



Adaptation au changement climatique dans la gestion des ressources en eau des Pyrénées

Rapports scientifiques du projet PIRAGUA · Vol II

Beguería S., Antigüedad I., Cakir R., Domènech M. Haro-Monteagudo D., Huang P., Jódar J., Lambán L.J., Le Coent P., Le Roux G., Llasat M.C., Llasat-Botija M., Meaurio M., Palazón L., Pardo E., Pons M., Sans F., Sauquet E., Travesset O., Uriarte J., Valiente M., Vidal J.P., Zabaleta A., 2022. **Adaptation au changement climatique dans la gestion des ressources en eau dans les Pyrénées**. Rapports scientifiques du projet PIRAGUA, vol. 2. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Zaragoza, España, xx p.

DOI: <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14684>.

Coordination: Santiago Beguería (EEAD-CSIC)

Auteurs (par ordre alphabétique): Iñaki Antigüedad (UPV/EHU), Santiago Beguería (EEAD-CSIC), Roxelane Cakir (CNRS), Marta Domènech (AR+I), David Haro-Monteagudo (EEAD-CSIC), Peng Huang (INRAE), Jorge Jódar Bermúdez (IGME-CSIC), Luis Javier Lambán Jiménez Philippe Le Coent (BRGM), (IGME-CSIC), Gaël Le Roux (CNRS), María del Carmen Llasat (UB), Montserrat Llasat-Botija (UB), Maite Meaurio (UPV/EHU), Leticia Palazón (EEAD-CSIC), Erika Pardo (UB), Marc Pons (AR+I), Fabienne Sans, Eric Sauquet (INRAE), Oriol Travesset (AR+I), Jesus Uriarte (UPV/EHU), María Valiente (UPV/EHU), Jean-Philippe Vidal (INRAE), Ane Zabaleta (UPV/EHU)

Traduction: Maramara y S. Beguería

Edition graphique et mise en page: Samuel Barrena

Mentions légales

Les actualités et opinions contenues dans cet ouvrage n'engagent que leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement les opinions officielles des institutions auxquelles ils appartiennent ou du bailleur de fonds du projet. Ni les auteurs, ni les institutions auxquelles ils appartiennent, ni l'organisme de financement ne sont responsables de l'utilisation qui peut être faite des informations contenues dans cet ouvrage.

Droit d'auteur

Ce travail est sous [Licence Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Cette licence vous permet de copier et de redistribuer l'œuvre ou des parties de celle-ci sur n'importe quel support ou format et de remixer, transformer et développer son contenu, sous les conditions suivantes : licence, et indiquant si des modifications ont été apportées à l'œuvre originale ; utilisation non commerciale - l'œuvre ne peut pas être utilisée à des fins commerciales.

Prologue

Le changement climatique récent est l'une des principales menaces pour la durabilité des sociétés humaines et pour la santé écologique de notre planète. Les activités humaines, et en particulier l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, ont entraîné une perturbation de l'équilibre énergétique mondial dont l'effet le plus notable a été l'augmentation de la température de la planète à un rythme de 0,1 °C par décennie au cours des cent dernières années (IPCC, 2014). Les conséquences de ce réchauffement comprennent la fonte des glaciers dans les calottes glaciaires et les montagnes, l'élévation du niveau de la mer, une incidence accrue de vagues de chaleur, et très probablement des perturbations du système hydrologique, ainsi que des changements dans les systèmes biologiques.

Les rapports du GIEC, l'Accord de Paris ou les conférences de l'ONU sur le changement climatique témoignent de l'intérêt politique mondial pour entreprendre avec urgence des actions visant à atténuer le changement climatique. Malgré les difficultés politiques lors des phases de négociation et de mise en œuvre, ces réunions et accords témoignent de la forte détermination d'une partie importante des sociétés humaines à engager une transition vers une économie mondiale sans émissions de carbone permettant de ralentir ou de limiter le processus de réchauffement planétaire.

Les efforts en matière d'atténuation ne suffisent cependant pas à minimiser les conséquences négatives du changement climatique. Il est nécessaire, en parallèle des mesures d'atténuation, de développer des stratégies d'adaptation au changement climatique qui permettent de minimiser les risques que celui-ci représente pour les sociétés. Avec une approche beaucoup plus locale, le développement de stratégies d'adaptation doit partir d'une évaluation de la vulnérabilité de l'ensemble de la société ou de secteurs de celle-ci aux conséquences attendues du changement climatique. À cette étape, la recherche joue un rôle fondamental en raison de sa capacité à fournir des analyses et des modèles de vulnérabilité fiables et avec des informations sur le degré d'incertitude, c'est-à-dire à générer des informations fiables sur lesquelles fonder les bases permettant de développer des processus de prise de décision impliquant tous les secteurs de la société.

La réalisation et la diffusion de ce guide de synthèse des options d'adaptation s'inscrivent dans cet objectif plus général de développer un dialogue entre la science et la société, que nous considérons comme indispensable pour impulser une action efficace et partagée pour l'adaptation au changement climatique dans les Pyrénées.

Tabla de contenidos

1. Retos y oportunidades para la adaptación al cambio climático en la gestión de los recursos hídricos de los Pirineos

1

1.1. Relevancia regional de los recursos hídricos de los Pirineos, evolución reciente y perspectivas futuras	2
--	---

1.2 Los casos de estudio del proyecto de cooperación transfronteriza PIRAGUA	5
--	---

1.2.1 La competencia por los recursos hídricos en Andorra	7
---	---

1.2.2 Impactos del cambio climático en la gestión de embalses de producción hidroeléctrica: el caso de los valles de Nestes d'Aure y Louron	7
---	---

1.2.3 Adaptación al cambio climático en la agricultura de regadío: el caso de Riegos del Alto Aragón	8
--	---

1.2.4 Impactos del cambio climático en áreas de especial valor ambiental: presión turística, cambio climático y calidad ambiental en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido	9
---	---

1.2.5 Adaptación al cambio climático desde la gestión de la funcionalidad hidrológica del territorio: el caso de la cuenca del río Bidasoa	9
--	---

1.2.6 Transformation du territoire et dynamique hydrologique dans les têtes de bassin versant : le cas de la tourbière de Bernadouze en Ariège.	10
---	----

1.2.7 Impactos de las inundaciones y eventos extremos en los recursos hídricos de los Pirineos en un contexto de cambio climático.	11
--	----

1.3 Principios transversales de la adaptación al cambio climático	12
---	----

1.3.1 Importancia de los modelos de vulnerabilidad al cambio climático	12
--	----

1.3.2 Importancia de conocer los servicios ecosistémicos y promover soluciones basadas en la naturaleza	14
---	----

1.3.3 Importancia de considerar a todos los actores	15
---	----

2. Gobernanza de los recursos hídricos de los Pirineos y estrategias de adaptación

17

2.1. Gobernanza de los recursos hídricos de los Pirineos	18
--	----

2.1.1 Contexto institucional e histórico	18
--	----

2.1.2 Planes de gestión de cuenca y adaptación al cambio climático	20
--	----

2.2.1 Contexto internacional y europeo	23
--	----

2.2. Estrategias de adaptación al cambio climático con relación a los recursos hídricos	23
---	----

2.2.2 Planes nacionales de adaptación al cambio climático	24
---	----

2.2.3 Estrategias regionales y transfronterizas para la adaptación al cambio climático en los	
---	--

Pirineos	27
2.3 Conclusiones	31
3. La competencia por los recursos hídricos en la actualidad y su evolución futura: el caso del Principado de Andorra	33
3.1. Introducción	34
3.2. Retos del cambio climático y el cambio global con respecto a la competencia por los usos del agua, y opciones de adaptación	37
3.3. El ejemplo del Principado de Andorra	39
3.3.1 Efectos del cambio climático y el cambio global en el régimen hídrico	43
3.3.2 Afectaciones del cambio climático y el cambio global a las funciones ecosistémicas	44
3.3.3 Afectaciones del cambio climático y el cambio global al sector hidroeléctrico	45
3.3.4 Afectaciones del cambio climático y el cambio global en un tramo de río con alta competencia por el agua	47
3.3.5 Capacidad de adaptación	49
3.4.1 Población residente y turismo	52
3.4. Conclusiones	52
3.4.2 Agricultura	53
3.4.3 Producción de energía hidroeléctrica	53
3.4.4 Funciones ecosistémicas	54
4. Impacto del cambio climático en la gestión de los embalses de producción hidroeléctrica: el caso de los valles del Neste d'Aure y del Neste de Louron	57
4.1. Introducción	58
4.2. El impacto del cambio climático en la producción de energía hidroeléctrica y la gestión de los embalses	60
4.3.1 Adaptación al cambio climático en la gestión de los embalses	61
4.3. Estrategias de adaptación	61
4.3.2 Adaptación al cambio climático en la cuenca Adur-Garona	63
4.4.1 Contexto	65
4.4. Lecciones de un estudio de caso: la gestión en los valles del Neste d'Aure y del Neste de Louron	65

4.4.2 Efectos del cambio climático	67
4.4.3 Estrategias de adaptación	69
4.5. Conclusiones	73
5. Adaptación al cambio climático en la agricultura de regadío: el caso de Riegos del Alto Aragón	75
5.1. Introducción	76
5.2 Retos del cambio climático para la agricultura de regadío y estrategias de adaptación	80
5.3.1 Contexto general	86
5.3 El caso de estudio del sistema Riegos del Alto Aragón	86
5.3.2 Análisis de los recursos hídricos disponibles (presente y futuro)	88
5.3.3 Modelización de los recursos hídricos bajo escenarios de cambio climático y medidas de adaptación	91
5.3.4 Resultados	93
5.4.1 Escasa eficacia de las soluciones centradas en el aumento de la oferta de agua (regulación)	98
5.4 Discusión y conclusiones	98
5.4.2 Necesidad de promover soluciones centradas en el control de la demanda de agua y el aumento de la productividad	99
5.4.3 Insuficiencia de los enfoques de una vía (de arriba-abajo o de abajo-arriba) y valor de los sistemas de apoyo a la toma de decisiones	99
5.4.4 Otros factores: aterramiento de los embalses, usos del suelo, usuarios aguas abajo y caudales ecológicos	100
6. Impactos del cambio climático en áreas de alto valor ambiental: presión turística, cambio climático y calidad ambiental en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido	103
6.1. Introducción	104
6.2.1 Retos del cambio climático en áreas de alto valor ambiental	107
6.2. Retos del cambio climático y el cambio global en áreas de especial valor ambiental y estrategias de adaptación	

107

6.2.2 Estrategias de adaptación

108

6.3.1 Introducción

110

6.3. El caso de estudio del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido (Huesca)

110

6.3.2 Área de estudio

112

6.3.3 Evaluación de los efectos del cambio climático en la cantidad de los recursos hídricos

114

6.3.4 Evaluación de los efectos del cambio climático y el turismo en la calidad de los recursos hídricos disponibles.

118

6.4. Conclusión

120

7. Adaptación al cambio climático desde la gestión de la funcionalidad hidrológica del territorio: el caso de la cuenca del río Bidasoa

123

7.1. Introducción

124

7.2.1 Retos del cambio climático sobre la planificación hidrológica y del territorio

127

7.2 Retos de la gestión del territorio ante el cambio climático y el cambio global

127

La Evapotranspiración (ET)

128

7.2.2 Estrategias de adaptación

136

7.3 El caso de estudio de la cuenca del Bidasoa (Navarra)

139

7.3.1 Factores sociales y económicos

140

7.3.2 Sistemas de abastecimiento

141

7.3.3 Planificación territorial, desde 1956 hasta 2019

142	
7.3.4	Definición de Espacios de Prioridad Hidrológica (EPH) en la cuenca del Bidasoa
145	
7.3.5	Percepción social sobre los servicios hidrológicos del territorio
148	
7.3.6	Propuesta de acciones de adaptación
149	
7.4	Conclusiones
150	
8.	Transformación del territorio y dinámica hidrológica en cabecera: el caso de la turbera de Bernadouze en el Ariège
155	
8.1	Introducción
156	
8.2.1	Simulación del funcionamiento hidrológico de la cuenca de Bernadouze
158	
8.2	Caso de estudio
158	
8.2.2	Impactos del cambio climático en la hidrología
161	
8.2.3	Estrategias de adaptación: impacto de la tala forestal sobre en los cambios del paisaje
164	
8.3	Conclusiones
168	
9.	Impactos de las inundaciones y eventos extremos en los recursos hídricos de los Pirineos en un contexto de cambio climático
171	
9.1	Introducción
172	
9.2	Retos del cambio climático en relación con el riesgo de eventos hidrológicos extremos
174	
9.3	Coordinación de las estrategias de adaptación frente a las inundaciones en los Pirineos
176	
9.4.1	La base de datos PIRAGUA_flood
184	

9.4 Dos experiencias piloto para la mejora del conocimiento y la participación ciudadana en la adaptación al riesgo de inundación en los Pirineos: la base de datos PIRAGUA_flood y la aplicación FLOODUP

184

9.4.2 Las inundaciones en los Pirineos en el contexto del cambio climático: FLOODUP, un proyecto educativo y de ciencia ciudadana

188

9.5.1 Introducción a los episodios de sequía de 1986-1989 y 2004-2008

195

9.5 Análisis del desarrollo y aplicación de medidas de adaptación frente a sequías en Cataluña

195

9.5.2 El episodio de sequía de 1986-1989

196

9.5.3 El episodio de sequía de 2004-2008

198

9.5.4 Descripciones de las medidas de adaptación desarrolladas entre ambos eventos

199

9.6 Conclusiones y recomendaciones

202

Bibliografía

205

Índice de Figuras

Figure 1.1. Localisation des sept études de cas.	6	Figure 3.9. Demande mensuelle d'eau (hm ³) pour des usages domestique, touristique, de production de neige et agricole dans les scénarios considérés pour 2050.	52
Figure 2.1. Délimitation des administrations des ressources en eau dans les Pyrénées : Confédération hydrographique de Cantabrie (CHC), Agence basque de l'eau / Ur Agentzia (URA), Confédération hydrographique de l'Ebre (CHE), Agence catalane de l'eau / Agència Catalana de l'Aigua (ACA), Agence de l'eau Adour-Garonne (AEAG), et Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse (AERMC).	20	Figure 3.10. Résultat de la priorisation des stratégies d'adaptation au changement climatique proposées par les personnes interrogées.	56
Figure 3.1. Usage annuel moyen de l'eau par conseil d'exploitation (hm ³), usage par secteur (%) et origine de la ressource (%).	37	Figure 4.1. 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) ».	68
Figure 3.2. Localisation des stations de ski et des centrales hydroélectriques des Pyrénées, classées en fonction du domaine skiable (km) et de la puissance installée (MW), respectivement.	38	Figure 4.2. Schéma synoptique des vallées des Nests d'Aure et du Louron.	68
Figure 3.3. Demande mensuelle d'eau en Andorre dans les principaux secteurs d'activité.	42	Figure 4.3 : Surface de réponse caractérisant la sensibilité des apports totaux naturels aux lacs-réservoirs à des perturbations du climat. Les courbes représentent des trajectoires possibles de la période actuelle jusqu'à la fin de siècle, échantillonnées tous les 10 ans sous scénarios RCP4.5 (bleu) et RCP8.5 (vert). Chaque point est représentatif d'une période glissante de 20 ans (moyenne de 6 projections climatiques). Les surfaces en bleu et vert représentent la dispersion des projections climatiques issues de CLIMPY. Les limites des zones critiques pour les usages en termes de changement de climat sont identifiées par des lignes en noir.	70
Figure 3.4. Changement du régime mensuel de débit à la sortie du bassin d'Andorre (Borda Sabaté) en 2050 dans le scénario « actuel » et dans les scénarios « référence », « changement climatique » et « changement global ».	45	Figure 4.4. Evolution du régime hydrologique des apports aux lacs-réservoirs de Caillaouas et Pouchergues à différents horizons (les simulations obtenues avec la réanalyse SAFRAN-PIRAGUA sont la référence historique temps présent, les simulations sous changement climatique sont obtenues avec six projections élaborées par le projet CLIMPY).	71
Figure 3.5. Énergie électrique produite dans la centrale hydroélectrique d'Encamp pour les scénarios « actuel », « référence » et « changement global » en 2050.	48	Figure 4.5 : Schéma conceptuel de trajectoires d'adaptation.	72
Figure 3.6. Localisation du tronçon de rivière dont la concurrence pour l'eau est élevée, entre Ransol et Escaldes-Engordany.	49	Figure 4.6. Cadre générique de modélisation.	73
Figure 3.7. Débit mensuel du tronçon de rivière à la concurrence élevée pour l'eau, en 2050, entre Ransol et Escaldes-Engordany (coordonnées Lambert III Sud-Andorre 536028;24948) et dans les différents scénarios analysés. La limite du débit environnemental proposé par le PSIEA est représentée en rouge, et le débit minimum écologique réglementaire du RPHA en jaune.	50	Figure 4.7. Durabilité des trajectoires d'adaptation combinant différents leviers (la combinaison G1-M0-DOE-100 correspond au contexte actuel de pratique et de gestion).	74
Figure 3.8. Demande mensuelle d'eau aujourd'hui et dans les scénarios « changement global » et « adaptation » en 2050.	51	Figure 5.1. L'agriculture dans les Pyrénées (zone délimitée par la ligne rouge) et ses zones de piémont.	79
		Figure 5.2. Carte de la zone d'étude (système d'exploitation E14 du bassin de l'Ebre) avec la localisation des principales rivières et bassins de retenue, les informations sur l'altitude et l'occupation des sols, la	

délimitation des zones en amont et dans la vallée, et le périmètre du système « Riegos del Alto Aragón ».

86

Figure 5.3. Évolution de la superficie irriguée (a), volume d'eau fourni (b) et volume d'eau par unité de superficie (c) dans le système « Riegos del Alto Aragón ».

86

Figure 5.4. Changement dans les apports mensuels (a) et annuels (b) aux bassins de retenue de Lanuza, La Peña et El Grado (pourcentage par rapport à la période 1961-2010), pour les horizons 2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100. Résultats de la simulation avec le modèle SWAT forcé avec six projections climatiques (AEMET, 2018) dans deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et RCP 8.5). Les zones de couleur dans a) indiquent l'enveloppe des six projections, alors que les lignes indiquent les valeurs moyennes. Les boîtes dans b) indiquent la fourchette de variation entre 25 et 75 %, la ligne horizontale marquant la valeur moyenne (50 %) et les lignes verticales marquant les valeurs extrêmes.

90

Figure 5.5. Priorisation des mesures d'adaptation durant la réunion avec les acteurs.

91

Figure 5.6. Indicateurs de durabilité pour l'ensemble du système RAA en fonction de la capacité de régulation interne, aujourd'hui et pour trois horizons temporels futurs : indice de durabilité globale, nombre de mois avec des restrictions d'irrigation conformément au plan de sécheresse actuel, intensité des restrictions (% de demande non couverte) et débits écologiques pour les rivières Gállego et Cinca. La capacité actuelle installée est représentée par une ligne grise verticale.

94

Figure 5.7. Durabilité future du système RAA grâce à l'optimisation du volume de régulation interne. Les différents points représentent, pour chaque secteur du système RAA et du scénario climatique, le volume optimal de réserve interne (panneaux à gauche) requis pour maintenir ou se rapprocher le plus possible du niveau de durabilité actuel du système (panneau à droite). Les lignes horizontales indiquent le volume de régulation interne et la durabilité actuelles.

95

Figure 5.8. Durabilité future du système RAA grâce à l'optimisation conjointe du volume de régulation interne et à la diminution de la dotation en eau d'irrigation par hectare. Les différents points représentent, pour chaque secteur du système RAA et du scénario climatique, le volume optimal de réserve interne et d'économies d'eau nécessaires pour maintenir ou se rapprocher le plus possible du niveau de durabilité actuel du système. Les lignes horizontales indiquent le volume de régulation interne, les économies d'eau et la durabilité actuelles.

96

Figure 6.3. Sources de la Cola de Caballo (A), Fuen Blanca (B) et Fuen de Escuin ou résurgence du Yaga (C).

109

Figure 6.3. Localisation de la zone d'étude, relief et principaux points d'intérêt.

110

Figure 6.4. Situation, carte géologique et coupes géologiques.

111

Figure 6.5. Variation par rapport à la période de contrôle (1961-2005) des précipitations, de la température, de l'évapotranspiration et des débits de décharge totale, de flux hyporrhéique et souterrain, ainsi que du ruissellement superficiel, en faisant la moyenne des valeurs de chacune de ces variables pour les périodes 2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100.

112

Figure 6.6. Variation saisonnière de la décharge totale de la rivière Ara, pour la période de contrôle (1961-2005) comme pour la période 2071-2100, en tenant compte des scénarios de changement climatique RCP 4.5 et RCP 8.5 simulés par les différents modèles climatiques.

112

Figure 6.7. (A) Secteur compris entre le massif du Monte Perdido (3 355 m au-dessus du niveau de la mer) et la Cola de Caballo (1 800 m au-dessus du niveau de la mer). Points du réseau de contrôle (source de Góriz, ravin de Góriz, source Roldán, source des Zetas et siphon Silvia) et projection en surface des principaux systèmes karstiques (en bleu). Le système Garcés est le système le plus bas. (B) Système Garcés en détail, où l'on peut voir l'emplacement des différentes sondes de mesure installées pour contrôler la réponse hydrodynamique, chimique et isotopique du système aux variations hydroclimatiques et anthropiques qui peuvent affecter la recharge de l'aquifère.

113

Figure 6.8. Schéma du modèle conceptuel de recharge observé en 2018-19 dans le système karstique de Garcés.

113

Figure 6.10. Coupe géologique en suivant le profil A-B dans la Figure 11. Au-dessus de la coupe figure la projection des gouffres par lesquels les différents traceurs ont été injectés. La ligne rouge discontinue indique la possible trajectoire des traceurs avec le flux souterrain dans le système karstique.

115

Figure 11. Points d'échantillonnage d'eau souterraine dans le système Garcés. (A) Campagne d'échantillonnage 29/09/2018. (B) Campagne d'échantillonnage 05/08/2019.

116

Figure 7.1. Le bassin-versant comme système intégré de processus : vision BASSIN, essentielle pour la gestion adaptative du territoire, au-delà de celle du lit (modifié de Zabaleta et al., 2021). Nous avons signalé en rouge une zone de priorité hydrologique (EPH, dans ses sigles en espagnol) associée à un captage.

123

Figure 7.2. Rapport entre les valeurs annuelles des précipitations (P), de l'évapotranspiration réelle (ETR) et du débit (Q) dans les bassins de l'Avic (droite) et de Gipuzkoa (gauche).	129	Figure 8.5. Comparaison entre les moyennes interannuelles mensuelles des débits observés (noir) et simulés (rouge) à la sortie du barrage du Pla de Soulcem entre 1980 et 2013.	154
Figure 7.3. Approche conceptuelle de déplacement associé à des changements dans le climat et l'occupation des sols.	131	Figure 8.6. Précipitations mensuelles moyennes (Pcp), débit (discharge), stock de neige (SnoPack), fonte des neiges (SnoMelt), rendement en eau (WtrYield), infiltration (Perc) et évapotranspiration (ET) à Artigue, en amont, pour chaque période et chaque scénario d'émission par rapport à la période de référence (1985-2013). Les "enveloppes" ombrées indiquent la variabilité de l'ensemble des modèles, les lignes bleues indiquent les médianes pour le scénario RCP 8.5, les lignes rouges indiquent les médianes pour le scénario RCP4.5 et les lignes noires représentent la période de référence. L'unité est le millimètre.	157
Figure 7.4. Schéma conceptuel pour la considération des Services hydrologiques et les zones de priorité hydrologique dans la planification territoriale orientée à sa fonctionnalité hydrologique.	134	Figure 8.7. Débit spécifique saisonnier moyen à Artigue et Vicdessos pour chaque période de temps et chaque scénario d'émission. Les histogrammes rouges représentent les scénarios RCP 4.5 alors que les histogrammes bleus représentent le RCP 8.5. Printemps = AMJ, été = JAS, automne = OND, hiver = JFM.	157
Figure 7.5. Situation géographique de la zone d'étude, les communes qui la composent, le réseau hydrographique et la sous-division du bassin par zones d'approvisionnement (zones de Bidassoa et de Baztan).	138	Figure 8.8. Cartographie de la coupe forestière menée dans le bassin versant de la tourbière de Bernadouze à l'automne 2016.	160
Figure 7.6. Géologie du bassin de la Bidassoa, localisation et type des captages d'eau.	140	Figure 8.9. Sketch représentant les inter-relations entre les différentes variables hydrogéochimiques affectées potentiellement par une coupe forestière autour d'une tourbière. EVT : évapotranspiration, COD : carbone organique dissout.	161
Figure 7.7. Série de données en continu sur l'évolution de l'humidité du sol dans le profil de chaque parcelle (fougeraie, pré, chênaie et pinède) et données de précipitations enregistrées dans la station météorologique. L'humidité est exprimée en contenu volumétrique d'eau (%) et les précipitations en mm/heure.	141	Figure 8.10. Débit annuel moyen (m3.s-1), ruissellement de surface (Hm3) et l'apport en sédiments (tons.ha-1) à Vicdessos pour chaque période et chaque scénario d'émission selon quatre scénarios de gestion. (S0: base; S1: pâturages transformés en forêt; S2: 30% de la surface forestière totale est coupée à blanc; S3: pâturages transformés en forêt et 30% de la surface forestière totale est coupée à blanc).	161
Figure 7.8. Espaces naturels protégés et espaces de protection de la faune dans le bassin de la Bidassoa.	143	Figure 8.11. Micro-hydrologie des bassins versants de montagne : illustration des inconnues à caractériser pour une meilleure gestion concertée des paysages et des ressources en eau. (Fuente: elaboración propia.)	164
Figure 7.9. Bassins de drainage des sources de la Bidassoa. Graphiques circulaires avec la représentation du pourcentage d'occupation des sols de chacune d'elles. La taille du diagramme indique la zone du bassin de drainage : plus le bassin est grand, plus le diagramme est grand. Nous avons également représenté le relief (DEM), le réseau de drainage et la sous-division dans des zones de distribution (zone de Baztan à droite et zone de Bidassoa à gauche).	143	Figure 9.1. Répertoire des mesures d'adaptation aux inondations dans la région pyrénéenne.	176
Figure 7.10. Feuille de route pour le développement des zones de priorité hydrologique (EPH).	146	Figure 9.2. Nombre d'épisodes d'inondation avec des dommages extraordinaires et catastrophiques qui ont affecté chaque commune entre 1981 et 2015.	180
Figure 8.1. Illustrations du cas d'étude, localisation, type d'étendues d'eau.	151	Figure 6.3. Menu contextuel qui indique le nombre d'épisodes classés par impact, pour la commune de Bielsa (province de Huesca).	
Figure 8.2. Coupe forestière autour de la tourbière de Bernadouze en 2016.	151		
Figure 8.3. Visualisation du bassin versant de Vicdessos.	153		

Figure 9.4. Couche du nombre de crues par commune colorée en fonction du nombre d'épisodes identifiés entre 1981 et 2015.

Figure 9.6. Flux de fonctionnement de la app FLOODUP

Figure 9.8. Évolution des anomalies des précipitations moyennes annuelles dans le district du bassin fluvial de Catalogne (DCFC) depuis l'année hydrologique 1940-1941 (de septembre à octobre) jusqu'à l'année hydrologique 2013-2014.

Figure 9.9. SPI-12 et SSMI2-1 en octobre 1989 en Espagne et au Portugal (gauche : ré-analyse de SAFRAN ; droite : SURFEX LSM forcé par SAFRAN).

Figure 9.10. SPI-12 et SSMI2-1 en juin 2005 en Espagne et au Portugal (gauche : ré-analyse de SAFRAN ; droite : SURFEX LSM forcé par SAFRAN).

1. Défis et opportunités pour l'adaptation au changement climatique dans la gestion des ressources hydriques des Pyrénées

Santiago Beguería (EEAD-CSIC), Fabienne Sans (FSVA Eurl)

Les ressources hydriques des Pyrénées revêtent une importance écologique et socio-économique fondamentale, tant au sein de la cordillère elle-même que dans ses vastes territoires de piémont. Ces dernières décennies, des changements ont été observés dans les débits annuels et la saisonnalité des régimes des rivières, attribuables tant au changement climatique qu'à un processus accéléré et généralisé de changements de l'occupation des sols et de la couverture végétale des montagnes. Les prévisions à venir indiquent une transition vers des Pyrénées plus sèches et plus pauvres en ressources hydriques, notamment durant l'époque estivale, aux impacts très divers et très importants sur les ressources hydriques. À partir de sept études de cas axées sur différents thèmes liés au cycle hydrologique et aux ressources hydriques dans diverses zones des Pyrénées, nous avons collaboré avec les acteurs locaux afin d'analyser la vulnérabilité au changement climatique des territoires et d'explorer des options d'adaptation. Le développement de modèles de vulnérabilité pour explorer les différents scénarios tant climatiques que d'adaptation, la communication de l'incertitude associée à ces scénarios, l'implication des acteurs locaux et des citoyens, ainsi que la recherche de solutions fondées sur la nature ont été certains des principes transversaux qui ont articulé les différentes études de cas.

Beguería, S., Sans, F., 2023. Défis et opportunités pour l'adaptation au changement climatique dans la gestion des ressources hydriques des Pyrénées. Dans (Beguería, S., ed.), Adaptation au changement climatique dans la gestion des ressources hydriques des Pyrénées. Mémoires scientifiques du projet PIRAGUA, vol. 2. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Saragosse, Espagne, 1-14.
<https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/15255>

1.1. Importance régionale des ressources hydriques des Pyrénées, évolution récente et perspectives à venir

La cordillère pyrénéenne (les Pyrénées) est un système montagneux situé au nord de la péninsule Ibérique entre l'Espagne, la France et l'Andorre. À la densité de population faible, contrairement aux territoires qui l'entourent, les Pyrénées revêtent une importance exceptionnelle quant à la génération de ressources hydriques, dépassant largement le domaine de la cordillère elle-même, car les ressources hydriques des Pyrénées alimentent les besoins en eau de l'agriculture, de l'industrie et de l'approvisionnement d'une vaste région s'étendant à ses piémonts. Dans un volume préalable, nous avons étudié les utilisations des ressources hydriques des Pyrénées, leur évolution récente et les prévisions futures selon des scénarios de changement climatique (Beguería et al., 2022a). Dans cette section, nous résumons brièvement les résultats les plus notables de ce travail afin de donner un contexte à ce volume.

Les ressources hydriques des Pyrénées revêtent une importance écologique et socio-économique fondamentale, tant au sein de la cordillère elle-même que dans ses vastes territoires de piémont.

Les débuts de l'utilisation moderne des ressources hydriques des Pyrénées remontent à la seconde moitié du XIX^e siècle, lorsque les premières infrastructures hydrauliques d'envergure commencèrent à être planifiées et parfois exécutées. La construction de barrages commença afin d'augmenter la capacité de certains lacs de haute montagne et de réguler les débits des torrents et de certaines rivières principales. Parallèlement au développement de l'utilisation de l'électricité, les premières centrales de production hydroélectrique furent installées. Ce développement pionnier s'est déroulé en parallèle sur les deux versants de la chaîne de montagnes et atteignit son rythme de développement le plus fort à la seconde moitié du XX^e siècle. C'est précisément au cours de ce siècle que furent construites les infrastructures les plus ambitieuses, dont certaines constituaient de véritables défis d'ingénierie pour les ressources de l'époque. C'est aussi tout au long du XX^e siècle que les différentes conceptions de la planification de l'exploitation des ressources hydriques commencèrent à apparaître sur les versants français et espagnol. Alors qu'un grand

nombre de barrages petits et moyens, continuait d'être construit en France, de grands projets étaient menés à bien en Espagne, donnant lieu à des bassins de retenue d'une grande capacité, liés au développement de vastes superficies d'irrigation, afin de transformer l'économie et le niveau de développement de vastes territoires au pied des Pyrénées. Ce développement a conduit aujourd'hui à des différences importantes entre les deux pays, tant dans la gestion que dans l'utilisation des ressources hydriques des Pyrénées.

Ainsi, l'utilisation totale de l'eau des Pyrénées s'élève, de nos jours, à environ 6 700 hm³ annuels, dont 5 757 hm³ sont consommés en Espagne, alors que la France utilise 960 hm³ et l'Andorre 13 hm³ (Beguería et al., 2022b). Une partie très importante des ressources hydriques (79 %) est destinée à l'agriculture irriguée, bien que cet usage soit surtout prédominant en Espagne, où il représente 92 % de l'usage total, contre 44 % en France ou 16 % en Andorre. Par contre, l'approvisionnement urbain représente seulement 4 % de l'utilisation de l'eau des Pyrénées, avec un pourcentage similaire consacré à l'utilisation industrielle. Bien que ces usages de l'eau soient petits en volume, ils revêtent une grande importance régionale et stratégique, qui ne doit pas être négligée. Bien qu'une grande majorité de ces utilisations de l'eau se fassent en dehors des Pyrénées, il ne faut pas oublier l'importance locale d'autres emplois de l'eau au sein de la cordillère, tant de type consommptif que non consommptif. Outre l'importance stratégique susmentionnée de l'approvisionnement en eau, qui est encore plus important dans les Pyrénées en raison de la forte demande saisonnière due au tourisme, il convient de citer certains aspects de l'utilisation de l'eau au sein de la chaîne de montagnes. Le premier est la production hydroélectrique, car la concomitance d'abondantes ressources et de forts dénivelés a permis l'existence de plus de 300 centrales dans les Pyrénées, pour une production d'environ 11 500 GWh par an. Deuxièmement, il convient de mentionner l'importance croissante de l'utilisation des ressources en eau par le secteur touristique, qui doit intégrer tant la production de neige de culture dans les stations de ski que d'autres usages tels que les installations thermales ou l'irrigation de terrains de golf. Enfin, il

convient de ne pas oublier l'extrême importance de l'eau sous toutes ses formes pour le maintien de la qualité et de la variété des écosystèmes et paysages des Pyrénées. Glaciers, lacs de haute montagne, neige, résurgences, cascades, torrents de haute montagne, etc. sont sans aucun doute certains des éléments iconiques des Pyrénées, qui contribuent puissamment à l'attrait et à la richesse naturelle et paysagère de cette chaîne de montagnes.

L'analyse des données de débits circulants dans les rivières en régime naturel des Pyrénées révèle qu'une baisse généralisée de tous les indicateurs s'est produite : débits bas, moyens et hauts, débits d'étiage et débits de crue (Zabaleta et al., 2022). La baisse des débits circulants est très prononcée, surtout si l'on tient compte des périodes les plus longues (70, 60 et 50 ans). Les tendances s'atténuent ces vingt dernières années, bien que les négatives prédominent, surtout pour les débits bas et d'étiage. À l'échelle saisonnière, les débits hauts, caractéristiques de la fusion nivale, ont avancé dans la saison, alors que les étiages sont peu à peu devenus plus longs et plus accentués. Ces changements peuvent s'observer sur les deux versants de la cordillère.

Ces dernières décennies, les débits et les régimes hydriques saisonniers ont connu des changements notables des deux côtés de la cordillère, dus tant au changement climatique (principalement au réchauffement) qu'à d'autres processus du changement global, liés à l'abandon des activités traditionnelles dans les montagnes, telles que l'élevage et l'agriculture.

Étant donné que les débits circulants sont presque les seules variables du bilan hydrique qui se mesurent systématiquement dans les Pyrénées, pour connaître l'évolution des différentes composantes du bilan (évapotranspiration, contribution de la fusion nivale, recharge des aquifères, etc.), il est nécessaire d'utiliser des outils de modélisation numérique, qui simulent le fonctionnement complexe du système hydrologique continental (Quintana et al., 2022a). La mise en œuvre de différents modèles de simulation a permis d'étudier les diverses composantes du bilan hydrique (flux d'eau et

variables d'état), leur répartition géographique, saisonnalité et évolution temporelle. La modélisation des différents éléments du bilan hydrique indique que les changements observés dans les débits obéissent tant à des causes climatiques (principalement la hausse des températures, puisque les précipitations ne montrent aucun changement significatif) qu'à des changements récents dans l'occupation des sols, notamment à l'augmentation de la couverture végétale due à l'abandon des activités agropastorales dans les montagnes.

Les prévisions futures indiquent une transition vers des Pyrénées plus sèches et plus pauvres en ressources hydriques, notamment durant l'été.

L'utilisation de modèles hydrologiques combinés à un ensemble de projections climatiques pour le XXI^e siècle a permis d'estimer les changements que l'on peut attendre pour les différentes composantes du bilan hydrique des Pyrénées et leur niveau d'incertitude (Quintana et al., 2022b). Les résultats indiquent de manière très cohérente qu'à l'avenir les Pyrénées seront plus chaudes et plus sèches, avec une hausse de l'aridité dans l'espace et dans le temps, sauf dans les zones les plus hautes. Les simulations sont cohérentes quant à la diminution de l'enneigement, ainsi que du poids relatif de la fusion nivale dans la génération de débit, ce qui provoquera une transition des régimes hydriques nivaux ou pluvio-nivaux actuels vers des régimes de type nettement pluvial. Par conséquent, l'apport des principales rivières pyrénéennes connaîtra d'importantes réductions, dont l'ampleur varie selon le scénario et l'horizon temporel considérés. La réduction des apports sera plus marquée sur le versant nord du massif, où ils pourraient être en moyenne de l'ordre de 20 % à la fin du XXI^e siècle, alors que sur le versant sud, ils seraient plus modérés, avec un gradient depuis la zone la plus occidentale (avec des baisses de 15 %) à la plus orientale (10 %).

Ces résultats mettent l'accent sur l'importance et le besoin d'aborder l'adaptation au changement climatique dans le domaine de la gestion des ressources hydriques des Pyrénées, tant à l'échelle locale que du bassin, voire même de la cordillère.

1.2 Les études de cas du projet de coopération transfrontalière PIRAGUA

Le projet EFA210/16 PIRAGUA (Évaluation et prospective des ressources hydriques des Pyrénées dans un contexte de changement climatique et mesures d'adaptation ayant des impacts sur le territoire) est un projet de coopération internationale cofinancé par le programme INTERREG V-A Espagne-France-Andorre (POCTEFA 2014-2020) et les organismes participants : Agence nationale du Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Centre national de la recherche scientifique (CNRS), Université du Pays basque/Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU), Andorra Recerca i Innovació (ARI), Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE), Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Université de Barcelone (UB) et la Fundació Observatori de l'Ebre (OE).

Entre janvier 2018 et décembre 2021, PIRAGUA a abordé, grâce à la coopération transfrontalière, l'évaluation du cycle hydrologique des Pyrénées dans le contexte du changement climatique, afin d'améliorer la capacité d'adaptation des territoires face aux défis imposés par le changement climatique et soutenir les investissements destinés à l'adaptation au changement climatique de la gestion de la ressource eau. Pour cela, des actions ont été développées au cours du projet ; elles sont axées sur :

- l'amélioration des connaissances et le développement de bases de données régionales
- l'établissement et le suivi d'indicateurs-clés
- l'élaboration de scénarios futurs de ressources hydriques
- le développement d'expériences pilotes dans les domaines de la gestion de bassins de retenue, d'exploitations forestières et autres
- l'estimation des coûts associés au changement climatique
- l'élaboration de recommandations sur les adaptations sectorielles

- le transfert des résultats aux acteurs impliqués dans la gestion des ressources hydriques sur le territoire du programme POCTEFA

Les défis que le projet PIRAGUA a abordés sont les suivants :

- réaliser une caractérisation conjointe des ressources hydriques des Pyrénées, permettant de connaître l'évolution des eaux superficielles et souterraines et leurs variations
- connaître l'utilisation des ressources hydriques des Pyrénées, tant au sein de la cordillère que dans ses piémonts et sa zone d'influence
- quantifier les ressources hydriques des Pyrénées à l'avenir, en se basant sur des scénarios de changement climatique
- identifier et proposer des actions d'adaptation au changement climatique, concernant la ressource eau

À partir de sept études de cas locaux, axées sur différents thèmes liés au cycle hydrologique et aux ressources hydriques des Pyrénées, nous avons collaboré avec les acteurs locaux afin d'analyser la vulnérabilité au changement climatique des territoires et d'explorer des options d'adaptation.

Les trois premiers défis seront traités dans un autre volume (Beguiria et al., 2022a). Le présent travail se concentre donc sur le quatrième objectif. Ce défi a été abordé grâce à une série d'études de cas, développées dans des lieux concrets des Pyrénées ou dans leur zone d'influence, en étroite collaboration avec les acteurs locaux. L'objectif de ces études de cas, axées sur différents systèmes, était de réaliser des évaluations de l'impact de la vulnérabilité au changement climatique à l'échelle locale, afin de proposer et de valider des actions d'adaptation pour différents secteurs économiques et à différentes échelles. Nous décrivons ensuite brièvement le contexte (lieu, objectif, acteurs impliqués) de chacune de ces études de cas, dont la localisation approximative est indiquée dans la Figure 1.1.

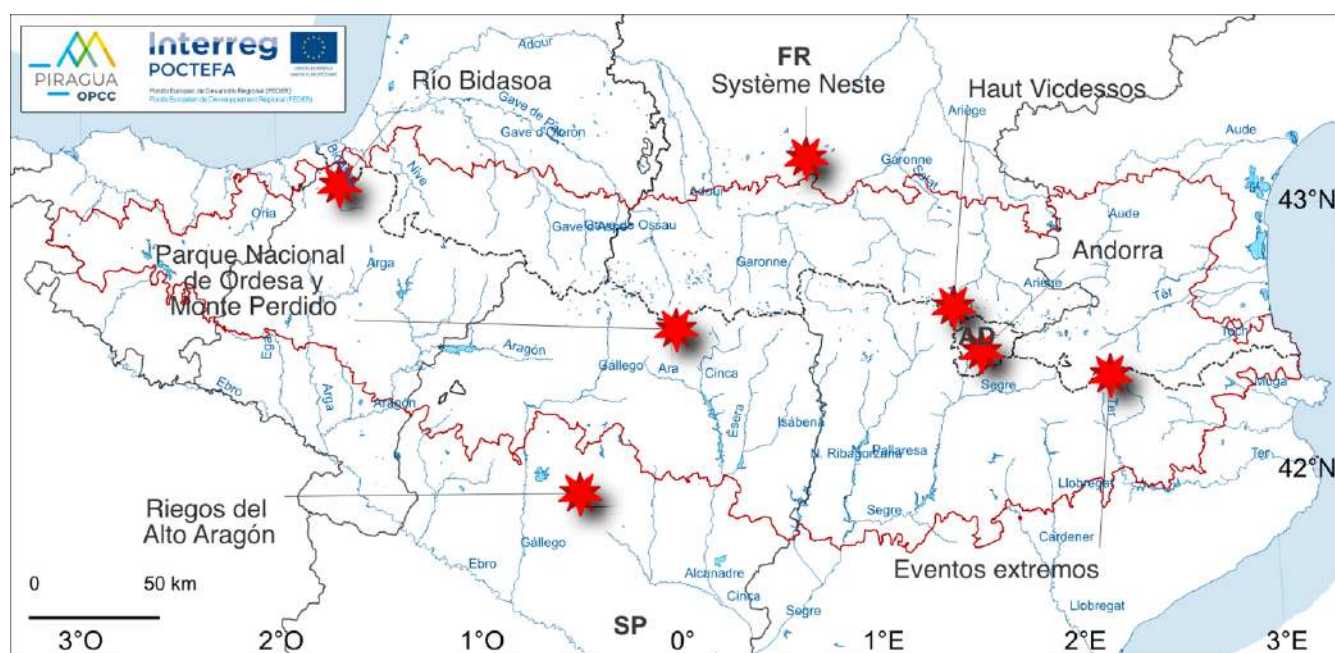


Figure 1.1. Localisation des sept études de cas.

1.2.1 La concurrence pour les ressources hydriques en Andorre

La première étude de cas présentée dans ce volume (Domènech et al., 2022) analyse les ressources hydriques actuelles et futures de la principauté d'Andorre, où la convergence du changement climatique et d'un modèle socio-économique basé sur une utilisation intensive de l'eau pourrait menacer la durabilité à venir du système. L'analyse principale est réalisée au moyen de l'outil WEAP (« Water Evaluation and Planning System »), en mettant en œuvre un modèle qui explore l'évolution future des ressources hydriques en associant des scénarios climatiques et socio-économiques.

Les résultats de l'analyse font apparaître une diminution importante des débits circulants à l'avenir. Le schéma de changements dans leur distribution tout au long de l'année dans les bassins andorrans est conforme aux estimations dans d'autres régions de la cordillère pyrénéenne et les Alpes, avec une fonte des neiges précoce, une augmentation du débit durant les mois d'hiver et une réduction des ressources concentrée entre le milieu du printemps et l'été. La réduction maximale du débit se concentrera en été, lorsque les débits seront nettement inférieurs aux débits actuels. Il s'agit de la période la plus vulnérable et pour laquelle il faudra destiner davantage de ressources, afin d'évaluer l'impact sur les fonctions écosystémiques de certains tronçons de rivières.

La réduction des ressources ne devrait pas conditionner la disponibilité en eau pour l'usage humain avant 2050, bien que le maintien des tendances de croissance puisse la compromettre à long terme. Sur le moyen terme, le plus grand impact se produira sur les fonctions écosystémiques des rivières et la compatibilité de la conservation de ces fonctions avec la demande en eau pour certaines périodes et tronçons, notamment à la fin de l'été.

Cette étude analyse également, à l'échelle du pays, le potentiel de différentes mesures d'adaptation au changement climatique pour les principaux secteurs d'activité. En parallèle,

les stratégies destinées à améliorer l'efficacité de l'usage de l'eau dans les stations de ski ont été mises en œuvre pour deux essais pilotes dans les stations de Grandvalira et de Vallnord.

1.2.2 Impacts du changement climatique dans la gestion de bassins de retenue de production hydroélectrique : le cas des vallées de Nestes d'Aure et de Louron

La seconde étude de cas (Sauquet et al., 2022) aborde les impacts du changement climatique sur la production hydroélectrique et la concurrence pour les ressources dans des situations d'étiage à l'avenir. Les questions concernant l'hydroélectricité et son futur sont illustrées dans une étude de cas sur les bassins de retenue de montagne du système Neste d'Aure et Neste de Louron (région des Hautes-Pyrénées). L'objectif principal est de proposer de possibles trajectoires d'adaptation pour le maniement de ces bassins de retenue sous des conditions de changement climatique. Pour y parvenir, les questions suivantes ont été abordées : Quels outils doivent être mis en œuvre pour représenter la gestion des bassins de retenue à usages multiples, les demandes d'eau, y compris la demande d'énergie, la mobilisation des volumes stockés sous forme de neige, etc. ? Quel est l'impact prévisible du changement climatique dans la gestion des bassins de retenue et dans la production d'énergie ? Quelle est la vulnérabilité de la chaîne de production et d'autres usages de l'eau qui dépendent de l'eau stockée dans les bassins de retenue ?

L'analyse est basée sur un ensemble de modèles qui simule l'évolution de la ressource hydrique et les actions humaines sur cette ressource (demandes et prélèvements d'eau, actions de stockage et réduction des stocks, etc.). Il a été nécessaire de mettre en œuvre un développement spécifique d'outils, étant donnée la complexité du système hydroélectrique : l'eau est mobilisée dans les bassins de retenue en amont des vallées pour irriguer des secteurs agricoles hors du

bassin de Neste par un canal de dérivation ; les connaissances et les bases de données sur les méthodes de gestion sont fragmentées.

