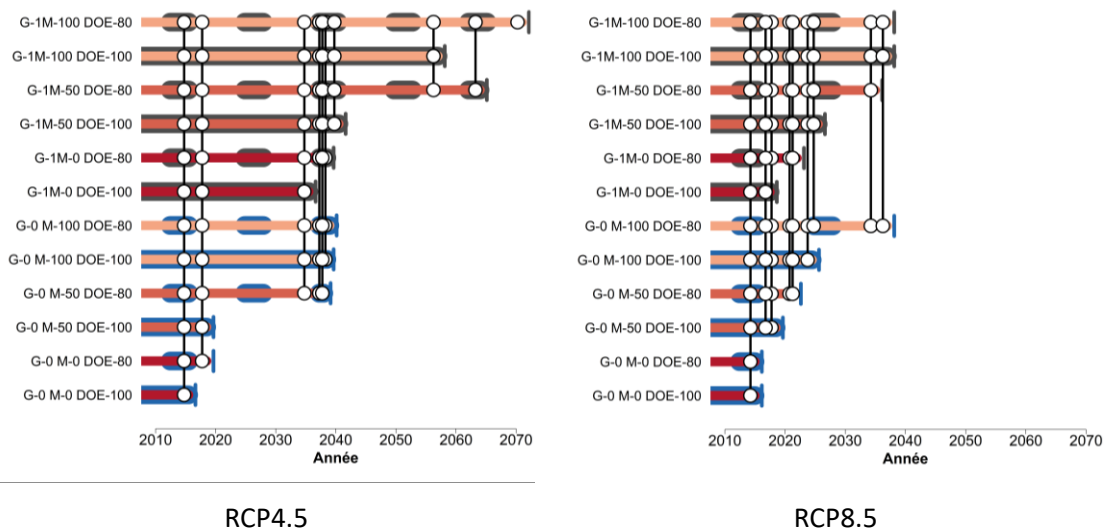
La première action modifie la fonction « demande en eau », la seconde s'inscrit dans une modification de la répartition des ressources dédiées aux différents usages, selon la typologie définie plus haut (cf. fin de la section 6.3.1)

### 6.3.3. Résultats sur l'identification de trajectoires d'adaptation

La Figure 36 montre les trajectoires d'adaptation selon la méthode TDPA pour le critère de défaillance C1 (- de 10 Mm<sup>3</sup> dans les réservoirs de montagne au 15 septembre) avec les résultats suivants :

- Les mesures de gestion de crise (G-1) mises en place actuellement, avec en plus une limitation de l'hydroélectricité en hiver, permettent d'éviter d'atteindre le seuil de défaillance uniquement dans le scénario RCP 4.5 (jusqu'en 2035). Si le scénario RCP 8.5 se vérifie, les résultats suggèrent que les seuils de défaillance sont déjà atteints et que des mesures d'adaptation supplémentaires plus structurelles doivent être mises en œuvre dès à présent. Il est donc nécessaire de suivre la situation afin d'établir dans quel scénario on se situe et de déclencher la mise en place de ces mesures rapidement s'il s'avère que le scénario RCP8.5 se confirme et dans la prochaine décennie dans le cas contraire.
- Les mesures de réduction de la sole de maïs irriguée permettent de reculer d'environ 5 à 10 ans l'atteinte des seuils de défaillance pour la réduction de moitié de la sole de maïs et de 20 ans pour l'arrêt du maïs, quelle que soit la projection climatique considérée. Sans autre mesure, le changement de la sole maïs, même la conversion totale vers une culture beaucoup moins exigeante en eau (le tournesol), permet d'éviter l'atteinte de seuil de défaillance jusqu'à 2060 en scénario RCP4.5 mais seulement en 2040 en scénario RCP8.5.
- L'impact de la réduction du seuil de DOE de 20% sur les rivières de Gascogne dépend plus fortement du scénario et des autres mesures d'adaptation mises en place. En l'absence de changement de la sole de maïs, la réduction des DOE réglementaires a un impact très faible sur la défaillance du système quel que soit le scénario climatique. C'est en combinaison avec une réduction de moitié de la sole de maïs que le changement de DOE a le plus d'impact notamment dans le scénario RCP4.5 (+25 ans) et dans une moindre mesure en scénario RCP8.5 (+10 ans). Enfin, en cas d'arrêt du maïs, la réduction du DOE permet de repousser l'atteinte du seuil de défaillance de 2055 à 2070 alors que ce changement n'a aucun effet sous RCP 8.5 plus extrême en termes de climat.





○ Station de transfert vers une autre action | Défaillance atteinte (médiane des  $T_D$  sur six projections climatiques)

Figure 36 : Trajectoires d'adaptation selon la méthode TDPA pour le système Neste pour le critère de défaillance C1 (moins de 10 Mm<sup>3</sup> dans les réservoirs de montagne au 15/09 plus de deux années sur dix) pour deux RCPs. Les légendes qui présentent les actions (en ligne) sont indiquées dans la section 6.3.2.