Tout comme d'autres bassins pyrénéens, l'effet du changement climatique se reflète dans des précipitations plus faibles à l'avenir, une réduction des débits d'entrée dans les bassins de retenue, ainsi que des débits de fonte réduits et plus tôt dans l'année. L'analyse de vulnérabilité du système a montré que le potentiel de production hydroélectrique pourrait être fortement réduit en raison de la combinaison de la diminution des volumes d'eau retenue et de la priorité de l'engagement de distribution du volume d'eau pour l'approvisionnement et l'irrigation durant les étiages.

À partir de ces analyses, différentes options d'adaptation ont été discutées avec les principaux acteurs du territoire, ainsi que les critères pour évaluer ces stratégies, s'agissant d'intégrer toutes les dimensions du système (y compris des aspects économiques et écologiques). Ce travail contribuera en dernière instance au développement de trajectoires d'adaptation sur le territoire.

1.2.3 Adaptation au changement climatique dans l'agriculture irriguée : le cas de « Riegos del Alto Aragón » (irrigations du Haut-Aragon)

La construction de grands barrages et de canaux de distribution tout au long du XX^e siècle dans les Pyrénées centrales a permis la mise en œuvre de l'irrigation de grandes superficies dans les plaines, qui se sont développées aux pieds de la chaîne de montagnes, en assurant la production d'aliments et en améliorant la qualité de vie de ses habitants. Les grands systèmes d'irrigation présentent, néanmoins, des problèmes dérivés de leur conception à une époque très différente de l'actuelle et sont confrontés aux nouveaux défis du XXI^e siècle. Parmi ces défis, nous pouvons souligner la baisse prévisible des ressources hydriques disponibles en raison du changement

climatique. En outre, il ne faut pas oublier des problèmes tels que la réduction de la capacité des bassins de retenue en raison de l'envasement ou de l'augmentation des coûts de production du fait des prix de l'énergie.

La troisième étude de cas analyse le système de « Riegos del Alto Aragón » (irrigations du Haut-Aragon) dans la province de Huesca, qui bénéficie aujourd'hui d'un niveau adéquat de durabilité (Beguería et al., 2022c). Cependant, cette situation sera menacée à l'avenir si les projections du changement climatique analysées se réalisent. Une diminution des apports de débit aux bassins de retenue alimentant le système devrait avoir lieu, ainsi que des changements dans la saisonnalité des apports, avec un plus grand poids des débits hivernaux et des étiages plus prononcés et plus longs. Cela aura une répercussion sur la durabilité du système, se reflétant en une plus grande fréquence et une plus grande intensité de situations où les demandes d'irrigation aujourd'hui établies ne peuvent être satisfaites.

L'analyse de vulnérabilité démontre l'inefficacité des solutions centrées sur l'augmentation de l'offre d'eau (tant au niveau des grandes infrastructures de régulation hydrologique qu'au niveau interne par des bassins d'irrigation), en prenant notamment en compte les projections climatiques. Les efforts doivent donc se centrer à garantir la dotation actuelle en eau d'irrigation tout en assurant une meilleure gestion de la demande d'eau. Dans un scénario de raréfaction progressive de la ressource, il est nécessaire d'envisager des mesures (réglementations, de gouvernance, etc.), orientées à maximiser la rentabilité par unité d'eau fournie, en marginalisant les pratiques et les cultures moins rentables. Il est essentiel qu'une plus grande implication à tous les niveaux existe, de l'Administration aux petits agriculteurs, en passant par les entrepreneurs locaux, pour que le système puisse devenir un modèle d'agriculture durable à la productivité élevée dont a besoin la société du XXI^e siècle.

1.2.4 Impacts du changement climatique dans des zones de valeur environnementale spéciale : pression touristique, changement climatique et qualité environnementale dans le Parc national d'Ordesa et de Monte Perdido

La quatrième étude de cas aborde l'impact du changement climatique lié au problème de la pression touristique dans des lieux d'une grande valeur environnementale (Lambán et Jódar, 2022). Le Parc national d'Ordesa et de Monte Perdido et le Parc national des Pyrénées présentent de nombreuses figures de protection environnementale à l'échelle nationale, supranationale et transfrontalière (Patrimoine mondial de l'UNESCO, diplôme du Conseil de l'Europe à la Conservation, Réserve de la biosphère ou Charte de coopération entre les deux parcs, entre autres). Ils constituent le plus grand massif montagneux calcaire d'Europe occidentale, provoquant un manque d'eaux superficielles de ruissellement, car la plupart des précipitations (pluie et neige) s'infiltre dans le sous-sol (recharge) en alimentant les aquifères. La hausse de la température générée par le changement climatique implique une plus faible accumulation de neige dans la zone de recharge et une anticipation progressive de l'époque de fonte, ce qui, uni à la courte durée de transit de l'eau souterraine du fait de la nature karstique du terrain, provoque une diminution de la quantité et de la qualité de l'eau disponible, affectant tant les écosystèmes associés que le tourisme. Nous avons modélisé la dynamique des ressources hydriques et évalué l'impact provoqué par le tourisme dans l'un des secteurs les plus visités et les plus vulnérables. Les résultats permettent d'évaluer les risques associés au changement climatique quant à la quantité et à la qualité des ressources hydriques, ainsi que de proposer des mesures d'adaptation pour assurer une gestion adéquate et une conservation de ces ressources. Comme mesures d'adaptation en ce qui concerne la quantité, nous proposons : le stockage des

précipitations dans des citernes ou réservoirs adaptés, un usage conjoint des eaux superficielles et souterraines, et la construction de puits pour le maintien de débits écologiques dans les rivières durant l'époque d'étiage. Comme mesures d'adaptation en ce qui concerne la qualité, nous proposons : le contrôle du nombre de visiteurs et de nuitées, outre les recommandations pour l'optimisation de la génération et le traitement des déchets produits.

1.2.5 Adaptation au changement climatique à partir de la gestion de la fonctionnalité hydrologique du territoire : le cas du bassin du fleuve Bidassoa

L'objectif de la cinquième étude de cas, axée sur le bassin du fleuve Bidassoa en Navarre, est de promouvoir l'adaptation au changement climatique, en reliant la gestion des ressources hydriques à la gestion du territoire et, concrètement, par la planification de l'occupation des sols (Antigüedad et al., 2022). En partant du concept de la fonctionnalité hydrologique du territoire, nous réalisons une analyse permettant d'identifier des zones du bassin qui ont une valeur spéciale quant à la provision des services hydrologiques d'approvisionnement en eau, en quantité et en qualité. Ainsi, tout comme le carbone est l'axe des mesures d'atténuation du changement climatique à l'échelle globale, nous proposons que l'eau soit l'un des axes de l'adaptation au changement climatique à l'échelle locale. L'analyse des services écosystémiques hydrologiques cherche à agir dans les espaces les plus changeants du territoire afin de déterminer comment adapter ses usages futurs au changement climatique à partir de la considération de l'amélioration des services hydrologiques. Nous tenons compte de deux types d'usages : ceux qui sont consolidés dans le temps, qui ne supposent pas de changements importants dans l'état des masses végétales et du sol, et les usages qui sont en situation de changement, naturel ou planifié, et supposent une altération

importante. Les premiers sont notamment liés aux masses boisées de plusieurs dizaines d'années, où le type de gestion réalisée ne suppose pas de changements hydrologiques importants à moyen et long terme. Les deuxièmes sont liés aux différents types d'usages et situations : des prés en processus d'abandon aux plantations d'espèces à croissance rapide, avec des cycles de rotation courts, qui peuvent altérer les conditions de l'évapotranspiration et des sols. Dans ce cas, nous proposons que la priorité soit donnée aux services écosystémiques hydrologiques dans certaines zones, notamment là où ceux-ci sont liés à l'existence de captages superficiels ou souterrains, ou au besoin de maintenir des débits environnementaux. En dernière instance, nous cherchons à favoriser une complémentarité des services écosystémiques sur le territoire grâce à une mosaïque planifiée de l'occupation des sols. Pour cela, il est nécessaire d'établir des critères basés sur des preuves obtenues sur le terrain concernant la fonctionnalité hydrologique du territoire.

1.2.6 Transformation du territoire et dynamique hydrologique dans les têtes de bassin-versant : le cas de la tourbière de Bernadouze en Ariège.

La sixième étude de cas aborde la problématique liée aux changements de l'occupation des sols dans les têtes des rivières de montagne et, concrètement dans les zones de tourbières (Sánchez-Pérez et al., 2022). Ces cinquante dernières années, les changements de l'occupation des sols ont été surveillés en continu dans les territoires de haute montagne des Pyrénées et, concrètement dans le bassin hydrographique de Videssos situé dans la région de l'Ariège. La tête du bassin de la rivière Videssos contient une zone de tourbière, Bernadouze, d'une grande importance écologique et pour la régulation du cycle de l'eau et du carbone dans le bassin. La gestion forestière et les changements associés dans la couverture des sols peuvent avoir un effet

sur le fonctionnement hydrologique du bassin et sur les exportations fluviales de carbone. À partir des données obtenues en continu par des capteurs dans la tourbière de Bernadouze ces dix dernières années et grâce à l'application de la modélisation hydrologique, nous avons obtenu des résultats et de nouvelles perspectives pouvant être utilisés pour une meilleure gestion conjointe des environnements de haute montagne, notamment les environnements mixtes de forêts et de zones humides. Dans cette étude de cas, nous avons testé plusieurs scénarios avec et sans gestion forestière afin de comprendre l'impact de la sylviculture dans les différents processus et composantes du bilan hydrologique du bassin. Les tendances indiquent que la couche de neige hivernale durera moins longtemps et que la fonte tendra à être plus précoce à l'avenir, ce qui aura pour résultat une atténuation de la variabilité hydrologique saisonnière. Si ce changement de l'hydrologie n'est pas associé à une occupation rationnelle des sols et des forêts, l'érosion des sols pourrait s'accroître.

1.2.7 Impacts des inondations et des événements extrêmes sur les ressources hydriques des Pyrénées dans un contexte de changement climatique.

Les mesures d'adaptation évaluées dans la septième étude de cas se concentrent sur l'impact du changement climatique par les risques liés aux ressources hydriques, notamment les inondations (Llasat-Botija et al., 2022). Tout d'abord, nous avons analysé l'importance des inondations dans les Pyrénées et leur relation avec les ressources hydriques. Trois propositions sont ensuite présentées. La première est adressée aux autorités et organismes de gestion, car elle offre des informations utiles pour la coordination et l'apprentissage mutuel, où toutes les mesures d'adaptation existantes à l'heure actuelle contre les inondations ont été intégrées. Nous avons donc analysé et répertorié différents types de mesures d'adaptation existant déjà sur le territoire pyrénéen. La deuxième proposition

se base également sur l'amélioration des connaissances mais, dans ce cas, elle offre des informations complètement nouvelles. Elle consiste en la première cartographie d'épisodes d'inondations à l'échelle municipale réalisée jusqu'alors pour l'ensemble des Pyrénées. La base de données qui a été compilée couvre la période 1981-2015 et contient des informations sur les impacts et les caractéristiques spatio-temporelles des événements d'inondation. L'analyse de cette base de données permet de faire connaître un phénomène qui est beaucoup plus fréquent et beaucoup plus nuisible que ce que l'on croit habituellement et qui affecte la distribution et la qualité de l'eau. Il s'agit d'un outil pour la prise de décisions et la coordination d'actions interrégionales par les administrations compétentes, mais elle est aussi utile pour la population en matière d'amélioration des connaissances du territoire et pour favoriser le réveil de la mémoire historique face au risque d'inondation. La troisième proposition se concentre sur le développement d'une application pour mobile dans les différentes langues du territoire pyrénéen et en anglais, dans le but d'impliquer les citoyens dans l'importance des connaissances sur le risque d'inondation et favoriser leur autonomisation face aux événements extrêmes et au changement climatique.

1.3 Principes transversaux de l'adaptation au changement climatique

Les études de cas présentées dans ce volume correspondent à divers aspects liés à l'adaptation au changement climatique en matière de ressources hydriques. Chaque étude de cas permet de dégager des conclusions et des recommandations sur les sujets traités, tels que la gestion conjointe des utilisations de l'eau et des sols, l'importance des connaissances et du travail avec des scénarios, l'évaluation des services écosystémiques ou la prévention des risques. Malgré la disparité thématique, territoriale et même méthodologique de ces exemples appliqués, nous pouvons trouver certains principes transversaux que nous considérons fondamentaux pour aborder l'adaptation au changement climatique, quel que soit le contexte ou la situation d'un territoire. Nous développons ci-après certains de ces principes transversaux, dont l'application se matérialise dans la presque totalité des études de cas abordées.

1.3.1 Importance des modèles de vulnérabilité au changement climatique

Les modèles de vulnérabilité au changement climatique (MVCC) permettent de quantifier la prédisposition à être affecté de façon négative par les conséquences du changement climatique, et peuvent s'appliquer tant aux organismes individuels qu'aux systèmes complexes (Joyce et Janowiak, 2011). Les MVCC intègrent les informations scientifiques et d'experts disponibles pour réaliser une analyse quantitative sur la manière dont les ressources, les écosystèmes ou d'autres éléments peuvent être affectés par le changement climatique, y compris les événements extrêmes. Cette analyse part de la prémisse que la vulnérabilité d'un système est déterminée, d'une part, par la nature et l'ampleur du changement climatique auquel il est exposé et, d'autre part, par la sensibilité du système aux changements et sa capacité d'adaptation.

De fait, les MVCC peuvent offrir de précieuses informations servant de base pour promouvoir des actions d'adaptation au changement climatique sur une base informée. Les modèles de

vulnérabilité n'établissent pas en soi de priorités sur les décisions à prendre, mais permettent d'évaluer les conséquences possibles de certaines décisions sur un scénario de continuité, comparer les conséquences de différentes alternatives et identifier quels éléments du système sont plus vulnérables et devraient faire l'objet d'un monitoring soigné. En général, les MVCC intègrent des informations sur différentes options d'adaptation disponibles pour les administrateurs ou qui pourraient être mises en œuvre à l'avenir et évaluent ces options par des simulations selon différents scénarios.

Les modèles de vulnérabilité permettent d'analyser le degré d'impact du changement climatique sur un organisme ou un système, et d'évaluer les conséquences de diverses stratégies d'adaptation.

Ces informations, ainsi qu'une évaluation adéquate et la communication des incertitudes associées aux différents scénarios, représentent le pilier fondamental pour un processus de prise de décisions approprié et la mise en œuvre de mesures d'adaptation efficaces.

Un aspect fondamental des MVCC est la quantification et la communication efficace des incertitudes. Ces incertitudes peuvent avoir différentes origines. Tout d'abord, les projections-mêmes du climat futur dans des conditions de changement climatique sont sujettes à une importante incertitude, notamment lorsque l'on essaie de descendre à des échelles spatiales locales. Il existe aussi une incertitude quant à l'éventuelle évolution des indicateurs socio-économiques importants pour un système déterminé comme, par exemple, l'évolution de la demande ou les prix de certains biens ou services. Enfin, il existe une incertitude associée aux modèles-mêmes de vulnérabilité. Pour cela, de multiples scénarios de conditions futures sont fréquemment utilisés dans les analyses de vulnérabilité, y compris autant de projections de changement climatique que de scénarios de forçage (itinéraires d'émissions de gaz à effet de serre) et de scénarios socio-économiques et d'alternatives de gestion. Idéalement, différents modèles de vulnérabilité peuvent aussi être utilisés afin d'évaluer l'incertitude associée au modèle lui-même. Cela donne lieu non pas à

une seule estimation de l'impact du changement climatique à un moment du futur, mais à toute une gamme de futurs possibles, chacun étant associé à un degré de possibilité déterminé. De cette manière, il est possible d'explorer les zones d'incertitude liées aux différentes alternatives de gestion, ce qui peut également guider la prise de décisions. Néanmoins, l'expérience a montré à de nombreuses reprises que la gestion correcte de l'incertitude est un défi important pour les preneurs de décisions, étant l'un des aspects pour lesquels il convient de consacrer de plus grands efforts afin de parvenir à une transmission optimale des informations qui guident la conception et la mise en œuvre de mesures d'adaptation.

1.3.2 L'importance de connaître les services écosystémiques et favoriser des solutions fondées sur la nature

Les Solutions fondées sur la nature (SFN) sont définies comme des actions destinées à protéger, gérer durablement et restaurer les écosystèmes naturels ou modifiés, afin d'aborder les défis sociaux et économiques d'une manière efficace et adaptable, tout en garantissant le bien-être humain et un bénéfice pour la biodiversité. Envisagé en 2009 au cours de la conférence des parties de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, le concept de SFN est intégré au programme global de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) en 2013. À la suite de la COP21 (2015), et plus tard en raison du Congrès mondial de la nature (2016), les SFN ont été reconnues à l'échelle internationale en tant que moyen pour parvenir aux Objectifs de développement durable (UICN, 2018).

Nous pouvons détailler les SFN en trois types d'actions qui peuvent être menées à bien de façon indépendante ou combinée :

- actions pour la préservation des écosystèmes fonctionnels dans de bonnes conditions écologiques

- actions pour améliorer la gestion des écosystèmes tout en garantissant un usage durable du territoire
- actions pour promouvoir la restauration des écosystèmes dégradés ou la création de nouveaux écosystèmes

Les SFN favorisent les services fournis par les écosystèmes bien conservés, restaurés ou gérés de façon durable. Ces services écosystémiques sont les bénéfices que les êtres humains obtiennent du fonctionnement normal des écosystèmes. Les SFN représentent, de fait, une alternative économiquement viable et durable, parfois moins coûteuse, sur le long terme, que les investissements technologiques ou la construction et la maintenance d'infrastructures.

Du fait de leurs multiples bénéfices pour les sociétés humaines et la biodiversité, les solutions fondées sur la nature doivent être explorées et favorisées comme des mesures efficaces d'adaptation au changement climatique.

La mise en œuvre de SFN pour aborder des problèmes concrets permet aussi d'éviter les impacts sur les environnements naturels liés aux infrastructures conventionnelles d'ingénierie, ainsi que d'intervenir en adaptant les actions réalisées aux incertitudes associées au changement climatique (UICN, 2018).

1.3.3 L'importance de considérer tous les acteurs

Le succès des mesures d'adaptation au changement climatique dépend surtout des connaissances que les gens ont du phénomène lui-même, à échelle globale et locale, et des conséquences sur leur mode de vie et leur sécurité (OPCC-CTP, 2021). Le rôle actif des citoyens et leur implication directe sont, de fait, essentiels pour l'adaptation au changement climatique. Les changements dans le comportement des citoyens et consommateurs vers des modèles plus durables peuvent se produire étonnamment vite, comme l'expérience nous a enseigné, puisque des outils très utiles existent, tels que l'éducation, la

sensibilisation, la science citoyenne, l'observation et le suivi des impacts environnementaux, l'engagement civique et l'innovation sociale.

Les initiatives d'adaptation au changement climatique naissent nécessairement de processus participatifs qui facilitent l'échange d'informations et de connaissances entre les preneurs de décisions (politiques, gestionnaires), les experts (scientifiques), les acteurs locaux et les populations qui vivent sur les territoires concernés par les mesures d'adaptation.

Pour changer des comportements et développer des actions plus vastes en faveur de l'adaptation au changement climatique, il est nécessaire d'impliquer et de collaborer avec tous les acteurs, c'est-à-dire, les personnes qui pensent, font, utilisent et vivent sur les territoires. L'implication active des acteurs locaux, y compris les experts, mais aussi l'ensemble de la société civile, dans l'observation de l'évolution des territoires, le diagnostic des impacts climatiques, la conception de possibles mesures d'adaptation, la prise de décisions et dans le suivi et l'évaluation des mesures mises en œuvre sont des éléments indispensables. Le dialogue entre les connaissances communes ou locales et les connaissances expertes doit encourager les acteurs du territoire à s'approprier le diagnostic des impacts du changement climatique, ce qui permettrait de mieux établir les stratégies ou actions locales d'adaptation. Le codéveloppement de réponses locales, l'expérimentation, les projets pilotes, les jeux sérieux et d'autres techniques sont des pratiques qui peuvent encourager la participation des parties intéressées et qui doivent s'utiliser dans toute expérience sur l'adaptation au changement climatique (RECO, 2021).

2. Gouvernance des ressources en eau dans les Pyrénées et stratégies d'adaptation

Fabienne Sans (FSVA Eurl), Santiago Beguería (CSIC)

Ce chapitre analyse la gouvernance de la gestion des ressources en eau dans les Pyrénées. Il s'agit d'un système complexe dans lequel convergent plusieurs agences de bassin nationales et autres agences régionales ou autonomes, et où la législation européenne et nationale se chevauche. Le principal outil de planification et de gestion des ressources en eau est constitué par les plans de bassin hydrographique, qui incluent de plus en plus l'analyse de la vulnérabilité aux effets du changement climatique et la nécessité de mettre en œuvre des stratégies d'adaptation. D'un point de vue plus général, des plans d'adaptation au changement climatique ont été élaborés tant au niveau européen qu'aux niveaux national, régional et des communautés autonomes. La stratégie pyrénéenne sur le changement climatique, développée dans le cadre de la Communauté de travail des Pyrénées (CTP), se distingue comme une initiative transfrontalière et multirégionale. Aucune de ces stratégies n'identifie les ressources en eau comme l'un des principaux axes d'adaptation au changement climatique, bien que l'importance de l'eau et des ressources en eau soit reconnue et apparaisse, de manière transversale, à différentes occasions. Il n'existe pas d'initiative régionale qui traite spécifiquement de l'adaptation au changement climatique dans la gestion des ressources en eau..

*Sans, F., Beguería, S., 2023. Gouvernance des ressources en eau dans les Pyrénées et stratégies d'adaptation. Dans (Beguería, S., ed.), Adaptation au changement climatique dans la gestion des ressources hydriques des Pyrénées. Mémoires scientifiques du projet PIRAGUA, vol. 2. Station Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Saragosse, Espagne, 17-33.
<https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14684>*

2.1. La gouvernance des ressources en eau dans les Pyrénées

2.1.1 Contexte institutionnel et historique

Il existe des différences importantes entre la gouvernance de l'eau en France, en Andorre et en Espagne, qui trouvent leur origine dans les différents contextes institutionnels et développements historiques de chacun des trois pays. Dans ce qui suit, nous allons brièvement passer en revue l'histoire de la gouvernance de l'eau dans chacun des trois pays.

La France a reconnu la pertinence de la gestion par district hydrographique dès 1964. La création d'agences financières autonomes intervient à un moment où l'enjeu qui domine la gestion de l'eau est la lutte pour la diminution des pollutions des cours d'eau. Les vagues de décentralisation du début des années quatre-vingts (1982 – 1983) puis la loi sur l'eau de 1992 ont renforcé le rôle des agences respectives des six districts hydrographiques métropolitains.

Deux niveaux de gestion emboîtés préfigurent la gestion française de l'eau qui perdure encore aujourd'hui à travers deux outils : celui de la planification de la gestion à l'échelle des districts hydrographiques (SDAGE, Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux) ; et celui de la gestion à l'échelle des sous-bassins versants (SAGE, Schéma d'Aménagement et de gestion des Eaux) (Zamarbide et al., 2018). Localement, les documents de planification traitant de la ressource en eau doivent être compatibles avec le SDAGE.

L'Espagne est un pays qui comporte dix-sept communautés autonomes. Elles disposent de leur propre gouvernement mais ne jouissent pas de l'autonomie judiciaire. L'autonomie financière de chaque communauté présente par ailleurs un degré variable. La reconnaissance officielle du bassin hydrographique comme entité pertinente de gestion est entérinée par décret royal en 1926, même si des tentatives antérieures sont observables (moitié du 19ème siècle). La fin des années 1970 et le début des années 1980 inscrivent les autonomies comme nouvel échelon administratif compétent pour la gestion de l'eau, dont le processus de transfert de compétences

est finalisé au début des années 2000. La détermination des compétences entre échelons s'effectue à l'aune d'un critère géographique : les fleuves et cours d'eau qui s'écoulent au sein d'une seule communauté autonome relèvent de l'unique compétence de la région ; tandis que les fleuves et les cours d'eaux qui débordent des limites d'une communauté relèvent de la compétence étatique via les confédérations hydrographiques (Confederaciones Hidrográficas - CCHH).

L'Espagne compte dix fleuves « transrégionaux », dont quatre transnationaux. A l'instar de la France, la gestion de l'eau espagnole compte deux outils de planification distincts à deux niveaux : i) un Plan Hydrologique National, qui « contient les mesures nécessaires pour la coordination des Plans Hydrologiques des districts, des solutions et des alternatives proposées, la prévision et les conditions des transferts des ressources hydriques entre territoires des différents bassins » ; et ii) au niveau inférieur, les Plans de Gestion de District Hydrographique. Si les districts hydrographiques sont localisés à l'intérieur des frontières d'une communauté autonome, alors ils sont gérés par les communautés autonomes. Si les districts hydrographiques sont des bassins transrégionaux, ils font l'objet d'un plan de gestion sous autorité de l'administration centrale, via la CCHH.

Historiquement, les détenteurs des concessions ont été les interlocuteurs privilégiés des CCHH. Ils intègrent les CCHH via des organes directeurs : « Junta de Gobierno » (équivalent à un conseil d'administration) et de gestion : « Asamblea de Usuarios » (assemblée des usagers), « Comisión de desembalse » (commission de déstockage des barrages), « Juntas de explotación » (comité d'exploitation). Ce sont les CCHH qui recueillent les redevances. Elles disposent donc de moyens financiers propres (Zamarbide et al., 2018).

L'Andorre, quant à elle, est un pays structuré en sept paroisses qui représentent les divisions administratives locales et disposent de leur propre autonomie exécutive et financière en matière de ressources naturelles (forêts, eau, bétail). Chaque paroisse a son propre gouvernement local sous la forme de sept Comuns, un pour chaque paroisse, qui est responsable des ressources en eau. Les Comuns sont des établissements publics dotés de la personnalité juridique et de pouvoirs réglementaires locaux, soumis à la loi,

sous forme d'ordonnances, de règlements et de décrets. L'Andorre est également structurée avec le Conseil général (Parlement) et l'Administration générale (Gouvernement). Le gouvernement détient le pouvoir exécutif de l'État et met en œuvre les lois votées par le Conseil général. Certaines de ces lois affectent la gestion de l'eau et la conservation des écosystèmes aquatiques en Andorre (Doménech et al., 2022).

Ainsi, les compétences en matière de gestion de l'eau sont réparties entre les différentes administrations, les Comuns et le Gouvernement. Le captage, le traitement et la distribution de l'eau potable dépendent des Comuns. Les communes sont également responsables de la construction, de l'exploitation, de la maintenance et de l'entretien des collecteurs d'eaux usées et d'eaux pluviales. Toutefois, le gouvernement est responsable de la construction, de l'exploitation, de la maintenance et de l'entretien des collecteurs généraux d'eaux usées. Un égout général a pour fonction de transporter les eaux usées vers les stations d'épuration, et les égouts communaux sont ceux dont la fonction est de collecter les eaux vers les égouts généraux.

Le traitement des eaux usées relève de la responsabilité du gouvernement. À cet égard, dès 1996, le gouvernement a élaboré et approuvé le Plan d'assainissement de la Principauté d'Andorre, dont les objectifs reposent sur les éléments suivants :

- La réduction progressive de la pollution de l'eau et des cours d'eau, conformément aux directives européennes sur le traitement des eaux usées, telles que la directive 91/271/CEE, entre autres ;
- Le maintien de débits minimaux dans les cours d'eau (Règlement de Protection des Habitats Aquatiques) ;
- La prévention de la pollution des nappes phréatiques ;
- L'établissement de mécanismes de contrôle ;
- La promotion d'une sensibilisation sociale à l'utilisation appropriée des ressources en eau.

- Le plan d'assainissement a divisé le pays en 4 systèmes d'assainissement en fonction de l'orographie du pays. Chaque système d'assainissement dispose d'un réseau de collecteurs général et d'une station d'épuration.

Le territoire pyrénéen est administrativement divisé en sept bassins hydrographiques, les deux plus importants étant l'Ebre et l'Adour-Garonne. Par conséquent, du point de vue de la gestion des ressources en eau, la région des Pyrénées est divisée entre plusieurs organismes. Ceux-ci sont délimités dans la Figure 2.1. Ce sont, d'ouest en est, la Confederación Hidrográfica del Cantábrico (CHC), l'Agencia Vasca del Agua / Ur Agentzia (URA), la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), l'Agencia Catalana del Agua / Agencia Catalana de l'Aigua (ACA), le ministère andorran de l'environnement, de l'agriculture et du développement durable (MMAAS), l'agence de l'eau Adour-Garonne (AEAG) et l'agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse (AERMC). Ces organismes dépendent à leur tour de différentes administrations, telles que le ministère de la transition écologique et du défi démographique du gouvernement espagnol (CHC, CHE), le gouvernement basque (URA), la Generalitat de

Catalunya (ACA), le gouvernement d'Andorre (MMAAS) et le ministère français de la transition écologique (AEAG, AERMC).

2.1.2 Plans de gestion des bassins fluviaux et d'adaptation au changement climatique

La Directive-Cadre sur l'Eau (DCE), adoptée en 2000 et première pierre angulaire de la politique européenne de l'eau, vise une gestion durable de l'eau à long terme fondée sur un niveau élevé de protection de l'environnement aquatique par la réalisation d'un bon état écologique de toutes les masses d'eau. La directive elle-même ne fait pas explicitement référence à l'adaptation au changement climatique. Toutefois, en 2009, les États membres de l'UE ont convenu que les menaces liées au climat et la planification de l'adaptation devaient être intégrées dans les plans de gestion des bassins hydrographiques (River Basin Management Plans, RBMPs) élaborés dans le cadre de la DCE (European Communities, 2009).

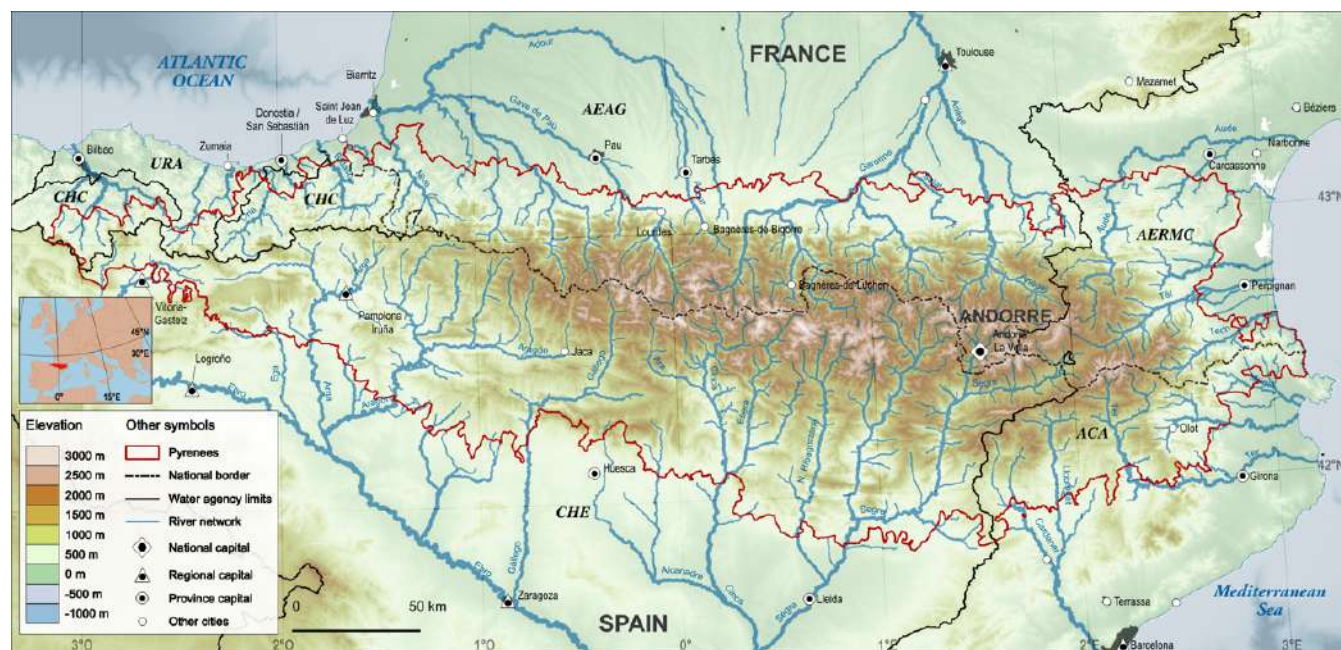


Figure 2.1. Délimitation des administrations des ressources en eau dans les Pyrénées : Confédération hydrographique de Cantabrie (CHC), Agence basque de l'eau / Ur Agentzia (URA), Confédération hydrographique de l'Ebre (CHE), Agence catalane de l'eau / Agencia Catalana de l'Aigua (ACA), Agence de l'eau Adour-Garonne (AEAG), et Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse (AERMC).

(Source: Beguería et al., 2022a.)

La Directive sur les Inondations, adoptée en 2007, vise à évaluer et à gérer les inondations de manière cohérente dans l'ensemble de l'UE et intègre directement la prise en compte des impacts du changement climatique dans sa mise en œuvre. Les États membres doivent évaluer les risques d'inondation sur leur territoire et préparer des plans de gestion des risques d'inondation (PGRI) tenant compte des impacts du changement climatique.

Les principaux instruments de la politique européenne de l'eau encadrant la gouvernance de la gestion de l'eau sont la Directive-Cadre sur l'Eau (directive 2000/60/CE) et la Directive sur les Inondations (directive 2007/60/CE).

La dernière mise à jour concernant les RBMPs est décrite dans le 5e Rapport de Mise en Oeuvre de la Commission Européenne, adopté en février 2019 (European Communities, 2019), qui indique que la prise en compte des impacts du changement climatique reste un défi important pour les prochains cycles de mise en œuvre de la DCE. Bien que la plupart des États membres aient pris en compte le changement climatique lors de l'élaboration des derniers plans de gestion des ressources en eau, l'efficacité des méthodes de protection contre le changement climatique n'est pas claire et, en général, les infrastructures vertes et les mesures de rétention d'eau sont sous-utilisées. Les solutions fondées sur la nature sont fortement encouragées par la stratégie de l'UE pour l'adaptation au changement climatique (2021), car elles sont particulièrement bien adaptées pour accroître la résilience climatique aux impacts sur l'eau (Climate-ADAPT, 2022).

En France, les stratégies d'adaptation au changement climatique dans le domaine de l'eau entrent désormais dans le champ d'application des plans de gestion des bassins hydrographiques dénommés Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE). Les SDAGEs, établis tous les cinq ans depuis 1992 en coopération avec les parties prenantes, définissent les principales orientations stratégiques des agences de l'eau françaises. Les objectifs sont définis en conformité avec le cadre réglementaire français et les directives européennes, notamment

la directive-cadre sur l'eau (Sauquet et al., 2022). L'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse a publié son Plan de bassin d'adaptation au changement climatique en 2014. L'agence de l'eau Adour-Garonne a publié en 2018 un Plan d'Adaptation au Changement Climatique (PACC) rédigé en concertation avec les acteurs locaux. Ce plan formalise les grandes orientations stratégiques de retour à l'équilibre en faisant appel à un panel d'actions concrètes possibles.

Leurs plans sont basés sur des synthèses de connaissances de l'impact du changement global sur la gestion de l'eau, réalisées par des instituts de recherche dans le cadre de partenariats. La stratégie d'adaptation repose en partie sur une analyse de la vulnérabilité dans différents secteurs liés à l'eau (érosion côtière, ressources en eau de surface et souterraine, humidité du sol, biodiversité et qualité de l'eau). Les six agences de l'eau ont publié ensemble des recommandations pour que les acteurs s'engagent dans des stratégies d'adaptation en 2018 dans le rapport « Eau et changement climatique - Agir pour ne pas subir ». Ces mesures ne sont pas exhaustives et elles peuvent être appliquées à l'échelle locale en fonction de leur pertinence et de leur efficacité. Les Agences de l'eau françaises suggèrent d'identifier quel secteur / domaine serait très sensible au changement climatique. Cela permettra d'identifier les priorités d'actions. Elles encouragent les actions sans regret et multifonctionnelles dans le contexte d'un avenir incertain. Les actions sans regret sont des actions bénéfiques quelle que soit l'ampleur du changement climatique. Les actions multifonctionnelles, qui sont bénéfiques pour l'eau, la biodiversité, le stockage du carbone ou les sols, permettront de répondre à plusieurs objectifs. Elles suggèrent également de définir des stratégies d'adaptation par territoire ou par secteur au niveau local (Sauquet et al., 2022).

En Espagne, l'objectif de la planification hydrologique est d'atteindre le bon état et la protection adéquate du domaine public de l'eau (DPH) et de l'eau, la satisfaction des demandes en eau, ainsi que l'équilibre et l'harmonisation du développement régional et sectoriel. Il s'agit essentiellement d'un outil de gestion adaptative, qui est évalué et révisé tous les six ans.

Le nouveau Plan hydrologique de l'Ebre 2022-2027 (PHDE) accorde une attention particulière à la prise en compte du changement climatique (CHE, 2021). À titre d'exemple, les plans hydrologiques élaborés par la Confédération hydrographique de l'Ebre ont envisagé une réduction de 5 % des apports naturels dans le bassin en raison du changement climatique (à partir de 2039). Cette réduction signifie, globalement, une variation des contributions totales de la démarcation. Il est essentiel de souligner que la réduction des ressources est l'un des principaux aspects de la rédaction du nouveau PHDE, car elle a des répercussions importantes sur l'établissement de nouvelles allocations et réserves. En outre, et afin de parvenir à des conclusions fondées sur le principe de précaution, un scénario a été envisagé qui prend en compte une réduction des ressources de 20% (scénario 2070-2100).

Cependant, il n'existe pas encore de plans d'adaptation au changement climatique dans les bassins qui analysent la vulnérabilité aux changements dans les ressources en eau et qui proposent des mesures d'adaptation dans le cadre d'une évaluation des risques, comme cela a été fait dans d'autres pays. À cet égard, la Commission européenne, dans son rapport sur l'évaluation des plans hydrologiques du deuxième cycle, reconnaît que les effets du changement climatique ont été pris en compte dans les plans espagnols. Cependant, la Commission estime également que les mesures d'adaptation à adopter pour faire face aux pressions importantes qui pourraient être exacerbées par le changement climatique ne sont pas clairement identifiées (Commission européenne, 2019). Cette révision du plan hydrologique tente d'apporter une première réponse aux nouvelles exigences par l'incorporation de plusieurs contenus faisant référence aux effets du changement climatique (CHE, 2021).

Le SDAGE Adour-Garonne 2022-2027 intègre les principes fondamentaux du PACC de 2018, dans une nouvelle orientation qui décrit les principes transversaux s'imposant à toutes les thématiques. Il regroupe les mesures transversales du SDAGE 2016-2021, à savoir le principe de non-détérioration et la réduction de l'impact des

Installations, Ouvrages, Travaux, Aménagements (IOTA) ainsi que la mise en place de la séquence « Éviter-Réduire-Compenser » (ERC). Le SDAGE doit assurer une meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau et de lutte contre le gaspillage de la ressource, l'objectif étant de garantir un accès à une eau de qualité en quantité suffisante pour tous les usages, dans un contexte de raréfaction de la ressource.

Enfin, le SDAGE accompagnera un développement d'activités et une occupation des sols compatible avec les ressources en eau disponibles localement avec la prise en compte des risques naturels. Il s'agit d'identifier et de mettre en œuvre les scénarios possibles d'adaptation des activités fortement consommatrices en eau dans les régions actuellement déficitaires : gestion des prélèvements, développement de filières agricoles économes en eau, limitation de l'imperméabilisation des sols et valorisation de l'infiltration des eaux pluviales, etc.

Au-delà de la gestion quantitative, le projet de SDAGE s'attache à restaurer les rivières vivantes et à lutter contre les pollutions, ce qui contribuera à limiter les incidences du changement climatique en favorisant la résilience du milieu aquatique. L'ensemble de ces mesures répond aux attentes fixées par les objectifs nationaux, européens et internationaux (Comité de Bassin Adour-Garonne, 2021).

2.2. Stratégies d'adaptation au changement climatique en relation avec les ressources en eau

2.2.1 Le contexte international et européen

Au niveau international, l'Agenda 2030 pour le développement durable est adopté durant le Sommet de l'Assemblée générale des Nations Unies à New York, les 26, 27 et 28 septembre 2015. Il s'agit d'un plan d'action qui vise à éradiquer la pauvreté, protéger la planète et garantir la prospérité. Il fixe 17 objectifs de développement durable (ODD), en associant à chaque objectif des cibles à atteindre à l'horizon 2030. Certains d'entre eux portent directement sur le changement climatique, comme l'ODD 13 qui vise à « prendre d'urgence des mesures pour lutter contre le changement climatique et ses répercussions » face aux aléas naturels. A cela viennent s'ajouter d'autres ODD en lien avec les impacts du changement climatique, tels que l'ODD 14 sur « la protection de la faune et de la flore aquatiques », l'ODD 15 sur « la protection de la faune et de la flore terrestres » et l'ODD6 sur « garantir l'accès de tous à l'eau et à l'assainissement et assurer une gestion durable des ressources en eau ».

Le changement climatique fait également l'objet d'un accord international, l'accord de Paris, adopté le 12 décembre 2015 lors de la COP21. Il s'agit du premier accord universellement adopté sur le domaine du changement climatique, et à caractère contraignant. Celui-ci fixe des objectifs précis dans son article 2 : limiter l'élévation de la température à 1,5°C par rapport aux niveaux préindustriels, renforcer les capacités d'adaptation aux effets néfastes des changements climatiques, promouvoir la résilience à ces changements et un développement à faible émission de gaz à effet de serre.

Il est important enfin de rappeler que l'évolution du climat fait l'objet d'un suivi du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), organisme créé en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). La principale mission du GIEC consiste à évaluer l'état des connaissances les plus avancées relatives au changement climatique, ses causes et ses impacts.

Il publie régulièrement des rapports dont le dernier « Changements climatiques 2021 : les bases scientifiques », publié le 09 août 2021, est le premier volet (sur trois) du sixième rapport d'évaluation du GIEC, dont les deux autres parties, portant sur les impacts et sur les solutions, seront achevées en 2022.

Ces engagements internationaux se traduisent par la volonté de mettre en œuvre de politiques à l'échelle européenne, nationale et régionale.

Au niveau de l'Union Européenne le Pacte vert européen (Green Deal), présenté par la Commission Européenne le 11 décembre 2019, constitue un ensemble d'initiatives politiques visant principalement à atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. Pour ce faire, le Pacte vert européen doit mobiliser l'ensemble des secteurs de l'économie (énergie, industrie, bâtiments...), avec un financement à hauteur de 1 000 milliards d'euros sur 10 ans. Dans cette optique, le 9 décembre 2020, la Commission Européenne a également présenté le pacte européen pour le climat visant à faire participer les citoyens et l'ensemble de la société à l'action pour le climat. De même, depuis le 9 juillet 2021, l'objectif de neutralité climatique de l'UE d'ici 2050 est devenu contraignant pour tous les États membres, avec la publication de la « loi européenne sur le climat » (règlement UE 2021/1119).

Enfin, pour mettre en œuvre l'ambition du Pacte vert d'améliorer la résilience du territoire européen face aux effets du changement climatique, la Commission européenne a adopté le 24 février 2021 sa nouvelle stratégie européenne d'adaptation au changement climatique. Ainsi, 4 objectifs principaux sont identifiables, afin de se préparer aux conséquences inévitables du changement climatique : rendre l'adaptation plus intelligente, plus rapide et plus systématique, et intensifier l'action internationale en matière d'adaptation au changement climatique.

Cette stratégie européenne souligne l'importance de veiller à ce que l'eau douce soit disponible de manière durable, que l'utilisation de l'eau soit fortement réduite et que la qualité de l'eau soit préservée. Les principaux instruments de la politique européenne de l'eau permettant

d'intégrer ces idées sont la directive-cadre sur l'eau (directive 2000/60/CE), la directive sur les inondations (directive 2007/60/CE), les différentes communications et réglementations relatives à la gestion de la sécheresse et la directive révisée sur l'eau potable (directive 2020/2184).

2.2.2 Plans nationaux d'adaptation au changement climatique

A l'échelle nationale, la France a adopté un premier Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC) en 2011. Cinq priorités du premier PNACC liées aux ressources en eau sont mises en avant : (i) accroître les connaissances sur les impacts du changement climatique ; (ii) développer des outils spécifiques pour surveiller les ressources en eau et l'allocation de l'eau dans une perspective à moyen et long terme ; (iii) encourager les économies d'eau et assurer une utilisation plus efficace de l'eau ; (iv) favoriser un développement en accord avec les ressources en eau locales disponibles ; et (v) prendre en compte les mesures d'adaptation dans la planification de la gestion de l'eau. L'ambition est d'atteindre une diminution de 20% des prélèvements d'eau d'ici les années 2020.

Un second PNACC a été adopté en 2018, après consultations et évaluation du premier PNACC. L'objectif général est de mettre en œuvre les actions nécessaires pour adapter, d'ici 2050, les territoires de la France métropolitaine et outre-mer aux changements climatiques régionaux attendus, et ce, en cohérence avec les objectifs des conventions internationales décrites précédemment. Ce PNACC est composé de six « domaines d'action ». Le domaine d'action « Nature et milieux » vise à renforcer la résilience des écosystèmes pour leur permettre de s'adapter au changement climatique et s'appuyer sur les capacités des écosystèmes pour aider notre société à s'adapter au changement climatique, en anticipant les transformations à venir. Les mesures à mettre en œuvre concernent des ressources et milieux variés tels que l'eau et les écosystèmes aquatiques, les sols, les mers et

littoraux, les forêts et la biodiversité. Dans l'axe « Adaptation et préservation des milieux » plusieurs actions sont proposées pour la ressource en eau et les écosystèmes aquatiques. Il s'agira de faire converger une offre prévue en diminution avec une demande qui, déjà par endroits, n'est pas satisfaite, autour de deux objectifs : encourager la sobriété et l'efficacité des usages et réguler en amont la ressource, grâce notamment à l'innovation et à la modification des pratiques ; faire émerger, dans l'ensemble des territoires, des solutions adaptées aux besoins et aux contextes locaux, notamment dans le cadre de projets de territoires pour la gestion de l'eau. Il s'agira également de continuer à améliorer la qualité de l'eau et à veiller à la sécurité sanitaire de cette ressource dans un contexte climatique en évolution, et de préserver les écosystèmes aquatiques.

Deux autres domaines d'actions sont en liens avec la démarche du projet PIRAGUA :

- Le domaine d'action « Gouvernance » vise à renforcer le pilotage stratégique de la démarche d'adaptation dans une logique de co-construction avec les échelons de gouvernance territoriaux, incluant les acteurs locaux et la société civile ;
- enfin, le dernier domaine concerne le renforcement de l'action internationale. Ceci implique notamment le renforcement de dispositifs d'observation et de capitalisation transfrontaliers pour identifier les vulnérabilités communes et les transferts de vulnérabilité potentiels et renforcer également les capacités d'adaptation des territoires et des acteurs transfrontaliers.