Quelles que soient les trajectoires d'adaptation y compris les plus radicales, présentant une modification profonde de l'activité agricole et une dégradation de la qualité environnementale des rivières de Gascogne, les modélisations prévoient une défaillance au plus tard en 2070 sous RCP 4.5 mais dès 2040 sous RCP 8.5. Il est donc nécessaire d'envisager et de tester d'autres mesures d'adaptation listées durant la phase de consultation. Il est toutefois à noter qu'il existe une forte dispersion entre les résultats des différentes projections climatiques qui est masquée par notre méthode de calcul du critère de défaillance.

### 6.3.4. Réflexion sur les potentialités de la méthode TDPA pour l'évaluation de stratégies d'adaptation à l'impact du changement climatique sur les ressources en eau

Dans ce projet, nous avons testé la mise en place de la méthode TDPA de façon expérimentale sur le territoire Neste et rivières de Gascogne pour estimer l'intérêt de cette approche pour la formulation de stratégies d'adaptation.

Tout d'abord la méthode n'a été mise en œuvre que de façon partielle et présente les limites suivantes :

- De nombreuses sources d'incertitude délicates à quantifier mais qui peuvent impacter sensiblement les résultats,
- Nous n'avons pas pu étudier les critères d'évaluation permettant de choisir parmi les trajectoires d'adaptation préférées et nous avons limité le travail à l'utilisation de critères de défaillance,
- La complexité du système Neste est indiscutable et certains éléments n'ont pas été finement modélisés (ex. prise en compte du rôle et de la gestion des réservoirs de piémont),
- Seul l'impact d'un nombre limité d'actions d'adaptation assez tranchées a pu être évalué.

L'application de la méthode TDPA a permis de tirer les leçons suivantes sur sa possible remobilisation dans d'autres contextes :

- L'application de la méthode nécessite un processus de consultation intense des acteurs aux différents stades de la mise en œuvre,
- La subdivision des stratégies d'adaptation en critères de défaillance et critères d'évaluation est une approche intéressante pour faire discuter les acteurs sur les priorités en matière d'adaptation et hiérarchiser les critères. Cette approche permet de créer un critère fort permettant de déterminer l'année à partir de laquelle une stratégie d'adaptation n'est plus adaptée. Cette approche associée à la mise en place de la représentation en « ligne de métro » a un potentiel intéressant en matière de communication sur la nécessité de mise en place de mesures d'adaptation,
- La méthode permet de tenir compte de la gamme des possibles en présentant l'atteinte des seuils de défaillance pour différents scénarios,

- La mise en œuvre de la méthode nécessite l'existence d'une approche de modélisation intégrée permettant d'évaluer la situation actuelle et les stratégies d'adaptation selon au minimum les critères de défaillance. Dans un contexte d'usages multiples de l'eau, comme dans le cas de la Neste, ce travail peut s'avérer extrêmement complexe et peut requérir des ressources très importantes.

## 7. Conclusion

Le changement climatique va profondément modifier l'hydrologie naturelle des cours d'eau du système Neste. Les précipitations et corrélativement les débits vont vraisemblablement diminuer sur l'ensemble du secteur. La hausse des températures va réduire sensiblement le manteau neigeux et avancer le pic de fonte dans les bassins versants de montagne. Cette hausse aura pour conséquence une augmentation sensible de l'évapotranspiration de référence en Gascogne. Les changements sont très marqués en fin de siècle avec le scénario d'émission le plus pessimiste (RCP8.5). Ces conclusions obtenues ici avec de nouvelles projections climatiques et de nouveaux outils de simulation rejoignent celles déjà établies dans de précédents projets.

Les usages de l'eau avec des demandes tributaires du climat et de l'hydrologie seront également impactés. En l'absence de changement de pratiques ou mode de consommation :

- L'hydroélectricité devrait moins mobiliser d'eau en hiver pour assurer les pointes de consommation pour le chauffage du fait d'une hausse des températures, et devrait être moins rentable,
- La hausse de l'évapotranspiration de référence traduit une augmentation des besoins en eau des plantes ; la demande en eau unitaire (ramenée à la surface) pour l'irrigation pour le maïs ou le soja sur la saison devrait augmenter même si les cycles sont plus courts,
- Si les règles actuelles pesant sur les points de consigne devaient être conservés, les volumes nécessaires au maintien des débits réglementaires dans les rivières de Gascogne devraient croître aussi du fait de débits d'étiage naturels plus faibles.

L'effet du changement climatique sur le fonctionnement du système Neste a été simulé avec un modèle empirique qui reproduit les grands traits du mode de gestion actuel, les demandes simulées, les contraintes techniques et la disponibilité en eau. La performance du système a été mesurée globalement au travers d'indicateurs de défaillance choisis après discussions avec les parties prenantes du système Neste. D'autres modalités (*i.e.* modification des débits réglementaires et de la sole) ont été envisagées en compléments pour qualifier des pistes ou trajectoires possibles d'adaptation.

Les résultats des simulations de la gestion de l'eau montrent un système en tension avec une difficulté à garantir les usages sur l'ensemble du XXI<sup>e</sup> siècle, que ce soit avec les pratiques actuelles ou avec les options d'adaptation testées. Les défaillances apparaîtront plus tôt sous scénario d'émission pessimiste (RCP8.5).

Les résultats obtenus ici apportent un premier éclairage sur les changements attendus et les risques de défaillance du système Neste. Le diagnostic final s'appuie sur des données, des outils et des hypothèses qui sont discutables, perfectibles ou empreints d'incertitude. L'ensemble est donc perfectible et l'étude n'a pas la prétention d'être complète.