En Espagne, le deuxième plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC), qui couvre la période 2021-2030, a été approuvé par le Conseil des ministres le 21 janvier 2020. Ce PNACC vise à répondre au besoin croissant d'adaptation au changement climatique en Espagne, ainsi qu'à ses engagements internationaux dans ce domaine. Elle jette les bases de la promotion, au cours de la prochaine décennie, d'un développement plus résilient au

changement climatique, ainsi que d'une action coordonnée et cohérente pour éviter ou réduire les dommages actuels et futurs du changement climatique, et pour construire une économie et une société plus résilientes.

La NAPCC 2021-2030 élargit les questions abordées, les acteurs impliqués et l'ambition de ses objectifs. Pour la première fois, le cadre du NAPCC fixe des objectifs stratégiques et définit un système d'indicateurs d'impact et d'adaptation au changement climatique. On distingue neuf objectifs spécifiques qui contribuent de manière complémentaire à l'objectif général. Le premier objectif est d'améliorer les connaissances sur le changement climatique, c'est-à-dire l'observation systématique du climat, la génération de connaissances sur les impacts, les risques et l'adaptation en Espagne et leur transfert à la société. Cela permettra de définir et de mettre en œuvre les mesures d'adaptation correspondantes. Le renforcement des capacités d'adaptation du pays est un axe principal de la stratégie, ainsi que son intégration dans les politiques publiques, le suivi et l'évaluation. La coordination administrative et le renforcement de la gouvernance dans le domaine de l'adaptation font également l'objet d'un objectif spécifique. Enfin, il s'agit également de promouvoir la participation de tous les acteurs, y compris les différents niveaux d'administration, le secteur privé, les organisations sociales et tous les citoyens, qui contribuent activement à la construction de réponses aux risques découlant du changement climatique. La réalisation de ces objectifs permettra à l'Espagne de remplir et de développer les engagements acquis dans le contexte européen et international.

Le PNACC 2021-2030 définit et décrit 81 lignes d'action sectorielles organisées en 18 domaines de travail (Tableau 2.1). Parmi elles, il y en a une consacrée à l'eau et aux ressources en eau. Dans ce domaine, on distingue six (6) lignes d'action, qui sont décrites de manière très concise ci-dessous :

- Élargissement et mise à jour des connaissances sur les impacts du changement climatique sur l'eau et la gestion des ressources en eau.

- L'intégration de l'adaptation au changement climatique dans la planification hydrologique.
- Gestion du risque de sécheresse contingente intégrée dans la planification de l'eau.
- Gestion coordonnée et contingente des risques d'inondation.
- Actions visant à améliorer l'état des masses d'eau et des écosystèmes aquatiques, avec un impact sur les eaux souterraines.
- Suivi et amélioration des connaissances sur les effets du changement climatique sur les masses d'eau et leurs usages.

Parallèlement à ce plan d'adaptation, la loi 7/2021, du 20 mai, sur le changement climatique et la transition énergétique (LCCTE) a été approuvée. La LCCTE va un peu plus loin et inclut dans son objet, pour la première fois, les politiques d'adaptation et la nécessité de définir un système d'indicateurs d'impacts et d'adaptation au changement climatique, ce qui facilite le suivi et l'évaluation des politiques publiques, ainsi que la nécessité d'établir des rapports sur les risques. Ainsi, il est nécessaire d'approuver la Stratégie de l'eau pour la transition écologique dans un délai d'un an à compter de l'entrée en vigueur de cette loi (art. 19.2), dont les principes correspondent à l'adaptation et à l'amélioration de la résilience de la ressource et des usages face au changement climatique dans l'identification, l'évaluation et la sélection des actions dans les plans hydrologiques et dans la gestion des eaux (art. 19.4e).

Suivant la même logique que le PNACC français, le PNACC espagnol accorde une attention particulière à une série de dimensions stratégiques et de principes directeurs qui devraient faciliter la définition et le développement d'initiatives d'adaptation efficaces.

Tableau 2.1. Principes directeurs du PNACC 2021-2030.

Génération de connaissances

Les réponses adaptatives doivent être fondées sur une connaissance adéquate des risques liés au changement climatique.

Intégration dans les plans, programmes et règlements sectoriels

L'incorporation de l'adaptation dans les politiques sectorielles se concrétise et se base sur son intégration dans les plans et programmes élaborés par les administrations publiques, ainsi que dans les règles qui régulent l'activité de chaque domaine sectoriel : Dans le cas de l'eau : Plans de bassin hydrologique ; Plans de gestion des risques d'inondation ; Plan national d'épuration, d'assainissement, d'efficacité, d'économie et de réutilisation ; Plans spéciaux de sécheresse des organismes de bassin.

Mobilisation des parties prenantes

L'adaptation au changement climatique ne peut être conçue que comme un projet collectif, impliquant un large éventail d'institutions... favorisant l'information, la diffusion, la formation et la recherche ainsi que l'innovation et la participation sociale.

Suivi et évaluation

La planification et le développement dérivés du PNACC-2 auront une approche itérative, afin de garantir des processus flexibles, robustes et évitant les erreurs d'adaptation, permettant l'intégration périodique des meilleures données scientifiques disponibles.

En Andorre, plusieurs stratégies et législations d'adaptation au changement climatique ont été déployées ces dernières années. Les plus importants d'entre eux sont énumérés ci-dessous :

- Adhésion à la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) (2011) pour la mise en œuvre des processus liés à la lutte contre le changement climatique.
- Processus d'adaptation au changement climatique d'Andorre (PAACC, 2015) [12], afin de fournir au pays des ressources et des mesures d'adaptation pour devenir moins vulnérable aux impacts du changement climatique.
- La stratégie nationale pour la biodiversité d'Andorre (ENBA, 2016)[13], afin de garantir une action visant à enrayer la crise de la biodiversité dans le contexte du changement climatique.
- Ley de Impulso a la Transición Energética y del Cambio Climático (LITECC, 2018)[14]”, promeut et accompagne la transition vers un nouveau modèle énergétique basé sur l'utilisation des énergies renouvelables et des énergies à faible émission de carbone.
- Stratégie nationale pour l'énergie et le changement climatique (OECC, 2021) [15] visant à réduire les émissions nationales et à s'adapter aux effets du changement climatique, conformément aux objectifs de l'accord de Paris de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC).

Tant la loi 21/2018 sur la transition énergétique et le changement climatique (Litecc) que la stratégie nationale pour l'énergie et le changement climatique (EENCC), approuvée en février 2021, doivent conduire à une réduction des émissions de gaz à effet de serre afin de garantir la neutralité carbone d'ici 2050.

Le document EENCC est structuré en cinq programmes : le programme de décarbonisation ; le programme d'adaptation au changement climatique et de renforcement de la résilience ; le programme du marché national des crédits carbone et autres outils fiscaux ; le programme de transition sociale ; et le programme d'innovation, de recherche et d'observation systématique. Les programmes sont ensuite répartis en 17 activités spécifiques. L'activité 7 sur « Promouvoir des solutions fondées sur la nature pour améliorer la résilience » est la principale activité traitant de l'eau.

2.2.3 Stratégies régionales et transfrontalières d'adaptation au changement climatique dans les Pyrénées

Toutes les Régions et Communautés autonomes du territoire pyrénéen, membres de la Communauté de Travail des Pyrénées (CTP), ont élaboré leurs politiques régionales de changement climatique et certaines des lois comme la loi 16/2017 de Catalogne, conformément aux orientations des stratégies européennes et des stratégies nationales. Ces stratégies ont plusieurs points communs. Elles visent des objectifs à 2030-2050, la plupart traitent à la fois d'atténuation et d'adaptation au changement climatique.

Les six stratégies régionales et celle de l'Andorre abordent plusieurs thématiques communes dont celles d'intérêt pour le projet PIRAGUA : l'eau, les écosystèmes et la biodiversité, les boisements, le tourisme, la gestion des risques et l'aménagement du territoire.

Elles sont portées par les Régions et Communautés autonomes en concertation et coordination avec des groupes intersectoriels. Certaines stratégies comme celle d'Occitanie, d'Aragon ou de Catalogne comportent des mesures spécifiques pour les Pyrénées. Un tableau de synthèse de ces stratégies est présenté ci-après (Tableau 2.2).

Tableau 2.2. Présentation synthétique des stratégies des 7 territoires des Pyrénées.

	Marco temporal	Governanza
Nouvelle Aquitaine	SRADDET 2030. Feuille de route NéoTerra 2030	Région et Etat Représentants SCOT - EPCI COPTEC Conseil scientifique (AcclimaTerra) Citoyens (Budget part.)
Aragón	La Estrategia Aragonesa de Cambio Climático horizonte 2030 (EACC 2030)	Gobierno de Aragón - DCCEA Comisión Interdepartamental de Cambio Climático Consejo Aragonés del Clima Ciudadanos: Participa
Cataluña	Estratègia catalana d'adaptació al canvi climàtic 2021 2030 (ESCACC30)	Oficina Catalana del Cambio Climático (OCCC) Comisión Interdepartamental del Cambio Climático (CICC) Grupo de Expertos en Cambio Climático en Catalunya (GECCC) Mesa Social del Cambio Climático
Occitanie	SRADDET - Occitanie 2040 Plan Montagne 2025	Région Etat SCOT - EPCI Assemblée des territoires Parlement de la Montagne Citoyens (Budget part.)
Andorra	Estratègia energètica nacional i de lluita contra el canvi climàtic (EENCC) 2020-2050 Estrategia nacional de movilidad 2021-2050	Ministeri de Medi Ambient, Agricultura i Sostenibilitat L'Oficina de l'Energia i del Canvi Climàtic Comissió Nacional de l'Energia i del Canvi Climàtic Subcomisión permanente de trabajo técnico en el marco de la movilidad
Euskadi	Estrategia de Cambio Climático 2050 del País Vasco Proyecto LIFE URBAN KLIMA 2050 (2019- 2025)	Gobierno Euskadi - DMA Comisión Ambiental del País Vasco, sección de cambio climático Grupo Técnico de Coord. de CC
Navarra	Hoja de Ruta de lucha frente al cambio climático HCCN-KLINA 2030-2050 Proyecto LIFE-IP NADAPTA-CC 2018-2025	DG de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio Comisión Interdepartamental del Cambio Climático (CICC) Plataforma multi-agente AGORA KLINA

Temas comunes: Ordenación del territorio; Energía; Transporte y Movilidad; Ecosistemas y Biodiversidad; Agua; Silvicultura; Agricultura; Turismo; Riesgos naturales; Suelo (Agricultura); Residuos; Salud; Economía circular (Andorra); Acción municipal (Euskadi, Navarra); Información - Difusión - Educación; Innovación - Investigación; Seguimiento - Evaluación

Les sept territoires membres de la CTP ont une longue trajectoire de coopération et en particulier pour ce qui concerne le changement climatique avec l'Observatoire Pyrénéen de Changement Climatique, créée en 2010. Récemment, la CTP-OPCC a souhaité aller plus loin et inscrire dans la durée son action pour le Climat par l'élaboration d'une Stratégie Pyrénéenne de Changement Climatique, EPiCC (OPCC-CTP, 2021). Cette stratégie est axée sur la coopération des sept territoires afin de renforcer, compléter et coordonner les différentes stratégies régionales (Figure 2.2).

L'EPiCC a été construite et développée grâce à la coopération et à la contribution d'une centaine de personnes issues des sphères socio-économiques, politiques et scientifiques. Cette stratégie vise à prendre en compte toutes les contributions pertinentes des sept territoires frontaliers. Grâce à un processus inclusif et participatif, ce document a été réalisé de juin 2020 à septembre 2021, enrichi par les suggestions et les avis de tous les acteurs pyrénéens. Les bases de cette nouvelle stratégie transfrontalière pour les Pyrénées en matière de changement climatique sont résumées ci-après :

- Une vision pour 2050 : En 2050, les Pyrénées seront un territoire résilient aux effets du changement climatique.
- Cinq principes fondamentaux qui font référence à la coopération transfrontalière ; à la génération et au transfert de connaissances, aux actions innovantes, aux actions en synergie avec d'autres stratégies et à la visibilité des Pyrénées en Europe et dans le monde.
- Cinq objectifs stratégiques liés au développement des connaissances, à la gestion durable de la biodiversité et des ressources naturelles, à la contribution à la transition écologique et juste, à la gestion cohérente du territoire au regard des risques liés du changement climatique, et à la contribution à une gouvernance qui favorise la connaissance mutuelle, la coopération et la coordination.
- Une stratégie qui s'organise autour de cinq systèmes et quinze défis et qui sera mise en œuvre au travers de plans d'action à échéance 2030 et 2050.

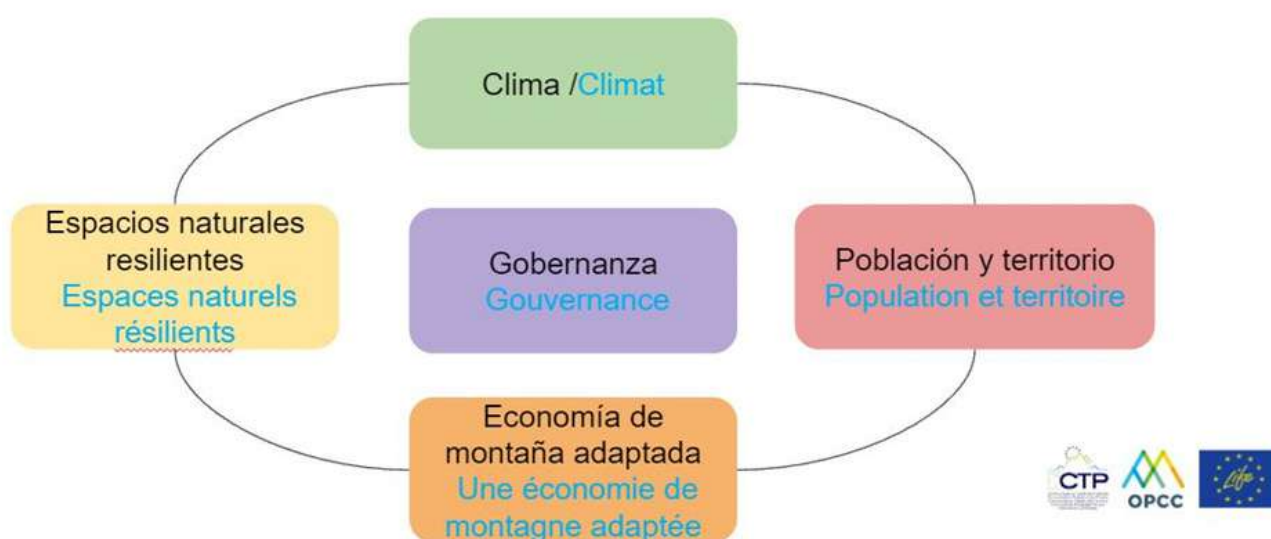


Figura 2.2. Los cinco sistemas que estructuran la Estrategia Pirenaica del Cambio Climático (EPiCC).
(Fuente: OPCC-CTP, 2021).

Afin d'atteindre les objectifs stratégiques sur le changement climatique pour les Pyrénées, 15 défis sont proposés qui concernent différents secteurs de la réalité pyrénéenne, mais qui, ensemble, permettent d'agir de manière globale sur la question du changement climatique. 38 pistes d'actions ont été élaborées pour concrétiser davantage et indiquer comment agir pour relever

les défis. Pour chaque piste d'action, des actions sont spécifiées dans le premier programme d'action de l'EPiCC afin d'atteindre les objectifs climatiques des Pyrénées à une première échéance de 2030. Les défis et pistes d'actions concernant le Climat et les Espaces Naturels Résilients sont les suivants (Tableaux 2.3 à 2.4).

Tableau 2.3. Défis et pistes d'actions de la EPICC pour le système « Climat » (OPCC-CTP, 2021).

Défis	Pistes d'action
Disposer d'informations climatiques actualisées, analysées et accessibles pour tous les acteurs des Pyrénées.	• Promouvoir l'innovation et le transfert des connaissances scientifiques sur le climat. • Mettre à jour les bases de données climatiques à l'échelle des Pyrénées et les mettre à disposition des territoires. • Mettre à jour le calcul des principaux indicateurs sectoriels du changement climatique au niveau de la chaîne de montagne. • Assurer la continuité des systèmes transfrontaliers de suivi et de mesure de la variabilité climatique, en introduisant des innovations technologiques.
Tirer profit des réseaux internationaux pour mettre en exergue la vulnérabilité des montagnes au changement climatique.	• Participer aux réseaux nationaux et internationaux sur le changement climatique dans les zones de montagne. • Promouvoir les synergies et les collaborations avec les organismes européens et transfrontaliers d'autres zones de montagne.

Tableau 2.4. Défis et pistes d'actions de la EPICC pour le système « Espaces Naturels Résilients » (OPCC-CTP, 2021).

Défis	Pistes d'action
Assurer une gestion résiliente des rivières des Pyrénées et la qualité de l'eau, en particulier en amont des bassins versants.	• Évaluer la disponibilité des ressources en eau sur la base de scénarios de changement climatique et de modèles de la demande, à l'échelle du massif. • Promouvoir des mesures de gestion de l'offre et de la demande en eau dans les secteurs les plus vulnérables.
Lutter contre la perte progressive de biodiversité et dégradation des paysages face au changement climatique et global.	• Promouvoir une gestion adaptative du paysage et une gestion active du système des espaces naturels protégés. • Améliorer la connaissance des impacts actuels et prévus du changement climatique sur les habitats et les espèces particulièrement sensibles des Pyrénées. • Protéger la biodiversité et les espèces les plus vulnérables en conservant, améliorant et restaurant leurs habitats.
Anticiper les maladies et ravageurs émergents.	• Renforcer et coordonner les plans de prévention, suivi, contrôle et gestion des espèces pyrénéennes vulnérables, des espèces exotiques envahissantes et parasites. • Contribuer à l'amélioration des systèmes d'alerte transfrontaliers pour les parasites, les espèces envahissantes et les maladies émergentes.
Faire face aux extrêmes climatiques pour préserver les services écosystémiques.	• Promouvoir la gestion adaptative des écosystèmes naturels et des sols pyrénéens en faveur de leur multifonctionnalité, d'une plus grande résilience aux extrêmes climatiques et des services. • Développer des outils et des méthodologies pour la gestion et prévention des risques naturels et climatiques à l'échelle des Pyrénées, par le biais des solutions fondées sur la nature (NBS).

Enfin, l'EPiCC s'appuie sur un nouveau système de gouvernance, particulièrement important pour la réalisation des objectifs et des progrès proposés, un système dynamique capable de promouvoir la coordination horizontale avec d'autres politiques (liées au changement climatique) et territoires (avec les stratégies régionales et locales), et la coordination verticale (avec les stratégies et les politiques définies au niveau des états et de l'Europe et les accords mondiaux). En même temps, la gouvernance de l'EPiCC doit intégrer la grande diversité des acteurs et entités scientifiques, économiques, sociales et politiques des Pyrénées et permettre de tisser des relations qui s'adaptent à tout moment aux besoins et aux changements requis par un avenir incertain.

2.3. Conclusions

Les Pyrénées sont un territoire transfrontalier et administrativement complexe, ce qui se reflète dans la planification et la gestion des ressources en eau. Du point de vue juridictionnel, la compétence hydrographique est répartie entre quatre organismes de bassin suprarégionaux (Confederación Hidrográfica del Cantábrico, Confederación Hidrográfica del Ebro, Agence de l'eau Adour-Garonne et Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse) et deux organismes régionaux (Agencia Vasca del Agua / Ur Agentzia et Agencia Catalana de l'Aigua), en plus du gouvernement d'Andorre. Cette situation se traduit par une gouvernance complexe dans laquelle les législations nationales et régionales se chevauchent, bien qu'elles soient toutes conformes aux directives européennes (principalement la directive-cadre sur l'eau 2000/60/CE et la directive sur les inondations 2007/60/CE).

Les outils clés pour la gouvernance de la gestion des ressources en eau sont les plans de bassin, appelés Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) en France et Planes Hidrológicos de cuenca (PH) en Espagne. La préparation et la révision des plans de bassin hydrographique, conformément à la directive-cadre sur l'eau, sont effectuées périodiquement et comportent une forte composante de consultation et de participation du public. Les plans de bassin sont chargés de définir les stratégies et les outils permettant d'atteindre les objectifs fixés par les différentes législations (européenne, nationale et régionale), tout en garantissant la satisfaction des demandes en eau de la région en termes de quantité et de qualité.

Dans les révisions successives des plans de bassin, la composante d'adaptation au changement climatique a un poids de plus en plus important. Cependant, dans le contexte de l'adaptation, il existe une variété beaucoup plus grande d'instruments, qui se chevauchent à nouveau en termes de compétence territoriale. Ainsi, sous l'égide des accords internationaux et de la stratégie européenne d'adaptation au changement climatique, des stratégies nationales d'adaptation ont été élaborées en France et en Espagne. Un plan d'adaptation a également été élaboré en Andorre. Ceux-ci se superposent aux plans

d'adaptation élaborés par les régions et les communautés autonomes.

Bien que toutes ces stratégies abordent inévitablement des questions similaires, il n'y a pas eu de coordination dans le développement de ces stratégies jusqu'à présent. En ce qui concerne les ressources en eau, il serait important de les compiler et de les systématiser, y compris les exemples spécifiques de bonnes pratiques, afin de faciliter les progrès en matière d'adaptation au changement climatique.

3. La concurrence pour les ressources hydriques aujourd'hui et leur évolution future : le cas de la principauté d'Andorre

Marta Domènech, Oriol Travesset, Marc Pons (AR+I)

Cette étude de cas analyse les ressources hydriques actuelles et futures de la principauté d'Andorre, où la convergence du changement climatique et d'un modèle socio-économique basé sur une utilisation intensive de l'eau pourrait menacer la durabilité à venir du système. L'analyse principale est réalisée au moyen de l'outil WEAP (Water Evaluation and Planning System), en mettant en œuvre un modèle qui explore l'évolution future des ressources hydriques en associant des scénarios climatiques et socio-économiques. Les résultats suggèrent une diminution du débit annuel dans le futur. Le schéma de changements dans sa distribution tout au long de l'année dans les bassins andorrans est conforme aux estimations dans les autres régions de la cordillère pyrénéenne et les Alpes, avec une fonte des neiges précoce, une augmentation du débit durant les mois d'hiver et une réduction des ressources concentrée entre le milieu du printemps et l'été. La réduction maximale du débit devrait se concentrer en été, lorsque les débits seront nettement inférieurs aux débits actuels. Il s'agit de la période la plus vulnérable et pour laquelle il faudra destiner davantage de ressources, afin d'évaluer l'impact sur les fonctions écosystémiques de certains tronçons de rivières. La réduction des ressources ne devrait pas conditionner la disponibilité en eau pour l'usage humain avant 2050, bien que le maintien des tendances de croissance puisse la compromettre à long terme. Sur le moyen terme, le plus grand impact se produira sur les fonctions écosystémiques des rivières et la compatibilité de la conservation de ces fonctions avec la demande en eau pour certaines périodes et tronçons, notamment à la fin de l'été. Cette étude analyse également, à l'échelle du pays, le potentiel de différentes mesures d'adaptation au changement climatique pour les principaux secteurs d'activité. En parallèle, les stratégies destinées à améliorer l'efficacité de l'usage de l'eau dans les stations de ski ont été mises en œuvre dans deux essais pilotes dans les stations de Grandvalira et de Vallnord.

Citer comme : Domènech, M., Travesset, O., Pons, M., 2022. La concurrence pour les ressources hydriques aujourd'hui et leur évolution future : le cas de la principauté d'Andorre. Dans (Beguería et al., 2022) Adaptation au changement climatique dans la gestion des ressources hydriques des Pyrénées. Mémoires scientifiques du projet PIRAGUA, vol. 2. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Saragosse, Espagne, 35-57.
<https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/15255>

3.1. Introduction

La plupart des principales rivières de la planète prennent leur source dans les terres hautes, et plus de la moitié de l'humanité dépend de l'eau douce qui est générée dans les régions montagneuses. Bien qu'elles constituent une proportion relativement faible des bassins hydrographiques, la plus grande partie du débit de la rivière en aval provient des montagnes. À mesure que la demande croît, le potentiel de conflit pour l'utilisation de l'eau de montagne augmente. Par conséquent, la gestion durable dans les régions en amont, ainsi que des ressources elles-mêmes, notamment la régulation de la concurrence des différents usages et secteurs impliqués doit devenir une priorité mondiale dans un monde qui avance vers une crise de l'eau au cours du prochain siècle (Mountain Agenda, 2001).

L'eau disponible dans les régions montagneuses est une limitation et, en même temps, une opportunité pour le tourisme dans ces régions. Pour la plupart des centres touristiques de montagne en Europe, la neige est devenue la principale ressource touristique entre 1960 et 1980, ce qui a entraîné une forte dépendance de cette ressource et le développement d'un modèle d'affaires fondamentalement basé sur la saison hivernale (Clarimont et al., 2001; Reynard, 2020). Depuis la fin des années 1980, la hausse des températures et la variabilité interannuelle des précipitations hivernales ont sapé cette activité et les centres touristiques ont dû s'adapter en développant des installations de production de neige artificielle (Scott, 2006). Dans les Alpes françaises, en Isère, entre 2001 et 2016, la consommation d'eau pour la neige artificielle est passé de 600 000 m³ en l'an 2000 à 1,6 Mm³ en 2016 (Gerbaux et al., 2020). En 2007, uniquement dans les sous-bassins des Pyrénées françaises de l'Adour et de la Garonne, 1,8 hm³ d'eau ont été consommés pour la production de neige artificielle (Clarimont et al., 2001). Les stations de ski de Gourette ou de Formigal ont consommé 300 000 m³ annuels pour la production de neige (Clarimont et al., 2001), tandis que la consommation de toutes les stations de ski d'Andorre atteint actuellement 1,5 hm³ (Govern d'Andorra, 2021a). Dans les Pyrénées, le nombre de canons à neige artificielle a augmenté de 13 % au cours de ces 10 dernières années. (Prudencio, 2021)

Face à cette réalité, de plus en plus d'alternatives sont recherchées, comme d'autres sports d'hiver ou des activités de montagne en été (Reynard, 2020).

Un autre des défis auxquels sont confrontées les régions montagneuses est la compatibilité entre la production d'énergie hydroélectrique et la conservation des fonctions écosystémiques des rivières et des habitats associés. L'augmentation du nombre de stations hydroélectriques dans les montagnes d'Europe en réponse à la transition et à la diversification énergétique est déjà un fait (Popa et al., 2020; Velychko & Dupliak, 2021). Ces stations, dont les émissions de Gaz à effet de serre (GES) sont quasi nulles, doivent respecter les différents régimes de débits environnementaux. De fait, il est également nécessaire d'optimiser les installations hydroélectriques pour parvenir à un équilibre avec les exigences écologiques des systèmes hydriques touchés et les écosystèmes terrestres adjacents. En outre, les tronçons de rivières sans modification artificielle du débit sont de plus en plus singuliers ces dernières années et menacés par des modifications (captages, chantiers, etc.), conduisant à un conflit d'intérêts.

3.1.1 La concurrence pour les ressources hydriques dans les Pyrénées

D'une densité d'environ 23 hab/km² (OPCC-CTP, 2013), les Pyrénées sont généralement considérées comme un territoire peu peuplé. La faible densité à l'échelle du massif contraste avec les régions fortement peuplées dans le bassin de Pampelune et d'Andorre, ou à la densité moyenne dans de petites villes des Pyrénées centrales, ainsi qu'Olot, Berga et Ripoll dans les Pyrénées orientales. Comme l'indique la figure 3.1, à l'exception du bassin de Pampelune, l'usage urbain de l'eau est prédominant dans le reste des territoires cités. Bien qu'il soit prévu d'une façon générale qu'au milieu du XXI^e siècle la demande domestique se stabilise (OPCC-CTP, 2018), si les plans urbanistiques actuels sont exécutés, certains territoires tels que l'Andorre pourraient accroître la pression de ce secteur sur les ressources en eau (Recaño, 2021).

Les plus grandes étendues agricoles du massif sont concentrées sur le versant sud des Pyrénées centrales, coïncidant avec les bassins où l'extraction d'eau est la plus intense. L'augmentation de la demande prévue pour le

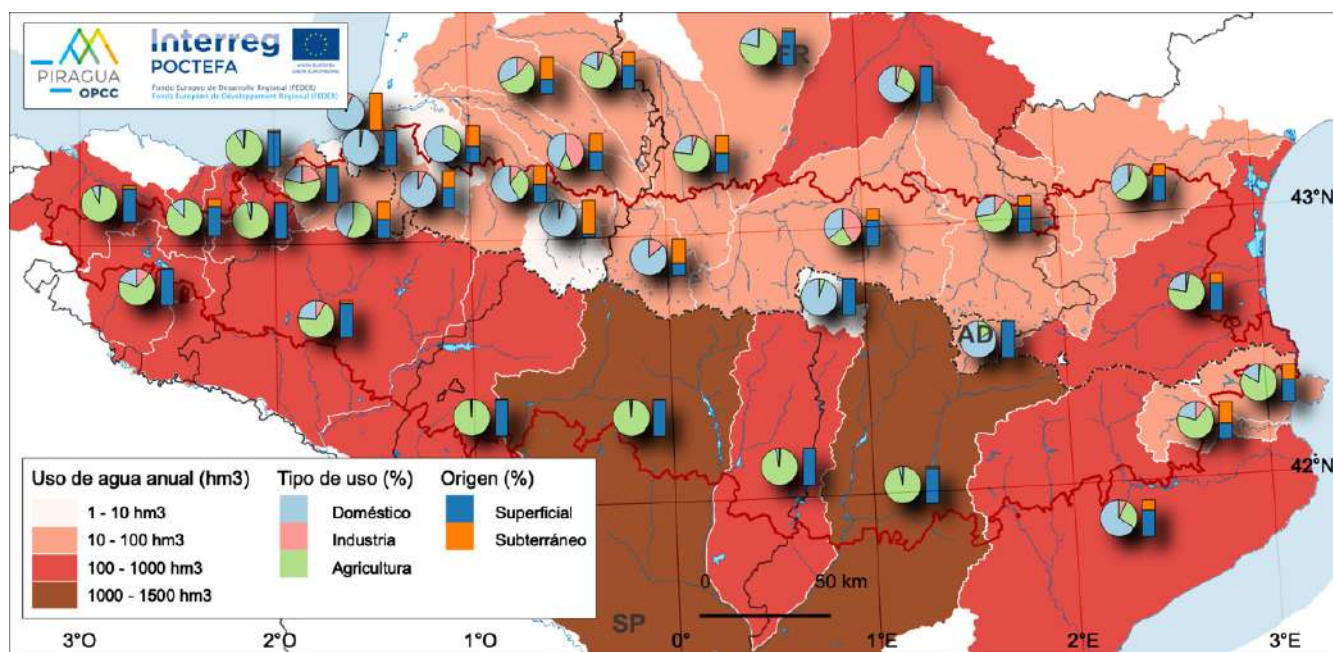


Figure 3.1. Usage annuel moyen de l'eau par conseil d'exploitation (hm³), usage par secteur (%) et origine de la ressource (%).

(Source : Beguería, 2022.)

développement de nouvelles zones d'agriculture irriguée, notamment dans le bassin de l'Èbre, peut accroître les tensions et mener à la concurrence pour les ressources hydriques (OPCC-CTP, 2018).

Le secteur industriel est peu représenté dans les Pyrénées, avec un poids significatif dans l'utilisation de l'eau uniquement dans les Pyrénées orientales (associé à l'industrie agroalimentaire) et dans certains bassins du versant nord.

Le secteur touristique, avec le tourisme de neige en tête, est l'un des principaux moteurs économiques des Pyrénées et, en même temps, un secteur exigeant dans l'usage des ressources hydriques, destinées à fournir principalement les logements touristiques et les stations de ski. Celles-ci se concentrent notamment dans les Pyrénées centrales, comme indiqué dans la figure 3.2. Du fait notamment du changement climatique, les stations de ski pyrénéennes ont réalisé d'importants investissements destinés à renforcer la capacité de production de neige, dans le but de maximiser le nombre de jours opérationnels. L'intensification de l'enneigement artificiel a augmenté la pression sur les ressources dans des zones en amont, où elles peuvent, de façon ponctuelle, entrer en concurrence pour l'eau avec de petites installations hydroélectriques. C'est ce qui se passe actuellement dans la station de ski

d'Ordino Arcalís (Andorre) où le même réservoir fournit la production de neige et une mini-centrale hydroélectrique, en donnant la priorité à l'enneigement artificiel en cas de concurrence.

L'exploitation hydroélectrique se concentre sur les deux versants du massif dans les zones centrales et occidentales (figure 3.2), principalement composée d'installations de petite taille (< 100 MW) bien qu'il existe aussi de grandes centrales.

Enfin, il est important de souligner que la fonction écosystémique des rivières des Pyrénées en amont permet d'utiliser l'eau et d'en garantir sa qualité en amont et en aval. Les rivières sont des écosystèmes dynamiques, complexes et intégrateurs longitudinaux et transversaux. Les actions anthropiques, qui provoquent des changements dans le régime de débit, ont des conséquences graves sur leur diversité et leurs fonctions écosystémiques. En ce sens, la conservation des services écosystémiques est essentielle pour la sécurité hydrique et la résilience face au changement climatique.

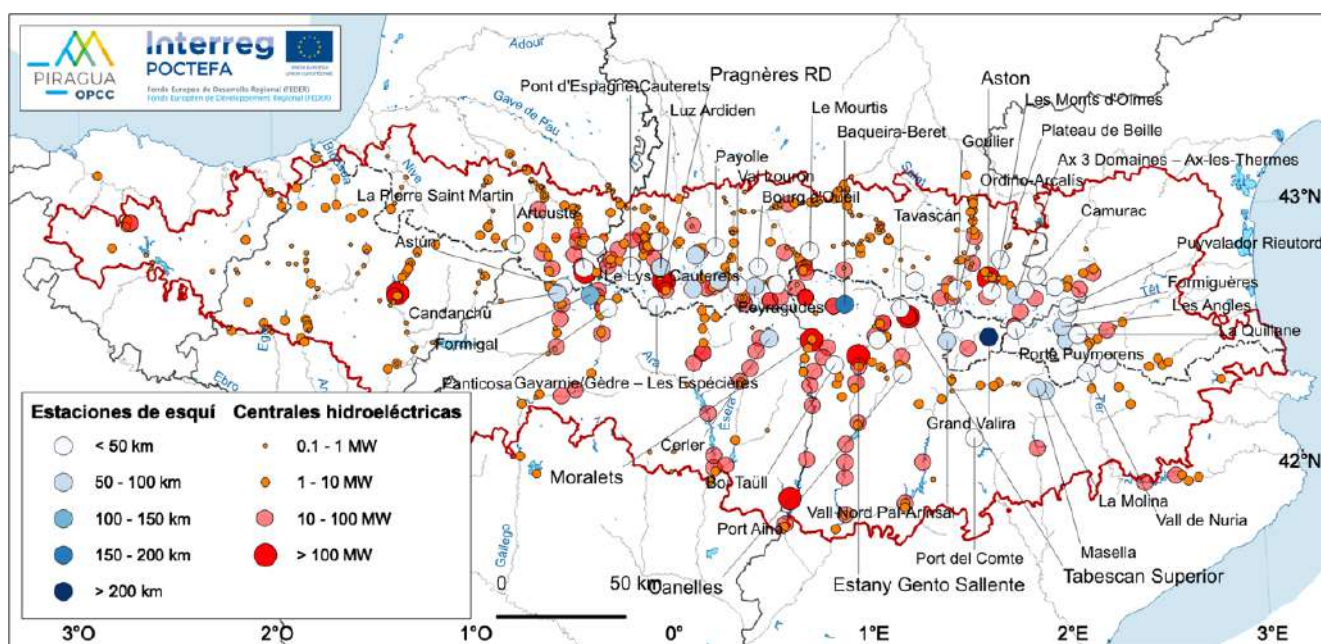


Figure 3.2. Localisation des stations de ski et des centrales hydroélectriques des Pyrénées, classées en fonction du domaine skiable (km) et de la puissance installée (MW), respectivement.

(Source : Beguería, 2022.)

3.2. Défis du changement climatique et du changement global concernant la concurrence pour les usages de l'eau, et les options d'adaptation

Le concept de changement global fait référence à l'ensemble des changements et transformations à grande échelle, conséquent des activités anthropogéniques qui affectent notre planète. Au cours du siècle dernier, les composantes biophysiques (atmosphère, océans, ressources hydriques, sols, biodiversité, entre autres) ont été altérées à la suite de l'intensification des activités anthropiques. La hausse des GES s'est traduite par la modification des schémas climatiques qui indiquent une intensification du réchauffement global pour les prochaines années dans les Pyrénées (Amblar-Francés et al., 2020).

Le cadre socio-économique a beaucoup changé ces dernières décennies (augmentation de la population, de la demande d'énergie, des infrastructures, etc.) se traduisant en une pression croissante sur les ressources naturelles, et dans le cas qui nous intéresse ici, sur l'eau. Cette tendance de la pression sur l'eau devrait augmenter. Les études indiquent une augmentation de la population dans certaines régions montagneuses, ainsi qu'une augmentation du tourisme d'été dans ces régions (Recaño, 2021), (Debarbieux et al., 2014). L'exploitation hydroélectrique devrait également augmenter du fait du développement des différentes stratégies relatives à la transition énergétique mise en œuvre de part et d'autre des Pyrénées. Dans ce contexte, les ressources en eau et leur utilisation doivent être compatibles avec le maintien des fonctions écosystémiques et permettre de pérenniser les usages de l'eau avec le moins de conflits possible.

Le gouvernement d'Andorre a déjà déployé plusieurs stratégies et législations en matière d'adaptation au changement climatique depuis quelques années. Nous citons les plus importantes ci-après :

- Adhésion à la Convention-cadre des Nations unies sur le changement climatique (CCNUCC) pour la mise en œuvre de processus liés à la lutte contre le changement climatique.
- Processus d'adaptation de l'Andorre au changement climatique (PAACC) (Gouvern d'Andorra, 2014) pour doter le pays de ressources et de mesures d'adaptation, afin d'être moins

vulnérable aux impacts dérivés du changement climatique.

- Stratégie nationale de la biodiversité de l'Andorre (ENBA) (Govern d'Andorra, 2016) pour garantir une action freinant la crise de la biodiversité dans le contexte du changement climatique.
- Loi sur la promotion de la transition énergétique et le changement climatique (LITECC) (Govern d'Andorra, 2018b), renforce et accompagne la transition vers un nouveau modèle énergétique basé sur l'usage des énergies renouvelables et des énergies à faibles émissions de carbone.
- Stratégie énergétique nationale et de lutte contre le changement climatique (OECC) (OECC, 2021a) afin de réduire les émissions nationales et de s'adapter aux effets du changement climatique, conformément aux objectifs de l'accord de Paris de la Convention-cadre des Nations unies sur le changement climatique (CCNUCC).
- POCTEFA ADAPYR (ADAPYR-OPCC, 2022) a pour objectif de systématiser les suivis d'impact climatique dans les Pyrénées et de définir une stratégie pyrénéenne d'adaptation au changement climatique conjointe.

3.3. L'exemple de la principauté d'Andorre

Actuellement, les usages consommptifs de l'eau en Andorre sont d'environ 21,63 hm³ par an et ont été classés de la façon suivante : domestique, touristique, agricole, production de neige et élevage (Figure 3.3), tandis que les usages non consommptifs représentent environ 75 hm³ à l'année et font référence, pour la plupart, à la production hydroélectrique.

Parmi les usages consommptifs, celui destiné au secteur domestique prédomine en Andorre (72,29 %). Comme nous pouvons l'observer dans la Figure 3.3, il est presque constant toute l'année. L'usage destiné aux logements touristiques et au centre thermal Caldea représente 11,48 % du total de l'emploi hydrique des secteurs économiques du pays et est supérieur durant les mois d'hiver et d'été. Au contraire, la consommation pour l'usage agricole s'en tient aux mois où le développement végétatif effectif dans les vallées pyrénéennes (de juin à septembre) a lieu, occupant la troisième place dans l'utilisation de l'eau (9,31 %). La consommation d'eau dans les stations de ski se concentre durant les mois d'hiver, tenant compte que la base de neige artificielle est, en général, formée en novembre et en décembre. Un renfort permettant de terminer la saison est apporté entre janvier et mars. Cela représente 6,67 % de l'emploi total d'eau du pays. L'utilisation de l'eau destinée à la gestion de l'élevage est faible en Andorre (0,22 %), en raison d'une activité plus extensive qu'intensive, y compris des exploitations qui requièrent une demande élevée en eau, de façon concentrée sur le territoire.

La récente législation andorrane et ses stratégies associées prévoient une augmentation des infrastructures destinées à la production hydroélectrique à l'avenir. L'évaluation des changements futurs dans la disponibilité des ressources est essentielle pour soutenir la gestion hydrique et énergétique intégrale.

L'utilisation la plus exigeante en eau en Andorre est l'hydroélectricité qui, bien qu'elle soit considérée comme non consomptive, représente une moyenne annuelle de 75 hm³, provenant principalement de la rivière Valira d'Orient. Cette utilisation se traduit par une production annuelle

moyenne d'électricité d'environ 85 GWh, grâce à la centrale hydroélectrique d'Encamp et d'une petite contribution de la mini-centrale d'Arcalís. L'énergie hydroélectrique apporte actuellement 75 % de la production nationale d'électricité, qui représente à son tour 20 % de l'électricité utilisée en Andorre.

La récente loi sur la promotion de la transition énergétique et le changement climatique (LITECC) (BOPA, 2018) exprime la volonté d'augmenter la production nationale d'électricité à au moins 50 % d'ici 2050, en garantissant un pourcentage de sources renouvelables d'au moins 75 %. Cet engagement exige d'encourager l'introduction de nouvelles installations de production d'électricité renouvelable, la technologie hydroélectrique étant identifiée comme celle au plus grand potentiel sur le Plan

sectoriel d'infrastructures énergétiques d'Andorre (PSIEA) (Govern d'Andorra, 2018a). Dans ce contexte, prévoir d'éventuels changements futurs dans la disponibilité de la ressource est essentiel pour la gestion hydrique et énergétique.

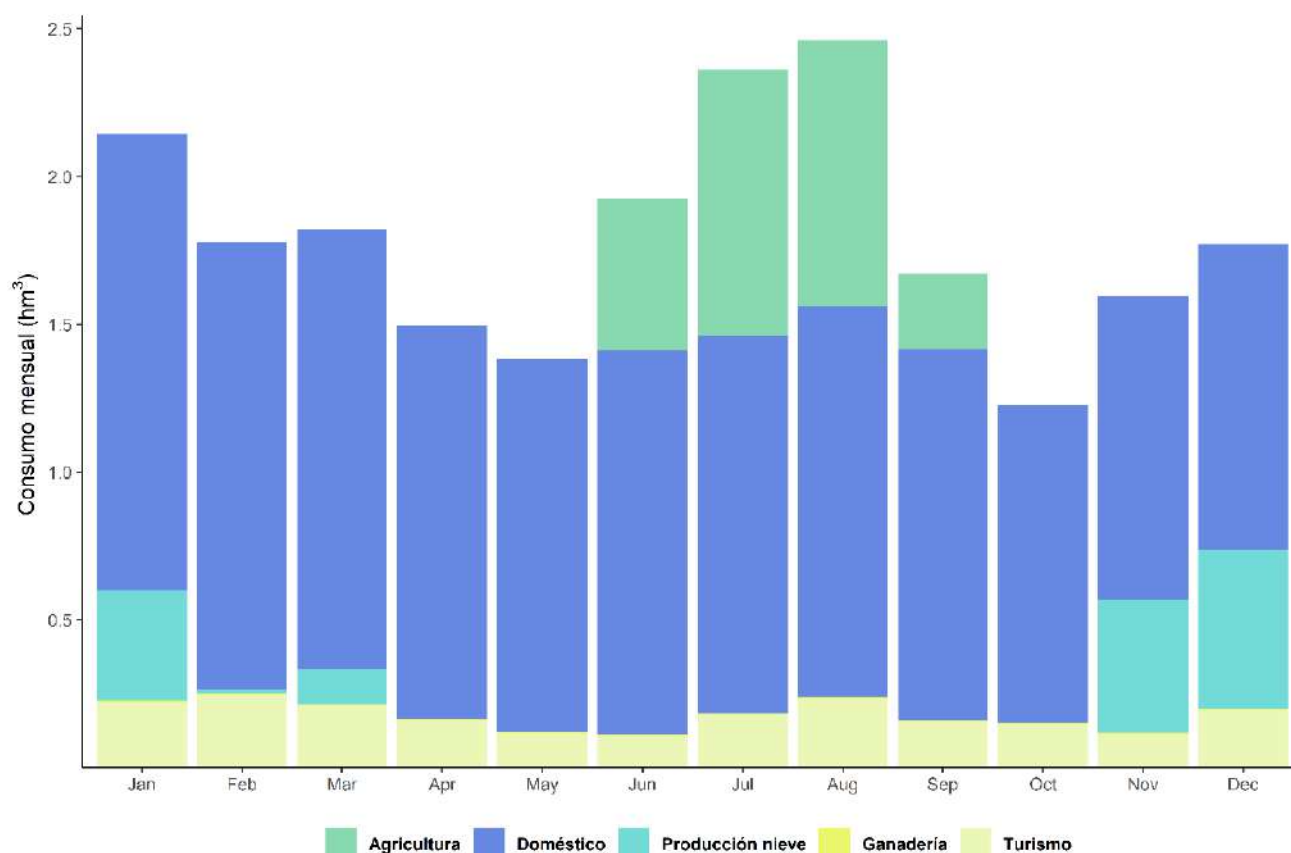


Figure 3.3. Demande mensuelle d'eau en Andorre dans les principaux secteurs d'activité.

(Source : élaboration propre).

Box 3.1: Analyse de vulnérabilité basée sur des scénarios

L'analyse de vulnérabilité a été basée sur l'outil WEAP (Water Evaluation and Planning System) pour explorer l'évolution future des ressources en eau en combinant des scénarios climatiques et socio-économiques. Des données de précipitations, de température, d'humidité relative, de vitesse du vent et d'occupation des sols ont été utilisées. L'année de base du modèle est 2015, et la moyenne de la série de données utilisée est celle comprise entre 2015 et 2019. Le modèle a été calibré avec des variables liées aux caractéristiques du sol (perméabilité, sens d'écoulement, capacité de rétention d'eau, etc.). La période de calibrage se situe entre 2015 et 2017 et celle de validation entre 2018 et 2019, démontrant que les deux vont au-delà des indicateurs de qualité de l'ajustement, désignant le modèle comme satisfaisant (Moriassi et al., 2007). Le modèle calibré a permis de simuler des scénarios à l'échelle mensuelle jusqu'à l'année 2050. La demande en eau est analysée et classée par secteurs (domestique, tourisme, agriculture, stations de ski et élevage), y compris les pertes et la répartition des consommations sur une échelle mensuelle. Les scénarios suivants ont été considérés : Référence ou statu quo, Changement climatique, Changement global et Adaptation, ce dernier intégrant des stratégies pour faire face au changement global. Les scénarios analysés sont décrits ci-dessous.

Scénario de référence. Nous supposons le scénario de concentration de gaz à effet de serre (GES) RCP 4.5, qui se traduit pour l'Andorre en une augmentation de la température moyenne annuelle de 1,46 °C en 2050 et en une diminution des précipitations moyennes annuelles de -0,35 mm (voir distribution mensuelle dans le Tableau 3.2). À l'échelle socio-économique, il est prévu que la population augmente de façon modérée de 1,18 %/an (Recaño, 2021, scénario central), pourcentage également supposé comme une augmentation des logements touristiques. L'occupation touristique est considérée inchangée, tant dans sa distribution mensuelle que dans la moyenne annuelle, avec une valeur de 51 %, basée sur les 10 dernières années (Union hôtelière d'Andorre, communication personnelle).

Tableau 3.2. Températures et précipitations mensuelles projetées dans le scénario RCP 4.5, calculées à partir de 6 scénarios du projet CLIMPY-OPCC (Amblar-Francés et al., 2020; Beguería, com. pers.)

	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
T°C	1,36	0,92	1,21	1,08	1,37	2,18	1,92	2,33	1,50	1,44	1,03	1,14
PP(mm)	1,01	1,50	3,39	-4,75	-3,62	3,05	-1,90	6,10	-3,34	2,24	-2,82	-5,16

Scénario « changement climatique ». Nous supposons le scénario de concentration de GES RCP 8.5, qui se traduit pour l'Andorre en une augmentation de la température moyenne annuelle de 2,23 °C et en une augmentation des précipitations moyennes annuelles de 0,72 mm en 2050 (voir distribution mensuelle dans le Tableau 3.3). L'augmentation de la température (> 2 °C) se traduit par une augmentation de l'évapotranspiration de 10 %, affectant les besoins d'irrigation de l'agriculture (Durán & Salamanca, 2008). Sur la même ligne, nous avons considéré une augmentation de 15 % de la consommation de l'eau pour la production de neige dans les stations de ski (Gerbaux et al., 2020). Le reste des attributs socio-économiques sont hérités du scénario de référence.

Tableau 3.3. Températures et précipitations mensuelles projetées dans le scénario RCP 8.5, calculées à partir de 6 scénarios du projet CLIMPY (Amblar-Francés et al., 2020) pour le PIRAGUA (Beguiría, com. pers.)

	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
T°C	1,66	1,61	1,66	2,05	2,09	3,32	2,96	2,83	2,50	2,11	2,03	1,95
PP(mm)	-5,62	7,35	3,74	-1,13	-1,89	0,41	3,11	14,55	4,38	1,75	-12,10	-5,80

Scénario « changement global ». Nous considérons les mêmes conditions que dans le scénario « changement climatique », avec des écarts dans certaines variables socio-économiques : a) augmentation de la population de 1,82 %/an (Recaño, 2021)¹, b) augmentation des logements touristiques de 1,82 %/an et c) augmentation de l'occupation touristique annuelle jusqu'à 70 % pour l'année 2050.

Scénario « adaptation ». Nous considérons toutes les conditions du scénario « changement global » et un ensemble de mesures adaptatives. Nous détaillons et justifions ci-après les stratégies d'adaptation évaluées, destinées à réduire l'utilisation de l'eau des principaux secteurs consommateurs du pays.

Secteur domestique

Diminution de la consommation moyenne par personne, qui passerait de 220 l/personne/jour (actuellement) à 150 l/personne/jour (objectif défini dans Govern d'Andorra, 2021b) d'ici à 2035). Cette réduction pourrait s'obtenir grâce à : i) l'élaboration d'un plan de vulgarisation sur l'usage responsable de l'eau en Andorre, qui inclurait la diffusion à la population d'un manuel de bonnes pratiques d'économies domestiques de l'eau et ii) la création du « quota de l'eau » qui serait payé proportionnellement à la consommation unifamiliale, comme référence symbolique de sensibilisation environnementale.

Réduction de 20 % des pertes dans les captages et le transport de l'eau. Nous supposons un investissement public pour améliorer les canalisations de captage et le transport de l'eau, ainsi que le contrôle et le suivi de ces captages. Nous estimons que ces mesures réduiront de 50 % les pertes actuelles en eau, évaluées à 40 % (Govern d'Andorra, 2021a).

Secteur touristique

L'amélioration de l'efficacité dans l'utilisation de l'eau permet de réduire de 25 % la consommation des logements touristiques. Il serait possible de parvenir à cette amélioration en suivant les directives du projet LIFE Wat'save reuse², notamment grâce à la création et à la diffusion d'un manuel d'usage efficace de l'eau dans le secteur touristique et de la mise en œuvre d'une marque de garantie des bonnes pratiques dans l'usage de l'eau dans les logements touristiques en Andorre.

Stations de ski

Contrôle de l'utilisation de l'eau afin de connaître en détail les principaux domaines consommateurs dans une station de ski et les économies potentielles.

Suivi continu de l'épaisseur du manteau neigeux pour améliorer la planification et la gestion de la neige. L'épaisseur du manteau neigeux peut s'obtenir grâce à l'installation d'équipements GNSS-RTK (Global Navigation Satellite Systems - Real Time Kinematic) sur les dameuses et à l'intégration de la technologie LiDAR (Light Detecting And Ranging) sur les véhicules aériens sans pilote (drones) (Pons et al., 2018).

L'augmentation de l'efficacité dans l'utilisation des ressources hydriques destinées à la production de neige par les stratégies décrites peut supposer une réduction de jusqu'à 15 % de la

demande d'eau destinée à cette fin (Cognard y François, 2019).

Au cours du projet PIRAGUA, les deux stratégies ont été mises en œuvre dans deux essais pilotes dans les stations de Grandvalira et de Vallnord dans le but d'évaluer leur viabilité technique et économique. Une plateforme destinée aux gérants des stations a donc été développée pour être utilisée comme centre de contrôle. Cela permet d'accéder aux mesures d'épaisseur effectuées par les différentes dameuses en temps réel, ainsi que de consulter l'historique de la saison.³

Secteur agricole

Réduction de 15 % de la demande d'eau pour l'irrigation par sa technification. L'installation de systèmes d'irrigation plus efficaces (VVAA FAO, 2008), en évitant l'irrigation gravitaire (également appelé irrigation de surface) et l'irrigation par aspersion, et en mettant en œuvre la micro-irrigation.

3.3.1 Effets du changement climatique et du changement global sur le régime hydrique

Pour traiter l'étude de cas, une analyse de vulnérabilité basée sur la simulation de scénarios a été élaborée, en tenant compte à la fois du changement climatique et des changements socio-économiques, ainsi que des différentes mesures d'adaptation (encadré 3.1). Cela a permis de caractériser la situation actuelle en termes de

disponibilité et d'utilisation des ressources en eau, mais aussi de disposer de simulations pour l'avenir.

Une diminution du débit annuel en Andorre, notamment entre la fin du printemps et l'été, est attendue à l'avenir.

Le régime hydrologique d'Andorre est typique d'une région montagneuse à l'influence méditerranéenne et à régime nival, présentant des débits hauts au printemps et faibles à l'été, avec un léger apport provenant des précipitations

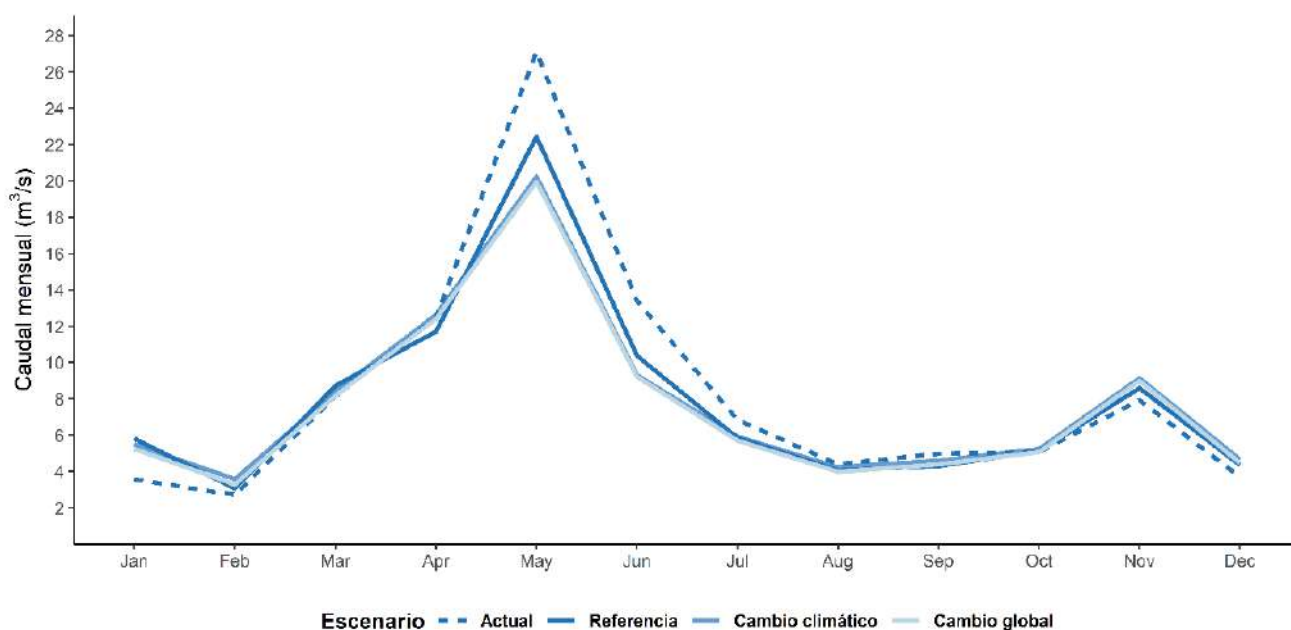


Figure 3.4. Changement du régime mensuel de débit à la sortie du bassin d'Andorre (Borda Sabaté) en 2050 dans le scénario « actuel » et dans les scénarios « référence », « changement climatique » et « changement global ».

(Source : élaboration propre).

à l'automne. Les résultats de la modélisation obtenus indiquent que l'hydrogramme actuel changera dans les prochaines années en raison du changement climatique (Figure 3.4).

Le changement de schéma dans l'hydrogramme est associé au changement dans le régime de chutes de neige. Les précipitations solides baisseront en raison de la hausse des températures et, par conséquent, le ruissellement instantané durant les mois d'hiver sera significativement plus important.

Le scénario de référence présente une perte de débit moyen annuel de 5,87 % par rapport à aujourd'hui, alors que le scénario « changement climatique » présente une diminution, légèrement au-dessus du débit de référence (6,80 %), par rapport à l'« actuel ». Les diminutions de débit, entre le scénario de « changement climatique » et l'« actuel » se concentrent durant les mois d'avril à septembre (-17,73 %). Des augmentations sont prévues durant les autres mois (14,87 %) de l'année. Les débits du scénario de « changement global » sont encore légèrement au-dessous de ceux du scénario de « changement climatique ».

Ces résultats indiquent que la hausse des températures à l'avenir produira une augmentation du ratio eau/neige, une fonte des neiges précoce. En définitive, une augmentation du ruissellement superficiel durant les mois d'hiver. Le débit augmentera durant ces mois au détriment du débit à la fin du printemps et de l'été, où il sera significativement plus faible. Ces résultats sont conformes à ceux fournis par les études sur les bassins à régime nival (Birsan et al., 2005; Lorenzo-Lacruz et al., 2012; Wilson et al., 2010).

Il est important de souligner que la modélisation présentée est basée sur des modèles climatiques aux accroissements successifs pour les valeurs des températures et des précipitations, basées, dans ce cas, sur le projet CLIMPY (Amblar-Francés et al., 2020). De fait, nous n'avons pas pris en compte l'augmentation des événements climatiques extrêmes tels que la sécheresse, qui pourraient aggraver les débits faibles durant les époques estivales.

3.3.2 Effets du changement climatique et du changement global sur les fonctions écosystémiques

La planification et la gestion des bassins hydrologiques doit intégrer les scénarios futurs de changement climatique et les mesures adaptatives. L'un des objectifs-clés est de rendre compatible les différents usages de l'eau et d'envisager l'augmentation des infrastructures de production hydroélectrique en garantissant le maintien de la qualité écologique de la rivière, et si possible, de promouvoir une tendance de l'amélioration dans le temps.

Le maintien de la qualité écologique des rivières est une des garanties de développement durable de tout pays. En ce sens, l'un des instruments prévus par la directive-cadre sur l'eau 2000/60/CE sont les programmes de suivi et de contrôle de l'état des rivières, de la structure et du fonctionnement des écosystèmes aquatiques. La plupart des pays contrôlent la qualité des rivières par la mise en œuvre de débits environnementaux.

En ce sens, l'Andorre possède le Règlement de protection des habitats aquatiques (ci-après, RPHA) (BOPA, 2005) qui régule les débits minimums et définit le débit environnemental. Le RPHA considère que le débit écologique minimum est égal à un dixième du débit moyen interannuel, alors qu'il considère le débit écologique comme « le débit nécessaire pour garantir l'évolution biologique naturelle des populations de flore et de faune aquatiques ». Cependant, son calcul n'est pas détaillé, ni ses valeurs.

Il faudra évaluer le développement d'un régime de débits environnementaux qui garantissent les fonctions écosystémiques des rivières en 2050.

Dans les rivières d'Andorre, ainsi que dans le reste des rivières en amont des Pyrénées, un régime de débits en dessous de la limite environnementale acceptable suppose la perte des

fonctions écosystémiques (Arnett, 1976; Agencia Catalana de l'Aigua, 2006). Dans ce contexte, des diminutions ou des pertes d'espèces autochtones sont à prévoir. Cela pourrait être le cas de la truite commune (*Salmo trutta*) qui nécessite une profondeur de rivière d'au moins 40 cm, afin de maintenir la population adulte de façon stable dans le temps (Lewis, 2006). Avec des débits en dessous de la limite environnementale, une perte de la qualité de l'eau est également à prévoir, pouvant stagner durant certaines périodes, augmentant sa température, sa concentration en nitrites et nitrates, et diminuant la concentration en oxygène, affectant de nombreuses espèces de faune et de flore, ainsi que la qualité propre de l'eau. Ce cas est aggravé lorsque les débits faibles arrivent en été, car les températures environnementales sont plus élevées. Il existe de nombreux autres effets et exemples de la perte des fonctions écosystémiques dans ce type de rivières (perte de la qualité de l'eau pour usage humain, perte de résilience de l'écosystème, etc.) (Tennant, 1976; Agencia Catalana de l'Aigua, 2006).

Les débits minimums définis dans le RPHA (10 % du débit interannuel) ne garantissent pas les fonctions écosystémiques des rivières (Arnett, 1976; Tennant, 1976; Diaz et al., 2003; Alcázar Montero, 2007; Velychko & Dupliak, 2021). De fait, il est nécessaire de définir et d'appliquer des débits environnementaux spécifiques plus conservateurs, par tronçons de rivière, qui comprennent des études et des suivis environnementaux dûment validés et qui représentent la variabilité naturelle de la rivière.

Comme la disponibilité des données environnementales et biologiques n'est pas évidente, ni le nombre ni la représentativité des stations de jaugeage, avec des séries significatives de données, les calculs hydrologiques tels que les percentiles sont généralement employés. Un exemple sont les propositions du PSIEA (Gouvern d'Andorra, 2018a), basées sur la méthode de Tennant (Tennant, 1976). Une autre méthode hydrologique plus solide, plus étendue et plus représentative est celle basée sur le calcul des moyennes des minima des moyennes mobiles, dénommée QBM ou Basic Flow Method (Arnett, 1976; Agencia Catalana de l'Aigua, 2006; Alcázar Montero, 2007; Palau et al., 2012), avec des

adaptations à la variabilité saisonnière propre de chaque rivière.

En l'absence de débits environnementaux plus solides, ce rapport a évalué la conformité des débits environnementaux définis dans le PSIEA, qui propose les pourcentages saisonniers de rétention de débit suivants :

- 20 % du débit moyen interannuel (d'octobre à mars)
- 40% du débit moyen interannuel (d'avril à septembre)

Le paragraphe suivant évalue l'obtention des débits environnementaux en observant qu'à l'avenir, la non-conformité s'aggraverait pendant les mois d'été.

3.3.3 Effets du changement climatique et du changement global sur le secteur hydroélectrique

Les scénarios de changement climatique étudiés en Andorre prévoient une modification dans la capacité de production hydroélectrique, avec des mois à la hausse et d'autres à la baisse.

Les centrales hydroélectriques devraient être essentielles pour accompagner la transition énergétique. Dans le cas de l'Andorre, la principale centrale hydroélectrique est située à Encamp et suppose environ 15 % de la production nationale d'énergie (OECC, 2021b). Elle est basée sur un système de lacs de haute montagne régulés et de canaux qui transportent l'eau vers le lac d'Engolasters. De plus, il existe deux mini-centrales au fil de l'eau (Arcalís et Aixovall), et le PSIEA projette d'en implanter quatre autres d'ici à 2030. En ce sens, l'étude des effets du changement climatique sur la production hydroélectrique, le débit et les fonctions écosystémiques des rivières est essentielle pour déployer les stratégies d'adaptation les plus appropriées.

Dans cette étude de cas, nous avons observé que le régime de débits sera modifié par l'augmentation des précipitations liquides en hiver

et par l'arrivée précoce de la fonte des neiges. Cette situation a déjà été décrite dans diverses études réalisées à l'échelle des Pyrénées et des Alpes (OPCC-CTP, 2018; Brunner et al., 2019).

Examiner la stratégie de gestion et de régulation de l'eau des lacs d'Andorre régulés sera crucial pour s'adapter au nouveau scénario de changement climatique.

Les scénarios de changement climatique étudiés en Andorre prévoient une modification dans la capacité de production hydroélectrique. La 5 présente la production électrique mensuelle estimée dans la centrale d'Encamp en 2050 pour les différents scénarios analysés.

Le scénario « référence » prévoit une hausse de la production moyenne d'énergie hydroélectrique annuelle de 2 % pour 2050, alors que l'augmentation du scénario « changement global » est un peu plus accentuée (2,4 %). La différence positive entre le scénario « changement global » et l'actualité est spécialement significative durant les mois de janvier, février et mars (40,9 %). Comme nous pouvons l'observer dans la Figure 3.5, cette hausse est la conséquence d'une plus grande disponibilité en ressources durant les mois d'hiver (Adamovic & Després, 2020). Par contre, il existe une période au cours

de laquelle les débits devraient diminuer, touchant aussi la production hydroélectrique. Une plus faible disponibilité du débit ne pénaliserait pas la production en mai, car il s'agit d'une période où toute la ressource disponible n'est pas utilisée, en raison des débits significativement élevés de cette période et de la faible capacité de stockage d'eau en Andorre (lac-bassin de retenue d'Engolasters). Par contre, la réduction de débit au début de l'été pénalise la production, notamment durant les mois de juin et de juillet, et plus intensément dans le scénario « changement global » (-25,86 %).

Bien que l'importante diminution du débit au printemps n'ait pas une grande influence sur la capacité de production, la disponibilité en eau à cette période pour la réserve dans les lacs de haute montagne sera plus faible. De fait, la gestion du stockage de l'eau en sera altérée. En ce sens, la capacité de régulation du stockage de l'eau dans des zones de montagne sera essentielle pour gérer la production hydroélectrique et la rendre compatible avec la conservation des débits environnementaux. Cela dépendra de chaque région et de sa capacité de stockage qui, dans le cas de l'Andorre, est faible.

Les résultats exposés dans cette section sont conformes à ceux obtenus dans des pays du centre et du nord de l'Europe (Adamovic &

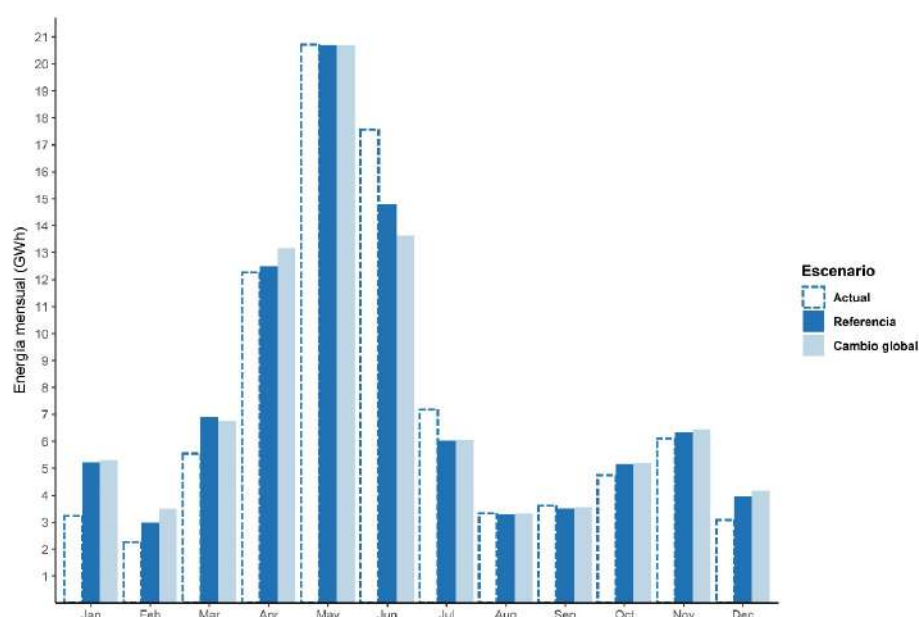


Figure 3.5. Énergie électrique produite dans la centrale hydroélectrique d'Encamp pour les scénarios « actuel », « référence » et « changement global » en 2050.

(Source : élaboration propre).

Després, 2020). Il est important de souligner qu'ils sont basés sur la projection d'une année type et que, par conséquent, l'impact d'un éventuel prolongement des périodes de sécheresse (Van Vliet et al., 2016) sur la production hydroélectrique n'entre pas dans le cadre de cette étude.

3.3.4 Effets du changement climatique et du changement global sur un tronçon de rivière avec une concurrence élevée pour l'eau

Nous avons analysé l'un des tronçons qui pourrait présenter des conflits dans l'utilisation de l'eau en raison d'une convergence élevée des usages de différents secteurs. Il s'agit du tronçon entre le barrage de Ransol et la confluence de la rivière Valira d'Orient et le torrent de Plamanera (Figure 3.6), juste avant le retour de l'eau de la centrale hydroélectrique à la rivière (coordonnées Lambert III Sud-Andorre 536028;24948). Ce

tronçon d'environ 11,5 km est touché par les trois déviations d'eau de la centrale hydroélectrique d'Encamp vers Engolasters. De plus, il existe deux communes sur le même tronçon, dont la consommation en eau est importante (Canillo et Encamp) pour des usages touristiques et agricoles et, en amont, les captages destinés à la production de neige de la station de ski de Grandvalira.

D'après la modélisation réalisée, les débits minimums environnementaux fixés dans le RPHA (10 % du débit interannuel) sont respectés sur le nœud avant le retour de l'eau de la centrale hydroélectrique, à l'exception du mois de février. Au contraire, les débits environnementaux fixés par le PSIEA ne sont pas respectés pendant la majeure partie de l'année.

Les résultats des scénarios à venir indiquent une réduction générale du débit annuel d'ici 2050. En ce sens, la diminution du débit se concentre entre les mois d'avril et d'août, alors qu'une légère augmentation est prévue de janvier à février et d'octobre à décembre (Figure 3.7). L'augmentation du débit prévue en hiver permet de se rapprocher du débit environnemental

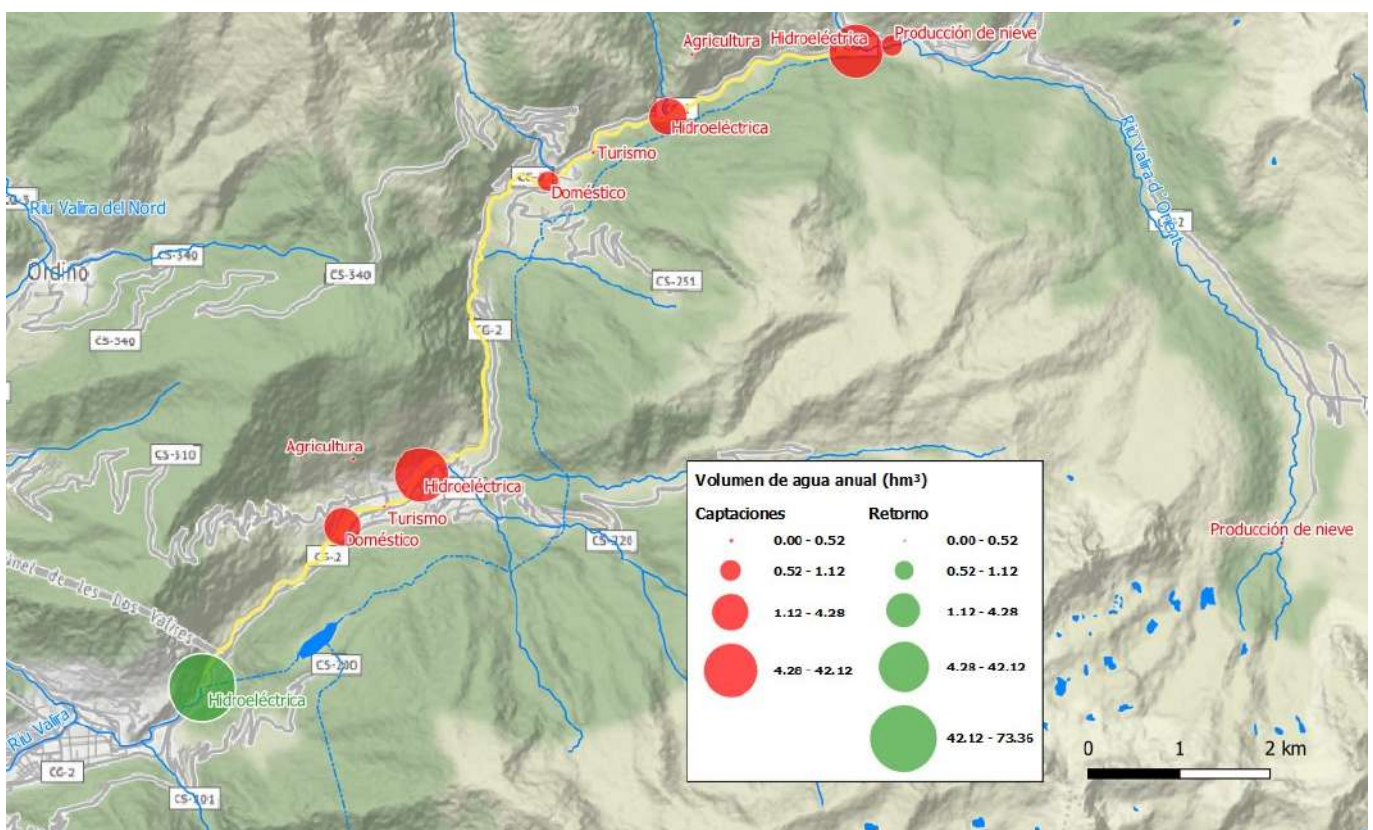


Figure 3.6. Localisation du tronçon de rivière dont la concurrence pour l'eau est élevée, entre Ransol et Escaldes-Engordany.

(Source : élaboration propre).

fixé dans le PSIEA durant cette saison, mais sans y parvenir. La baisse du débit annuel dans le scénario de référence est de 9,57 % par rapport à aujourd'hui. La baisse du débit dans le scénario « changement global » est de 2,9 m³/s, représentant une réduction de 15,26 % par rapport à aujourd'hui, alors que dans le scénario « changement climatique », elle est de 2,18 m³/s (-11,46 %).

Comme nous pouvons l'observer dans la figure, dans le scénario « changement climatique », la période d'avril à août est celle présentant la diminution de ressource la plus accentuée (29,53 % par rapport à aujourd'hui). La diminution durant les mois les plus chauds de l'année est la plus critique, car la température de l'eau des rivières de la période estivale est la plus élevée, aggravant les conditions biochimiques et thermiques des eaux au débit faible, et affectant directement l'habitat et ses êtres vivants.

En juin, le débit actuel modélisé est de 1,62 m³/s alors que dans le scénario « changement global », il diminue jusqu'à 0,74 m³/s (réduction de 54 %), les deux en dessous de la limite du débit environnemental fixé dans le PSIEA (1,85 m³/s). D'après les résultats de la modélisation, entre les mois de juin et d'octobre, le débit environnemental fixé dans le PSIEA n'est pas actuellement respecté. C'est précisément au cours de ces mois que tous les scénarios futurs

prévoient que les valeurs de débit vont davantage s'éloigner de celles établies par le PSIEA comme débit environnemental. Au contraire, au cours des mois d'hiver, la hausse de débit prévue d'ici 2050 facilitera l'augmentation des valeurs proposées par le PSIEA. Février est le mois présentant le débit le plus faible dans tous les scénarios, période où le débit représente moins de la moitié de celui requis par le critère environnemental fixé dans le PSIEA.

Il est nécessaire de déployer une stratégie intégrale d'adaptation au changement climatique afin de rendre compatible la conservation des fonctions écosystémiques des rivières et la transition énergétique.

Il est important de souligner que jusqu'alors, aucun régime de débits environnementaux spécifiques pour ses rivières n'a été étudié ni déterminé pour l'Andorre, prenant en compte les études précédentes, les données de suivi environnemental et les calculs hydrologiques solides tels que le calcul des moyennes des minima des moyennes mobiles ou QBM (Arnett, 1976; ACA, 2006; Alcázar Montero, 2007). Cette proposition de débits environnementaux permettra de diviser en tronçons les rivières en Andorre, en tenant compte de leurs particularités.

Ces perspectives futures de baisse du débit (sans tenir compte des sécheresses), notamment

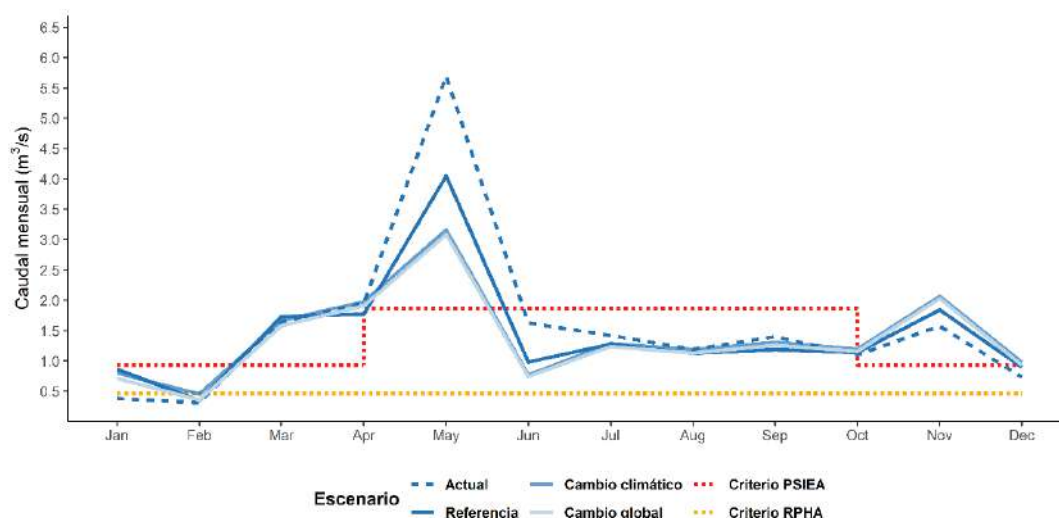


Figure 3.7. Débit mensuel du tronçon de rivière à la concurrence élevée pour l'eau, en 2050, entre Ransol et Escaldes-Engordany (coordonnées Lambert III Sud-Andorre 536028;24948) et dans les différents scénarios analysés. La limite du débit environnemental proposé par le PSIEA est représentée en rouge, et le débit minimum écologique réglementaire du RPHA en jaune.

(Source : élaboration propre).

sur des tronçons à la concurrence pour l'eau élevée comme celui décrit, renforcent le besoin d'étudier, d'évaluer et de déployer une stratégie intégrale d'adaptation au changement climatique rendant compatibles la conservation des fonctions écosystémiques des rivières et la transition énergétique à laquelle le pays s'est engagé. Cette stratégie devrait réguler les débits environnementaux, en intégrant la conservation des systèmes riverains et, par conséquent, leurs fonctions écosystémiques. À son tour, la régulation des débits environnementaux permettrait de disposer de critères solides à appliquer dans le développement de nouvelles installations d'exploitation hydroélectrique.

3.3.5 Capacité d'adaptation

Aujourd'hui, la demande annuelle en Andorre est de 21,63 hm³, alors que dans le scénario « changement global », une hausse jusqu'à 36,49 hm³ (68,70 %) est prévue d'ici à 2050. Comme nous pouvons l'observer dans la Figure 3.8, la distribution mensuelle de la demande d'eau se maintient de façon très similaire dans

tous les scénarios, juillet, août et janvier étant les mois de plus grande demande et octobre celui de plus faible demande.

Dans un contexte de changement global, le secteur domestique est celui qui dispose d'un plus grand potentiel d'économies d'eau, avec 22,84 % de potentiel d'économies par rapport au total d'usages consommatifs.

La distribution de la demande mensuelle dans les principaux secteurs (Figure 3.9) indique la complémentarité entre le secteur agricole et la production de neige, où le premier centralise la demande d'eau pendant les mois de printemps et d'été, alors que l'enneigement artificiel la concentre en hiver. Les secteurs domestique et touristique sont généralement constants au cours de l'année. Nous pouvons apprécier une petite diminution de l'utilisation de l'eau du secteur touristique au printemps et à l'automne. La mise en œuvre des mesures adaptatives proposées dans le scénario « adaptation » réduit la demande d'eau pour un usage consommatif de 27,87 % par rapport au scénario « changement global » (Tableau 3.2).

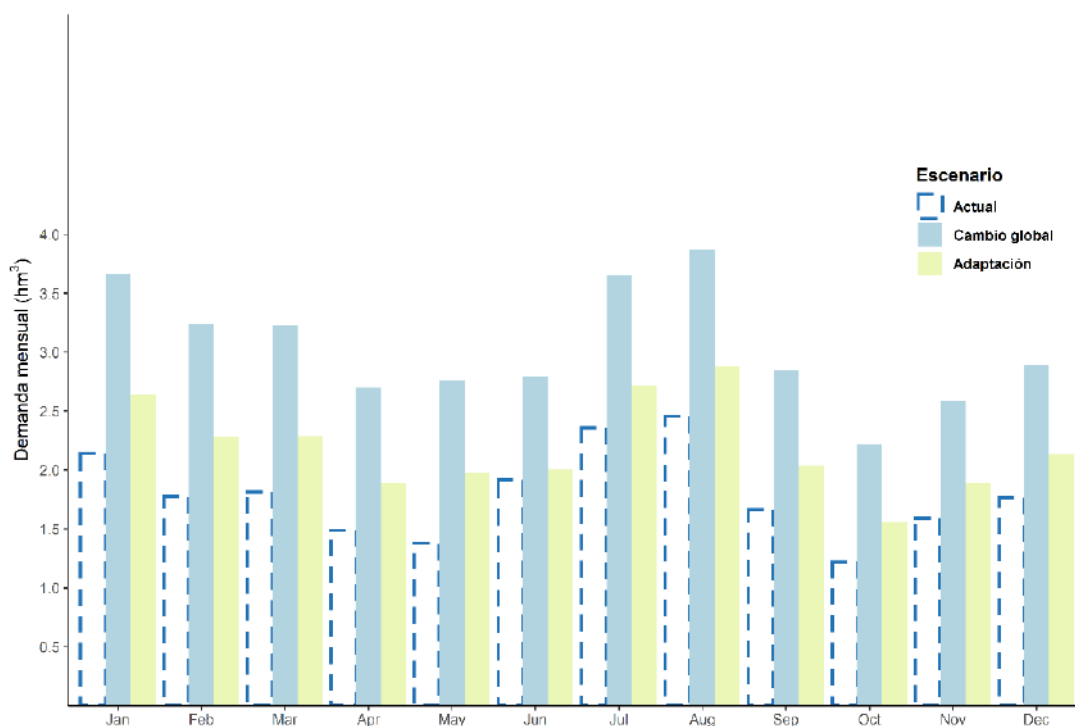


Figure 3.8. Demande mensuelle d'eau aujourd'hui et dans les scénarios « changement global » et « adaptation » en 2050.

(Source : élaboration propre).

L'analyse de la demande sectorielle indique que le volume d'eau pour l'usage domestique est aujourd'hui de 15,43 hm³, alors qu'il atteint les 27,08 hm³ (soit une hausse de 72,7 %) dans le scénario « changement global ». Les mesures adaptatives étudiées diminueraient la demanda jusqu'à 18,76 hm³, se réduisant de 30 % par rapport au scénario « changement global » et atteignant des valeurs proches des valeurs actuelles.

La demande actuelle d'eau pour l'agriculture est de 2,57 hm³, alors qu'une hausse jusqu'à 2,85 hm³ est prévue dans le scénario « changement global ». Grâce aux mesures adaptatives mises en œuvre, la demande du secteur diminuerait de 15 %, comme établi dans la définition des scénarios (Box 3.1).

Le scénario « changement global » prévoit que l'utilisation de l'eau destinée à la production de neige artificielle dans les stations de ski d'Andorre augmente jusqu'à 1,76 hm³, soit une hausse de 15 % par rapport à aujourd'hui, qui s'obtiendrait grâce à la compensation des mesures adaptatives proposées.

Actuellement, la demande d'eau pour fournir les logements touristiques et l'infrastructure de SPA Caldea est de 2,08 hm³ à l'année, alors que dans le scénario « changement global », une augmentation jusqu'à 4,72 hm³ est attendue. Grâce aux mesures adaptatives mises en œuvre, la demande pourrait baisser jusqu'à 3,59 hm³. Les mois de plus forte demande se maintiennent en février et en août, ce dernier étant particulièrement critique en termes de débit dans un contexte de changement global.

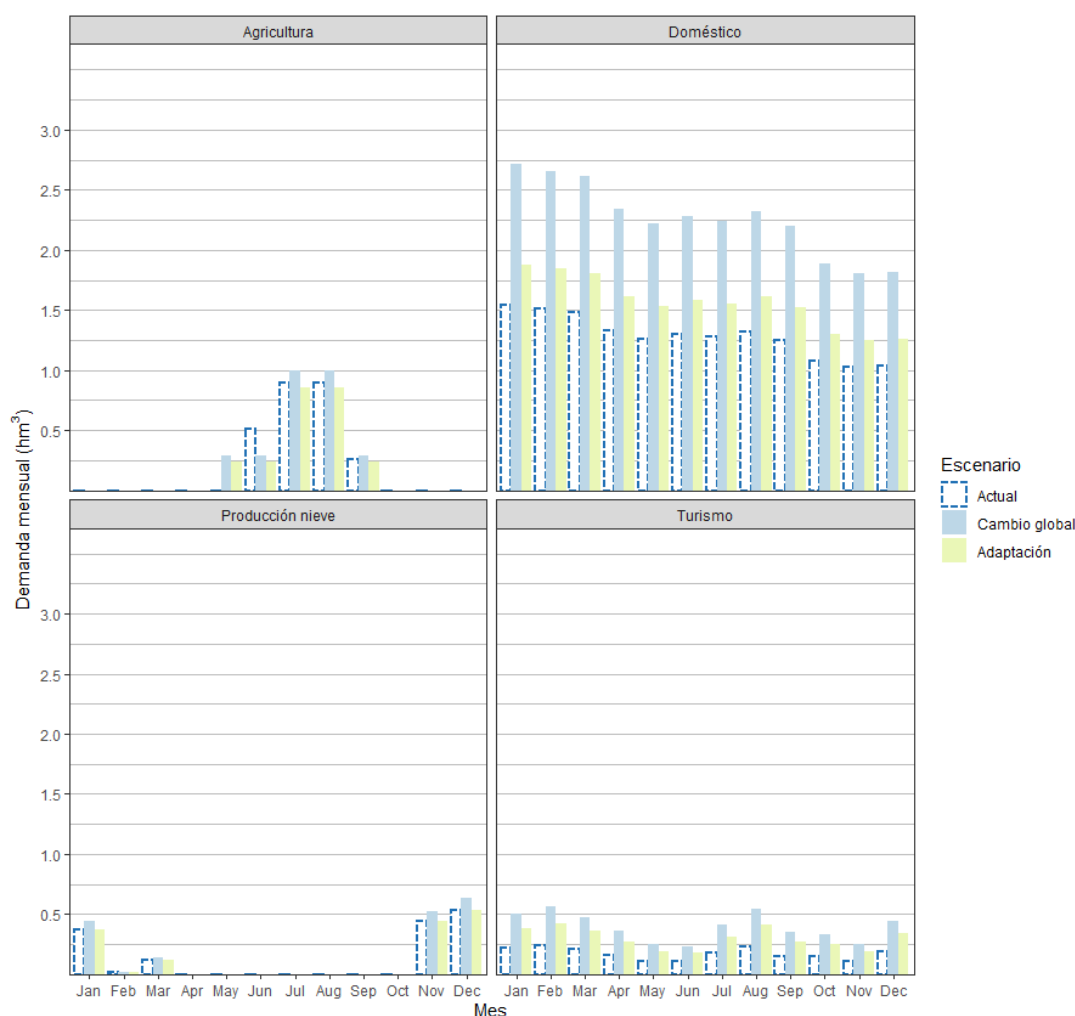


Figure 3.9. Demande mensuelle d'eau (hm³) pour des usages domestique, touristique, de production de neige et agricole dans les scénarios considérés pour 2050.

(Source : élaboration propre).

Le Tableau 3.4 présente le potentiel d'économies d'eau de chaque secteur étudié, indiquant que le secteur domestique est celui qui dispose d'un plus grand potentiel, avec 22,84% de potentiel d'économies par rapport au total des usages consommables dans le scénario « changement global ». À l'autre extrémité se trouvent les stations de ski, avec un potentiel d'économies à l'échelle du pays par des mesures d'efficacité de 0,74 %. Malgré le potentiel limité à l'échelle du pays, il est important de remarquer que la plupart des captages des stations de ski se trouvent en amont des rivières où les débits sont spécialement faibles à certaines époques de l'année.

Les captages annuels destinés à l'usage consommable en Andorre supposent 0,54 % du débit disponible. Ajoutant les captages à usage non consommable (notamment pour usage hydroélectrique), le volume d'eau atteint 23,71 % du débit. Les mesures adaptatives permettraient de réduire de 27,87 % l'usage consommable de l'eau, sans pour autant apporter une amélioration significative à la conservation du débit destiné à maintenir les fonctions écosystémiques. En ce sens, il convient d'envisager des mesures d'adaptation au changement climatique qui soient davantage axées sur la transformation

socio-économique et les stratégies politiques que celles étudiées grâce au modèle mis en œuvre, se concentrant sur la hausse de l'efficacité de l'utilisation des ressources.

D'après les résultats obtenus, en 2050 et pour le scénario le plus extrême (« changement global »), les usages domestiques, touristiques, agricoles et hydroélectriques actuels pourraient être approvisionnés et, de fait, la compatibilité entre les utilisations de l'eau des principaux secteurs d'activité ne sera pas directement touchée. Le défi sera de garantir le maintien des fonctions écosystémiques tout au long de l'année, sur tous les tronçons et de le concilier avec l'augmentation de la production hydroélectrique prévue.

La régulation des débits environnementaux comme mesure adaptative est considérée indispensable, notamment sur les tronçons de captage d'eau pour usage hydroélectrique. Cela aura un effet significatif sur la conservation des fonctions écosystémiques des tronçons de rivière, notamment durant les mois où il est attendu que l'hydrogramme présente des débits plus faibles.

Tableau 3.4. Potentiel d'économies d'eau (hm³ et %) des différents secteurs à usage consommable de l'eau en Andorre appliquant les mesures adaptatives au scénario « changement global ».

Secteur	Potentiel d'économies (hm ³)	Potentiel d'économies (%)*
Domestique	8,32	22,84
Touristique	1,13	3,1
Stations de ski	0,27	0,74
Secteur agricole	0,43	1,18
TOTAL	10,15	27,87

*Économies par rapport au total des usages consommables.

3.4. Conclusions

Bien que les résultats et les apprentissages apportés dans ce chapitre se basent sur une étude de cas centrée sur la principauté d'Andorre, ils peuvent servir de référence et être généralisés à d'autres régions des Pyrénées ayant un contexte géographique et socio-économique semblable.

Le schéma de changements dans la distribution du débit tout au long de l'année dans le contexte de changement global en Andorre est déjà connu et représentatif de la cordillère pyrénéenne et des Alpes, avec une fonte des neiges précoce et une augmentation du débit durant les mois d'hiver, suivie d'une réduction au printemps et en été.

Nous résumons ci-après les principales conclusions sectorielles basées sur les apprentissages de l'étude de cas de l'Andorre. Le degré d'acceptation sociale des différentes mesures d'adaptation est variable, comme le montre l'étude réalisée pour cette étude de cas (Box 3.2).

3.4.1 Population résidente et tourisme

Dans certaines zones pyrénéennes telles que l'Andorre, la population résidente devrait augmenter et s'ajouter à la hausse du tourisme prévue en été, où l'intervalle de températures agréables s'étendra sur cette période et servira, en outre, de refuge pour les visiteurs (touristes) des plaines et des grandes villes qui éviteront les canicules estivales.

Les mesures adaptatives au changement global proposées sur la base de cette étude de cas se centrent sur :

- La réduction des pertes dans le réseau de distribution de l'eau et le contrôle de tous les captages et réseaux de distribution.
- La promotion d'une gestion de l'eau plus efficace dans les centres touristiques et la diffusion de guides de bonnes pratiques sur la gestion de l'eau aux usagers et promoteurs. Ces mesures s'appliquent aussi à la consommation domestique en eau.

- La promotion d'une désaisonnalisation du tourisme concentré sur le mois d'août vers des mois à faible demande et à la disponibilité favorable des ressources.
- Le déploiement de technologies destinées à améliorer l'efficacité de la production et de la gestion de la neige, telles que le monitoring de l'utilisation de l'eau et le suivi continu de l'épaisseur du manteau neigeux.
- Le développement d'un système de label pour les centres touristiques des Pyrénées, lié à un usage rationnel et efficace de l'eau, encourageant les activités touristiques, récréatives et de santé à la faible consommation d'eau.

3.4.2 Agriculture

Dans la zone axiale des Pyrénées, en prenant l'Andorre comme référence, la demande en eau se concentre sur les mois d'été, alors que la période végétative existe de façon naturelle. L'agriculture et l'élevage extensif dans les Pyrénées permettent de maintenir la biodiversité des espaces ouverts, régulent les incendies, produisent des aliments aux distances courtes, entre autres, et c'est pourquoi il est intéressant de conserver cette activité et de l'adapter au contexte du changement climatique.

Les mesures adaptatives envisagées à appliquer dans les Pyrénées sont :

- La technification de l'irrigation (automatisation et suivi à distance).
- L'installation de systèmes d'irrigation plus efficaces.
- Le choix d'espèces et de variétés végétales plus adaptées aux nouvelles conditions climatiques.

3.4.3 Production d'énergie hydroélectrique

Les changements prévus dans l'hydrogramme d'ici 2050 auront une incidence sur la disponibilité mensuelle de l'eau destinée à la production hydroélectrique. Les options d'adaptation de la gestion hydroélectrique dépendront, en grande mesure, de la capacité d'accumulation et de régulation des bassins de retenue de chaque région.

Dans le contexte de changement global, il est prévu que la plus grande baisse de débit aura lieu en été, étant la période la plus vulnérable et au cours de laquelle il faudra destiner davantage de ressources, afin d'évaluer les effets sur les fonctions écosystémiques de certains tronçons de rivière. La diminution de la ressource en été fait de sa gestion un défi dans une hypothétique augmentation de la demande en eau et en énergie durant cette saison (agriculture, tourisme, climatisation, etc.). Il convient de signaler que les températures environnementales atteignent leur maximum en été, ce qui contribue à empirer les conditions écologiques de l'eau.