Le modèle hydrologique a montré de bonnes performances sur un nombre réduit d'années (robustesse des valeurs affectées aux paramètres non acquise). Comme un seul modèle – GR6J – a été appliqué, il est impossible d'apprécier les incertitudes relatives au devenir de la ressource en eau. Les projections climatiques utilisées sont biaisées en termes de précipitations, ceci conduit à une vision très pessimiste des débits en amont de Sarrancolin. Le projet Explore2 (<https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1244>) pourrait fournir des projections climatiques et hydrologiques peut-être plus pertinentes d'ici fin 2023.

Les données relatives aux usages sont incertaines. C'est le cas, par exemple, des surfaces irriguées malgré la consultation de différentes sources. Les prélèvements sont mieux connus mais pas les consommations, ni le retour aux milieux. Une méthode suggérée par Richard (2020) serait de croiser le RPG et les périmètres des réseaux collectifs d'irrigation (désormais disponibles auprès des chambres régionales d'agriculture).

Le système Neste est très complexe et forcément, certains aspects de son fonctionnement ont pu être omis ou plus vraisemblablement mal représentés dans les modèles. ADEAUMIS s'appuie sur des enquêtes du début des années 2000 ; le secteur agricole a subi des évolutions depuis et les règles intégrées dans le modèle pourraient être mises à jour. En outre, ni les mesures de restriction, ni les rendements du réseau d'irrigation, ni les irrigations précoces ou tardives sur cultures d'hiver (blé, colza) ou semis de maïs n'ont pu être pris en compte faute de données précises. Comme pour l'hydrologie, un autre modèle pourrait être envisagé pour apprécier les incertitudes sur les prélèvements pour l'irrigation (par exemple, MAELIA, même s'il est proche conceptuellement de ADEAUMIS ou un modèle plus agronomique).

Des modèles empiriques – extrêmement simples – ont été mis en place notamment pour décrire le fonctionnement des réservoirs de piedmont ou du canal conditionnés aux saisons et leur pouvoir explicatif reste limité (d'autres déterminants et d'autres types de modélisation seraient à intégrer).

Nos hypothèses de travail sont forcément simplistes et discutables. Ainsi,

- Nous avons considéré que les besoins des milieux à venir étaient indépendants de l'hydrologie naturelle (100% des DOE avec [DOE-100] ou 80% des DOE actuels [DOE-80]), donc il y a une volonté de maintenir artificiellement des milieux dans le futur par réalimentation. C'est une hypothèse forte. Une autre option aurait été de faire évoluer les DOE en fonction de l'hydrologie naturelle mais c'est faire abstraction des débits minimums biologiques et des besoins de dilution pour la salubrité des eaux. Ces modifications de DOE sont purement « théoriques » car l'impact sur le milieu n'a pas été projeté ;
- Le devenir de l'hydroélectricité est en débat (Auverlot *et al.*, 2021). La structure de la demande d'énergie n'a pas été modifiée : un basculement vers plus de demande de refroidissement et moins de demande de chauffage n'est pas improbable, étant donné la tendance à la hausse de la température en France. L'hydroélectricité est centrale pour la gestion des points de demande ; c'est le mode de production le plus réactif pour gérer ces pics et, à ce jour, aucun autre moyen de production ne peut le concurrencer sur ce point. La place de l'hydroélectricité dans les énergies renouvelables n'a pas été abordée.

D'autres hypothèses pourraient être suggérées dans une étude complémentaire.

## 8. Remerciements

Ces travaux de recherche ont été menés avec le soutien de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne. Les développements des outils ont été réalisés dans le cadre de la thèse de P. Huang cofinancé par le projet PIRAGUA (Programme Interreg V-A Espagne-France-Andorre POCTEFA).

Merci à l'ensemble des acteurs de l'eau du territoire Neste que nous avons mobilisés dans le cadre de cette étude, pour leur disponibilité, le temps consacré, et l'expertise apportée.

Merci également à Delphine Leenhardt-Burger pour son aide dans l'application du modèle ADEAUMIS.