Les régions pyrénéennes à plus grande capacité de stockage d'eau (lacs ou bassins de retenue adaptés) auront une plus grande flexibilité pour compenser le manque d'eau prévu à la fin de l'été et satisfaire les débits environnementaux. Dans ce contexte, les mesures d'adaptation proposées concernant la production hydroélectrique sont :

- Optimiser l'exploitation hydraulique par la technification de systèmes de contrôle à distance pour surveiller les débits captés et environnementaux sur les tronçons faisant l'objet de l'exploitation.
- Disposer d'outils d'estimation de la couverture de neige à grande échelle pour les prédictions de la disponibilité en eau provenant de la fonte des neiges.
- Évaluer la capacité réelle de stockage de l'eau dans chaque bassin pyrénéen et les possibilités à venir de gestion du stockage.

- Avancer le remplissage des lacs-bassins de retenue afin de garantir un débit environnemental approprié en aval en été.
- Proposer un système de débits environnementaux adaptés au changement global à l'échelle de la cordillère pyrénéenne.
- Gérer de façon conjointe les ressources hydriques et le secteur énergétique par des modèles de planification intégrée à l'échelle pyrénéenne.

En parallèle, la diversification de la production électrique, en renforçant d'autres technologies de génération, est une mesure fondamentale, car elle permet de diminuer la pression sur le système hydrique et d'augmenter la résilience du secteur énergétique.

3.4.4 Fonctions écosystémiques

Les fonctions écosystémiques sont élémentaires pour garantir la résilience du système énergétique dans les zones de montagne, notamment la qualité de l'eau et la conservation de la biodiversité. Les ingrédients des systèmes riverains et leurs fonctions écosystémiques sont exposés à de forts changements environnementaux dans le contexte de changement global. Les débits environnementaux sont la première mesure pour garantir un minimum de ces fonctions. Il faut comprendre le concept de débits environnementaux comme une mesure de restauration et non comme une restriction à appliquer dans les régimes hydrologiques. Certaines des mesures adaptatives à considérer dans cet ordre d'idées sont :

- Étudier, évaluer et déployer un système de débits environnementaux qui respecte la directive-cadre sur l'eau 2000/60/CE, en conservant une qualité acceptable des systèmes riverains et, par conséquent, de

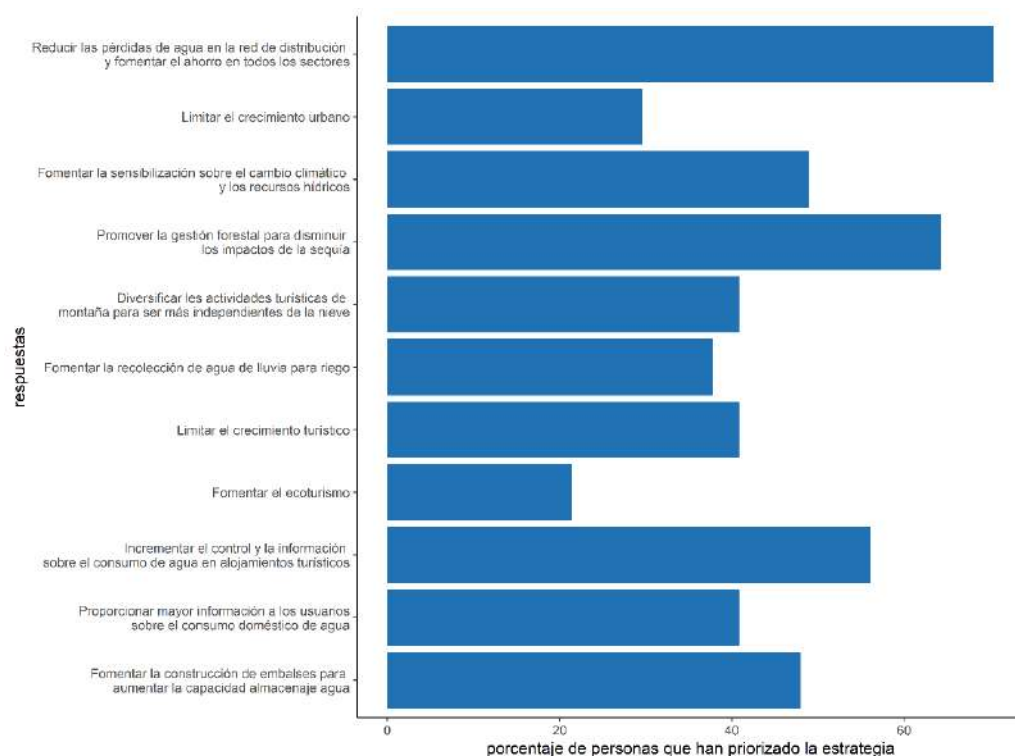


Figure 3.10. Résultat de la priorisation des stratégies d'adaptation au changement climatique proposées par les personnes interrogées.

(Source : élaboration propre).

Box 3.2 : Perception sociale des mesures adaptatives

La capacité d'adaptation possède une composante sociale profondément enracinée. Les mesures d'adaptation promues doivent être conformes à l'acceptation des citoyens et des secteurs économiques impliqués. En ce sens, Andorra Recerca + Innovació a réalisé une enquête à la population andorrane en 2019, puis l'a complétée par un atelier participatif afin d'évaluer la perception sociale sur la ressource eau en Andorre, ses menaces dans le contexte de changement climatique et l'acceptation des potentielles mesures adaptatives¹.

Il ressort des résultats de l'enquête que plus des deux tiers de la population pense que le changement global provoquera une diminution des débits des rivières en Andorre. Parmi les mesures adaptatives les plus largement acceptées figurent les suivantes : 1) la réduction des pertes dans la distribution de l'eau et la mise en œuvre de mesures d'efficacité dans l'utilisation de l'eau dans tous les secteurs du pays, 2) la limitation de la croissance urbaine, 3) la promotion de l'éducation sur les effets du changement climatique et les ressources hydriques et 4) la promotion de la gestion forestière afin de réduire les effets de la sécheresse (Figure 3.10).

leurs fonctions écosystémiques. Le système proposé doit, à son tour, être compatible avec l'engagement d'aborder la transition énergétique dans les Pyrénées.

- Étudier, évaluer et déployer un système de débits environnementaux basé sur des indices hydrologiques solides, en intégrant la variabilité saisonnière, les différents types de tronçons de rivière et la totalité des bassins.
- Évaluer les fonctions écosystémiques des rivières, notamment sur les tronçons les plus vulnérables (tronçons de captage en aval, à fort degré d'artificialité du lit, aux indices de biodiversité faibles, une structure inadéquate de la population de poissons, etc.), afin de suivre un système de contrôle basé sur des débits environnementaux, entre autres, qui garantisse leurs fonctions et la qualité du système aquatique et, par conséquent, la qualité de l'eau.

- Évaluer l'application d'indices holistiques de qualité écologique sur des tronçons de rivière spécialement vulnérables dans les Pyrénées.
- Développer des plans de restauration de rives et de berges des lits, afin d'améliorer les conditions écologiques des tronçons de rivière à la vulnérabilité élevée.
- Promouvoir des plans de financement, y compris d'importants investissements en sensibilisation, éducation, recherche et participation politique pour garantir le maintien des fonctions écosystémiques en parallèle à la promotion de la transition énergétique.

4. Impacts du changement climatique sur la gestion de réservoirs de production hydroélectrique : le cas des vallées des Nestes d'Aure et du Louron

**Eric Sauquet (INRAE), Philippe Le Coent (BRGM),
Peng Huang (INRAE), Jean-Philippe Vidal (INRAE)**

La production d'hydroélectricité est un usage majeur des Pyrénées, comme dans tous les autres massifs montagneux français, qui sera impacté par le changement global. L'étude de cas s'intéresse au devenir de cet usage parmi ceux actuellement en place sur le système Neste. Ce système a été conçu pour répondre aux besoins en eau des milieux et des activités économiques sur un ensemble de rivières de Gascogne. De l'eau issue des vallées des Nestes d'Aure et du Louron déstockée de réservoirs multi-usage de montagne (i.e. turbinant des eaux, entre autres) est dérivée et vient compléter des ressources en eau locales limitées en Gascogne. Même si la question de l'adaptation est une préoccupation des acteurs du bassin Adour-Garonne, aucune stratégie n'a encore été esquissée. L'étude de cas propose de tester certains leviers via une chaîne de modélisation simulant la ressource en eau et les actions humaines sur cette ressource. Sans adaptation, le potentiel de production électrique pourrait être fortement diminué du fait d'une baisse probable des débits entrant dans les réservoirs et d'engagements prioritaires des gestionnaires des réservoirs (soutien des débits, fourniture d'eau potable et d'eau d'irrigation, etc. sur le territoire desservi par le système Neste). Ainsi, le seuil de rentabilité de la production électrique pourrait être atteint à court terme. Différentes options d'adaptation ont été discutées avec les parties prenantes du système Neste, puis testées. Le changement d'assolement (remplacement du maïs par du tournesol) apparaît comme un levier d'adaptation efficace mais aucune stratégie ne semble durable sur l'ensemble du XXI^e siècle. Il n'est pas possible de généraliser ces conclusions sur l'efficacité des stratégies testées ici aux autres réservoirs.

*Citar como: Sauquet, E., Le Coent, Ph., Huang, P., Vidal, J.-P., 2022. Impacts du changement climatique sur la gestion de réservoirs de production hydroélectrique : le cas des vallées des Nestes d'Aure et du Louron. En (Beguería et al., 2022) Adaptación al cambio climático en la gestión de los recursos hídricos de los Pirineos. Memorias científicas del proyecto PIRAGUA, vol. 2. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Zaragoza, España, xx-xx.
<https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14684>*

4.1. Introduction

L'hydroélectricité est la seconde source de production d'électricité derrière le nucléaire, soit environ 11% de la production électrique en France (RTE, 2019) et elle est, à ce jour, la première source d'électricité renouvelable (MTES, 2019). Elle vient compléter la production de base fournie par le parc nucléaire pendant des pics de demande (notamment durant les vagues de froid en France).

De facto, le potentiel hydroélectrique est fortement lié à la disponibilité en eau et donc à son évolution sous changement climatique. Le changement climatique va agir sur la capacité à produire (modifications des apports naturels alimentant le lac-réservoir amont en quantité et en temporalité), et sur la demande en énergie (modification des pics de demande liés aux vagues de froid notamment). Pour un réservoir multi-usage, d'autres activités demandeuses en eau pourraient être impactées et entrer en concurrence plus forte avec l'usage hydro-électricité.

A l'échelle des Pyrénées françaises, la production d'électricité annuelle est de l'ordre de 4100 GWh (source : Electricité de France, chiffres 2015-2016 ; Société hydroélectrique du Midi, chiffres 2015), soit un peu moins de 9% de la production annuelle (source : RTE, bilan électrique 2017).

L'évolution de l'hydroélectricité s'inscrit dans un contexte politique double : celui de la transition énergétique (visant la mise en place d'un mix énergétique basé principalement sur des ressources renouvelables) et celui de la gestion intégrée des ressources en eau (visant une gestion durable, équitable et adaptée des ressources en eau, en prenant en compte les usages et enjeux concurrents, dont la préservation environnementale).

La production d'hydroélectricité est réalisée dans un contexte de tension sur l'eau bien connu. Sur le bassin de la Garonne, les débits d'objectifs d'étiage (DOE) ne sont respectés 8 années sur 10 que sur 38,5% des points de suivi sur la période 2000-2018 (source : Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement). La situation va probablement se dégrader : selon les conclusions de l'étude Garonne 2050 (Agence de l'Eau Adour Garonne,

2014), le volume à apporter pour garantir ces débits réglementaires chiffré actuellement à 760 Mm3 pourrait augmenter jusqu'à hauteur de 1,2 milliards de m3 à l'horizon 2050 sous l'effet du changement climatique. L'usage énergétique disposant de capacités de stockage, la question se pose de mobiliser cette eau non plus pour l'hydroélectricité mais pour d'autres usages (dont les services écosystémiques)

Les questions autour de la gestion des réservoirs dédiés à l'hydroélectricité dans le contexte pyrénéen sous changement global sont illustrées par le cas d'étude traité par l'Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE) en collaboration avec le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), centré sur les lacs-réservoirs de montagne des Nestes d'Aure et du Louron (Hautes-Pyrénées). Les réservoirs examinés forment un système unique dans les Pyrénées. Cependant, on peut voir dans la chaîne de réservoirs Durance-Verdon un équivalent de plus grande taille (Sauquet et al., 2016). Les réservoirs traités ici - comme dans le système durancien - sont multi-usages et des volumes sont stockés en haute montagne et restitués pour l'agriculture, l'énergie et l'eau potable sous contrainte environnementales dans des territoires en dehors des frontières naturelles du bassin versant.

4.2. L'impact du changement climatique sur l'hydroélectricité et la gestion des réservoirs

En France, les retenues dédiées à l'hydroélectricité sont majoritairement localisées dans les secteurs de montagne. L'effet attendu du changement climatique dans ces territoires serait en premier lieu une élévation des températures de l'air avec une onde de fonte avancée et une réduction des précipitations sous forme de neige. Les projections hydrologiques annoncent une sévérité moindre des étiages hivernaux (les températures plus élevées favorisent le ruissellement au détriment de la constitution du manteau neigeux). De l'eau serait davantage disponible en hiver pour produire de l'énergie au moment des pointes de consommation (du fait du chauffage domestique). En revanche, le changement climatique s'accompagnera vraisemblablement d'une sévérité accrue des étiages estivaux, ce qui aurait pour conséquence une mobilisation plus importante des volumes stockés pour les besoins en irrigation en aval des barrages multi-usages.

Cependant, le changement climatique pourrait être perçu comme une opportunité si la climatisation devait se généraliser et selon le coût de l'hydroélectricité par rapport au coût de production d'autres moyens (ex. photovoltaïque dans un futur sans nucléaire).

4.3. Les stratégies d'adaptation

4.3.1 Pour la gestion des réservoirs

La façon dont la gestion de réservoirs peut être adaptée aux changements nécessite non seulement une vision des évolutions possibles de l'offre et de la demande en eau, mais aussi une compréhension approfondie de la dimension sociale et économique de l'eau (Di Baldassarre et al., 2018 ; Kellner, 2021). En outre, s'adapter implique un changement de paradigme : s'affranchir de pratiques historiques pour considérer une planification et une gestion inédite, durable et adaptative qui s'inscrit dans un contexte résolument non stationnaire.

Le processus d'élaboration de stratégies d'adaptation comporte trois étapes fondamentales : (i) l'évaluation complète du système dans son contexte, (ii) la conception de stratégies d'adaptation et leur évaluation, et (iii) la mise en œuvre de l'adaptation. Des défis subsistent à chaque étape.

Le plus souvent en hydrologie, la première étape (i) s'inscrit dans une démarche « top-down », pilotée par un ensemble prescrit de projections climatiques : une chaîne de modélisation fait transiter les projections climatiques jusqu'à une quantification de la réponse du système étudié (ici, le bassin versant et les modes de gestion de l'eau) aux évolutions du climat à différents horizons. Le cadre « prévoir puis agir » trouve ses bases dans l'approche « top-down » mais se heurte à des incertitudes sur le climat parfois conséquentes ou/et mal appréciées (Lempert et al., 2006 ; Hawkins et Sutton, 2010). L'approche alternative, baptisée « bottom-up », se concentre sur le système à étudier et sa sensibilité intrinsèque à des perturbations du contexte. L'approche « bottom-up » va chercher à comprendre comment le système réagit aux changements plausibles, à identifier et hiérarchiser les facteurs de contrôle, et in fine à rendre le système résilient spécifiquement aux évolutions de ces facteurs. Un exemple est donné par le système AEP étudié par Schlef et al. (2018) localisé dans le sud-est des États-Unis. L'étude montre que le système est plus sensible aux changements de précipitations qu'à ceux de la température de l'air. Les adaptations

à envisager doivent permettre de faire face aux changements de précipitations et la réduction des incertitudes sur les précipitations futures contribuera à une meilleure appréciation des risques de défaillance. Il faut noter que la majorité des études « bottom-up » se limitent à tester la sensibilité aux principales variables climatiques : précipitations et température. D'autres variables (de type changement d'utilisation des terres, croissance de la population, réglementation environnementale, etc.) pourraient être examinées pour concevoir une adaptation à des contextes étendus.

L'évaluation des stratégies (ii) pose la question de la méthode à mettre en œuvre. Une évaluation économique de type « coût-bénéfice » est possible. L'examen de la littérature montre que les stratégies d'adaptation des modes de gestion des réservoirs s'appuient souvent sur le triplet d'indicateurs « RRV » renseignant respectivement la fiabilité (Reliability), la résilience (Résilience) et vulnérabilité (Vulnerability) pour évaluer leur performance en termes de fréquence, de durée et de sévérité des défaillances (Hashimoto et al., 1982). Le concept de robustesse a été introduit plus récemment pour orienter la prise de décision dans un contexte d'incertitude (Maier et al., 2016). En général, un système est jugé robuste lorsqu'il fonctionne de manière acceptable pour une large gamme de futurs plausibles (Metzger et al., 2021). Les notions de fiabilité, résilience, vulnérabilité et robustesse sont utiles pour qualifier les systèmes soumis à des perturbations. Cependant, leur déclinaison aux contextes locaux (l'expression des défaillances notamment) est un travail en soi avec le concours des acteurs de terrain, d'autant que les décisions semblent tributaires des définitions choisies pour l'appréciation de la robustesse (Giuliani et Castelletti, 2016).

La conception et la mise en œuvre des stratégies d'adaptation (iii) requièrent un engagement actif des scientifiques, des parties prenantes et des gestionnaires, dans la conception de l'adaptation. Cette phase n'est pas facilitée par des controverses (cf. controverses sur l'opportunité de construire des nouveaux stockages pour atténuer la crise de l'eau (Zarfl et al., 2015 ; Berga, 2016)). Engager les démarches d'adaptation au changement

global est loin d'être aisé. Une des raisons est que les gestionnaires sont plutôt conservateurs dans leur pratique par crainte des pertes ou d'émergence de nouveaux risques que des changements pourraient induire. Une autre est la réticence à partager des données sensibles (liées aux prélèvements et à la consommation), ce qui rend problématique la modélisation des fonctionnements actuel et futur du système étudié.

Parmi les options d'adaptation privilégiées pour les réservoirs à usage hydroélectrique, citons l'augmentation des rendements énergétiques des centrales. Van Vliet et al. (2016) suggèrent qu'une augmentation de 10% permettrait de limiter les impacts négatifs du changement climatique et de maintenir la sécurité énergétique de la plupart des régions du monde. Une autre solution serait l'installation de stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) qui augmenterait non seulement l'efficacité de l'utilisation de l'eau, mais offrirait également la possibilité de coopérer avec d'autres sources d'énergie renouvelables (Gaudard et al., 2013 ; François et al., 2014 ; Emmanouil et al., 2021). L'augmentation du stockage dans les réservoirs est vue comme prometteuse dans les régions où les précipitations et/ou la demande en eau sont susceptibles d'augmenter (par exemple, Bertoni et al., 2019 ; Fletcher et al., 2019) et se heurtent à des oppositions locales en lien avec des préoccupations environnementales (Maran et al., 2014) et des investissements financiers lourds (Zar et al., 2015). Plutôt que modifier les infrastructures, la modification des pratiques (c'est-à-dire une remise en cause des règles de gestion) apparaît moins coûteuse et a l'avantage d'être réversible. De nombreuses études ont démontré l'intérêt des opérations adaptatives en comparant les règles d'exploitation actuelles à d'autres modalités d'exploitation sous scénarios de changement global. Pour les bassins dominés par la neige, il est communément proposé de remplir plus tôt les réservoirs afin de bénéficier d'une onde de fonte plus précoce et d'anticiper les demandes en eau (Payne et al., 2004 ; Hendrickx et Sauquet, 2013). Revenir sur les règles de gestion en hautes eaux (écrêtement des crues) pourrait être un moyen de ne pas « gaspiller » l'eau (VanRheenen et al., 2004). Étant donné la concurrence accrue entre l'hydroélectricité et l'irrigation, une solution possible consiste

à déplacer la production d'hydroélectricité principalement en hiver (pour le chauffage) vers l'été (pour la climatisation) afin d'aligner les deux utilisations de l'eau (Pereira-Cardenal et al., 2014), pour autant qu'il y ait un report effectif de la demande en énergie.

L'adaptation des infrastructures et des modes de gestion associées, au changement global est une préoccupation majeure de la communauté scientifique (McMillan et al., 2016). Les stratégies « sans regret » qui génèrent des bénéfices indépendamment des changements sont couramment proposées pour contourner la difficulté de faire face à l'incertitude future (Hallegatte, 2009). La publication de cas d'étude et d'exemples de réussite contribuera à l'émergence et la concrétisation des stratégies d'adaptation.

4.3.2 Pour le bassin Adour-Garonne

Les stratégies d'adaptation au changement climatique se développent en France avec des initiatives prises à différentes échelles (du national au local). En 2011, la France a adopté un cadre général d'action - le Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC) - avec de nombreuses recommandations liées à la recherche et à l'observation. Cinq priorités du premier PNACC liées aux ressources en eau sont mises en avant : (i) accroître les connaissances sur les impacts du changement climatique ; (ii) développer des outils spécifiques pour surveiller les ressources en eau et l'allocation de l'eau dans une perspective à moyen et long terme ; (iii) encourager les économies d'eau et assurer une utilisation plus efficace de l'eau ; (iv) favoriser un développement en accord avec les ressources en eau locales disponibles ; et (v) prendre en compte les mesures d'adaptation dans la planification de la gestion de l'eau. L'ambition est d'atteindre une diminution de 20% des prélèvements d'eau d'ici les années 2020. Un second PNACC a été adopté en 2018, après consultations et évaluation du premier PNACC. Il vise une adaptation de la France dès 2050 dans un contexte de hausse de température de +1,5 à 2 °C au niveau mondial

par rapport au XIX^e siècle, et propose un ensemble de 58 actions sur 5 ans du PNACC-2 avec de nouvelles priorités.

Plus localement, les stratégies d'adaptation entrent désormais dans le champ d'application des Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE). Les SDAGEs, établis tous les cinq ans depuis 1992 en coopération avec les parties prenantes, définissent les principales orientations stratégiques des agences de l'eau françaises. Les objectifs sont définis en conformité avec le cadre réglementaire français et les directives européennes, notamment la directive-cadre sur l'eau. L'agence de l'eau Adour-Garonne a publié en 2018 un Plan d'Adaptation au Changement Climatique rédigé en concertation avec les acteurs locaux. Ce plan formalise les grandes orientations stratégiques de retour à l'équilibre en faisant appel à un panel d'actions concrètes possibles. La mise en œuvre des solutions relève du champ des projets de territoires pour la gestion de l'eau (PTGE).

Parmi les dernières actions, citons (i) la mise en place d'une plateforme sur les bonnes pratiques « Bonnes pratiques pour l'eau du grand sud-ouest » (<https://bonnespratiques-eau.fr/>) dédié à accueillir et partager des connaissances et des initiatives sur le territoire et (ii) un rapport sur les « conditions de mobilisation des retenues hydroélectriques pour le soutien d'étiage dans le bassin Adour-Garonne » (Auverlot et al., 2021) qui établit sept recommandations de différentes natures (technique, économique, politique, etc.) et (iii) un plan stratégique 2021-2027 de retour à l'équilibre pour la gestion quantitative de la ressource en eau, élaboré par le Comité de Bassin Adour-Garonne. Dans ce dernier document, des leviers activables pour résorber les déficits sont explicités et grossièrement chiffrés (Tableau 4.1) - le destockage de l'eau des ouvrages hydroélectrique pour le soutien d'étiage est une contribution notable et il reste un déficit résiduel en 2050.

Tableau 4.1. Bilan global besoins/ressources en eau de surface à l'horizon 2050 (source : Agence de l'eau Adour-Garonne).

	Volume (Mm3)
Déficit initialement évalué pour 2050	1000-1200
Gains économies d'eau (consommation)	200
Gains solutions fondées sur la nature/agro-écologie	50-250
Mobilisation nappes libres	20
Stocks complémentaires pour le soutien d'étiage, dont:	150-500
• Création d'ouvrages de réalimentation	(80-135)
• Mobilisation de barrages hydro-électriques	(70-375)
Mobilisation de petits ouvrages existants	30
Ouvrages de substitution, re-use	20-40
Nouveau déficit évalué en 2050	200-700

4.4. Les enseignements d'un cas d'étude : la gestion dans les vallées des Nestes d'Aure et du Louron

4.4.1 Le contexte

Le cas d'étude s'intéresse aux lacs-réservoirs des vallées des Nestes d'Aure (Oule et Orédon) et du Louron (Pouchergues et Caillaouas), dont la Société Hydro-Electrique du Midi (SHEM) a la concession depuis 2003. Chaque réservoir est géré en coordination avec les autres pour, d'une part, satisfaire des besoins en énergie et, d'autre part, pour réalimenter dix-sept affluents rive gauche de la Garonne situés dans le Plateau de Lannemezan. Ces réservoirs (Tableau 4.2) sont ainsi une composante essentielle du « système Neste », dont la gestion est confiée à la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne CACG (Figure 4.1). Les eaux de la Neste sont détournées au niveau de Sarrancolin, et rejoignent, via le Canal de la Neste. La Figure 4.2 positionne les lacs-réservoirs dans le réseau hydrographique en amont de Sarrancolin et leurs interactions avec d'autres aménagements. Certaines de ces interactions font appel à des ressources externes : le lac d'Orédon reçoit les débits réservés et les éventuels déversements des réservoirs Aubert, Aumar et Cap de Long gérés par EDF, un producteur d'électricité concurrent de la SHEM.

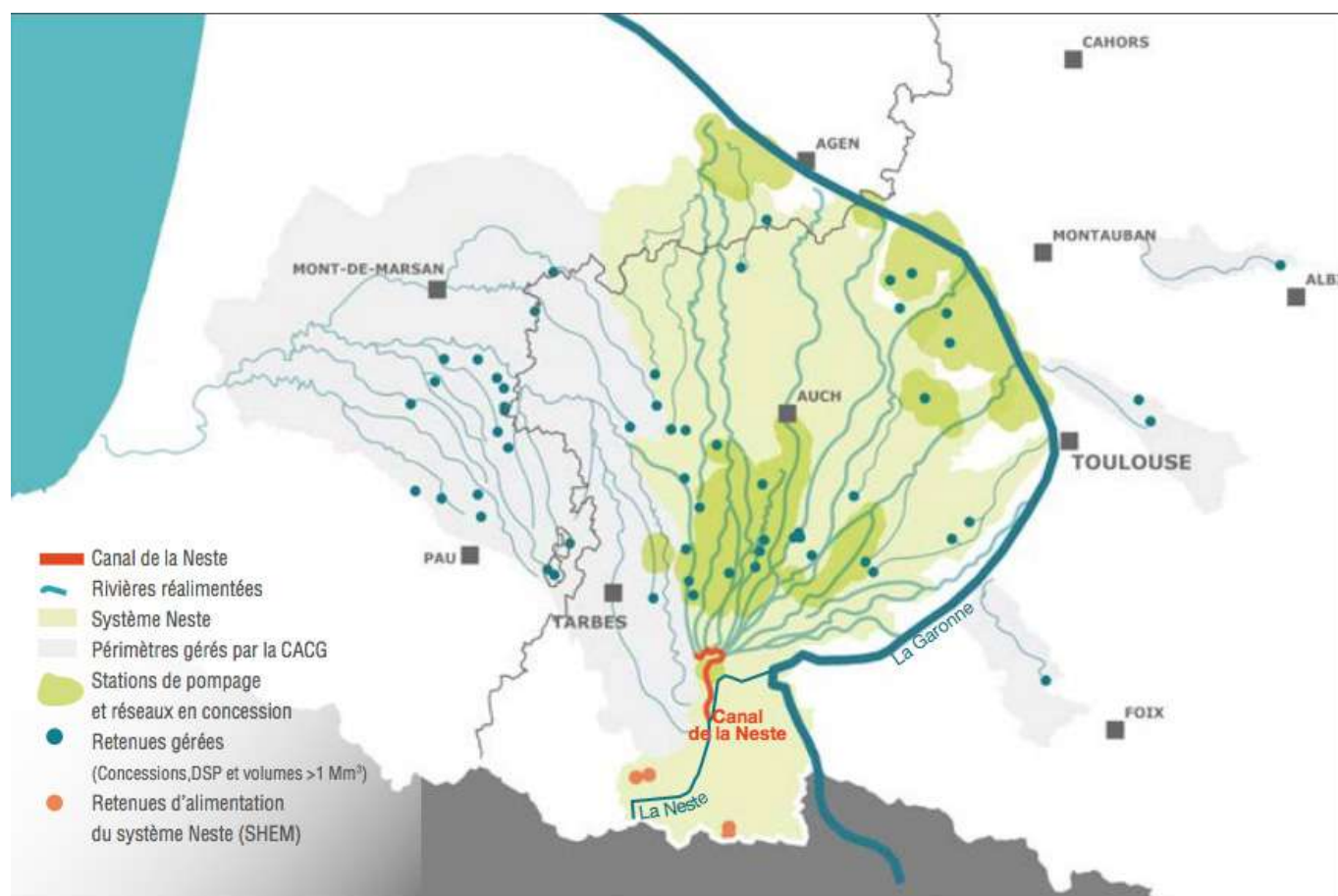


Figure 4.1. Domaine de gestion de la CACG. Les lacs-réservoirs de l'Oule, d'Orédon, de Caillaouas et de Pouchergues sont désignés sous le terme « Retenues d'alimentation du système Neste (SHEM) ».

(Source : CACG.)

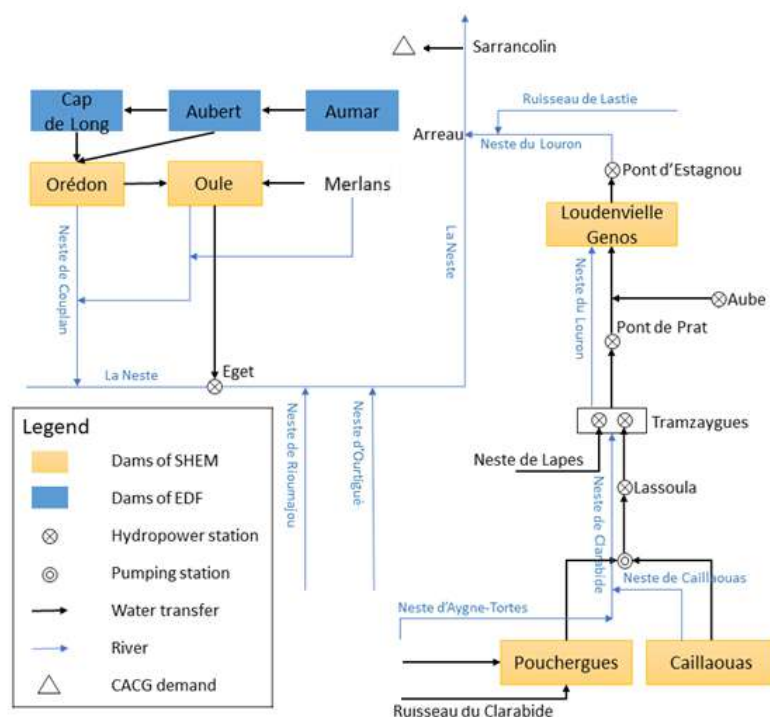


Figure 4.2. Schéma synoptique des vallées des Nestes d'Aure et du Louron.

(Source : fait maison.)

Tableau 4.2. Description des réservoirs de haute montagne.

	Vallée	Capacité (Mm3)	Altitude (m)	Surface (km2)
Aure	Oule	16.6	1816	28.4
	Orédon	7.27	1849	13
Oule	Caillaouas	25.4	2172	6.7
	Pouchergues	0.83	2111	9.9

Les lacs-réservoirs des vallées des Nestes d'Aure et du Louron (dits « lacs-réservoirs de haute montagne ») stockent les eaux issues de la fonte des neiges au printemps pour les restituer au moment jugé opportun. Les manœuvres de stockage et déstockage sont réalisées en coordination à l'échelle des deux vallées : la SHEM mobilise les stocks dans un réservoir plutôt que dans un autre selon des considérations économiques (rendement énergétique) et hydrologiques (niveau de remplissage) ; de même, la CACG fait appel aux ressources de haute montagne, si la Neste à Sarrancolin n'est pas en capacité de fournir l'eau nécessaire aux territoires desservis par le Canal de la Neste ou si les retenues « de piedmont » présentes sur le périmètre (cf. points bleus sur la Figure 4.1) ne peuvent soutenir les demandes en eau en aval.

Un volume total de 48 Mm3 est réservé dans les retenues gérées par la SHEM annuellement pour garantir les usages liés à l'irrigation, l'alimentation en eau potable et le bon état écologique des cours d'eau réalimentés du système Neste entre le 15 juin et le 1er mars de l'année suivante. En fin de campagne de soutien d'étiage, la SHEM valorise l'eau restante pour la turbiner en privilégiant les jours pendant lesquels les prix de l'énergie sont les plus élevés (principalement en hiver). Les centrales alimentées par ces réservoirs produisent annuellement environ 180 GWh. Au 1er mars, les retenues sont à leur minimum.

Les données de prélèvement fournies par la SHEM et la CACG 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 qui conditionnent la mobilisation des 48 Mm3 en fonction des conditions météorologiques de l'année.

4.4.2 Les effets du changement climatique

Une analyse de sensibilité via une modélisation des apports aux lacs-réservoirs a été engagée (Huang, 2022) afin de mesurer comment le potentiel de production réagit à des perturbations climatiques. Le climat actuel a été perturbé pour explorer de façon systématique une gamme étendue de modifications possibles. Ces 2625 climats perturbés ont alimenté le modèle hydrologique GR6J (Pushpalatha et al., 2011), calé sur des historiques, qui simule les débits entrant dans les réservoirs. Il n'y a pas de modélisation des usages engagés : ici, la capacité des bassins versants à fournir de l'eau aux ouvrages est examiné.

L'analyse de sensibilité est résumée par une surface de réponse (Figure 4.3) décrivant l'évolution des volumes annuels disponibles en amont des retenues en fonction de changements en précipitation et température. Les couleurs des points indiquent les changements en disponibilité en eau (exprimé en volume annuel produit par les bassins alimentant les lacs-réservoirs) par gamme de changement de précipitations et de température annuelles. La taille du point renseigne la dispersion au sein des différentes gammes. Sur la Figure 4.3 sont reportées également les trajectoires climatiques moyennes des bassins d'alimentation des lacs-réservoirs. La courbe noire avec des points en vert est construite à partir de six projections RCP8.5 et la courbe avec des points en bleu à partir des 6 projections RCP4.5, issues du projet CLIMPY (Amblar-Francés et al., 2020). Les points sont associés à différents horizons (2030, 2040, 2050, 2060, 2070, 2080, et 2090).

Un premier diagnostic du fonctionnement du système consiste à examiner sur la Figure 4.3 si les apports naturels peuvent garantir au moins 48 Mm³, ce qui permettra de conserver de l'eau pour le turbinage en hiver ; si ce n'est pas le cas, cette situation extrême est jugée critique. Sous RCP8.5, la disponibilité des 48 Mm³ n'est pas garantie en fin de siècle si on examine la dispersion. Le seuil 69.8 Mm³ de rentabilité de la production électrique apparaît sur la figure et est déjà franchi ou le sera probablement avec l'élévation des températures. Ce résultat questionne l'usage hydroélectrique.

A l'image des résultats produits dans le projet Imagine2030 (Hendrickx et Sauquet, 2013), le changement climatique sur l'hydrologie naturelle des cours d'eau de montagne aura pour effet une onde de fonte plus précoce et des chutes de neige à la baisse, modifiant la stratégie de remplissage des réservoirs (concomitant avec la période de fonte), conséquence d'une élévation des températures de l'air. La baisse des apports aux réservoirs (illustrée par la Figure 4.4 pour les réservoirs Caillaouas et Pouchergues) induite par une forte baisse des précipitations et donc du potentiel de production semble quasi certaine sur la base des projections de CLIMPY. A cette réduction, s'ajoutent pour le producteur d'hydroélectricité les contraintes réglementaires (débits écologiques et volume contractuel dédié

à d'autres besoins). Le respect de ces contraintes exprimées à l'aval des réservoirs induira moins de flexibilité pour le turbinage de l'eau en période hivernale en réponse à la demande d'énergie. Dans ces conditions, l'hydroélectricité produite dans les Pyrénées ne pourra pas contribuer au réseau électrique français comme par le passé. Ces évolutions – qui concernent les autres massifs - interrogent donc la contribution de l'hydroélectricité à la production d'électricité dans les prochaines décennies et la vraisemblance de certains scénarios de mix énergétique.

4.4.3 Les stratégies d'adaptation

Aucune planification de stratégies n'est planifiée à ce jour sur le système Neste. L'élaboration de stratégies d'adaptation a été initiée avec les acteurs des territoires (ateliers de travail organisés par le BRGM et INRAE, rassemblant les principaux acteurs de l'eau concernés : CACG, SMEAG, SHEM, ENGIE, Agence de l'Eau, OFB et département du Gers).

L'ambition était d'établir une liste d'options d'adaptation et de tester leur efficacité individuellement ou l'efficacité d'une combinaison de ces options, au regard de vulnérabilités exprimées des usages. A noter que cet exercice

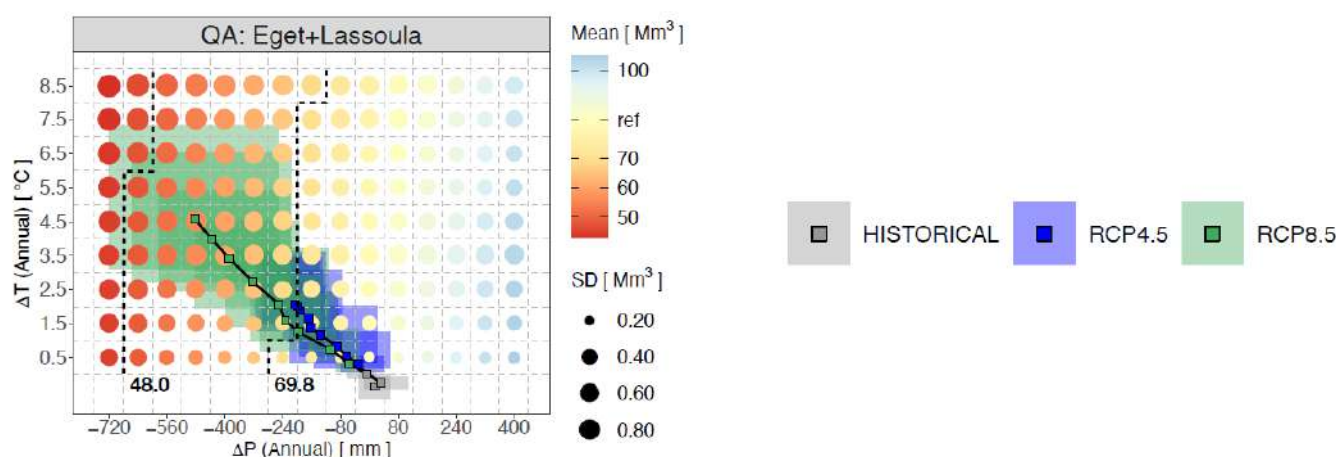


Figure 4.3 : Surface de réponse caractérisant la sensibilité des apports totaux naturels aux lacs-réservoirs à des perturbations du climat. Les courbes représentent des trajectoires possibles de la période actuelle jusqu'à la fin de siècle, échantillonnées tous les 10 ans sous scénarios RCP4.5 (bleu) et RCP8.5 (vert). Chaque point est représentatif d'une période glissante de 20 ans (moyenne de 6 projections climatiques). Les surfaces en bleu et vert représentent la dispersion des projections climatiques issues de CLIMPY. Les limites des zones critiques pour les usages en termes de changement de climat sont identifiées par des lignes en noir.

(Source : fait maison.)

de compilation d'options s'inscrit dans un travail de recherche et liberté a été donnée de proposer des actions iconoclastes (non acceptables pour les acteurs du territoire).

Les vulnérabilités du système Neste ont été identifiées et exprimées au travers de variables et d'indicateurs qui définissent des seuils de défaillance au-delà duquel le système est considéré comme non-fonctionnel. Les variables et indicateurs potentiels sont :

- La somme des débits à l'exutoire des rivières réalimentées par le système Neste (Figure 4.1) (variable) et les débits de crise (indicateur),
- Le volume turbiné par les réservoirs de haute montagne au cours de l'année (variable) et les revenus minimaux nécessaires à la maintenance de ces réservoirs (indicateur),
- Le volume des réservoirs dans le système Neste (variable) et les volumes objectifs de remplissage (indicateur).

Des actions ont été regroupées en fonction de leur impact pressenti sur les risques de défaillance. Les types d'impacts sont :

- Modification de la fonction de demande en eau : atténuation du pic de demande en période d'été, baisse de la demande totale sans modification de la répartition (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 (appel à des compléments de réservoirs gérés par d'autres producteurs) et/ou la modification de 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 en eau (modification des volumes prélevables, modification des prix de l'eau, levée temporaire de contraintes environnementales, etc.).

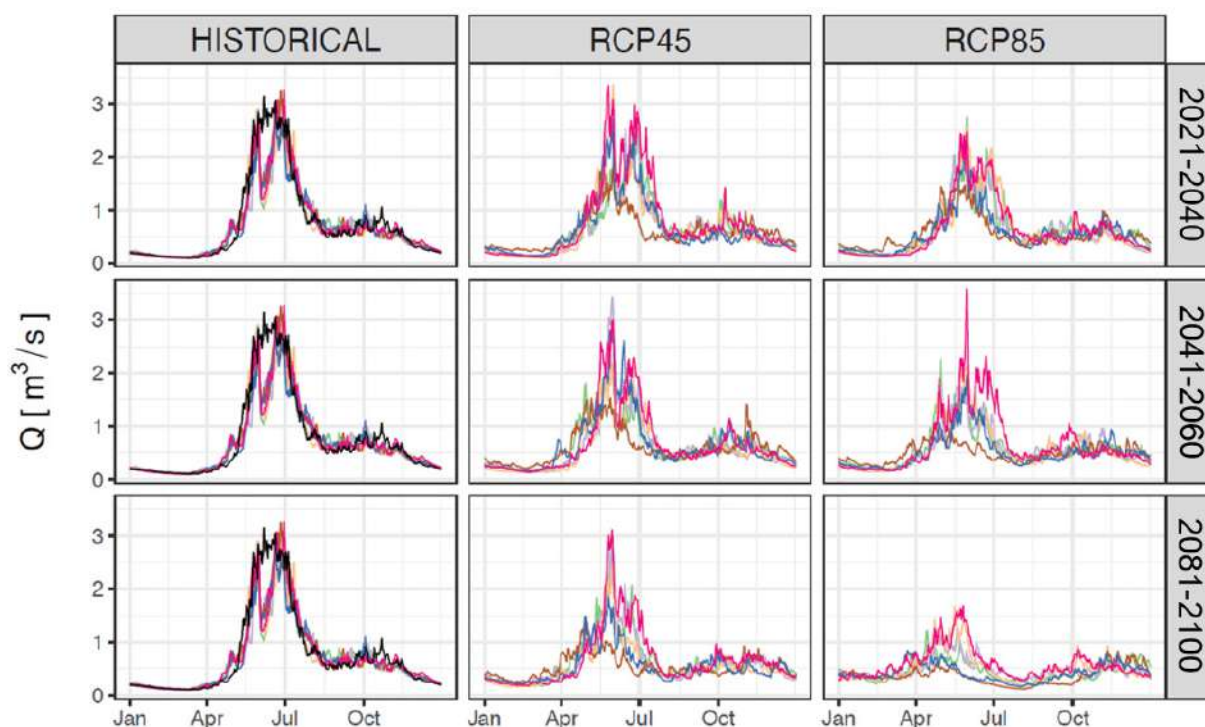


Figure 4.4. Evolution du régime hydrologique des apports aux lacs-réservoirs de Caillaouas et Pouchergues à différents horizons (les simulations obtenues avec la réanalyse SAFRAN-PIRAGUA sont la référence historique temps présent, les simulations sous changement climatique sont obtenues avec six projections élaborées par le projet CLIMPY).

(Source : fait maison.)

Pour répondre à la question de l'efficacité des trajectoires d'adaptation, la méthode d'élaboration dite « des Trajectoires Dynamique de Politiques Adaptatives » (Haasnoot et al., 2013) a été choisie. Elle cherche à appuyer les décideurs dans l'identification d'actions d'adaptation de court terme et des actions potentielles pour le long terme en caractérisant bien les seuils à partir desquels les actions ne sont plus efficaces. Les décisions sont prises dans le temps en interaction dynamique avec le système en s'appuyant sur un schéma de synthèse qui caractérise les futurs possibles et les trajectoire d'actions qui peuvent être empruntées pour s'y adapter. Ce schéma de synthèse se traduit par une représentation visuelle des trajectoires sous forme de ligne de métro ou de bus qui facilite les interactions avec les acteurs (Figure 4.5).

Sa mise en œuvre requiert une modélisation (Figure 4.6) intégrant les usages et infrastructures de gestion du système Neste et les lacs-réservoirs qui n'a pas être élaborée dans le cadre du projet PIRAGUA, étant donné la complexité du système Neste et l'accès erratique aux données d'usage (prélèvements, consommations, facteurs de contrôle, pratiques, etc.). Le modèle hydrologique GR6J (Pushpalatha et al., 2011) utilisé pour l'analyse de sensibilité a été utilisé ici. Il a été complété de briques décrivant les actions de

l'homme sur les débits en rivière, notamment :

- Les règles de gestion des ouvrages gérés par la SHEM, dont la représentation s'inspire de Hendrickx et Sauquet (2014) (action de stockage/destockage par optimisation numérique de la valeur de l'eau),
- La demande environnementale qui s'exprime via le respect des Débits Objectif d'Etiage (DOE),
- La demande agricole estimée par le modèle ADEAUMIS (Leenhardt et Trouvat, 2004) dans une version actualisée par C. Catalogne (Icare²).