## 9. Références

- Allan, R., Pereira, L., Smith, M. : Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage, paper 56, volume 56, 1998.
- Amblar-Francés, M.P., Ramos-Calzado, P., Sanchis-Lladó, J., Hernanz-Lázaro, A., Peral-García, M.C., Navascués, B., Dominguez-Alonso, M., Pastor-Saavedra, M.A., Rodríguez-Camino, E. : High resolution climate change projections for the Pyrenees region. *Advances in Science and Research* 17, 191-208, doi:10.5194/asr-17-191-2020, 2020.
- Auverlot, D., Follenfant, P., Joly, A., Le Coz, C. : Conditions de mobilisation des retenues hydroélectriques pour le soutien d'étiage dans le bassin Adour-Garonne. Rapport du CGAAER n°19109 et CGEDD n°013099-01, 136 pages, 2021
- CACG : Plan de gestion des étiages de la Neste et des rivières de Gascogne, Rapport de suivi annuel 2018 -103 pages, 2019.
- Catalogne, C. : Fouille et valorisation des archives hydro-climatologiques de l'hydrosystème anthropisé Oule-Orédon. Rapport d'étude Icare<sup>2</sup>, 21 pages, 2020.
- CEDEX/MAPAMA : Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España, 2017.
- Chauveau, M., Chazot, S., Perrin, C., Bourgin, P.Y., Sauquet, E., Vidal, J.P., Rouchy, N., Martin, E., David, J., Norotte, T., Maugis, P., Lacaze, X.D. : Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ? *La Houille Blanche* 99, 5-15, doi:10.1051/lhb/2013027, 2013.
- Clemins, P.J., Bucini, G., Winter, J.M., Beckage, B., Towler, E., Betts, A., Cummings, R., Chang Queiroz, H. : An analog approach for weather estimation using climate projections and reanalysis data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 58, 1763-1777, doi:10.1175/JAMC-D-18-0255.1, 2019.
- Dayon, G., Boé, J., Martin, É., Gailhard, J. : Impacts of climate change on the hydrological cycle over France and associated uncertainties. *Comptes Rendus Geoscience* 350, 141-153, doi:10.1016/j.crte.2018.03.001, 2018.
- Dequesne, J., Portela, S. : Observatoire des services publics d'eau et d'assainissement. Technical Report. Office Français de la Biodiversité. France. URL: [https://www.services.eaufrance.fr/docs/synthese/rapports/Rapport\\_Sispea\\_2019\\_VF.pdf](https://www.services.eaufrance.fr/docs/synthese/rapports/Rapport_Sispea_2019_VF.pdf), 2019.
- Falgon, A. : Reconstitution des apports SHEM-reconstitution des apports naturels des groupement d'eget et du louron. Technical report, DI-SFA 2014-238-00, Compagnie Nationale du Rhône, 2014.
- Gascoin, S., Hagolle, O., Huc, M., Jarlan, L., Dejoux, J.-F., Szczypta, C., Marti, R., Sánchez, R. : A snow cover climatology for the Pyrenees from MODIS snow products. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19:2337-2351, <https://doi.org/10.5194/hess-19-2337-2015>, 2015.
- Gaudard, L., Gilli, M., Romerio, F. : Climate change impacts on hydropower management. *Water Resource Management*, 27:5143-5156, doi:10.1007/s11269-013-0458-1., 2013.
- Giorgetta, M.A., Jungclaus, J., Reick, C.H., Legutke, S., Bader, J., Böttinger, M., Brovkin, V., Crueger, T., Esch, M., Fieg, K., Glushak, K., Gayler, V., Haak, H., Hollweg, H.D., Ilyina, T., Kinne, S., Kornblueh, L., Matei, D., Mauritsen, T., Mikolajewicz, U., Mueller, W., Notz, D., Pithan, F., Raddatz, T., Rast, S., Redler, R., Roeckner, E., Schmidt, H., Schnur, R., Segschneider, J., Six, K.D., Stockhause, M., Timmreck, C., Wegner, J., Widmann, H., Wieners, K.H., Claussen, M., Marotzke, J., Stevens, B. : Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 5, 572-597, doi:10.1002/jame.20038, 2013.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., Martinez, G. F. : Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1):80 - 91, 2009.
- Haasnoot, M., Kwakkel, J. H., Walker, W. E., ter Maat J. : Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world, *Global Environmental Change*, 23(2):485-498, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2012.12.006, 2013.
- Hendrickx, F., Sauquet, E. : Impact of warming climate on water management for the Ariège river basin (France). *Hydrolog. Sci. J.*, 58(5):976-993, doi:10.1080/02626667.2013.788790, 2013.
- Kling, H., Fuchs, M., Paulin, M. : Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424-425:264 - 277, 2012.