Finalement, différents leviers pour l'adaptation ont été testés :

- [G-0] Gestion sans contrainte autre que le respect d'une demande de la CACG de 48 Mm3 versus [G-1] gestion contrainte par les niveaux des réservoirs franchis dans l'année en cours et dérogation au DOE en aval de la prise du Canal de la Neste (gestion actuelle)

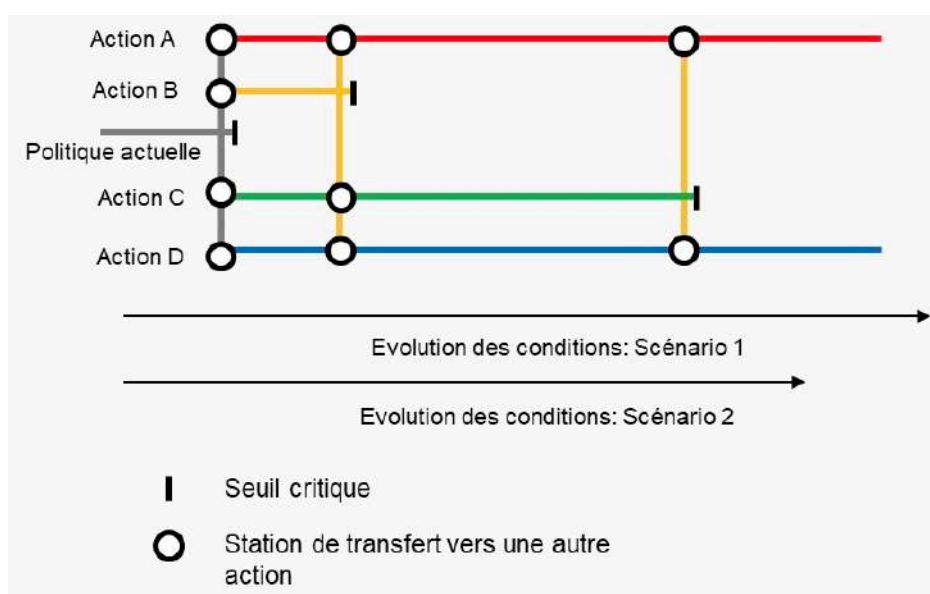
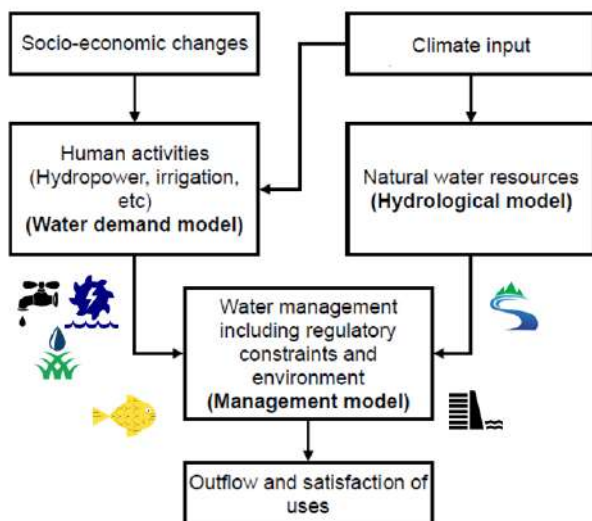


Figure 4.5 : Schéma conceptuel de trajectoires d'adaptation.

(Source : fait maison.)

- [M-0] Assolement agricole actuel versus [M-50 et M-100] baisse de la sole maïs au profit du tournesol : 50% et 100%
- [DOE-100 -] Respect versus [DOE-80 - -] baisse des exigences environnementales sur les rivières de Gascogne réalimentées de 20%
- Pour tous : même scénario pour l'AEP (consommation unitaire actuelle, conditionnée par l'évolution de la population) et l'industrie (maintenu au niveau actuel)

L'efficacité des trajectoires d'adaptation combinant ces leviers a été mesurée sur un objectif de remplissage au 15 septembre (variable) avec un seuil de défaillance (indicateur) de 10 Mm³ dans les réservoirs. La défaillance est atteinte l'année TD définie comme la dernière année de la première fenêtre mobile de 10 ans contenant deux défaillances. La Figure 4.7 montre que malgré des adaptations drastiques des usages (arrêt de la culture du maïs et réduction des DOE), le système semble en crise au milieu de siècle sous scénario RCP8.5.



Hydrological model
Rainfall-runoff model GR6J (Pushpalatha et al., 2011) coupled with a semi-distributed snow module Cemaneige (Riboust et al., 2019)
Water demand model
Energy demand: a linear model linking HDD (Heating Degree Day) (Spinoni et al., 2018) with historical production data from SDEM
CACG demand:
1. ENV (environmental use): $f(Q_{nat}, \text{storage of the CACG reservoirs})$
2. DRI (drinking water): $f(\text{population, network efficiency})$
3. IND (industrial use): constant
4. IRR (irrigation water): ADEAUMIS (Leenhardt et al., 2004) applied by C. Catalogne for the Neste region with input of S, P, T, and PET
Management model
SDEM management: Linear programming optimization method in a deterministic way
CACG management: decision tree of seasonal management
1. $Q_{canal} = f(\text{Demand, } Q \text{ at Sarrancolin})$ while respecting DOE at Sarrancolin
2. $V_{CACG_reservoir} = f(Q_{canal}, \text{Demand, } Q_{nat})$

Figure 4.6. Cadre générique de modélisation.

(Source : fait maison.)

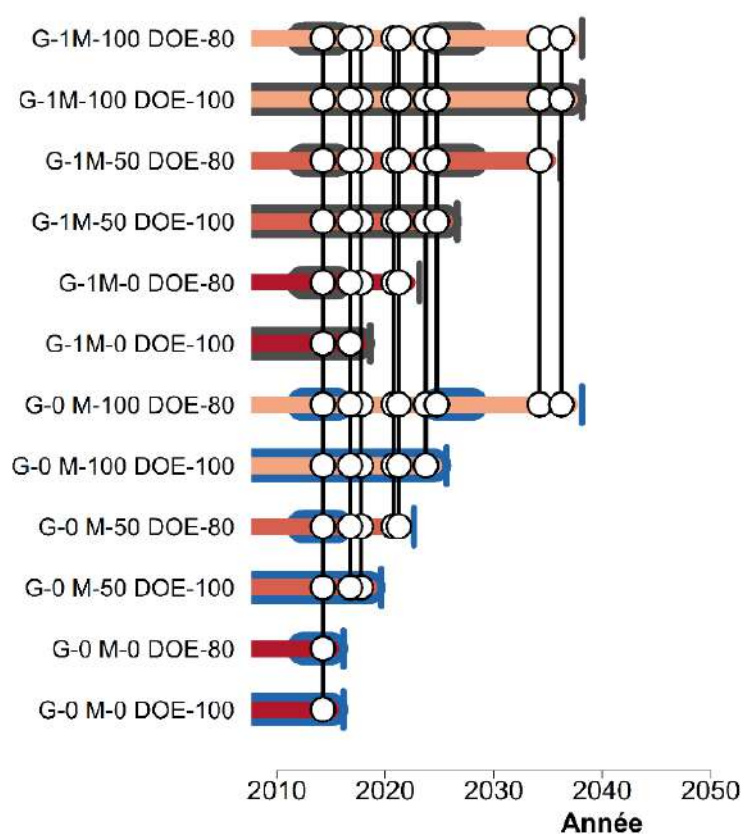


Figure 4.7. Durabilité des trajectoires d'adaptation combinant différents leviers (la combinaison G1-M0-DOE-100 correspond au contexte actuel de pratique et de gestion).

(Source : fait maison.)

4.5. Conclusions

L'étude de l'impact du changement climatique sur les lacs-réservoirs des vallées de la Neste d'Aure et du Louron a requis la mise en place d'outils spécifiques faisant le lien entre le climat, la ressource naturelle, les différents usages (dont énergie, irrigation) mobilisant des volumes dans les retenues et les modes de gestion propres au système Neste.

Les résultats obtenus avec les projections climatiques CLIMPY montrent que :

- Le changement climatique va fortement modifier les processus liés à la constitution et à la fonte du manteau neigeux et donc l'hydrologie du secteur,
- La production d'hydroélectricité est fragile économiquement parlant,
- Le changement d'assolement apparaît comme un levier d'adaptation efficace mais aucune stratégie ne semble durable sur le XXI^e siècle.

Les outils ne sont pas parfaits : ils présentent des biais inhérents à une description simplifiée (placement optimal de l'eau en fonction des besoins exprimés, mise en place de quotas et des pratiques d'irrigation sans ajustement, absence de prise en compte de prévisions météorologiques, etc.). Cependant, ils sont pertinents pour mesurer la sensibilité du système à des altérations du climat, tester des scénarios d'adaptation « tranchés » et engager des réflexions sur la vulnérabilité du système.

Les parties prenantes ont été impliquées dans le projet (échanges de données, ateliers de réflexion, etc.). Les conclusions devront être portées à connaissance au-delà de ce cercle pour mobiliser l'ensemble des acteurs et, sur ce système, il reste certainement à identifier d'autres stratégies d'adaptation.

Il n'est pas possible de généraliser ces conclusions sur l'efficacité des stratégies testées ici aux autres lacs-réservoirs des Pyrénées qui sont gérés de manière différentes (autre contexte climatique, autre contexte hydrologique, autre contexte réglementaire, autres usages connectés à ces réservoirs, etc.).

5. Adaptation au changement climatique dans l'agriculture irriguée : le cas de « Riegos del Alto Aragón » (irrigations du Haut-Aragon)

**Santiago Beguería, David Haro Monteagudo,
Leticia Palazón (EEAD-CSIC)**

L'agriculture irriguée a été un moteur économique et un vecteur de développement territorial dans le piémont des Pyrénées centrales espagnoles. La construction de grands chantiers de régulation hydrologique (barrages et bassins de retenue) et de canaux de distribution tout au long du XX^e siècle a permis l'irrigation de grandes superficies, assurant la production d'aliments et améliorant la qualité de vie des habitants du piémont. Les grands systèmes d'irrigation présentent, néanmoins, des problèmes dérivés de leur conception à une époque très différente de l'actuelle et sont confrontés aux nouveaux défis du XXI^e siècle. Parmi ces défis, nous pouvons souligner la baisse prévisible des ressources hydriques disponibles en raison du changement climatique. En outre, il ne faut pas oublier des problèmes tels que la réduction de la capacité des bassins de retenue en raison de l'envasement ou de l'augmentation des coûts de production du fait des prix de l'énergie. Dans ce travail, nous avons analysé le système de « Riegos del Alto Aragón » (irrigations du Haut-Aragon) dans la province de Huesca, qui bénéficie aujourd'hui d'un niveau adéquat de durabilité. Cependant, cette situation sera menacée à l'avenir si les projections du changement climatique analysées se réalisent. Une diminution des apports de débit aux bassins de retenue alimentant le système devrait avoir lieu, ainsi que des changements dans la saisonnalité des apports, avec un plus grand poids des débits hivernaux et des étiages plus prononcés et plus longs. Cela aura une répercussion sur la durabilité du système, se reflétant en une plus grande fréquence et une plus grande intensité de situations où les demandes d'irrigation aujourd'hui établies ne peuvent être satisfaites. L'analyse démontre l'inefficacité des solutions centrées sur l'augmentation de l'offre d'eau (tant au niveau des grandes infrastructures de régulation hydrologique qu'au niveau interne par des bassins d'irrigation), en prenant notamment en compte les projections climatiques. Les efforts doivent donc se concentrer pour garantir la dotation actuelle en eau d'irrigation tout en assurant une meilleure gestion de la demande d'eau. Dans un scénario de raréfaction progressive de la ressource, il est nécessaire d'envisager des mesures (réglementations, de gouvernance, etc.), orientées à maximiser la rentabilité par unité d'eau fournie, en marginalisant les pratiques et les cultures moins rentables. Les irrigants de RAA ont démontré une grande capacité d'adaptation, bien que les changements de ces dernières décennies soient plus dus à l'action individuelle qu'à un plan prémédité et conscient des autorités. Ainsi, le système de RAA continue d'être une irrigation relativement extensive qui n'a pas été capable de créer une agro-industrie puissante, permettant de développer des cultures à la valeur ajoutée élevée. Face aux défis du XXI^e siècle, il est essentiel qu'une plus grande implication à tous les niveaux existe, de l'Administration aux petits agriculteurs, en passant par les entrepreneurs locaux, pour que le système puisse devenir un modèle d'agriculture durable à la productivité élevée dont a besoin la société du XXI^e siècle.

5.1. Introduction

D'après la base de données Corine Land Cover (CLC, 2018), il existe 360 407 ha non irrigués et 55 975 ha irrigués dans les Pyrénées, c'est-à-dire, respectivement près de 7 % et de 1 % du territoire (figure 5.1). Il s'agit donc d'une activité très minoritaire au sein de la cordillère. Cette situation contraste avec l'importance que l'agriculture avait dans la cordillère dans le passé. Par exemple, Lasanta (1989) a estimé la superficie maximale cultivée dans certaines vallées des Pyrénées aragonaises, où 5,66 % de la superficie totale de la vallée de Tena étaient cultivés et 25,18 % de la superficie totale de la vallée de Hecho. Si nous ne prenons en compte que la superficie située en dessous de 1 600 m au-dessus du niveau de la mer (qui est celle pouvant être cultivée en raison des contraintes climatiques), alors la proportion de la superficie maximale cultivée s'élève à 22,1 % dans la vallée d'Aragüés ou 32,8 % dans la vallée d'Aísa, comme valeurs extrêmes. Cela signifie une utilisation non seulement des fonds de vallée, mais aussi des versants aux pentes très prononcées, parfois avec des champs à caractère nomade, cultivés durant deux ou trois années consécutives, suivies de jachères très longues. Dans d'autres cas, les versants ont été aménagés en terrasses afin de bénéficier de cultures plus permanentes.

L'agriculture irriguée dans les zones de piémont est la principale demande de ressources hydriques générées dans les Pyrénées, représentant 83 % des usages consommatifs totaux.

Néanmoins, dans les piémonts de la cordillère, la situation est très différente, car avec près de 2,4 millions d'hectares de superficie cultivée, l'agriculture constitue une occupation des sols extrêmement importante, ainsi que l'élevage, qui bénéficie de nombreux produits agricoles (maïs, luzerne), en plus du pâturage sur des superficies de montagne, les jachères des céréaliers, y compris sur de nombreux champs irrigués à l'automne et en hiver.

En ce qui concerne l'usage des ressources en eau, il est important de distinguer l'agriculture non irriguée qui se nourrit exclusivement des précipitations, et l'agriculture irriguée qui reçoit des apports supplémentaires extraits des lits et des aquifères. Il existe d'importantes superficies d'agriculture irriguée aux pieds des Pyrénées, sur

les deux versants, qui utilisent fondamentalement des ressources hydriques générées dans la cordillère. De fait, l'agriculture irriguée des piémonts suppose l'usage principal des ressources en eau des Pyrénées. Avec une utilisation moyenne de 5 315 hm³ annuels, elle représente 79 % de l'utilisation des ressources hydriques des Pyrénées. (Beguería, 2022 : Tableau 5.1).

Il existe des différences importantes entre les systèmes d'exploitation (tableau 5.1). Ainsi, la consommation en eau de l'agriculture représente des pourcentages supérieurs à 95 % de l'eau consommée dans certains systèmes de la vallée de l'Èbre et, au contraire, nuls dans certains systèmes du versant français. Par pays, le versant français utilise environ 800 hm³ annuels pour l'agriculture, soit 44 % de l'emploi des ressources hydriques générées sur ce versant. Sur le versant espagnol, l'agriculture utilise 4 513 hm³ annuels, soit 92 % du total de la consommation d'eau. En Andorre, 2 hm³ annuels sont utilisés pour l'agriculture soit 16 % des utilisations totales.

Il existe d'importantes différences entre l'irrigation espagnole et l'irrigation française. En France prédomine une utilisation diffuse des eaux d'origine souterraine ou à partir du captage direct

des nombreux lits, parfois alimentés de façon semi-artificielle, comme dans le cas des cours d'eau de Gascogne alimentés par le canal de Neste, construit en 1863. Par contre, en Espagne, des systèmes d'irrigation liés aux grands bassins de régulation aux pieds des Pyrénées ont été réalisés, ainsi qu'un réseau complexe de canaux de distribution. Les grands projets d'irrigation ont commencé à être planifiés au début du XX^e siècle, bien que dans certains d'entre eux les idées de transformation aient émergé au moins au milieu du XIX^e siècle. Ces plans d'irrigation couvrent de vastes étendues, parfois éloignées du réseau fluvial, et sont basés sur la régulation des rivières par de grands bassins de retenue et sur le transfert de l'eau par de grands canaux. Nous pouvons ainsi souligner le plan Jaén, le plan Badajoz, les irrigations du Duero par le canal de Castille, et le plus long de tous, les « Riegos del Alto Aragón » (irrigations du Haut-Aragon). Ces plans d'irrigation avaient pour objet de fixer la population rurale, d'encourager l'agro-industrie et de produire pour un marché national ou international.

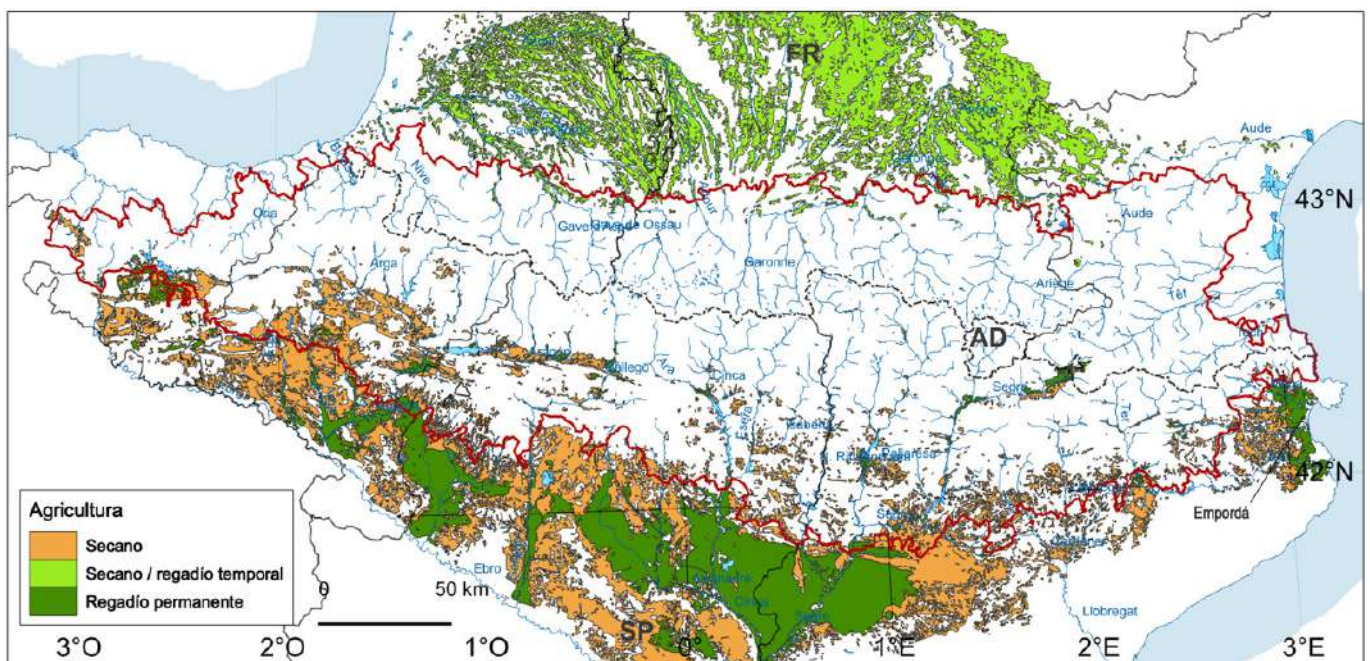


Figure 5.1. L'agriculture dans les Pyrénées (zone délimitée par la ligne rouge) et ses zones de piémont.

(Source : Corine Land Cover, 2018 ; CHE, 2020 ; Gouvernement d'Andorre. Élaboration propre).

Tableau 5.1. Utilisation de l'eau dans l'agriculture irriguée par des systèmes d'exploitation (volume annuel moyen et pourcentage sur l'emploi de l'eau totale). Source : dotations des plans hydrologiques de bassin.

Organisme de bassin	Système d'exploitation	Utilisation agricole (hm ³ année ⁻¹ , %)	
ACA	Ter-Llobregat	197	0,27
ACA	Fluvià	22	0,68
ACA	Muga	68	0,81
AEAG	La Garonne de sa source au confluent de l'Ariège	21	0,23
AEAG	L'Ariège	41	0,63
AEAG	La Garonne du confluent de l'Ariège au confluent du Tarn	35	0,29
AEAG	La Garonne du confluent du Tarn au confluent du Lot	51	0,78
AEAG	L'Adour de sa source au confluent du Larcis	53	0,72
AEAG	L'Adour du confluent du Larcis (inclus) au confluent de la Midouze	37	0,78
AEAG	L'Adour du confluent de la Midouze au confluent des Gaves Réunis	24	0,57
AEAG	Le Gave de Pau de sa source au confluent du Béz	0	0
AEAG	Le Gave de Pau du confluent du Béz (inclus) au confluent de l'Adour	8	0,13
AEAG	Le Gave d'Ossau	0	0
AEAG	Le Gave d'Oloron	4	0,31
AEAG	L'Adour du confluent des Gaves Réunis au confluent de la Nive	1	0,34
AEAG	L'Adour du confluent de la Nive (incluse) à l'océan	0	0
AEAG	Les côtières de l'embouchure de l'Adour au confluent de l'Untxin (inclus)	0	0
AEAG	La Bidasoa du confluent du Rio Latsa à l'océan	0	0
AERMC	Côtières de la frontière espagnole - l'Aude et el Segre (bassin français)	186	0,75
AERMC	L'Aude de sa source à la Méditerranée	51	0,61
CHC	Bidasoa	1	6%
CHC	Urumea	0.5	2%
CHC	Oria	1	4%
CHC	Urola	0.5	5%
CHC	Deba	0.5	3%
CHC	Nervión	1.5	1%
CHE	Andorra	2	0,16
CHE	Segre-Noguera Pallaresa	972	0,96
CHE	Noguera Ribagorzana-Ésera	849	0,96
CHE	Gállego-Cinca	1277	0,98
CHE	Aragón	758	0,98
CHE	Ega-Arga-Irati	193	0,68
CHE	Zadorra	86	0,68
CHE	Garona	0	0,04
TOTAL		5315	0,83

Pour expliquer la différente intensité avec laquelle les ressources hydriques ont été utilisées dans l'un ou l'autre versant des Pyrénées, il convient notamment de comprendre les caractéristiques climatiques qui prédominent dans le sud de la France et dans la dépression de l'Èbre. Il ne faut pas oublier que dans la dépression de l'Èbre, les précipitations sont généralement inférieures à 450 mm annuels et autour de 300 mm sur l'axe de l'Èbre, alors que sur le versant français, les précipitations dépassent largement les 500 mm annuels (Beguería, 2022: Figure 1.6). Il existe aussi un grand contraste dans la demande hydrique (évapotranspiration potentielle), de sorte qu'au nord de la cordillère prédominant des valeurs positives du bilan hydrique (précipitations plus importantes que la demande), alors que sur le versant sud, notamment dans la dépression de l'Èbre, le bilan est clairement négatif, atteignant même des valeurs de climats de type semi-aride. Tout ceci, accompagné de températures élevées entre les mois de mai et d'octobre, explique, d'une part, la baisse de la productivité des cultures non irriguées et d'autre part, la revendication quasi séculaire pour transformer les champs non irrigués en champs irrigués.

5.2 Défis du changement climatique pour l'agriculture irriguée et stratégies d'adaptation

Le changement climatique implique des défis d'une grande importance pour l'agriculture irriguée car, bien que dans une moindre mesure que les cultures non irriguées, il s'agit d'une activité fortement exposée aux variations climatiques. Dans l'ensemble, il est prévu que les effets négatifs du changement climatique dépassent les effets positifs. Ces effets ont été décrits à de nombreuses occasions. Nous nous concentrons ici sur les aspects plus liés aux ressources hydriques. Ainsi, l'augmentation très probable des températures et la (plus incertaine) diminution des précipitations devraient impliquer une baisse des ressources hydriques disponibles en raison de la réduction des débits circulants et de la recharge des aquifères. En outre, ces changements seront liés à une variation de la saisonnalité des ressources, puisqu'il est prévu que les précipitations liquides augmentent en hiver, au détriment de l'accumulation de neige, que la fonte du manteau neigeux soit plus faible et plus précoce, et que les étiages soient plus longs et plus prononcés. Le rapport à la base physique du projet PIRAGUA fournit des informations sur les tendances observées et les projections futures des différentes composantes du bilan hydrique des Pyrénées, y compris des estimations des changements sur les débits circulants et dans la recharge des aquifères (Beguería, 2023).

Il est prévu que le changement global, dont l'un des effets les plus connus est le changement climatique, implique une diminution des ressources hydriques disponibles pour l'agriculture et une augmentation des besoins des cultures.

Outre les changements dans la disponibilité des ressources en eau, le changement climatique entraînera très probablement une augmentation des besoins d'irrigation des cultures. Ceci est dû à trois types de facteurs : (i) l'allongement de la saison d'irrigation, qui s'avancera par rapport aux conditions actuelles, en raison de l'augmentation de la température et de la demande évapotranspirative ; (ii) l'augmentation des besoins des cultures à la suite de la plus grande capacité desséchante (demande hydrique) d'une atmosphère plus chaude et plus sèche ; et (iii) l'implantation de cultures industrielles et horticoles qui, dans certains cas, impliquent une

plus grande consommation d'eau. Ce dernier facteur est lié à la nécessité d'intensifier la productivité de l'irrigation.

Néanmoins, il ne faut pas oublier d'autres problèmes tels que les changements dans l'occupation des sols ou la réduction de la capacité de rétention en raison de l'envasement des bassins de retenue, qui peuvent être aussi importants que les effets du changement climatique.

Outre les conséquences du changement climatique, il ne faut pas oublier d'autres menaces qui peuvent avoir un impact similaire sur la disponibilité des ressources en eau. Bien que ce travail se concentre sur les effets du changement climatique, il ne faut pas oublier que l'évolution des ressources hydriques est aussi liée aux transformations de la couverture végétale, étant donné que l'extension des forêts et des maquis dans des zones en amont donne lieu à une plus grande consommation d'eau et à un plus grand captage, ce qui implique une plus faible recharge des aquifères et une plus faible production du ruissellement superficiel. La tendance observée aux sources des rivières pyrénéennes et dans d'autres bassins de montagne en Espagne indique une baisse notable des débits qui ne découle pas exclusivement de l'évolution du climat, mais est aussi liée à l'abandon des terres de culture et à la croissance consécutive de la superficie forestière et de la couverture de maquis denses (Beguiria et al., 2003 ; García-Ruiz et Lana-Renault, 2011 ; Morán-Tejeda et al., 2014). Il est difficile de prévoir comment va évoluer la couverture végétale des Pyrénées à l'avenir, car elle dépendra autant de l'évolution climatique que des changements dans l'occupation des sols et de la plus en plus faible disponibilité du territoire pour l'extension forestière. Cependant, il est prévisible que les processus d'extension végétale actuels se poursuivent à l'avenir.

Un autre aspect très important pour la gestion des ressources en eau dans les grands systèmes d'irrigation est l'envasement progressif des bassins de retenue en raison du charriage naturel de sédiments par les rivières qui les alimentent. Ces sédiments sont retenus par les barrages dans presque leur totalité, provoquant une perte de capacité de rétention lente mais progressive (Saa

et al., 1995 ; Cobo, 2008 ; Batalla et Vericat, 2011 ; Palazón, 2016 ; Casamor et Calafat, 2018). Par exemple, pour l'ensemble du bassin de l'Èbre, le Livre blanc de l'eau a estimé une perte totale de 271 hm³ (9 % du volume total de rétention), avec une perte de rétention moyenne annuelle de 0,25 % du volume initial (MMA, 2000). Parmi les grands barrages des Pyrénées centrales espagnoles, le barrage de Barasona avait perdu en 1995 un tiers de sa capacité depuis sa construction en 1932 (Navas et al., 1998 ; Valero-Garcés et al., 1999), avec un taux d'envasement de 2 à 18 cm par an, selon les zones (Navas et al., 2004 et 2009). Avendaño-Salas et al. (1997) ont calculé un taux d'apport de sédiments de 3,5 tonnes par hectare et par an pour ce même barrage qui, dans le cas du barrage de La Sotonera s'élevait à 11,21 tonnes. Pour la rivière Noguera Pallaresa, il a été calculé que les barrages de Camarasa, de Terradets et de Talarn avaient perdu, respectivement, en l'an 2000, 16 %, 62 % et 19 % de leur capacité initiale, avec des taux annuels d'envasement de 0,2 à 0,95 % (Casamor et Calafat, 2018). Bien qu'en général le rythme d'envasement des bassins de retenue décroisse à mesure qu'ils se remplissent de sédiments, il ne faut pas perdre de vue que les bassins de retenue sont des ressources non renouvelables et d'une durée de vie finie, et que sur le long terme ce problème va accentuer la diminution des ressources hydriques disponibles.

Les stratégies d'adaptation sont des actions destinées à réduire la vulnérabilité du secteur agricole face à la variabilité et au changement climatique. Des exemples de mesures d'adaptation dans l'agriculture irriguée sont la mise en œuvre d'améliorations dans les systèmes d'irrigation, l'utilisation de sources alternatives dans des situations d'urgence, l'utilisation de variétés plus tolérantes à la sécheresse, la modification des calendriers des semailles ou le labourage de conservation.

Pour relever les défis posés par le changement climatique, en limiter ses effets négatifs et les risques pour le secteur agricole, il est indispensable d'envisager des mesures d'adaptation à l'échelle particulière ou de

Box 5.1 : Processus participatifs et la stratégie à deux directions

Les processus participatifs sont des éléments fondamentaux dans la prise de décisions pour des questions complexes telles que l'adaptation au changement climatique, en facilitant l'échange de connaissances entre les décisionnaires (hommes-femmes politiques, gérants), les experts (techniciens, scientifiques) et les acteurs impliqués (agriculteurs, organismes sociaux). La participation des acteurs sociaux (appelés stakeholders en anglais) rend possible la coproduction de solutions partagées et contribue à réduire les conflits. Dans la conception de systèmes d'aide à la prise de décisions, basés sur l'évaluation de scénarios grâce à des modèles quantitatifs, les processus participatifs servent à informer les experts sur les options préférées des acteurs. Il s'agit d'une stratégie connue comme « de bas en haut » (de l'anglais bottom-up). Dans une stratégie « de bas en haut », les scénarios à évaluer sont construits à partir des préférences établies par les acteurs impliqués. Ainsi, nous partons a priori d'un ensemble de mesures d'adaptation, comptant sur un bon niveau d'acceptation parmi les acteurs. Toutefois, cette stratégie est confrontée à des risques, car le point de vue des acteurs peut être excessivement local et ignorer des aspects sur le long terme ou à grande échelle, qui sont plus difficiles à prendre en compte. Les stratégies pures « de bas en haut » excluent fréquemment les mesures d'adaptation les plus disruptives ou les plus ambitieuses, qui requièrent souvent de nouveaux instruments normatifs et des ressources qui ne sont pas à la portée des acteurs. D'autre part, la planification « de haut en bas » (top-down) est exclusivement basée sur les mesures d'adaptation proposées par les experts et les gérants. Ceux-ci ont généralement une meilleure perspective des processus globaux et sont plus enclin à inclure des options d'adaptation innovantes, comme de nouveaux instruments normatifs, mais ils ont aussi tendance à ignorer les priorités des acteurs. Ce type de stratégie s'utilise traditionnellement dans le domaine de la planification hydrologique. Actuellement, la stratégie dite à deux directions ou mixte (bottom-up meets top-down) prend de plus en plus de force. Elle permet de combiner les forces des deux méthodologies. Il s'agit de combiner, dès le début du processus, les préférences et les points de vue des acteurs et des experts, même si, à certains moments, ceux-ci peuvent s'exclure mutuellement. Le processus d'évaluation de scénarios ultérieur servira de base pour alimenter le débat sur l'adoption d'un ensemble de mesures d'adaptation aidant à minimiser les risques dérivés du changement climatique.

l'exploitation ainsi qu'à l'échelle générale. Il n'existe pas de consensus général sur la définition de l'adaptation au changement climatique, mais nous pouvons indiquer ici qu'il s'agit de réduire la vulnérabilité du secteur agricole face aux conséquences du changement climatique.

L'objectif ultime de l'adaptation est d'augmenter la résilience du secteur face au changement climatique. En d'autres termes, étant donné que l'on s'attend à ce que les situations de stress (par exemple les pénuries d'eau d'irrigation) se produisent de plus en plus fréquemment à l'avenir, l'objectif est de minimiser les effets de ces événements et de garantir que les exploitations puissent se rétablir par la suite sans subir de dommages permanents ou à long terme.

Tant les gérants (organismes de bassin et gouvernements régionaux) que les associations

d'agriculteurs sont bien conscients des défis que suppose le changement climatique pour l'agriculture et ont mené plusieurs initiatives visant à identifier des pratiques durables pour le secteur agricole et l'industrie alimentaire dans les Pyrénées et les régions qui en dépendent. Un exemple est le projet Agroclima du gouvernement d'Aragon (<https://www.aragon.es/-/proyecto-agroclima> ; Facteur CO₂, 2016). Il s'agit d'un projet ambitieux qui aborde non seulement l'adaptation au changement climatique, mais aussi son atténuation dans les secteurs de l'agriculture et de l'élevage sur tout le territoire de l'Aragon. Un élément essentiel de ce projet est l'importance de la participation de tous les agents du secteur agroalimentaire (box 5.1).

5.3. L'étude de cas du système « Riegos del Alto Aragón »

5.3.1 Contexte général

La Communauté générale de « Riegos del Alto Aragón » (RAA), située au pied du secteur central des Pyrénées entre les provinces de Huesca et de Saragosse (Espagne), est le système d'irrigation à la plus grande superficie de l'Union européenne. La superficie irrigable s'élève aujourd'hui à 135 000 hectares, répartis sur un territoire d'environ 2 500 km², entre 200 et 425 m d'altitude (figure 5.2).

Le système « Riegos del Alto Aragón » est la superficie d'irrigation la plus étendue de l'Union européenne. Il s'alimente exclusivement de débits superficiels générés dans le secteur central des Pyrénées, dans les sources des rivières Gállego et Cinca. Bien que le système connaisse aujourd'hui un bon équilibre entre l'offre et la demande d'eau, une augmentation des conflits, consécutive du changement climatique, est à prévoir.

La conception du système RAA remonte aux idées de Joaquín Costa, qui se sont concrétisées en la loi qui a autorisé les grands chantiers de régulation en 1915. Le développement du système a eu lieu, en grande partie, tout au long du XX^e siècle (figure 5.3) et il n'est pas encore terminé, car le projet définitif suppose un total de 174 000 ha irrigués, liés à la construction de nouveaux bassins de retenue. Ce développement n'aurait pas pu être possible sans la construction du système de grands barrages et de bassins de retenue sur les rivières Gállego et Cinca : Ardisa (1927, 1931,5 hm³), El Grado (1969, 400 hm³), Mediano (1960, 313 hm³ ; 1973, 434,6 hm³), Búbal (1971, 64,3 hm³) et Lanuza (1980, 16,9 hm³), et de bassins de retenue internes de régulation : La Sotonera (1935, 40 hm³ ; 1952, 80 hm³ ; 1962, 189 hm³), Torrollón (1983, 1,8 hm³), Valdabrá (1982, 1,3 hm³), Las Fitás (9 hm³) et Lasesa (6 hm³). L'eau stockée est distribuée via plus de 2 000 km de canaux, les plus importants étant le canal du Gállego (1927), le canal de Monegros I (1928, 1933, 1941, 1950, 1967, 1986), le canal du Cinca (1971, 1975, 1982, 1988), et le canal de Monegros II (1996). Un autre bassin de régulation interne est actuellement en construction, d'une capacité de 170 hm³

Box 5.2 : Systèmes de soutien à la prise de décisions appliqués à l'adaptation au changement climatique

Un système de soutien à la prise de décisions (DSS, dans ses sigles en anglais) est un outil qui permet d'évaluer différentes réponses face à un problème complexe. Un DSS est un soutien pour les personnes qui doivent prendre une décision ou planifier une stratégie, car il permet de compiler des informations, générer des options et comparer différentes alternatives. Pour tout cela, les DSS peuvent être des outils très utiles dans le processus de conception de stratégies d'adaptation au changement climatique, où coïncident de nombreux acteurs aux intérêts très différents et une multitude de réponses possibles.

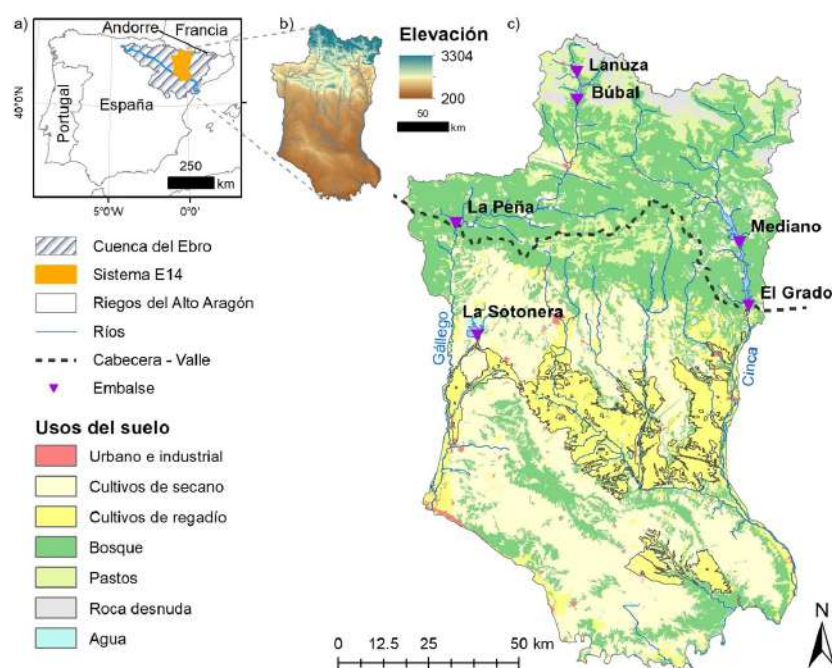


Figure 5.2. Carte de la zone d'étude (système d'exploitation E14 du bassin de l'Èbre) avec la localisation des principales rivières et bassins de retenue, les informations sur l'altitude et l'occupation des sols, la délimitation des zones en amont et dans la vallée, et le périmètre du système « Riegos del Alto Aragón ».

(Source : élaboration propre).

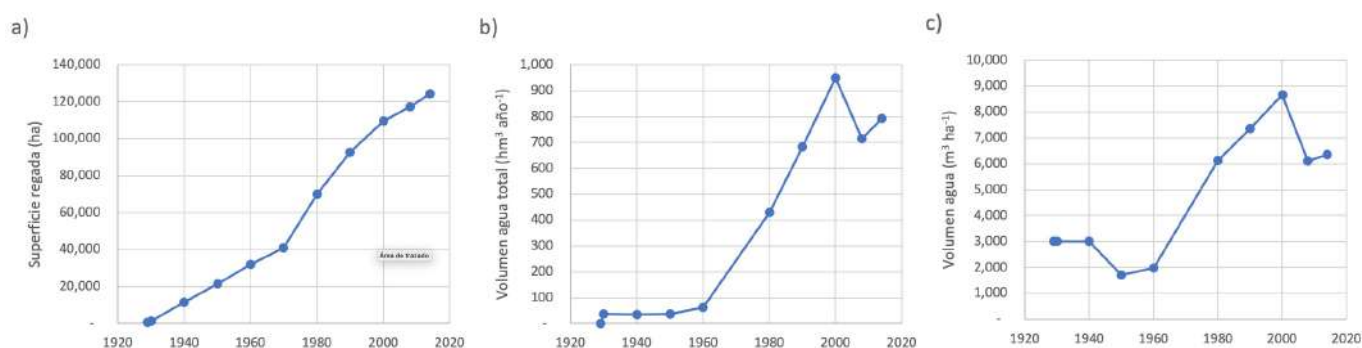


Figure 5.3. Évolution de la superficie irriguée (a), volume d'eau fourni (b) et volume d'eau par unité de superficie (c) dans le système « Riegos del Alto Aragón ».

(Source : RAA).

(Almudévar), dont la fin du chantier est prévue pour novembre 2022. Le volume d'eau fourni tous les ans par le système s'élève à 792 hm³, d'une dotation moyenne de 6 366 m³ par hectare. Outre la distribution d'eau d'irrigation à 48 communautés, le système approvisionne aussi 113 zones urbaines, 10 zones industrielles et 893 exploitations d'élevage.

D'après la Confédération hydrographique de l'Èbre (CHE, 2016), la demande brute moyenne d'eau d'irrigation de RAA atteint les 1 137 hm³/an, bien que la valeur moyenne soit de 838 hm³/an (d'une dotation moyenne de 6 717 m³ ha⁻¹), avec des variations de $\pm 15\%$ en fonction des conditions annuelles. Malgré les ajustements sur les opérations de prélèvements de la CHE pour faire face à la diminution de la disponibilité en eau et à la demande croissante, la perception générale parmi les irrigants est que la fréquence et la gravité des déficits d'eau ont augmenté ces dernières années, bien que cela ne s'apprécie pas nettement dans les données de distribution.

Les systèmes d'irrigation ont changé de façon substantielle tout au long de l'histoire de RAA. Le modèle initial basé sur l'irrigation gravitaire et sur une agriculture irriguée presque extensive, à la faible consommation d'eau et à la faible rentabilité, s'est clairement épuisé à la fin du XX^e siècle. Ainsi, le système a subi une importante transformation liée à la modernisation de l'irrigation, notamment à partir des années 1990 et jusqu'à aujourd'hui. 97 813 hectares ont été ou sont en processus de modernisation. L'installation de systèmes d'irrigation sous pression (via des systèmes rotatoires ou à aspersion) et de goutte-à-goutte, ainsi que la concentration parcellaire a profondément transformé le paysage, mais aussi les modes de gestion, notamment la nécessité d'augmenter la capacité de régulation interne par des bassins de retenue. Elle a également provoqué comme effets secondaires, l'augmentation de la consommation d'eau (par hectare et dans l'ensemble), la hausse des coûts de production à cause de la nécessité d'électricité pour pomper l'eau et obtenir de la pression.

La modernisation a aussi impliqué des changements dans les schémas de cultures. Ainsi, d'une prédominance des céréales d'hiver (avant 1980), nous sommes passés à une prédominance

des cultures d'été, telles que le maïs, le riz et le fourrage, qui consomment plus d'eau. Du fait des changements de la Politique agricole commune et de la disponibilité en eau d'irrigation, à partir du début du XXI^e siècle, le blé et l'orge sont devenus dominants, en raison de leurs exigences en eau moindres et de la possibilité de produire deux récoltes par saison, en combinant des céréales d'hiver avec le maïs (Lecina et al., 2010 ; Sánchez-Chóliz et Sarasa, 2013). Ces cultures sont, en grande partie, destinées à l'alimentation d'un élevage intensif croissant dans la région, où le bétail porcin se distingue par son importance. Par contre, les cultures horticoles, à forte valeur de marché, n'ont pas donné les résultats escomptés. Cela s'explique, en partie, par le manque de main d'œuvre, le manque d'entreprises de transformation et l'absence de marchés organisés. Toutefois, il convient de souligner la présence des cultures telles que l'endive, l'ail et l'oignon, contrôlées par des entreprises en dehors de l'Aragon, bien que les tâches soient effectuées par les propriétaires des terrains.

Dans le but d'évaluer des ensembles de mesures d'adaptation, une modélisation basée sur des scénarios a été réalisée. Ces derniers consistent en des combinaisons de projections climatiques futures et des ensembles de mesures. Les mesures sélectionnées sont basées sur les résultats d'une réunion avec les acteurs locaux et les recommandations promues par les gérants.

À l'heure actuelle, nous considérons que le système présente un équilibre satisfaisant entre l'offre et la demande d'eau, sauf lors des années extrêmement sèches, où le plan de sécheresse doit être activé et où l'approvisionnement en eau d'irrigation est restreint. Cependant, le changement climatique peut menacer cet équilibre et réduire la résilience des exploitations et leur viabilité à long terme. L'objectif de l'étude de cas consiste à développer, en collaboration avec les principaux acteurs, un système d'aide à la prise de décisions (box 5.2), afin d'encourager la réflexion sur la mise en œuvre de différentes mesures d'adaptation au changement climatique dans le système.

5.3.2 Analyse des ressources hydriques disponibles (présente et future)

Le système RAA s'inscrit dans le cadre du système d'exploitation E14 de la Confédération hydrographique de l'Èbre (figure 5.2). Nous pouvons diviser ce système en deux régions clairement différenciées : l'une en amont, dans le nord, entièrement encadrée par les Pyrénées centrales, et l'autre au sud, la vallée. Il existe des différences importantes entre les deux régions quant à l'élévation (la source de 500 à 3 304 m, la vallée de 200 à 500 m), au climat (excédentaire en ressources hydriques en amont et sec dans la vallée) et à l'occupation des sols (forêts et pâturages en amont, et prédominance agricole dans la vallée).

La plupart des débits employés dans le système E14 est générée en amont, avec une très faible contribution des bassins moyens et bas dans la zone de la vallée. De 1980 à 2006, l'apport annuel moyen de la rivière Gállego au bassin de retenue de La Peña a été de 907,6 hm³ et celui de la rivière Cinca aux bassins de retenue de Mediano et El Grado a été de 1 127,6 hm³. La

quasi totalité des demandes du système E14 sont satisfaites grâce à des ressources superficielles, l'utilisation des eaux souterraines n'existant presque pas (0,9 %, d'après les données de la CHE).

Les ressources disponibles pour l'irrigation devraient progressivement se réduire au cours du XXI^e siècle, avec des pourcentages moyens variant de 7 à 20 %, en fonction du scénario et de l'horizon temporel considérés.

En analysant les tendances du climat entre 1970 et 2015, l'augmentation de la température est le changement le plus évident (tableau 5.2). Le registre indique des hausses similaires en amont et dans la vallées de près de 0,6 °C par décennie dans le cas des minima et de 0,4 °C pour les maxima. Par mois, la hausse des températures se concentre de mars à juin pour les maxima, et de mars à novembre pour les minima. Néanmoins, les précipitations n'indiquent pas de changements significatifs sur l'année dans aucune des deux régions. Par mois, seul le mois de mai indique une baisse significative en amont, alors que le mois de novembre indique un changement positif. Dans l'ensemble, nous pouvons donc dire que les précipitations n'ont pas varié sur cette période.

Tableau 5.2. Tendances des moyennes mensuelles et annuelles des précipitations (mm par décennie) et température (°C par décennie) dans la région en amont et de piémont du système E14 et dans les apports aux bassins de retenue (hm³ par décennie) sur la période 1970-2015. Les valeurs en caractère gras indiquent le sens statistique à un niveau $\alpha = 0,05$. (Source : Haro-Monteagudo et al., 2020.)

	Cabecera			valle			Entrada embalses		
	Precip.	T e m p . Max.	T e m p . Min.	Precip.	T e m p . Max.	T e m p . Min.	Lanuza	La Peña	El Grado
Ene	2.99	0.18	0.43	1.84	0.19	0.38	0	-0.59	-1.5
Feb	-1.58	-0.01	0	-1.61	-0.14	0.04	-2.18	-5.66	-4.91
Mar	9.14	0.64	0.65	6.22	0.46	0.48	0.8	-0.59	3.94
Abr	5.85	0.77	0.91	5.23	0.7	0.88	1.14	6.01	10.5
May	-9.61	0.86	0.78	-5.57	0.81	0.87	-4.07	1.71	-2.06
Jun	-4.33	0.92	1.07	-2.36	0.99	1.04	-8.94	-4.1	-18.33
Jul	6.02	0.21	0.43	2.72	0.25	0.53	-6.27	-0.24	-9.21
Ago	0.51	0.17	0.43	0.81	0.26	0.67	-2.6	1.12	-3.27
Sep	2.57	0.05	0.28	2.06	0.09	0.44	-1.87	-1.27	-2.49
Oct	14.95	0.4	0.82	6.71	0.46	0.7	-0.43	-2.44	10.9
Nov	16.95	0.02	0.85	5.19	0.12	0.73	1.19	-1.22	11.61
Dic	-5.31	-0.09	0.17	-3.67	-0.08	0.11	0.67	-0.83	0.48
Anual	28.6	0.42	0.6	13.4	0.39	0.66	-25.23	-3.47	0

Box 5.3 : Analyse de vulnérabilité basée sur des scénarios

L'approche méthodologique utilisée dans l'étude de cas du système de « Riegos del Alto Aragón » est basée sur la modélisation, grâce à un logiciel de simulation des ressources hydriques du système et de sa gestion optimisée pour satisfaire les demandes existantes. Le modèle SWAT (Soil And Water Tool ; Gassman et al., 2007) a été utilisé pour modéliser le cycle hydrologique dans les zones en amont du Gállego (jusqu'au barrage d'Ardisa) et le Cinca (jusqu'au Grado). Le modèle hydrologique a été calibré en utilisant des données de climat, de l'occupation des sols et des débits actuels. Une fois calibré, un ensemble de projections climatiques pour le XXI^e siècle a été employé (AEMET, 2017) comme forçages. Cela a permis de créer un ensemble de projections de débit, avec deux scénarios d'émissions de Gaz à effet de serre (RCP 4.5, scénario intermédiaire avec baisse des émissions à partir de 2040 et RCP 8.5, scénario extrême avec augmentation constante des émissions).

Parallèlement à la modélisation hydrologique, le même débit mensuel a été utilisé, ainsi que le stockage actuel dans des bassins de retenue, pour calibrer un modèle de gestion des ressources hydriques du système (Aquatool Andreu et al., 1996). Ce modèle simule la gestion des bassins de retenue nécessaire, conformément aux ressources disponibles, afin de garantir l'approvisionnement de toutes les demandes existantes dans le système. Dans les simulations de gestion a été intégré le nouveau bassin de retenue d'Almudévar, dont la livraison est prévue pour novembre 2021. Grâce aux résultats précédents de débit circulant, la répartition de l'eau aux différentes demandes du système à l'avenir a été calculée pour différents scénarios climatiques.

En plus des scénarios climatiques, le système permet d'intégrer l'effet de différentes mesures d'adaptation. Pour le développement des scénarios de mesures, une approche à deux directions a été utilisée (voir box 1), intégrant la participation des acteurs impliqués (irrigants, techniciens du bassin et techniciens du gouvernement d'Aragon). Cette approche a permis de sélectionner un ensemble de mesures d'adaptation jugées plus pertinentes, qui ont ensuite été évaluées à l'aide du système de modélisation.

Quant aux débits des rivières, l'apport annuel au bassin de retenue de Lanuza a diminué à partir de 1970, à un rythme de plus de 25 hm³ par décennie, notamment du fait des mois d'été (de juin à septembre). Les apports à la sortie de la source de la rivière Gállego à La Peña ont aussi enregistré une baisse mensuelle et annuelle, mais pas aussi prononcées. D'autre part, bien que les apports de la rivière Cinca n'aient pas connu de changements significatifs sur l'année, le schéma mensuel a, lui, changé. Ainsi, les entrées dans le bassin de retenue d'El Grado se sont réduites de façon significative en juin et juillet, avec de plus grands apports durant les mois d'automne et de printemps, bien que les changements durant ces dernières périodes n'aient pas été significatifs.

L'utilisation d'un modèle de simulation hydrologique alimenté par différentes projections du climat à venir (box 5.3) permet d'obtenir des simulations des changements que l'on peut attendre dans les débits en amont du système tout au long du XXI^e siècle. Malgré les différences entre les simulations forcées par les six projections climatiques futures, nous pouvons apprécier un

schéma général clair (figure 5.3). Ainsi, les débits d'entrée dans les bassins de retenue indiquent une tendance générale à l'augmentation durant l'hiver et à la diminution entre le printemps et l'été. Cela représente une accentuation des changements que l'on a déjà pu observer au cours des dernières décennies, en raison de l'apparition de plus en plus fréquente de périodes de températures douces favorisant la fusion nivale en hiver, alors que cette fonte précoce réduit les apports à la fin du printemps et au début de l'été. Les différences augmenteront au cours du XXI^e siècle, peu de divergences existent entre les deux scénarios d'émissions. Sur la base annuelle, considérant le scénario RCP 4.5, les baisses des apports varient de 5 à 8 % en moyenne pour la période 2011-2040 et de 10 à 15 % en moyenne pour la période 2071-2100. Ces valeurs s'aggravent vers la fin du siècle pour le scénario 8.5.

De façon individualisée, les changements des débits d'entrée dans le bassin de retenue de Lanuza sont plus prononcés que dans les bassins de La Peña et d'El Grado. Cela peut être dû au fait que le bassin s'écoulant vers Lanuza subit une

diminution très importante de la rétention nivale en raison de la hausse de la température. Cet effet est atténué dans les deux autres réservoirs de retenue en raison de la plus grande taille de leurs bassins, relativisant l'importance de la neige, et en raison de la régulation en amont.

La saisonnalité des apports aux bassins de retenue sera très altérée, avec une hausse des apports hivernaux, une prolongation et une accentuation des étiages.

Ces résultats sont cohérents avec d'autres études sur les changements des débits des rivières dus au changement climatique dans les Pyrénées centrales, qui ont signalé des réductions dans cette région de 10 à 20 % entre 2041 et 2070 et de près de 35 % à la fin du XXI^e siècle (López-Moreno et al., 2014 ; Manzano, 2009 ; Candela et al., 2012 ; Caballero et al., 2007). De plus, la considération de projections climatiques plus récentes dans cette étude indique que les variations pourraient être plus grandes que prévu, avec des baisses maximales de près de 35 % entre 2041 et 2070, et de 40 % entre 2071 et 2100,

pour les scénarios climatiques les plus extrêmes. Il convient de signaler que les simulations futures n'ont pas pris en compte l'éventuelle évolution de l'occupation des sols et de la végétation dans les zones en amont. Plusieurs études ont indiqué qu'au cours de la seconde moitié du XX^e siècle, les changements de végétation liés à l'abandon des activités agropastorales et à la reforestation ont été des agents-clés dans la baisse des débits des rivières pyrénéennes (García-Ruiz et al., 2001, 2011 ; Beguería et al., 2003 ; López-Moreno, 2005 ; López-Moreno et al., 2006). Si ces changements continuent à l'avenir, cela pourrait accentuer davantage la baisse prévue des débits.

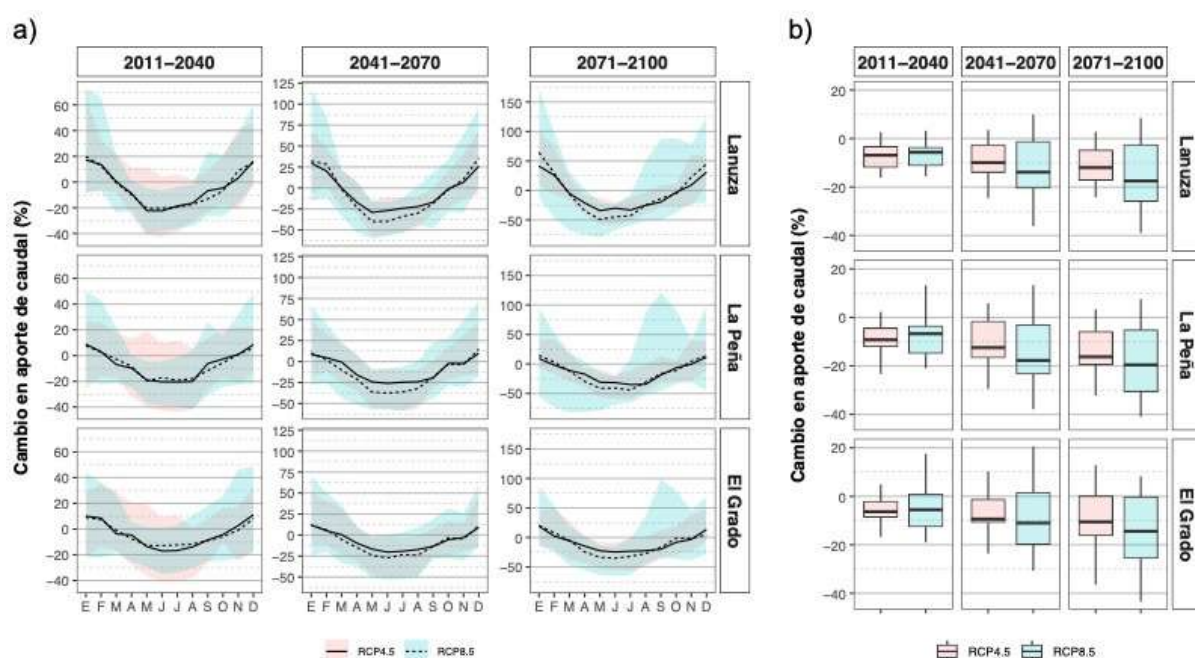


Figure 5.4. Changement dans les apports mensuels (a) et annuels (b) aux bassins de retenue de Lanuza, La Peña et El Grado (pourcentage par rapport à la période 1961-2010), pour les horizons 2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100. Résultats de la simulation avec le modèle SWAT forcé avec six projections climatiques (AEMET, 2018) dans deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et RCP 8.5). Les zones de couleur dans a) indiquent l'enveloppe des six projections, alors que les lignes indiquent les valeurs moyennes. Les boîtes dans b) indiquent la fourchette de variation entre 25 et 75 %, la ligne horizontale marquant la valeur moyenne (50 %) et les lignes verticales marquant les valeurs extrêmes.

(Source : élaboration propre).

5.3.3 Modélisation des ressources hydriques dans des scénarios de changement climatique et mesures d'adaptation

Pour la modélisation de la gestion des ressources hydriques dans l'ensemble du système pour différentes projections de changement climatique et mesures d'adaptation, un système de simulation en cascade (box 5.3) a été élaboré. Le système a été calibré grâce à des données observées ces dernières années et a montré d'excellentes capacités prédictives. La modélisation du cycle hydrologique en amont des rivières Gállego et Cinca a fourni des projections d'apport aux principaux bassins de retenue du système, qui ont ensuite été employées pour alimenter un module de gestion de ressources hydriques visant à optimiser la satisfaction des demandes établies dans le plan de bassin.

En plus d'incorporer les projections de changement climatique, le système permet de simuler la gestion des ressources hydriques sous différents scénarios de gestion, tels que la construction de nouvelles infrastructures de régulation, superficies irriguées ou changements dans la dotation d'irrigation. Pour créer un ensemble de mesures d'adaptation, une stratégie

à double direction (box 5.1) a été suivie. Au cours d'un atelier participatif avec les représentants des principaux acteurs du système RAA, un ensemble de mesures d'adaptation ont été établies par consensus pour centrer la discussion (tableau 5.3). Le vote ultérieur a permis d'établir les priorités des acteurs, en mettant en évidence une forte préférence pour les mesures d'amélioration de l'offre d'eau (augmentation de la régulation hydrique en amont du bassin, O1, et de la régulation interne, O2) et d'augmentation de l'efficacité des systèmes d'irrigation (E1 et E2) (figure 5.5, box 3). Les mesures orientées à réduire la demande d'eau d'irrigation ou à utiliser des sources alternatives ont, par contre, obtenu une faible priorisation.

Il a été décidé de réaliser trois ensembles de simulations à partir des résultats du processus de participation. En premier lieu, la durabilité du système a été évaluée à l'heure actuelle et avec les scénarios climatiques futurs, à la fois sur la base de la situation actuelle et en intégrant les nouvelles infrastructures hydrauliques envisagées dans le plan hydrologique du bassin de l'Èbre (CITA). Dans son développement maximal, cela impliquerait la mise en irrigation de 35 000 nouveaux hectares, outre la construction de nouveaux bassins de retenue. Cette simulation permet d'évaluer la durabilité du système après le développement de nouvelles infrastructures de régulation, qui représentent une demande historique des irrigants bien que, comme nous

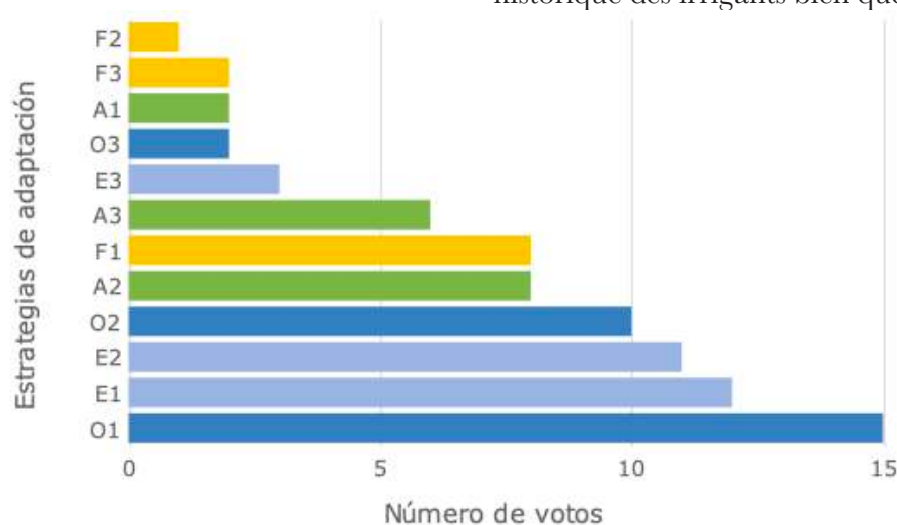


Figure 5.5. Priorisation des mesures d'adaptation durant la réunion avec les acteurs.

(Source : élaboration propre).

Box 5.4 : Processus participatif

Durant l'hiver 2019, un atelier participatif a été réalisé au siège de RAA à Huesca, composé de représentants d'acteurs importants du système : associations d'irrigants (16 participants), techniciens de la confédération de l'Èbre (2), techniciens du gouvernement régional (3), chercheurs et experts de la zone (4). Pendant l'atelier différentes mesures d'adaptation au changement climatique pour l'agriculture irriguée ont été abordées, à partir d'une sélection de mesures extraites de différents plans d'adaptation (OECC, 2006 ; DGA, 2018a ; DGA, 2018b ; CHE, 2016). Le nombre de mesures a été finalement réduit à 18, regroupées en six groupes (tableau 3). Toutes les mesures ont généré un fort consensus quant à leur caractère positif, pour améliorer l'adaptation au changement climatique. Les participants ont ensuite été invités à classer les six blocs de mesures, de la plus importante à la moins importante, puis à classer les mesures individuelles des quatre blocs les plus pertinents en fonction du vote précédent (figure 5).

La mesure individuelle qui a obtenu le plus grand nombre de votes (15 sur un total de 25) est l'augmentation de la capacité de régulation du système E14 par la construction de nouveaux barrages sur les rivières Gállego et Cinca. Il s'agit d'une demande traditionnelle des communautés d'irrigants, bien que sa mise en œuvre pratique soit perçue comme très difficile en raison de la forte opposition sociale, notamment due à l'impact environnemental de ces infrastructures. Le développement de nouvelles grandes infrastructures hydrauliques nécessite actuellement un large soutien politique et des ressources financières, exigences qui ne sont pas aujourd'hui satisfaites, d'après les participants de l'atelier.

Les deuxième et troisième mesures les plus votées (12 et 11 voix) concernaient la modernisation de l'irrigation, notamment, l'achèvement de la transformation de l'irrigation traditionnelle gravitaire dans des systèmes sous pression, suivi de l'incorporation de nouvelles technologies de contrôle et de gestion de l'irrigation (« modernisation 2.0 »). Les principales difficultés de ces mesures sont liées au coût élevé de leur mise en œuvre, aux périodes d'amortissement longues et au coût élevé de l'énergie. De plus, la modernisation des systèmes d'irrigation conduit toujours à une plus grande utilisation de l'eau, bien que cela représente une contradiction. Cela s'explique par le fait que, pour accroître les bénéfices et amortir les investissements de la modernisation, les agriculteurs doivent incorporer de nouvelles cultures qui consomment plus d'eau que les céréales d'hiver conventionnelles.

La quatrième mesure (10 voix) se concentre à nouveau sur l'augmentation de la capacité de la régulation hydrique mais, dans ce cas, par la construction de nouveaux bassins de retenue de petite et moyenne taille dans le périmètre de RAA (régulation interne). Ces bassins de retenue sont utilisés afin de garantir l'approvisionnement durant les époques de plus grande intensité d'irrigation et la pression adéquate pour les systèmes d'irrigation modernes. Il existe actuellement 98 bassins de régulation interne dans le RAA, d'un volume total de 30 hm³, soit 3,5 % de la demande totale annuelle du système (Jlassi et al., 2016 ; « Riegos del Alto Aragón », 2018).

Les mesures de type agronomique telles que l'introduction de nouvelles cultures ou la modification des calendriers de cultures, et de type financier, ont obtenu moins de 30 % des voix. Bien que l'utilisation de cultures et de variétés moins exigeantes ou mieux adaptées à la sécheresse ait été perçue comme une possible solution face à une pénurie prévisible des ressources en eau, les irrigants ont, en général, rejeté cette mesure d'adaptation par crainte qu'elle n'entraîne une réduction des récoltes ou des prix de produits plus bas sur le marché.

l'avons indiqué auparavant, il est très peu probable que ces chantiers soient réalisés dans l'horizon temporel considéré dans cette étude.

En deuxième lieu, des simulations ont été réalisées en maintenant les infrastructures de régulation

actuelles, mais en variant la capacité de régulation interne par des étangs dans différents secteurs du système RAA. Les changements dans les systèmes d'irrigation, les pratiques de cultures ou la dotation en eau par hectare n'ont pas été considérés dans cet ensemble de simulations.

Tableau 5.3. Sélection de mesures d'adaptation au changement climatique pour l'agriculture irriguée.

Groupe O : Gestion de l'offre d'eau		Groupe A : Mesures agronomiques	
O1	Augmenter la capacité de régulation du système E14	A1	Changement des calendriers de cultures pour réduire les besoins d'irrigation
O2	Augmenter la capacité de régulation interne	A2	Améliorations dans la commercialisation des produits
O3	Usage des ressources hydriques alternatives	A3	Nouvelles cultures/variétés aux besoins hydriques plus faibles
Groupe E : Amélioration de l'efficacité de l'irrigation		Groupe F : Instruments financiers	
E1	Modernisation de l'irrigation	F1	Outils de financement
E2	Modernisation 2.0 (technologies de l'information)	F2	Améliorations de l'assurance agricole
E3	Modernisation 2.0 (technologies de l'information)	F3	Paievements par services écosystémiques
Groupe G : Mesures de gouvernance		Groupe C : Société du savoir	
G1	Participation à l'échelle de l'association des irrigants	C1	Amélioration de la formation des agriculteurs et des gérants
G2	Participation à l'échelle du bassin	C2	Amélioration de la collecte de données sur l'emploi de l'eau
G3	Transparence des données et prise de décisions	C3	Développement de systèmes d'alerte précoce et suivi

Enfin, nous avons réalisé un ensemble de simulations dans lequel, outre l'augmentation de la régulation interne, nous avons considéré la mise en pratique de diverses stratégies d'économies d'eau. D'après le projet Agroclima (Factor CO₂, 2016), la mise en œuvre de mesures de type agronomique peut supposer une réduction des besoins d'irrigation. Dans la pratique et en termes de simulation, de telles mesures sont équivalentes à la réduction de la dotation en eau d'irrigation par hectare, une mesure mal considérée par les irrigants, mais qu'il convient de prendre en compte dans le domaine de la modélisation afin de connaître ses effets sur la durabilité du système.

Un modèle de simulation des ressources hydriques dans le système E14 capable de simuler le fonctionnement du système dans différentes projections de climat futur et différents scénarios de mise en œuvre de mesures d'adaptation.

la satisfaction des demandes d'irrigation du système RAA diminuent tout au long du XXI^e, en rapport direct avec la diminution des apports de débit aux grands réservoirs de régulation du bassin. La construction de nouvelles infrastructures de régulation envisagées dans le plan de bassin, associées à la mise en irrigation de nouvelles superficies n'améliore pas la situation. Les scénarios considérant uniquement la construction de nouvelles infrastructures sont décrits dans le travail publié par Haro-Monteagudo et al. (2020). Du fait des difficultés mentionnées pour le développement à venir de nouvelles grandes infrastructures, le reste des simulations seront réalisées dans l'hypothèse du maintien des chantiers existant à l'heure actuelle.

La satisfaction des demandes d'irrigation du système RAA sera progressivement compromise au cours du XXI^e siècle, ainsi que les débits des rivières Gállego et Cinca en aval du système.

5.3.4 Résultats

Les changements dans l'apport de débit pour des scénarios de changement climatique que nous avons vus auparavant (figure 5.4) sont directement transférés à la durabilité du système. Ainsi, la durabilité du système E14, notamment

La régulation interne a un effet très important sur le système. La figure 5.6 indique, pour le climat actuel et pour trois horizons au cours du XXI^e siècle, les changements que l'on peut attendre pour divers indicateurs du système en fonction du volume de régulation interne, exprimé en pourcentage sur la demande annuelle réelle. Le premier indicateur est un indicateur global

de durabilidad, sa valeur actuelle étant de 0,77. La valeur de cet indicateur oscille entre zéro et un, indiquant respectivement une capacité nulle et parfaite pour satisfaire les demandes du système tout au long de la période simulée. Le deuxième indicateur illustre le nombre de mois de restrictions au cours de chaque période de 30 ans, d'après les critères du plan de sécheresse du bassin de l'Èbre (CHE, 2018). Le troisième indicateur montre la taille moyenne des restrictions, soit le pourcentage de la demande d'eau qui ne peut être satisfaite. Dans l'ensemble, ces trois indicateurs signalent que la capacité pour augmenter la régulation interne à l'heure actuelle est limitée car, à partir de valeurs relativement basses (autour de 5 %), tous les indicateurs se détériorent. Il convient de rappeler que la capacité atteint déjà 3,2 % aujourd'hui (cette valeur est marquée comme référence par une ligne verticale dans la figure).

L'augmentation de la régulation interne a une très faible capacité pour contrecarrer les effets du changement climatique. En l'absence de nouvelles infrastructures de régulation dans le bassin (bassins de retenue), seules les mesures d'économies d'eau d'irrigation permettront de maintenir le niveau de durabilité que le système connaît aujourd'hui.

Quant aux horizons à venir, les trois indicateurs tendent à se dégrader à mesure que le XXI^e avance. Les différences entre les deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5) sont faibles pour l'horizon 2011-2040, mais augmentent pour les horizons en milieu et en fin de siècle. C'est-à-dire que l'effet des bassins de régulation interne est insuffisant pour maintenir les valeurs des indicateurs de durabilité du système au même niveau que l'actuel, notamment sur le long terme.

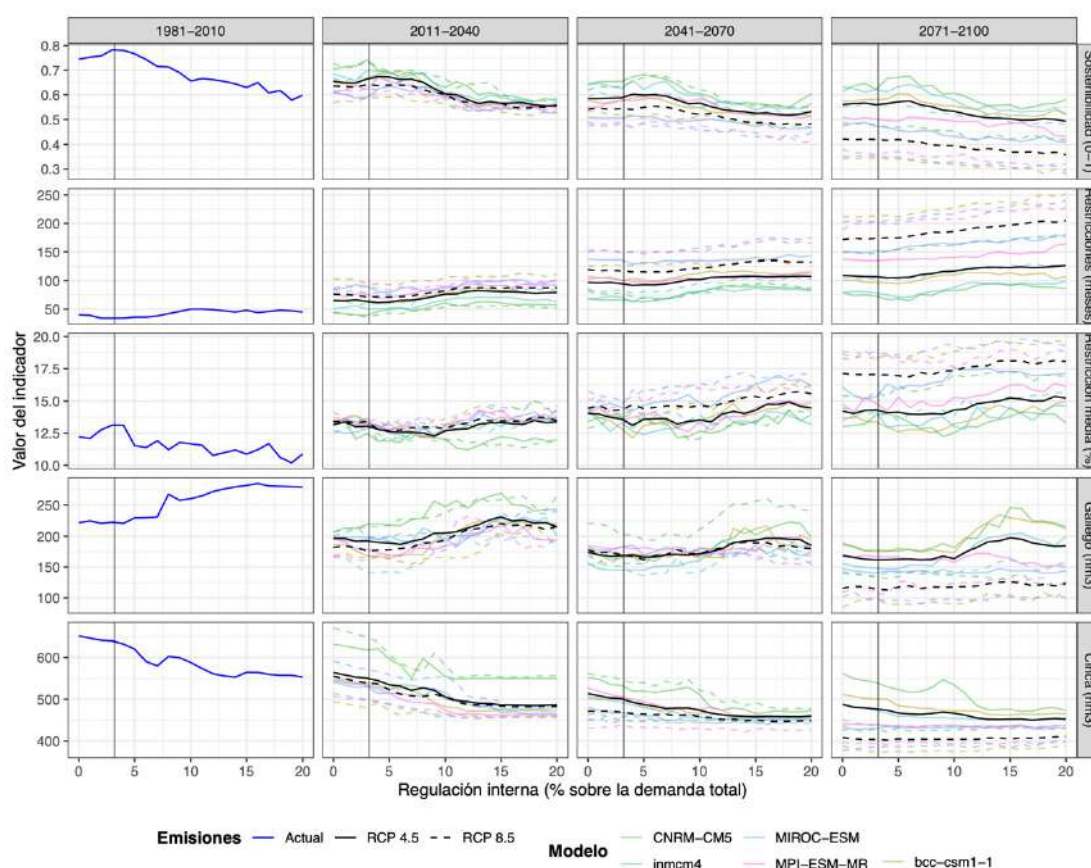


Figure 5.6. Indicateurs de durabilité pour l'ensemble du système RAA en fonction de la capacité de régulation interne, aujourd'hui et pour trois horizons temporels futurs : indice de durabilité globale, nombre de mois avec des restrictions d'irrigation conformément au plan de sécheresse actuel, intensité des restrictions (% de demande non couverte) et débits écologiques pour les rivières Gállego et Cinca. La capacité actuelle installée est représentée par une ligne grise verticale.

(Source : élaboration propre).

De plus, la figure indique les débits circulants dans les rivières Gállego et Cinca en aval des captages qui alimentent le système (débits écologiques). Ceux-ci se réduiront notablement à l'avenir, avec la menace conséquente pour la durabilité d'autres utilisations en aval.

Ces résultats montrent que le système de gestion E14 est confronté à d'importants défis à moyen et long terme si les projections de changement climatique se réalisent. Il est plus facile d'apprécier cela dans la figure 5.7, où l'on voit de façon individualisée les principaux secteurs qui composent le système de RAA. La figure montre, pour chaque scénario climatique, la valeur optimale de régulation interne qui permettrait de maintenir les niveaux de durabilité les plus proches de ceux d'aujourd'hui. Le volume actuel de régulation est indiqué par des lignes horizontales et varie entre certaines

zones et d'autres. Malgré les différences selon le modèle climatique employé, il est, en général, possible d'apprécier une fine marge pour la hausse de la régulation interne. Des secteurs tels que le canal de Monegros I-1 et le canal de Monegros II présentent actuellement un volume de régulation qui se situe à peu près au centre des divers scénarios climatiques, indiquant qu'ils ont atteint une valeur optimale. Dans le reste des secteurs, il existe encore une marge pour augmenter la régulation, car le volume actuel se trouve en dessous des valeurs optimales selon les différents scénarios climatiques. Ce type de chantiers devrait être lié à la fin des programmes de modernisation de l'irrigation, afin de pouvoir bénéficier de toute la superficie irrigable.

Malgré l'optimisation du volume de régulation interne, les valeurs de durabilité se situent en dessous de la valeur de durabilité actuelle

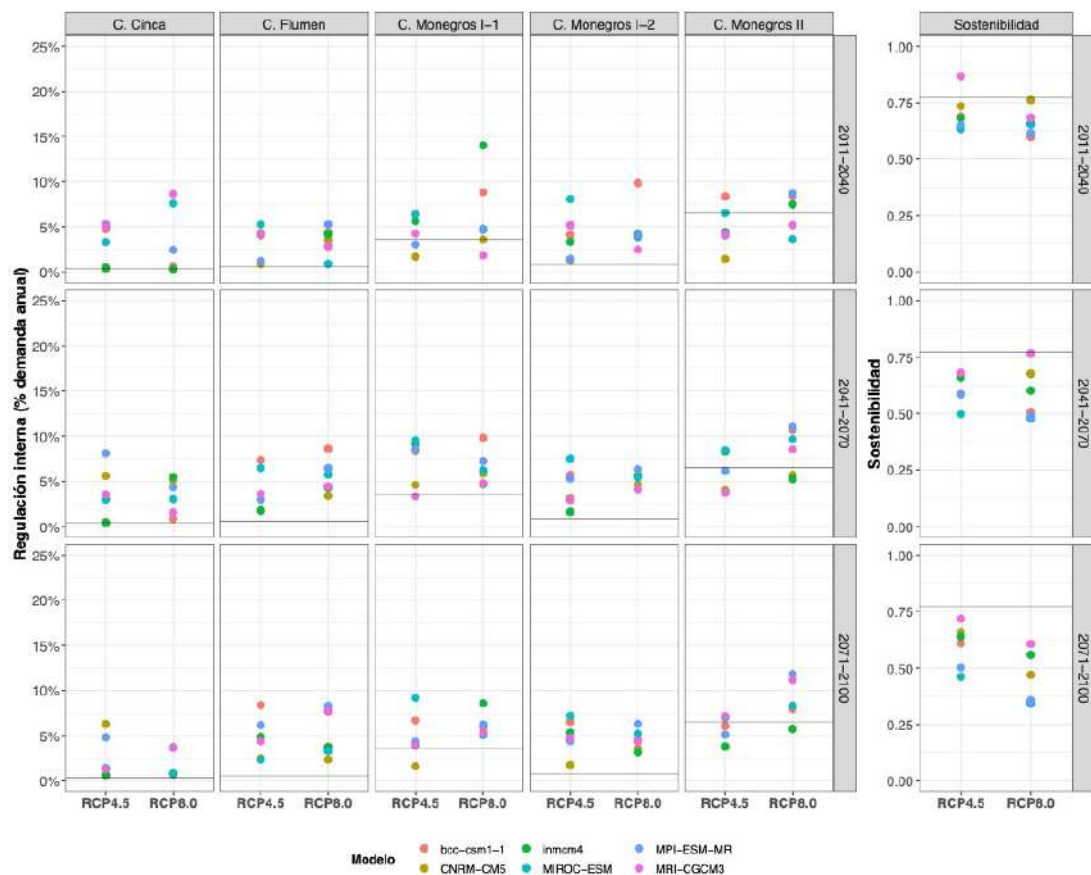


Figure 5.7. Durabilité future du système RAA grâce à l'optimisation du volume de régulation interne. Les différents points représentent, pour chaque secteur du système RAA et du scénario climatique, le volume optimal de réserve interne (panneaux à gauche) requis pour maintenir ou se rapprocher le plus possible du niveau de durabilité actuel du système (panneau à droite). Les lignes horizontales indiquent le volume de régulation interne et la durabilité actuelles.

(Source : élaboration propre).

dans presque tous les scénarios climatiques. La différence n'est pas très grande pour l'horizon temporel proche (2011-2040), mais s'accroît en milieu et fin de siècle, où les scénarios aux valeurs de durabilité de 0,5 ne sont pas rares.

L'ensemble des simulations signalées jusqu'alors se base sur le maintien des demandes actuelles en eau, notamment de la dotation en eau d'irrigation par hectare. Le dernier ensemble de simulations a intégré une réduction progressive de la dotation, appliquée à l'ensemble du système RAA. Cette simulation permet d'évaluer l'effet de la mise en œuvre de mesures d'adaptation impliquant des économies dans les besoins d'irrigation. Nous pourrions obtenir, tour à tour, les mêmes économies dans les besoins hydriques par la mise en jachère ou par la mise en culture non irriguée d'une partie proportionnelle de la superficie

d'irrigation disponible.

Les résultats de cette simulation sont résumés dans la figure 5.8. Comme dans le cas précédent, pour chaque projection climatique, nous indiquons des scénarios d'émissions et un horizon temporel, les valeurs optimales de régulation interne par UDA (unité de demande hydrique agricole) et de réduction de la dotation nécessaires afin de maintenir la durabilité du système à un niveau le plus proche possible de la situation actuelle. Les valeurs de l'indice de durabilité sont indiquées dans la partie droite de la figure. Quant au scénario précédent, sans réduction de la dotation, les valeurs optimales de régulation interne atteignent des valeurs plus élevées, entre 10 et 20 %. Les niveaux d'économies d'eau nécessaires pour maintenir la durabilité du système se situent entre 20 % (horizon à court

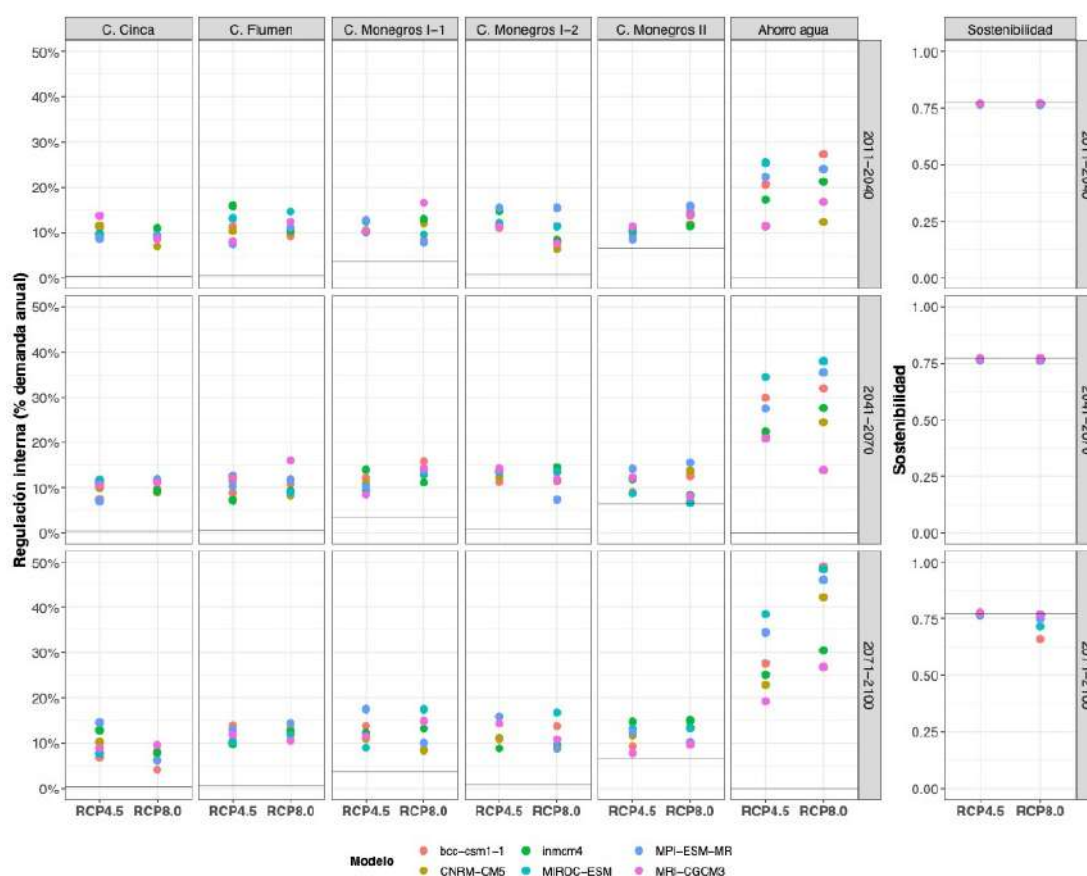


Figure 5.8. Durabilité future du système RAA grâce à l'optimisation conjointe du volume de régulation interne et à la diminution de la dotation en eau d'irrigation par hectare. Les différents points représentent, pour chaque secteur du système RAA et du scénario climatique, le volume optimal de réserve interne et d'économies d'eau nécessaires pour maintenir ou se rapprocher le plus possible du niveau de durabilité actuel du système. Les lignes horizontales indiquent le volume de régulation interne, les économies d'eau et la durabilité actuelles.

(Source : élaboration propre).

Box 5.5 : Traitement de l'incertitude

Les projections du changement climatique qui ont été utilisées pour ce travail sont des estimations du futur fonctionnement de l'atmosphère dans des conditions de plus grande concentration de CO₂. Du fait de la complexité du fonctionnement du système climatique, de nos connaissances imparfaites de celui-ci et des limitations des ordinateurs actuels, ces projections comportent un certain niveau d'incertitude qui est a priori inconnu. Cette incertitude est reflétée, en partie, dans les disparités que les simulations réalisées avec différents modèles climatiques par différents centres de recherche sur toute la planète présentent entre elles. Dans ce travail, l'analyse de l'incertitude a été abordée en utilisant six simulations de modèles climatiques différents. De fait, dans l'exposé des résultats, nous n'offrons pas qu'une seule valeur, mais une fourchette de valeurs plausibles, résultant de la réalisation des mêmes calculs à partir des différentes simulations climatiques. La fourchette de valeurs possibles est indiquée sous forme de bandes de couleur ou de boîtes (figure 4) ou par des lignes ou des points de différentes couleurs représentant les différents modèles (figures de 6 à 8). La fourchette de dispersion des résultats donne une idée de l'incertitude existante dans les prédictions, alors que la valeur moyenne ou médiane, également indiquée dans les figures, signale la tendance la plus probable. Il ne faut pas oublier qu'il existe aussi une composante d'incertitude associée à l'état actuel des connaissances, car il existe toujours la possibilité que certains processus importants gouvernant le système climatique n'aient pas été pris en compte dans les modèles actuels ou n'aient pas été correctement intégrés. Néanmoins, il faut considérer les résultats obtenus comme les résultats de l'application de l'état actuel des connaissances scientifiques sur les systèmes climatique et hydrologique.

terme) et 30 % (horizon à moyen et long terme). Dans les pires scénarios, dans l'horizon de fin de siècle, il n'est pas possible d'égaliser les valeurs de durabilité actuelles, même en assumant une forte restriction d'utilisation de l'eau. Évidemment, des valeurs de réduction de la dotation inférieures impliqueraient une détérioration des indicateurs de durabilité jusqu'à atteindre les valeurs observées dans la figure 5.7 où la dotation actuelle se maintiendrait entièrement.

5.4. Discussion et conclusions

Les projections climatiques prévoient, tout au long du XXI^e siècle, des diminutions de l'apport de débit aux bassins de retenue et un scénario de pénurie de ressources hydriques plus fréquent. Nous discutons ci-après les principales conclusions de l'étude de cas.

5.4.1 Faible efficacité des solutions centrées sur l'augmentation de l'offre d'eau (régulation)

Les résultats de l'atelier participatif ont mis en évidence la survivance de la demande historique de continuer à augmenter la superficie irriguée, liée à la construction de nouvelles infrastructures de régulation pour accroître la disponibilité des ressources. Dans un travail précédent, Haro-Monteagudo et al. (2020) ont démontré que l'agrandissement de la zone irriguée n'est pas durable sur le long terme, pas même si elle est associée à la construction de nouveaux bassins de retenue.

En prenant en compte la difficulté actuelle (sociale et politique) d'envisager de nouvelles infrastructures de régulation (grands barrages et bassins de retenue), la simulation de mesures d'adaptation pour améliorer l'offre d'eau s'est concentrée dans ce travail sur l'augmentation de la capacité de régulation interne grâce à la construction de bassins d'irrigation. Ces petits bassins de retenue privés permettent aux communautés d'irrigants une plus grande autonomie de gestion de l'irrigation, tout en augmentant la capacité de stockage de l'eau du système dans son ensemble. Les irrigants eux-mêmes donnent clairement la priorité à cette option, liée à la modernisation de l'irrigation, car les réservoirs sont nécessaires dans la plupart des cas, afin de garantir la pression requise par les systèmes sous pression.

Les résultats indiquent que la possibilité d'accroître la capacité de régulation interne dans le système de « Riegos del Alto Aragón » est très réduite pour la plupart des secteurs. En d'autres termes, la capacité de régulation interne

actuellement installée est proche des valeurs optimales. La simulation suggère, notamment pour les horizons à moyen et long terme, qu'accroître le volume de régulation au-dessus des valeurs optimales dégraderait rapidement la durabilité du système en augmentant la concurrence pour la ressource. Pour ce scénario de maintien de la demande en eau, même en optimisant le volume de régulation interne, la durabilité du système serait affectée, ce qui impliquerait que les exploitations agricoles devraient assumer un plus grand nombre de ruptures de l'alimentation en eau à l'avenir.

5.4.2 Nécessité de promouvoir des solutions centrées sur le contrôle de la demande d'eau et l'augmentation de la productivité

Les résultats précédents impliquent le besoin de considérer des mesures d'économies d'eau permettant de réduire le niveau de stress du système. Les simulations qui combinent l'optimisation du volume de régulation interne avec la réduction de la dotation en eau d'irrigation permettent d'explorer cette option. Les résultats indiquent que, pour maintenir les niveaux actuels de durabilité à l'avenir, il est recommandé de mettre en œuvre des mesures permettant de réduire les besoins d'irrigation de 10 à 30 %, en fonction des scénarios et des horizons temporels.

Il existe de nombreuses options pour les économies d'eau, comme par exemple, une utilisation plus rationnelle des systèmes d'irrigation modernes ou l'adoption de cultures et de variétés nécessitant moins d'eau. Cette situation est compliquée, car elle est souvent perçue par les agriculteurs comme entraînant une perte économique. La transformation de RAA a traditionnellement été régie par le critère de maximisation de la rentabilité individuelle des exploitations, un changement de perspective étant nécessaire pour se concentrer sur l'optimisation de la productivité du système.

Le problème de l'introduction de nouvelles cultures est souvent lié aux possibilités de commercialisation des récoltes. Actuellement, le schéma de cultures est lié au développement croissant de l'élevage intensif dans la région, étant le principal consommateur de la production agricole, mais cette situation pourrait changer si les conditions existaient (agro-industrie, canaux de commercialisation) pour d'autres cultures à la rentabilité économique par unité d'eau employée plus élevée. De fait, il est prioritaire de concentrer les efforts sur comment améliorer et revaloriser la production agropastorale. Dans cet effort, il est essentiel que l'Administration, nationale et régionale, accroisse son implication, avec des objectifs clairs et une véritable vocation de transformation.

5.4.3 Insuffisance des approches à une voie (de haut en bas ou de bas en haut) et valeur des systèmes de soutien à la prise de décisions

Les résultats de l'étude de cas démontrent la nécessité d'aborder l'adaptation au changement climatique par des estimations complexes intégrant différents points de vue, comme c'est le cas de l'approche à deux voies employée dans ce travail. Il a été nécessaire d'intégrer dans l'ensemble des mesures d'adaptation des options touchant au contrôle de la demande d'eau, qui ne sont généralement pas favorisées par les principaux acteurs du système, comme il a été manifeste durant l'atelier participatif. Si nous avions employé une méthodologie purement de bas en haut, des options d'adaptation disruptives, ne montrant pas une forte préférence parmi les acteurs mais pouvant représenter la seule option à l'avenir si les prévisions se réalisent, auraient été exclues.

Le système basé sur des simulations et des scénarios combinés de changement climatique et des mesures d'adaptation, qui a été développé dans cette étude de cas un exemple de méthodologie utile pour élaborer un système d'aide à la prise de décisions. Les résultats de

ce chapitre se limitent aux solutions extrêmes. D'une part, des simulations ont été effectuées en maintenant les besoins d'irrigation actuels, ce qui entraîne une détérioration de la durabilité du système qui impliquerait des défaillances dans l'approvisionnement, qui devraient être assumées par les exploitations. D'autre part, des simulations ont été effectuées en assumant le maintien de la durabilité actuelle, au prix de faire assumer aux usagers (les irrigants) le besoin de mettre en œuvre des mesures d'économies de l'eau. Évidemment, la solution optimale se situera en un moyen terme : les irrigants peuvent décider quel niveau d'économies d'eau assumer, en échange de parvenir à une plus grande sécurité d'approvisionnement sur le long terme. Le développement d'un système interactif permettant aux acteurs d'expérimenter toutes les variables en jeu et d'évaluer leurs conséquences sur le long terme s'avère être un élément très précieux pour encourager et centrer le débat sur des mesures d'adaptation aux conditions futures.

5.4.4 Autres facteurs : envasement des bassins de retenue, occupation des sols, usagers en aval et débits écologiques

Enfin, il convient de ne pas perdre de vue certains facteurs que nous avons pris en compte de manière secondaire dans ce travail, mais qui sont très importants. Nous avons déjà mentionné dans l'introduction qu'outre le changement climatique, la durabilité des ressources hydriques pour les grands systèmes d'irrigation est critique du fait de la perte progressive de capacité de rétention en raison de l'envasement. Nous n'avons pas trouvé d'estimations de la perte de volume dans les bassins de retenue qui alimentent le système RAA, sauf des valeurs citées pour La Sotonera. Cependant, nous pouvons affirmer en toute sécurité que l'envasement affecte davantage le bassin de retenue de Mediano, car il se trouve dans une zone de marne, et moins le bassin de retenue d'El Grado, car les sédiments transportés par la rivière Cinca restent justement à Mediano.

Il est presque certain que l'envasement du Cinca représente une perte de quelques hm³ par an, probablement plus que la baisse des débits prévue. Ce problème s'ajoute aux effets du changement climatique, et devrait être pris en compte dans les travaux futurs, ainsi que l'influence de l'évolution de l'occupation des sols et de la végétation dans les zones en amont, qui n'a pas non plus été prise en compte dans les simulations de scénarios futurs.

Bien que l'étude de cas se soit concentrée sur le système de RAA, il est important de ne pas perdre de vue que ce système n'est pas isolé, mais fait partie d'un système de gestion beaucoup plus complexe couvrant l'ensemble du bassin de l'Èbre, voire même certains transferts hors bassin. En d'autres termes, d'autres usagers en aval du bassin bénéficient des apports de débit des rivières Gállego et Cinca après leur passage par le RAA. Une exploitation plus intense des ressources des rivières Gállego et Cinca implique indéfectiblement une réduction des débits circulants dans les zones basses de ces rivières (et de leurs affluents, tels que le Flumen). Dans ce travail, nous n'avons pas pris en compte les répercussions des différents scénarios sur les usagers en aval, mais il convient de ne pas perdre de vue cet aspect.

Enfin, il convient de ne pas oublier l'importance des débits écologiques. Le maintien des écosystèmes fluviaux et riverains, ainsi que leurs services écosystémiques de régulation, d'épuration et de refuge de la biodiversité, requiert le maintien de débits minimums et le plus naturalisés possible, outre des niveaux de concentration de polluants qui respectent la directive-cadre européenne. Ces aspects ont été évalués sommairement dans ce travail, mais il est évident qu'une plus grande exploitation des ressources dans le système E14 impliquera un préjudice aux débits écologiques en aval des captages, des aspects qui devraient être évalués et pris en compte dans des travaux futurs.