- Leenhardt, D., Trouvat, J.-L. : ADEAUMIS, un outil pour estimer la demande en eau d'irrigation à l'échelle régionale - Exemple d'utilisation en temps de crise. *Revue Sciences Eaux & Territoires*, (40 Ingénieries-EAT), 37-50, <https://revue-set.fr/article/view/6059>, 2004.
- Leenhardt, D., Trouvat, J.L., Gonzalès, G., Pérarnaud, V., Prats, S., Bergez, J.E. : Estimating irrigation demand for water management on a regional scale I: ADEAUMIS, a simulation platform based on bio-decisional modelling and spatial information. *Agricultural Water Management* 68, 207-232, doi:10.1016/j.agwat.2004.04.004, 2004a.
- Leenhardt, D., Trouvat, J.L., Gonzalès, G., Pérarnaud, V., Prats, S., Bergez, J.E. : Estimating irrigation demand for water management on a regional scale II: validation of ADEAUMIS. *Agricultural Water Management* 68, 233-250, doi:10.1016/j.agwat.2004.04.003, 2004b.
- Lhuissier, L., Lamblin, V., Sauquet, E., Arama, Y., Goulard, F., Strosser, P. : Retour sur l'étude prospective Garonne 2050. *La Houille Blanche*, 6: 30-35, doi: <http://dx.doi.org/10.1051/lhb/2016057>, 2016.
- Maton, L., Leenhardt, D., Goulard, M., Bergez, J.E. : Assessing the irrigation strategies over a wide geographical area from structural data about farming systems. *Agricultural Systems* 86, 293-311, doi:10.1016/j.agry.2004.09.010, 2005.
- Soubeyroux *et al.* : Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole. Météo-France, <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/296>, 97 pages, 2020.
- Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V. : Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J. Hydrol.*, 279(1-4):275-289, doi: 10.1016/S0022-1694(03)00225-7, 2003.
- Pushpalatha, R., Perrin, C., Moine, N., Mathevet, T., Andréassian, V. : A downward structural sensitivity analysis of hydrological models to improve low flow simulation. *Journal of Hydrology*, 411, 2011.
- Quintana-Seguí, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., Morel, S. : Analysis of near-surface atmospheric variables: Validation of the SAFRAN analysis over France, *J. Appl. Meteorol. Clim.*, 47:92-107, doi:10.1175/2007JAMC1636.1, 2008.
- Quintana-Seguí, P., Turco, M., Herrera, S., Miguez-Macho, G. : Validation of a new SAFRAN-based gridded precipitation product for Spain and comparisons to Spain02 and ERA-Interim, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21:2187-2201, <https://doi.org/10.5194/hess-21-2187-2017>, 2017.
- Riboust, P., Thirel, G., Moine, N., Ribstein, P. : Revisiting a simple degree-day model for integrating satellite data: implementation of swe-sca hystereses. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 67(1):70-81, 2019.
- Richard, B. : Coupling agent-based and agro-hydrological modeling to represent human actions within an agro-hydrosystem. Application to collective irrigation in the Buëch catchment (France). Thèse AgroParisTech, 2020.
- RTE : Bilan électrique 2018, rapport RTE, 175 pages, 2019.
- Théron, O., Villerd, J., Taillandier, P., Gaudou, B., Murgue, C., Lacroix, B., Leenhardt, D. : La plateforme multi-agent MAELIA - modélisation et simulation des systèmes socio-agro-écologiques. *Dossiers d'Agropolis International - SYSTÈMES COMPLEXES - de la biologie aux territoires*, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03097516>, 2018.
- Vidal, J. P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., Soubeyroux, J. M. : A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system, *Int. J. Climatol.*, 30:1627-1644, doi:10.1002/joc.2003, 2010.
- Volodre, 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. : The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation. *Climate Dynamics* 40, 2091-2121, doi:10.1007/s00382-011-1259-y, 2013.
- Volodin, E.M., Dianskii, N.A., Gusev, A.V. : Simulating present-day climate with the INMCM4.0 coupled model of the atmospheric and oceanic general circulations. *Izvestia Atmospheric and Oceanic Physics* 46, 414-431, doi:10.1134/S000143381004002X, 2010.
- Watanabe, S., Hajima, T., Sudo, K., Nagashima, T., Takemura, T., Okajima, H., Nozawa, T., Kawase, H., Abe, M., Yokohata, T., Ise, T., Sato, H., Kato, E., Takata, K., Emori, S., Kawamiya, M. : MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geoscientific Model Development* 4, 845-872, doi:10.5194/gmd-4-845-2011, 2011.
- Wu, T., Li, W., Ji, J., Xin, X., Li, L., Wang, Z., Zhang, Y., Li, J., Zhang, F., Wei, M., Shi, X., Wu, F., Zhang, L., Chu, M., Jie, W., Liu, Y., Wang, F., Liu, X., Li, Q., Dong, M., Liang, X., Gao, Y., Zhang, J. : Global carbon budgets simulated by the Beijing



Climate Center Climate System Model for the last century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118, 4326–4347, doi:10.1002/jgrd.50320, 2013.

Yukimoto, S., Adachi, Y., Hosaka, M., Sakami, T., Yoshimura, H., Hirabara, M., Tanaka, T.Y., Shindo, E., Tsujino, H., Deushi, M., Mizuta, R., Yabu, S., Obata, A., Nakano, H., Koshiro, T., Ose, T., Kitoh, A. : A new global climate model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3 –model description and basic performance–. *Journal of the Meteorological Society of Japan, Ser. II* 90A, 23–64, doi:10.2151/jmsj.2012-A02, 2012.

## Annexe 1 : Compte-rendu de l'atelier du 05/11/2020 (réunion virtuelle, 13:00 – 17:00)

Participants : N. Dariba (SHEM), F. Goulard (AEAG), **P. Huang (INRAE)**, **Ph. Le Coent (BRGM)**, B. Leroy (SMEAG), **E. Sauquet (INRAE)**, J.-F. Moor (AEAG), L. Lhuissier (CACG), F. Gayou (OFB), K. Lieron (CG Gers)

Excusés : **J.-P. Vidal (INRAE)**

(En gras : les participants au projet)

Prise de notes et rédaction : Ph. Le Coent (BRGM), E. Sauquet (INRAE)

Ordre du jour :

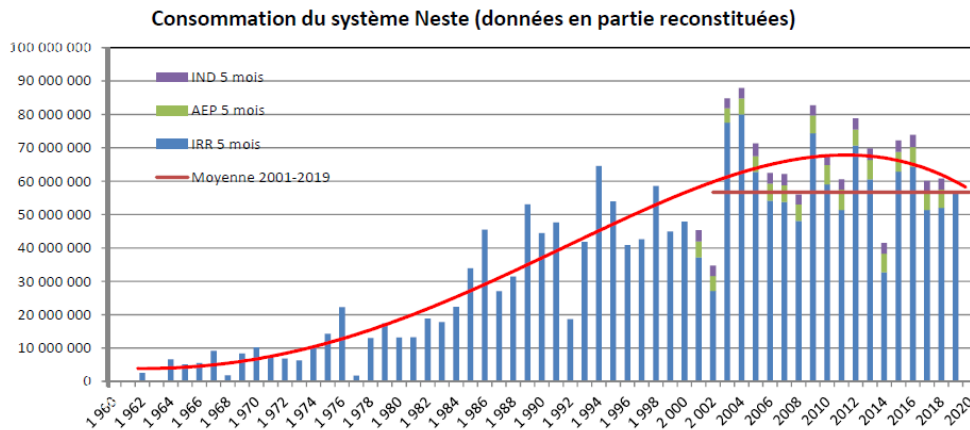
- Présentation générale de la méthodologie TDPA (15 minutes)
- Avancée de la modélisation INRAE (30 minutes)
- Indicateurs de vulnérabilité (45 minutes)
- Présentation et validation des indicateurs de vulnérabilité
- Identification des méthodes d'évaluation des indicateurs de vulnérabilité et données mobilisables
- Critères d'évaluation (45 minutes)
- Présentation et validation des critères d'évaluation
- Méthode d'évaluation de ces critères et données mobilisables
- Pause-café (15 minutes)
- Actions d'adaptation (45 minutes)
- Présentation et validation de la liste des actions
- Spécification des actions
- Identification de la temporalité potentielle des actions: court terme (5 ans), moyen terme (5-20 ans) et long terme (+20 ans)
- Méthodes mobilisables pour évaluer l'impact des actions d'adaptation
- Scénarios/incertitudes (30 minutes)
- Identification des principales sources d'incertitude pouvant affecter le système (dont changement climatique)
- Conclusions et suite de l'étude (15 minutes)
  
- **Relevé des points de discussion de la réunion**

Remarques sur les présentations générales (point 1 et 2)

Ne pas oublier la demande en eau industrielle sur le secteur qui représente un enjeu à ne pas négliger en plus de l'agriculture, l'AEP et l'environnement: le prélèvement principal en eau industrielle est celui de la société ARKEMIA (industrie chimique) à Barthe de Neste (65) qui s'élèvent à environ 8 Mm<sup>3</sup> par an avec une grande stabilité.

Les usages non préleveurs ne doivent également pas être négligés : navigation sur la Baïse, dilution des rejets de stations d'épuration.

Existence d'une dynamique passé-présent-futur avec une accélération des demandes pour l'adaptation au changement climatique ?



### Historiques des consommations du système Neste (Source : CACG)

Les données actuelles semblent révéler une stagnation des prélèvements d'eau depuis le début des années 2000, avec une variabilité interannuelle importante de la demande en eau d'irrigation en fonction des conditions météorologiques de l'année. Les participants signalent l'importance de modéliser l'évolution de la demande en eau dans le futur, consécutive à une adaptation aux changements climatiques (augmentation des températures, baisse des précipitations...).

Il est nécessaire de bien identifier les apports naturels sur les rivières de Gascogne et les apports du canal de la Neste (notamment vis-à-vis du remplissage des réservoirs de piémont). Les réservoirs de Piémont sont actuellement remplis grâce aux apports naturels des bassins naturels d'alimentation et à la dérivation du débit naturel de la Neste en hiver. En cas d'évolution de ces apports sous changement climatique, est-ce qu'il faudra solliciter les réservoirs de montagne pour remplir les réservoirs en hiver ?

Est-ce que les transferts vers l'extérieur du bassin sont pris en compte dans la modélisation INRAE (transfert vers Cap de long) ? Ils le sont par l'intermédiaire des débits réservés. Il n'y a pas de modélisation des besoins extérieurs au bassin (en amont du barrage d'Aubert).

- **Les indicateurs de vulnérabilité/défaillance**

Les indicateurs de vulnérabilité représentent des indicateurs relatifs au fonctionnement du système, auquel est associé une valeur numérique (un seuil) au-delà ou en deçà duquel le système est considéré comme non-fonctionnel. Suite à des discussions post-réunion, nous proposons d'utiliser le terme « indicateur de défaillance » plutôt que de « vulnérabilité », qui révèle la recherche de points de rupture futurs dans le fonctionnement du système Neste.

#### Indicateur 1 : Atteinte du débit de crise dans le système Neste

L'utilisation de la somme des Débits de CRise (DCR) définis dans l'arrêté de 2014 est reconnue comme un bon indicateur de défaillance. La somme des débits sous-tend néanmoins une hypothèse d'homogénéité des cours d'eau réalimentés en termes de fonctionnement hydrologique et masque des individualités et des axes à enjeu (ex. alimentation en eau potable de la ville d'Auch). Il est également rappelé que le DCR malgré ce qu'on attend de lui n'a pas été établi sur des débits biologiques. Dans le cadre de la modélisation, un zoom sur un axe n'est pas possible à ce stade.

Il faut s'appuyer sur les DCR des cours d'eau réalimentés en excluant les bassins autonomes. En théorie, cet indicateur doit de plus intégrer la satisfaction des besoins en eau potable et la satisfaction du débit dérogoire basse Neste (3 m<sup>3</sup>/s).

La somme des débits de crise en période d'étiage (en m<sup>3</sup>/s) s'obtiendrait à ainsi :

Cours d'eau	Station de référence	DCR
Save	Larra	0,43
Gimone	Castelferrus	0,28
Arrats	Saint-Antoine	0,22
Gers	Montastruc	0,95
Baïse	Nérac	0,65
Osse	Andiran	0,26
Bouès	Beaumarchés	0,14
Longe	Le Fousseret	0,1
Lavet	Confluent Garonne	0,04
Noues	Laffitte	0,18
Somme		3,25

*Indicateur 2* : Volume minimal turbiné au cours de l'année permettant de générer les revenus nécessaires à la maintenance des réservoirs et barrages.

Fréquence : à définir

Seuil : LOURON (Caillaouas, Pouchergues) : X Mm<sup>3</sup> ; EGET (Oule et Orédon) : Y Mm<sup>3</sup> (à définir avec la SHEM et ENGIE)

Cet indicateur a été considéré comme pertinent pour maintenir la pérennité des réservoirs de haute montagne. Il faudrait toutefois trouver un indicateur identique pour caractériser les seuils de rentabilité sur d'autres infrastructures telles que les réservoirs de piémont du système Neste, principalement conditionnées par le maintien d'une activité agricole rentable. Il a été toutefois décidé de tenir compte de cet aspect au travers la définition de l'indicateur 3.

Remarque: une aide au soutien d'étiage est actuellement versée par l'Agence de l'eau ; toutefois, cette aide sera amenée à diminuer dans le futur.

*Indicateur 3* : Volume de remplissage des réservoirs (CR) par rapport aux courbes de défaillance.

Une fréquence de dépassement de CR < CR2 (volume de défaillance une année sur 2) pour plus de 50 % de l'étiage plus de 1 année sur 2 semble être un bon indicateur de crise du système. En effet, l'atteinte de ce seuil conduirait à des restrictions, notamment agricole, d'une ampleur telle qu'elle remettrait en cause la possibilité de maintenir une agriculture irriguée sur le système Neste et indirectement de maintenir le fonctionnement économique du périmètre irrigué.

Il est à noter que des réflexions sont en cours, dans le cadre de la formulation du SAGE, sur la réactualisation des courbes CR1 et CR2. Notre étude devra donc autant que possible tenir compte de ces nouvelles données.

La fréquence de dépassement du seuil limite de 15 Mm<sup>3</sup> stockés dans les réservoirs au 15/09 est également un indicateur potentiellement intéressant à évaluer avec les modèles.

- **Les critères d'évaluation des trajectoires d'adaptation**

Les critères d'évaluation ne sont pas, à l'inverse des indicateurs de défaillance, des critères éliminatoires pour les stratégies d'adaptation. Il s'agit de critères qui permettent de **choisir les trajectoires d'adaptation préférables**. Il y a donc une forme de substituabilité entre ces critères. On pourra en effet préférer une solution plus coûteuse si elle permet par ailleurs d'assurer un meilleur soutien d'étiage. Le poids de ces critères dans le choix des stratégies d'adaptation devra par la suite être déterminé à travers le processus de consultation des acteurs dans une approche multicritère. Il est par ailleurs à noter qu'il ne s'agit pas de fixer de critères de type réglementaire mais plutôt de critères permettant de comparer différentes stratégies d'adaptation.

Une première réflexion à porter sur l'utilisation d'un indicateur relatif au DOE. Il a été rappelé que la règle pour le respect du DOE est en train de passer du seuil de VCN10 (débit moyen minimum sur 10 jours consécutifs) supérieur à 80% du DOE au QMNA (débit moyen mensuel) supérieur à 100% du DOE.

Dans une optique d'évaluation relative des stratégies d'adaptation, il a été proposé d'utiliser plusieurs indicateurs de débit : un critère relatif au nombre de jours où le débit est inférieur au DOE et un critère relatif au nombre de jours où les débits sont inférieurs au QAR (Débit d'Alerte renforcée).

Dans la même perspective que pour les débits de crise, l'idée est de sommer ces débits sur l'ensemble des cours d'eau réalimentés du système Neste.

La somme de ces débits en période d'étiage (en m<sup>3</sup>/s) s'obtiendrait ainsi (N.B. : certains cours d'eau n'ont pas de QAR) :

Cours d'eau	Station de référence	DOE en étiage	DOE Hors-étiage	QAR étiage
Save	Larra	0,67	1,005	0,51
Gimone	Castelferrus	0,4	0,480	0,32
Arrats	Saint-Antoine	0,27	0,405	0,24
Gers	Montastruc	2,12	2,120	1,34
Baïse	Nérac	1,11	1,620	0,80
Osse	Andiran	0,37	0,550	0,30
Bouès	Beaumarchés	0,212	0,300	0,10
Longe	Le Fousseret	0,19	0,285	
Lavet	Confluent Garonne	0,05	0,050	
Noues	Laffitte	0,1	0,150	
Somme		5,492	6,965	

- **Valorisation économique de l'eau**

Cet indicateur permet d'avoir une vision de la valorisation économique de l'utilisation de l'eau. Il sera difficile de valoriser l'ensemble des usages, l'évaluation se centrera donc probablement sur les usages directs marchands (agriculture, hydroélectricité). Il ne sera pas possible de générer de nouvelles données sur ce thème dans le cadre du projet. Il faudra donc s'appuyer sur des données extérieures. Il a été mentionné l'existence de plusieurs sources de données pouvant être mobilisées pour évaluer les stratégies d'adaptation sur ce critère : contact J.-F. Amen (CACG), études PTGE Adour et Midour (Agence de l'eau), étude ancienne DRAAF.

- **Satisfaction des besoins en irrigation**

Ce critère met l'accent sur la satisfaction des besoins agricoles sans la nécessité de mise en place de mesures de restriction. D'autres critères tels que la satisfaction des besoins en usage domestique, tourisme, et industriels pourraient être inclus. Ces critères sont importants pour l'évaluation des stratégies. Ils diffèrent des indicateurs similaires pour la défaillance qui eux cherchent à identifier des indicateurs de crise.

Dans la mesure où des restrictions sont mises en place dès l'atteinte de CR1. Le nombre de jours en dessous de CR1 peut être un bon moyen d'évaluer ce critère.

- **Indicateur biologique et de qualité des cours d'eau.**

Il a été rappelé que malgré l'importance de la question de la qualité de l'eau, il n'est pas possible de l'aborder dans les modélisations développées dans ce projet. La question des indicateurs biologiques est également difficile à aborder. Il a été suggéré de mesurer l'altération induite par la gestion sur les régimes hydrologiques : faire la part des altérations du changement climatique, des actions humaines dans l'appréciation, avec en référence l'état actuel (sans forcément considérer qu'il est satisfaisant).

- **Les actions d'adaptation**

Si dans un premier temps, l'approche avait consisté à identifier des actions individuelles, y compris des actions détaillées : substitution maïs par rotation blé/tournesol, développement de l'agriculture de conservation...

Il a été suggéré dans un premier de travailler sur des familles d'action en fonction de leur impact sur la vulnérabilité et d'identifier les actions à engager pour parvenir à ces impacts dans un deuxième temps. Les types d'impacts sont :

- Modification de la fonction de demande en eau : atténuation du pic de demande en période d'étiage, baisse de la demande totale sans modification de la répartition... (ex. par modifications des cultures, des variétés, etc.),
- Augmentation des ressources totales par l'augmentation de la capacité de stockage (création de nouveaux réservoirs ou valorisation de réservoirs non exploités), la modification des transferts interbassins ou la capacité à remplir les réservoirs de piémont (débitance des rigoles),
- Modification de la répartition des ressources dédiées aux différents usages conduisant également à une modification de la fonction de demande (modification volumes prélevables, modification des prix de l'eau, etc.).

En outre, on pourrait s'appuyer sur les travaux de Delphine Burger-Leenhardt (INRAE) réalisés pour l'Agence notamment sur la question des retenues collinaires.

Certaines actions ont été mentionnées comme potentiellement portant des messages qui peuvent représenter des actions non acceptables pour les acteurs du territoire : marché de l'eau, paiement du soutien d'étiage « environnemental », etc. Une attention particulière devra donc être portée à la sémantique utilisée. Il sera important ne pas orienter/préjuger des choix (ex. baisser un DOE ou augmenter le prix de l'eau) mais suggérer des changements (ex. faire évoluer le DOE ou le prix de l'eau). Il est toutefois important de pouvoir étudier des éventuelles actions de rupture à long terme qui posent potentiellement des problèmes d'acceptation : arrêt de l'irrigation, marché de l'eau, etc. ? Les documents de travail devront donc rester dans le cercle d'experts identifiés dans le cadre de cette étude pilote. Une attention particulière sera portée à cet aspect notamment dans les documents de synthèse diffusés vers l'extérieur à l'issue du projet.

- **Scénarios/sources d'incertitude**

Ce point n'a pas pu être discuté directement pendant la réunion. Les incertitudes relatives au climat ont été évoquées dans le support sur la modélisation en introduction de réunion. Certains éléments mentionnés dans d'autres points relèvent toutefois de cette section car les sources d'incertitude ne sont pas que d'origine climatique. Notamment des incertitudes pèsent sur le coût de l'eau selon l'évolution du coût énergétique des pompages et corrélativement sur le modèle économique de l'agriculture irriguée dans le système Neste.

## Annexe 2 : Liste des personnes contactées dans le cadre des entretiens individuels

Institution	Prénom, nom	Date
AEAG	Françoise GOULARD	03/06/2021
	Ludovic LHUISSIER	24/03/2020 ; 17/03/2021
CACG	Pascal CHISNE	24/03/2020 ; 17/03/2021
	Jean François AMEN	21/01/2021
	Daniel LEPERCQ	17/03/2021
	Damien LILAS	17/03/2021
CG32	Karine LIERON	04/06/2020
ENGIE	Natacha DARIBA	09/06/2020
	Benjamin TOTEL	09/06/2020
INRAE	Delphine LEENHARDT	21/04/2021
OFB	Francis GAYOU	04/06/2020
SHEM	Bertran LOOK	09/06/2020





**Centre Lyon-Grenoble - Auvergne-Rhône-Alpes**

**Site de Lyon-Villeurbanne**

**5 rue de la Doua - CS 20244**

**69625 Villeurbanne Cedex**

**Tel : +33 (0)4 72 20 87 87**

Rejoignez-nous sur :



<https://www.inrae.fr/centres/lyon-grenoble-auvergne-rhone-alpes>