6. Impacts du changement climatique sur les zones à haute valeur environnementale : pression touristique, changement climatique et qualité environnementale dans le Parc national d'Ordesa et de Monte Perdido

Luis Javier Lambán y Jorge Jódar (IGME)

L'eau constitue un élément-clé pour maintenir la biodiversité des Pyrénées. Promouvoir des mesures d'adaptation cherchant à garantir sa disponibilité est donc essentiel pour maintenir cette biodiversité, notamment dans des zones ayant des figures de protection environnementale. Les évidences du CC observées dans des zones protégées des Pyrénées sont nombreuses, bien que ce projet se concentre sur l'altération de certains processus biophysiques associés à des changements dans le cycle hydrologique. Le Parc national d'Ordesa et de Monte Perdido et le Parc national des Pyrénées présentent de nombreuses figures de protection environnementale à l'échelle nationale, supranationale et transfrontalière (Patrimoine mondial de l'UNESCO, diplôme du Conseil de l'Europe à la Conservation, Réserve de la biosphère ou Charte de coopération entre les deux parcs, entre autres). Ils constituent le plus grand massif montagneux calcaire d'Europe occidentale, ce qui provoque une pénurie en eaux superficielles, car la plupart des précipitations (pluie et neige) s'infiltre dans le sous-sol (recharge), alimentant les aquifères. Les études réalisées dans le cadre de ce projet montrent qu'à l'avenir la couverture de neige va diminuer dans toutes les Pyrénées, ce qui suppose une plus faible accumulation de neige dans la zone de recharge et une époque de fonte des neiges progressivement plus précoce, ce qui, uni à la courte durée de transit de l'eau souterraine du fait de la nature karstique du terrain, provoque une diminution de la quantité et de la qualité de l'eau disponible, affectant tant les écosystèmes associés que le tourisme. Nous avons modélisé la dynamique des ressources hydriques et évalué l'impact provoqué par le CC et le tourisme dans l'un des secteurs les plus visités et les plus vulnérables. Les résultats permettent d'évaluer les risques associés au changement climatique quant à la quantité et à la qualité des ressources hydriques, ainsi que de proposer des mesures d'adaptation pour assurer une gestion adéquate et une conservation de ces ressources. Comme mesures d'adaptation en ce qui concerne la quantité, nous proposons : le stockage des précipitations dans des citernes ou réservoirs adaptés, un usage conjoint des eaux superficielles et souterraines, et la construction de puits pour le maintien de débits écologiques dans les rivières durant l'époque d'étiage. Comme mesures d'adaptation en ce qui concerne la qualité, nous proposons : le contrôle du nombre de visiteurs et de nuitées, outre les recommandations pour l'optimisation de la génération et le traitement des déchets produits.

6.1. Introduction

Ce chapitre traite de l'influence du changement climatique dans des zones à haute valeur environnementale. L'eau constitue un élément-clé pour maintenir la biodiversité des Pyrénées. De fait, encourager des mesures d'adaptation axées sur la garantie de sa disponibilité, en quantité et en qualité, est essentiel pour maintenir cette biodiversité, notamment dans des zones de protection environnementale.

Il existe de nombreuses figures de protection environnementale dans les Pyrénées. Les plus importantes sont : a) les Espaces naturels protégés (Parc national, Parc naturel/régional, Monument naturel, Paysage protégé, Réserve et autres), b) le Réseau Natura 2000 (Lieux d'intérêt communautaire, Zones spéciales de conservation et Zones de protection spéciale pour les oiseaux) et c) les Réserves de la biosphère. La Figure 6.1 présente les principales zones protégées et les figures de protection qui les appliquent, dans les Pyrénées.

Développer la capacité d'adaptation à l'impact du changement climatique (CC) dans des zones à haute valeur environnementale est l'une des principales stratégies pour minimiser l'impact du CC sur les écosystèmes et leur biodiversité.

Dans les Pyrénées, la haute montagne est l'un des écosystèmes les plus sensibles au CC en raison de la proportion élevée d'espèces endémiques, aux petites populations, aux conditions d'habitat exigeantes et à la capacité de dispersion limitée. Dans ce milieu, de nombreuses évidences de l'impact du CC ont été documentées (Escudero et al., 2012 ; Zamora et al., 2015 ; OPCC-CTP, 2018).

Les zones protégées sont des observatoires remarquables pour le développement de mesures d'adaptation, car beaucoup d'entre elles comptent sur un historique de données de suivi permettant la détection précoce des effets du CC. Ce sont des espaces naturels où appliquer des solutions et transférer ce qui a été appris au reste des Pyrénées. Les zones protégées concentrent les valeurs naturelles les plus importantes du territoire et ce sont des lieux idéaux pour la sensibilisation de la société. Les évidences du CC observées dans des zones protégées des Pyrénées

sont nombreuses. Néanmoins, dans le cadre de ce projet, nous nous concentrons sur l'altération de certains processus biophysiques associés à des changements dans le cycle hydrologique.

Les zones de haute montagne sont très sensibles à tout changement dans le régime climatique, avec des conséquences immédiates sur des aspects du bilan hydrique tels que la génération de ruissellement superficiel, la recharge et le fonctionnement des aquifères. Ce sont tous des éléments-clés pour la conservation tant de la faune et de la flore singulières que des zones humides, qui sont souvent le produit de la décharge des eaux souterraines. Les zones de haute montagne se caractérisent par des précipitations (pluie et neige) importantes et, donc, par un ruissellement élevé. Les aquifères existant dans ces zones présentent, en général, des taux de recharge élevés, modulant le ruissellement des systèmes hydrologiques associés en assurant la durabilité des écosystèmes dépendants de la ressource hydrique. Pour pouvoir préserver et conserver ces écosystèmes contre les effets du changement climatique, il est essentiel de connaître les rapports entre la couverture de neige et sa durée et la saisonnalité du bilan hydrique.

Les bassins de haute montagne présentent des caractéristiques spécifiques associées à l'altitude et au relief, telles que la présence d'importants gradients altitudinaux de température et l'effet orographique amplificateur des précipitations. Ces aspects ont, à leur tour, des conséquences sur la végétation et les sols. De plus, ils sont caractérisés par la présence de sources situées à différentes altitudes. Tant la recharge que la décharge des aquifères sont fréquemment contrôlées ou conditionnées par la dynamique nivale (Jódar et al., 2020 ; González-Ramón et al., 2020).

En général, la couverture de neige empêche la recharge des aquifères en hiver, alors que la fonte des neiges favorise leur recharge au printemps (Kuusisto 1984 ; Van der Kamp, Van der Kamp et Maathuis, 1991 ; Jódar et al., 2020). Selon l'actuelle tendance à la hausse des températures, les précipitation sous forme de neige diminuent et la fusion nivale arrive plus tôt. En fonction des saisons, ces effets décalent les pics de ruissellement, tant superficiel que souterrain,

associés à la fonte des neiges (Veijalainen, 2008 ; Jódar et al., 2021), provoquant une pénurie de ressources hydriques dans les zones n'ayant pas une capacité de stockage suffisante (Barnett et al., 2005 ; Sauvage et al., 2021).

Dans ce cadre alpin, les aquifères sommaires et karstiques sont spécialement sensibles aux changements des conditions climatiques, étant donné le contact rapide existant entre la surface du terrain et le niveau phréatique, ainsi que la réponse rapide de ces systèmes en raison des courts temps de transit associés à ces aquifères (Healy et Cook, 2002 ; Dingman, 2002 ; Lee et al., 2006). Ces changements impliquent des modifications dans le régime de fonctionnement hydrodynamique des eaux souterraines et superficielles, dans l'interaction entre elles et dans les écosystèmes associés. En ce sens, ces changements peuvent avoir d'importants effets sur la distribution et l'abondance de la faune et de la flore (Hauer et al., 1997), et faciliter l'entrée d'espèces envahissantes.

De nombreuses zones ayant une valeur environnementale spéciale constituent, en outre, certaines des principales destinations touristiques des Pyrénées et c'est pourquoi les effets du changement climatique n'affectent non seulement la biodiversité et les écosystèmes associés, mais aussi l'un des principaux moteurs économiques. L'influence du CC sur le tourisme associé à des zones de protection environnementale spéciale est liée à l'altération d'éléments iconographiques du paysage pyrénéen ou la hausse du risque sur les infrastructures touristiques, dommages directs à des personnes, installations de logement ou infrastructures touristiques, inondations soudaines ou crues à cause d'une plus grande fréquence des précipitations intenses, ou des glissements de terrain liés à l'augmentation des cycles de gel et de dégel du fait de la plus grande variabilité climatique (Keiler et al., 2010 ; Raia et al., 2012). Cependant, le CC peut aussi avoir des effets positifs sur le tourisme, tel que la prolongation de la saison estivale, des températures plus douces au printemps et à l'automne, ou la baisse des températures minimales, ce qui pourrait supposer un plus grand choix de destinations touristiques de montagne (Isoard et al., 2008).

6.2. Défis du changement climatique et du changement global dans des zones ayant une valeur

6.2.1 Défis du changement climatique dans des zones ayant une valeur environnementale spéciale

L'un des principaux défis du changement climatique et global est de maintenir des niveaux adéquats de résilience écologique (Box 6.1). De fait, dans les stratégies d'adaptation au CC, il est très important de prendre en compte la variabilité climatique et le régime naturel de perturbations qui déterminent, en grande partie, la résilience des écosystèmes (EUROPARC-Espagne, 2018).

Le changement global (CG) se caractérise par ce que l'on appelle les « moteurs de changement ». Les « moteurs » directs font référence aux facteurs ou à l'ensemble de facteurs d'origine anthropogénique, qui impactent les processus écologiques essentiels des écosystèmes et, par conséquent, les fonctions qui définissent la capacité de ceux-ci à générer des services qui déterminent, en partie, le bien-être humain. Nous considérons six moteurs directs : les changements de l'occupation des sols, le changement climatique, la pollution des eaux, des sols et de l'atmosphère, les espèces exotiques envahissantes, les changements dans les cycles biogéochimiques et la surexploitation des composantes biotiques des écosystèmes. Toutefois, ces moteurs sont fondamentalement causés par des politiques ou des processus sociopolitiques, dénommés « moteurs indirects de changement ».

Pour stopper la perte de biodiversité dans des zones de protection environnementale spéciale, les politiques de conservation devraient se concentrer non seulement sur la minimisation des effets ou moteurs directs de changement, mais spécialement sur la gestion des causes, c'est-à-dire, influencer sur l'administration sensée des moteurs indirects.

La stratégie d'axer les politiques de conservation de la biodiversité sur la création de zones protégées plus vastes et plus nombreuses et sur la contribution de celles-ci aux processus d'atténuation et d'adaptation au changement

Box 6.1. Résilience écologique

La « résilience écologique » est la capacité d'un système écologique à retrouver ses propriétés après avoir été altéré par une perturbation (Lloret, 2016).

climatique rend invisible le territoire où elles se trouvent. De fait, les programmes de conservation se concentrent sur les espaces protégés et non pas sur la gestion du territoire où leurs objectifs sont développés, ce qui entraîne qu'il est politiquement plus facile et plus rentable de déclarer une zone protégée nouvelle que de demander une planification intégrée du territoire qui analyse et gère les causes d'un modèle territorial insoutenable. Bien que les zones protégées puissent contribuer à minimiser les effets non désirables du CC, il est fondamental de gérer également leurs causes ou, ce qui revient au même, les moteurs indirects de changement, qui devraient se refléter dans des transformations structurelles des politiques énergétiques, d'infrastructures, de transport, financière et industrielle. Les zones protégées peuvent jouer un rôle fondamental dans la coordination et la concertation pour développer un nouveau modèle territorial cohésif et durable (EUROPARC-Espagne, 2018).

6.2.2 Stratégies d'adaptation

L'adaptation au changement climatique suppose un défi pour les gestionnaires des zones protégées qui, d'après EUROPARC, doit prendre en compte les critères généraux suivants : a) considérer la perspective globale : les espaces protégés font partie de réseaux plus vastes, intégrés dans le territoire ; b) intégrer le changement comme un processus toujours présent dans les écosystèmes ; c) pour réaliser une gestion dans un contexte d'incertitude, utiliser les meilleures informations scientifiques ; d) développer des alliances avec les partenaires sociaux et essayer d'impliquer davantage d'acteurs ; et e) améliorer le soutien social et la sensibilisation sur les effets du changement climatique et global.

Les zones protégées constituent un outil essentiel pour minimiser les effets du CC et jouent un rôle-clé dans les processus d'atténuation et d'adaptation. En ce qui concerne les processus d'atténuation, les écosystèmes protégés stockent de grandes quantités de carbone dans la végétation et dans le sol. De plus, ils capturent le dioxyde de carbone de l'atmosphère. En ce qui concerne les processus d'adaptation, les écosystèmes des zones protégées soutiennent le climat local et réduisent le risque de catastrophes provoquées par des événements extrêmes.

Les stratégies d'adaptation de l'impact doivent suivre deux principales lignes d'action en fonction du type d'impact :

Impacts directs : L'effet de ces impacts sur les écosystèmes des zones ayant une valeur environnementale spéciale passe par une hausse des températures et une variation de la ressource hydrique, qui affecte sa quantité, sa saisonnalité et sa qualité. La hausse altitudinale des températures provoque la migration des espèces de flore et de faune en altitude. Afin de faciliter cette migration, nous proposons de développer des couloirs ad hoc et réaliser des campagnes de migration sélectives pour les espèces les plus vulnérables. L'impact causé par la variation des débits dans les rivières peut être minimisé en réalisant une gestion intégrale de la ressource hydrique, en favorisant surtout la recharge des aquifères. À ce sujet, il existe des Solutions fondées sur la nature pour la gestion de l'eau (SFNGE), qui impliquent des processus naturels et/ou anthropiques avec des résultats similaires aux résultats naturels, qui peuvent s'utiliser pour améliorer la disponibilité en eau, en quantité et en qualité, réduire les risques de catastrophes associés à cette disponibilité de la ressource hydrique, améliorer l'adaptation au CC et augmenter la résilience des écosystèmes.

Impacts indirects : L'effet de ces impacts sur les écosystèmes des zones ayant une valeur

environnementale spéciale passent par une diminution de la qualité des eaux en raison d'une hausse de l'activité anthropique dans ces zones (Lambán et al., 2021). Les mesures pour minimiser cet impact passent par un contrôle plus exhaustif des activités qui sont réalisées, mais, surtout, par la sensibilisation des personnes quant au grave impact potentiel que leur activité peut provoquer sur l'écosystème.

Les écosystèmes de haute montagne présentent une grande biodiversité car, dans un espace réduit, une large variation altitudinale coexiste avec une hétérogénéité topographique élevée. De plus, les populations s'y trouvant sont souvent génétiquement isolées et c'est pourquoi les endémismes y sont plus nombreux. L'un des effets du changement climatique prévu sur ces écosystèmes a à voir avec le mouvement altitudinal des niches climatiques, avec la réduction ou la perte correspondante des zones bioclimatiques supérieures et l'ascension en altitude des zones bioclimatiques inférieures. Cela aura pour conséquence la migration des espèces de flore et de faune en altitude ou à d'autres montagnes plus favorables. Ce processus va être très conditionné par : 1) la capacité de dispersion des espèces (fréquemment réduite dans les zones de haute montagne) et la connectivité du territoire ; 2) la plasticité et la capacité d'adaptation locale des espèces aux changements (Garzón et al., 2011 ; Escudero et al., 2012). Il est prévu que le changement climatique produise aussi des altérations sur la phénologie et les cycles vitaux de certaines espèces (Stefanescu et al., 2003 ; Donoso et al., 2016). La disparition des glaciers et la réduction de la période de permanence de la neige aura des effets sur les habitats les plus spécialisés dans ce type de conditions (névés), ainsi que des changements sur l'hydrologie, avec une diminution de la période de temps comprise entre les précipitations et le ruissellement superficiel, une diminution du flux de base dans les rivières et les ruisseaux (Price et Neville, 2002) et une modification de la recharge des aquifères (Jódar et al., 2020 et 2022). Par le fonctionnement de ces écosystèmes, proche du naturel, sauf dans le cas de ceux maintenus par l'activité anthropique (Martos Rosillo et al., 2019), les options d'intervention sont réduites et devraient se concentrer sur la protection des éléments singuliers.

6.3. Étude de cas du Parc national d'Ordesa et de Monte Perdido (Huesca)

6.3.1 Introduction

Le Parc national d'Ordesa et de Monte Perdido (PNOMP) présente un nombre de figures de protection environnementale élevé à l'échelle nationale, supranationale et transfrontalière. L'eau, sous ses différentes formes (glaciers, neige, ruissellement superficiel et souterrain, sources), est un élément fondamental d'un point de vue paysager et environnemental.

La zone constitue le plus grand massif montagneux calcaire d'Europe occidentale et le karst à la plus haute altitude d'Europe. La pénurie d'eaux superficielles durant l'été, en dehors des principaux lits, est due à ce qu'une bonne partie de l'eau des précipitations (pluies et neige) s'infiltre dans le sous-sol (recharge), alimentant les aquifères qui déchargent ultérieurement par des sources et apportent le débit de base aux principales rivières. Les aquifères karstiques de haute montagne constituent des systèmes hydrogéologiques complexes qui se caractérisent par une haute hétérogénéité, des vitesses de transit élevées, des effets associés à des reliefs abrupts et de grandes altitudes, des temps de réponse très courts à des épisodes de précipitations, d'importants gradients géographiques de température, une recharge et une décharge contrôlée en bonne partie par la dynamique nivale. Tout cela rend ces aquifères très vulnérables au changement climatique. Connaître leur fonctionnement est essentiel pour réaliser une gestion et une conservation correctes.

La hausse des températures en raison du CC implique une plus faible accumulation de neige dans la zone de recharge de l'aquifère et une époque de fonte des neiges progressivement plus précoce, ce qui, uni aux courts temps de transit de l'eau en raison de la nature karstique du terrain, peut affecter de façon significative le maintien des niveaux et des débits de décharge souterraine durant le printemps et l'été. La plupart des ressources hydriques, tant leurs sources (certaines aussi emblématiques que la Cola de Caballo, la Fuenblanca ou la Fuen de Escuaín ; Figure 6.2) que leurs principales rivières (Arazas, Bellós, Yaga et Cinca) proviennent des eaux souterraines. C'est pourquoi la diminution dans l'apport de celles-

ci affectera directement ou indirectement toute la biodiversité et tous les écosystèmes associés à l'eau.

Les scénarios climatiques futurs prévoient tant une diminution des ressources hydriques qu'une augmentation de leur variabilité temporelle, ce qui fait de cette étude de cas une zone spécialement sensible, étant donnée la réponse rapide des systèmes karstiques. Une diminution du débit des sources et des cours d'eaux superficielles, notamment à la saison chaude est donc à prévoir. De plus, cette saison coïncide avec une plus grande affluence de visiteurs (en nombre probablement croissant à l'avenir), pouvant générer des problèmes de pollution. Ces problèmes de qualité de l'eau s'aggraveront à l'avenir du fait de : 1) une plus grande affluence de visiteurs et une plus grande charge polluante associée à leur présence et à leur activité, 2) une plus faible capacité de dilution des polluants dissous, du fait de la baisse de la ressource hydrique engendrée par l'impact du changement climatique.

L'objectif de cette étude de cas est d'évaluer les effets du changement climatique sur la quantité et la qualité des ressources hydriques et de savoir dans quelle mesure les eaux superficielles et souterraines sont affectées par la pollution, provoquée par le tourisme dans l'un des secteurs les plus fréquentés et les plus vulnérables.

L'évaluation des effets du changement climatique sur la quantité des ressources hydriques est réalisée à l'échelle régionale, au moyen de l'élaboration et du calibrage d'un modèle numérique de bilan de l'eau dans le sol et de la simulation de scénarios climatiques futurs, et à l'échelle locale, dans le secteur compris entre le massif du Monte Perdido et de la Cola de Caballo, l'un des secteurs les plus emblématiques et les plus fréquentés du parc. Pour cela, des capteurs de niveau de l'eau, de conductivité électrique et de température de l'eau de l'aquifère ont été installés. De plus, nous avons réalisé et interprété divers essais à l'aide de traceurs, afin d'établir des connexions hydrauliques dans le karst et d'estimer les temps d'arrivée associés. L'impact du tourisme et du CC sur la qualité des ressources hydriques est établi à l'échelle locale, dans ce même secteur, par un réseau de points

de contrôle et d'échantillonnage biologique, chimique et isotopique de l'eau.

6.3.2 Domaine d'étude

La zone de l'étude est située dans le secteur central de la cordillère pyrénéenne. Elle est composée d'un système de vallées et de sommets reliés entre eux, se distinguant les gorges radiales que dessinent les principaux cours fluviaux : canyon d'Añisclo au S, vallée d'Escuaín au SE, vallée d'Ordesa à l'O et vallée de Pineta à l'OSE (Figure 6.3).

Selon la classification de Köppen-Geiger (Peel et al., 2007), le climat est froid, avec une saison sèche et des étés doux et frais. Dans la station météorologique de Fanlo-Góriz située à 2 200 m au-dessus du niveau de la mer, la température moyenne annuelle est de 4,9 °C et les précipitations moyennes de 1 650 mm/an. Juillet et août sont les mois les plus chauds, janvier et février les mois les plus froids. En général, les chutes de neige commencent en novembre et durent jusqu'à la mi-mai (Polo, 2015). Les moyennes mensuelles des précipitations présentent deux maxima durant l'automne et le printemps et deux minima durant l'hiver et l'été (Lambán et al., 2015). La variabilité spatiale des précipitations présente un gradient O-E (Benito Alonso, 2006) dû aux fronts atmosphériques de basse pression, venant de l'Atlantique. Ils sont responsables des principaux volumes de précipitations (Lambán et al., 2015). Les gradients verticaux moyens de température et de précipitations sont de -3,3 °C/km et de 200 mm/km, respectivement.

D'un point de vue géologique, le PNOMP fait partie d'un système imbriqué de plis et de chevauchements orientés vers le sud. Son architecture structurelle répond à l'existence de deux couches de glissement principales : la couche de Gavarnie, à l'O de la rivière Ara, et la couche du Monte Perdido, vers l'E (Seguret, 1972). La couche de Gavarnie peut s'observer dans la partie nord, où affleurent des matériaux du paléozoïque et du crétacé supérieur. La couche du Monte Perdido comprend des matériaux du crétacé



Figure 6.3. Sources de la Cola de Caballo (A), Fuen Blanca (B) et Fuen de Escuaín ou résurgence du Yaga (C).

à l'éocène inférieur, présentant une structure de stratification sub-horizontale avec peu de déformation interne dans la partie inférieure de la vallée d'Ordesa. Cette faible déformation, unie à l'intercalation de formations moins perméables, favorise localement la déconnexion hydraulique des niveaux perméables (Figure 6.4).

La zone présente un paysage de montagne alpine, résultat d'un intense processus de karstification et d'érosion par des processus glaciaux. Il est possible d'observer les effets de la karstification par la présence de nombreuses zones de lapiaz, grottes, avens et de fissures. D'autre part, les processus glaciaux se reflètent dans de longues et profondes vallées en forme de U d'Ordesa, Añisclo, Escuaín et de Pineta (IGME-OAPN, 2013).

D'un point de vue hydrogéologique, la zone appartient à la masse d'eau souterraine 09032 (Sierra Tendeñera-Monte Perdido). Les calcaires, dolomies et calcarénites du crétacé supérieur et inférieur et du paléocène-éocène constituent les

affleurements perméables les plus importants. On y trouve les sources et les zones de décharge souterraine les plus significatives. Les principaux systèmes karstiques sont situés dans les matériaux du paléocène-éocène (CHE, 1998 ; Ríos-Aragüés, 2003 ; Lambán et al., 2015), parmi lesquels ressortent le système de la Punta de las Olas, le système de Garcés et les sources d'Escuaín par leur développement. La puissance de l'ensemble est de 200 à 300 m, bien que l'épaisseur de ces formations augmente dans le secteur septentrional pour des causes tectoniques (plis serrés et empilements tectoniques), ce qui permet le développement de systèmes karstiques où les 1 000 m de puissance de zone vadose (non saturée) sont dépassés. Le substrat rocheux est constitué de faciès terrigènes du maastrichtien, responsables des nombreuses sources du réseau de drainage qui existent dans les vallées d'Añisclo et d'Ordesa.

6.3.3 Évaluation des effets du changement climatique sur la quantité des ressources hydriques

L'évaluation des effets du CC sur la quantité des ressources hydriques se réalise à l'échelle régionale (bassin de l'Ara) et locale, dans le secteur compris entre le massif du Monte Perdido et de la Cola de Caballo, les deux points les plus emblématiques et de plus grand attrait touristique du parc.

Effets du changement climatique sur la quantité à l'échelle régionale

Pour caractériser les ressources hydriques superficielles et souterraines à l'échelle régionale, un modèle hydrologique de précipitations-apports pour le bassin de la rivière Ara a été réalisé en appliquant le code GIS-BALAN (Samper et al., 1999 et 2015 ; Pisani, 2008). Le modèle hydrologique a été calibré à l'aide de données de débit de la rivière Ara pour la période 1980-2015, mesurés dans la station de jaugeage de Boltaña, appartenant à la Confédération hydrographique de l'Èbre. Le Tableau 6.1 présente les valeurs des principales composantes du bilan hydrologique obtenues pour ce bassin.

Tableau 6.1. Résultats moyens annuels des composantes du bilan hydrologique dans le bassin de la rivière Ara (1980-2015). De plus, nous indiquons les valeurs des rapports entre la recharge (R) et la recharge en transit (RT) par rapport aux précipitations (P).

Précipitations totales P (mm/an)	1364
Précipitations nivales (mm/an)	393
Interruption (mm/an)	160
ETR (mm/an)	482
Ruissellement superficiel (mm/an)	20
Flux hypodermique (mm/an)	322
Recharge en transit RT (mm/an)	696
Recharge R (mm/an)	380
RT/P (%)	51
R/P (%)	28
Débit total décharge (mm/an)	722

Le modèle calibré a été utilisé pour estimer l'impact du changement climatique sur la réponse hydrologique du système. Les données de précipitations (P) et de température (T) des modèles climatiques considérés dans le projet CLIMPY pour les scénarios d'émission RCP 4.5 et RCP 8.5 ont été utilisées.

La Figure 6.5 indique les résultats obtenus pour les variables hydrométéorologiques principales, en faisant la moyenne des valeurs de chaque variable

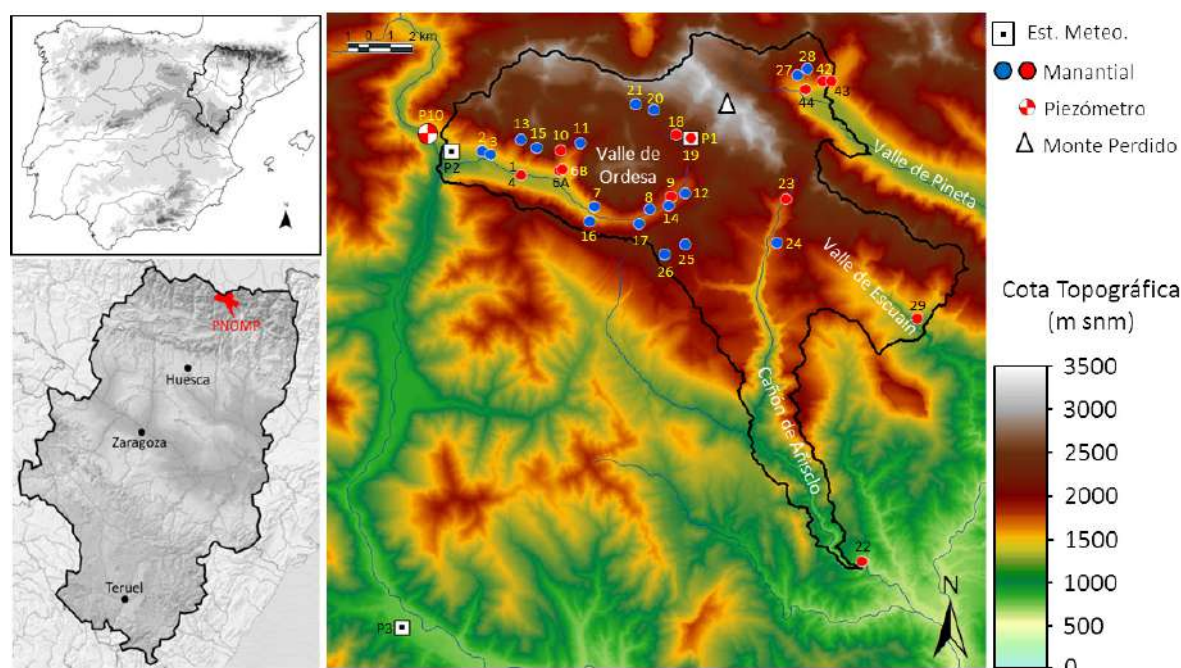


Figure 6.3. Localisation de la zone d'étude, relief et principaux points d'intérêt.

(Source : Jódar et. al., 2016.)

pour des intervalles de 30 ans. Les variables liées à la décharge du système (ruissellement total, superficiel, sub-superficiel et souterrain) présentent une tendance similaire à celle des précipitations, sans montrer de grandes variations, sauf dans le cas du ruissellement superficiel qui connaît des variations prononcées qui, en réalité, ne supposent pas de contribution ou de déviation très élevée au flux total de décharge du bassin, dû, précisément à la haute capacité d'infiltration des matériaux affleurant en surface.

Les précipitations montrent une légère tendance décroissante d'environ 5 % par rapport au présent pour la période 2071-2100. La température montre une tendance monotone croissante pour les trois horizons temporels (2011-2040, 2041-2070, et 2071-2100), qui se propage de façon naturelle aux flux d'évapotranspiration (AET).

En passant les pourcentages de changement dans la décharge totale du bassin, obtenue pour la

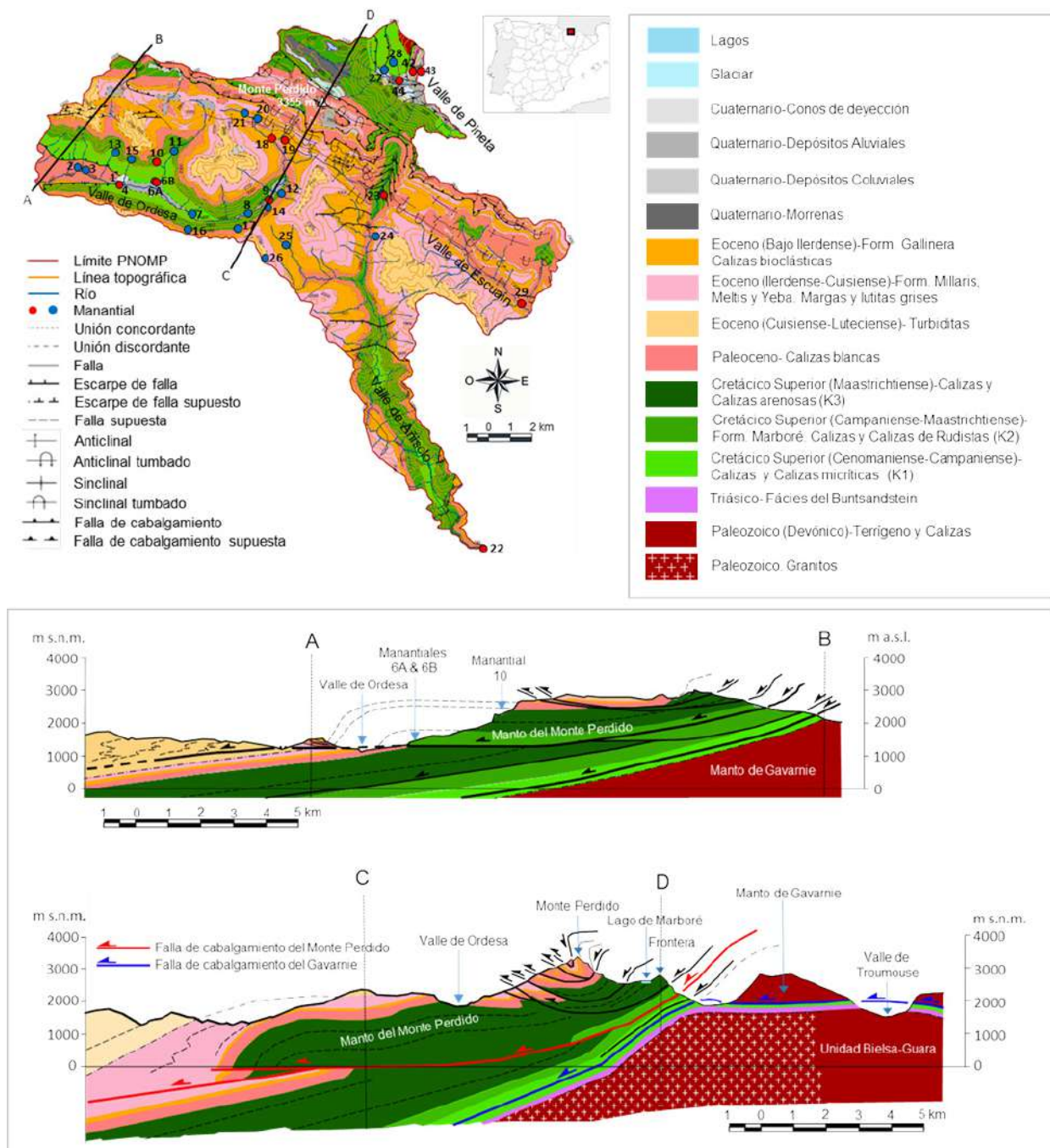


Figure 6.4. Situation, carte géologique et coupes géologiques.

(Source : modifiée de Lambán et al., 2015).

dernière période de 30 ans (2071-2100), dans des variations de débit, nous obtenons une diminution de 56 et de 112 hm³/an pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, respectivement. Néanmoins, l'impact du changement climatique s'observe non seulement dans la variation du débit de décharge du bassin, mais aussi dans la saisonnalité de celle-ci, ce changement se reflétant dans la forme de l'hydrogramme, avec un comportement nival à pluvio-nival plus prononcé (Figure 6.6).

En outre, les périodes associées à la fusion nivale et à l'étiage arrivent nettement plus tôt, comme on peut l'observer dans la Figure 6.6, où l'on voit clairement comment le débit de décharge augmente en hiver du fait de l'augmentation des précipitations sous forme de pluie et, de manière analogue, un débit plus faible à l'époque de la fonte des neiges, car une plus faible accumulation de neige se produit en hiver et, donc, un plus petit volume d'eau de fusion nivale pour contribuer au débit total de décharge du bassin au printemps.

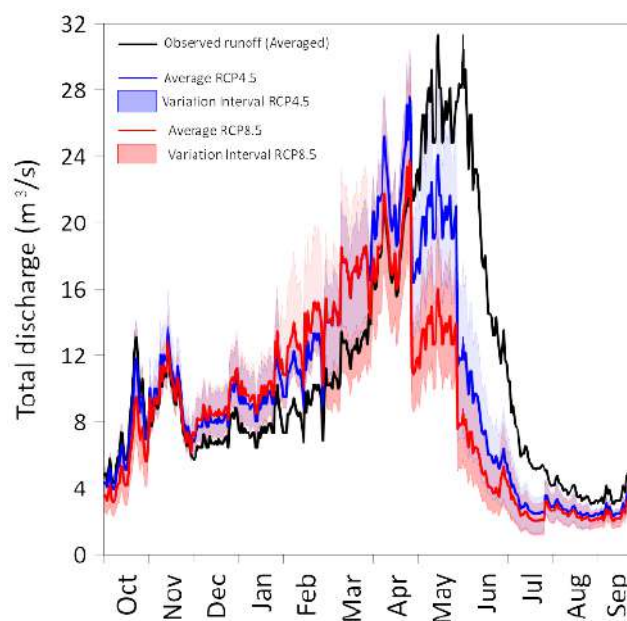


Figure 6.6. Variation saisonnière de la décharge totale de la rivière Ara, pour la période de contrôle (1961-2005) comme pour la période 2071-2100, en tenant compte des scénarios de changement climatique RCP 4.5 et RCP 8.5 simulés par les différents modèles climatiques.

(Source : élaboration propre).

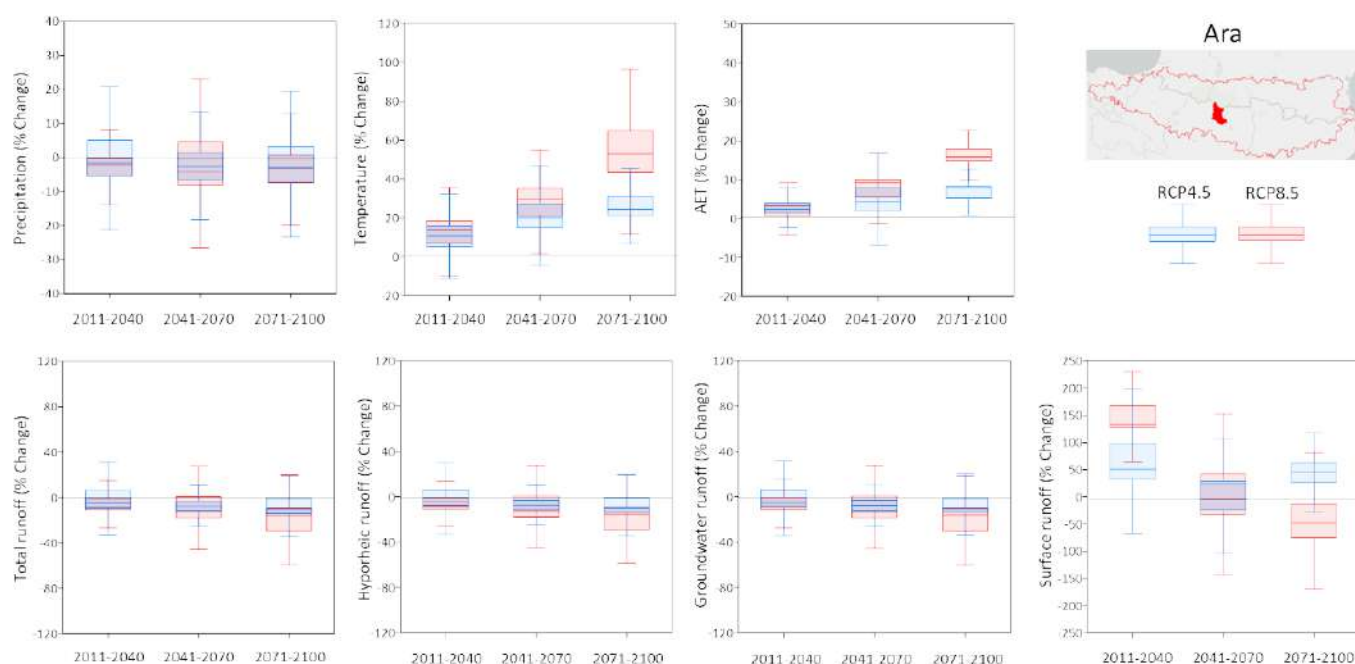


Figure 6.5. Variation par rapport à la période de contrôle (1961-2005) des précipitations, de la température, de l'évapotranspiration et des débits de décharge totale, de flux hyporhéique et souterrain, ainsi que du ruissellement superficiel, en faisant la moyenne des valeurs de chacune de ces variables pour les périodes 2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100.

(Source : élaboration propre).

On observe un profond changement de la saisonnalité des flux, de sorte que les périodes de l'année associées à la fusion nivale et à l'étiage sont nettement plus précoces dans la saison, ainsi qu'une prolongation de leur durée dans le cas de l'étiage.

Effets du changement climatique sur la quantité à l'échelle locale

Dans ce cas, les travaux se sont concentrés sur le secteur compris entre le massif du Monte Perdido et de la Cola de Caballo (Figure 6.7).

Sur ce secteur, l'un des systèmes karstiques les plus importants et les plus vastes du parc se développe, dans ce que l'on appelle le système aquifère supérieur (Lambán et al., 2015). Ce secteur comprend le système Garcés, à l'intérieur duquel ont été installés des capteurs pour mesurer en continu le niveau, la conductivité électrique et la température de l'eau de l'aquifère. En outre, différents essais de traceurs ont été réalisés et interprétés afin de vérifier la connexion hydraulique à l'intérieur du karst et d'évaluer les temps de transit des traceurs injectés entre la partie haute du système karstique et les sources de

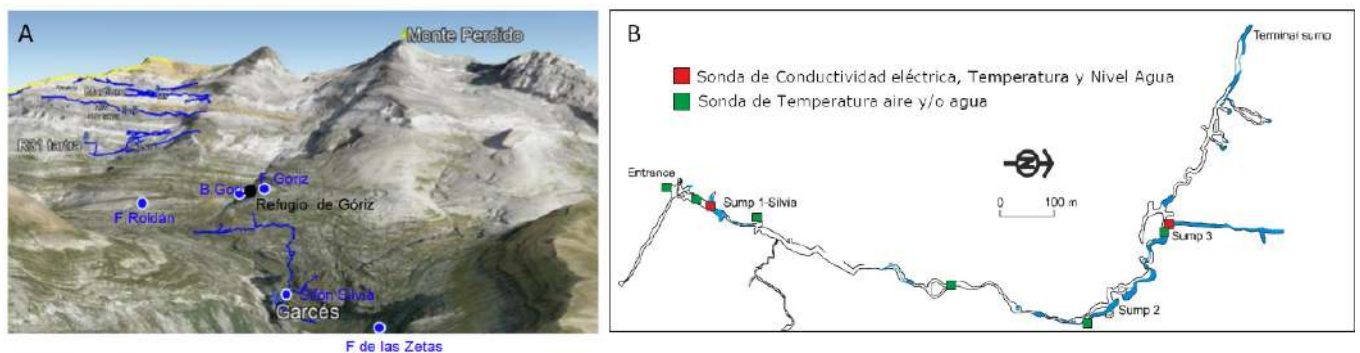


Figure 6.7. (A) Secteur compris entre le massif du Monte Perdido (3 355 m au-dessus du niveau de la mer) et la Cola de Caballo (1 800 m au-dessus du niveau de la mer). Points du réseau de contrôle (source de Góriz, ravin de Góriz, source Roldán, source des Zetas et siphon Silvia) et projection en surface des principaux systèmes karstiques (en bleu). Le système Garcés est le système le plus bas. (B) Système Garcés en détail, où l'on peut voir l'emplacement des différentes sondes de mesure installées pour contrôler la réponse hydrodynamique, chimique et isotopique du système aux variations hydroclimatiques et anthropiques qui peuvent affecter la recharge de l'aquifère.

(Source : élaboration propre).

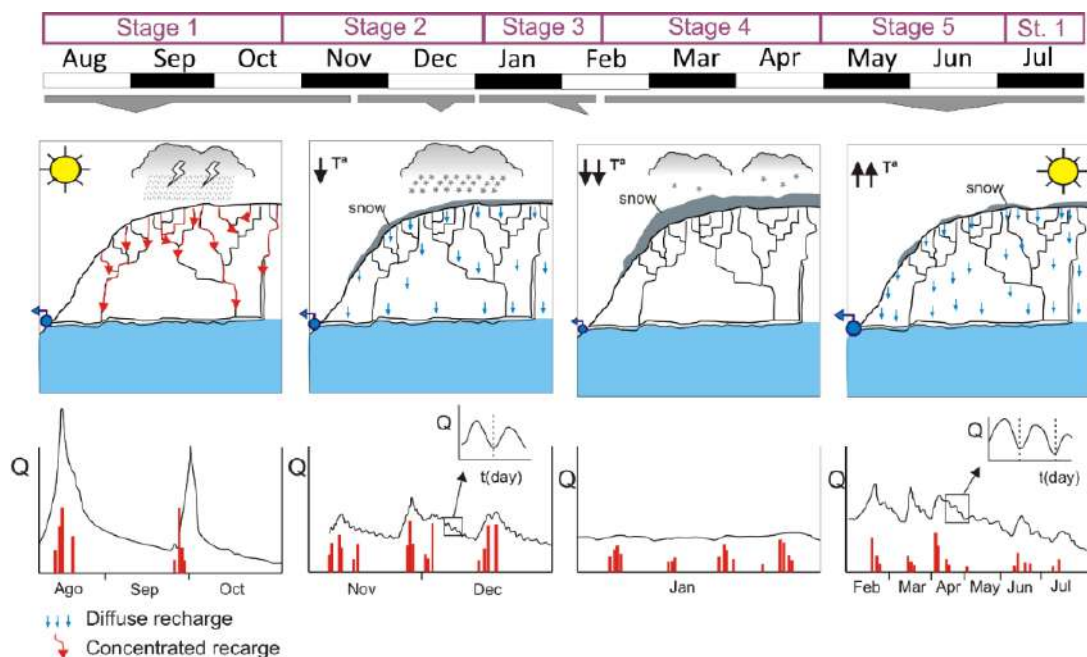


Figure 6.8. Schéma du modèle conceptuel de recharge observé en 2018-19 dans le système karstique de Garcés.

(Source : González-Ramón et al., 2020.)

Garcés (siphon Silvia) et Fuenblanca.

Les pics de crue les plus importants dans le système Garcés se produisent à l'automne, coïncidant avec des périodes de forts orages, alors qu'il n'y a pas encore de couverture nivale.

Durant l'année hydrologique 2018-19, l'évolution hydroclimatique du PNOMP et la réponse du système karstique en termes de recharge ont été enregistrées. La Figure 6.9 présente un résumé de l'évolution de la recharge pour cette période. En novembre et en décembre, deux petites crues peuvent s'observer, ainsi que de légères variations journalières du débit de recharge, ce qui indiquerait leur relation avec les premières chutes de neige de l'hiver et leur fonte ultérieure, car il ne fait pas encore assez froid pour que la neige tombée ne tienne longtemps sans fondre. La neige fondue s'infiltre et recharge le système. En janvier, les précipitations sont nivales et le froid stabilise le manteau neigeux. Comme il n'y a pas d'infiltration d'eau générant la recharge depuis la surface, les variations journalières du débit dans l'aquifère cessent et restent stables jusqu'à la mi-février, lorsque l'on commence à nouveau à enregistrer de légères variations de débit. De la mi-avril à la mi-juillet, le débit de recharge présente d'importantes fluctuations journalières dues au cycle de fonte diurne (donc, infiltration et recharge) et de congélation nocturne (donc, arrêt de l'infiltration depuis la surface). À partir du mois d'août, les crues sont à nouveau ponctuelles et liées à la recharge en eau de pluie provenant d'orages, bien que d'une plus faible intensité que ceux observés à l'automne.

Durant les orages de l'été et de l'automne, des hausses et des baisses rapides de la température et de la conductivité électrique sont observées, signalant l'existence de l'arrivée d'eau d'infiltration rapide, suivies d'apports en eau, avec un temps de résidence dans l'aquifère plus long, semblant indiquer des effets « piston », probablement liés à la présence de niveaux saturés suspendus (Jódar et al., 2020).

L'essai de traceurs en août 2019 a permis de conclure qu'il existait une connexion entre les points d'injection et la source de Garcés (Figures 6.9 et 6.10), de sorte que les gouffres les plus

éloignés présentent un temps d'arrivée plus long (9 jours) que celui associé aux gouffres les plus proches (5 jours). Le principal mécanisme du transport des traceurs est l'advection, le transport étant dispersif/diffusif peu important (Jódar et al., 2020). Cela implique que le débit d'eau souterraine se déversant dans le système Garcés circule principalement par des conduits, des galeries et des fractures ayant une perméabilité élevée. À la fin octobre 2019, en dehors de l'époque d'étiage, un autre essai de traceurs a été effectué, en les injectant dans un gouffre du ravin de Góriz, 150 m en aval du refuge de Góriz (Figure 6.7). Les résultats ont démontré la connexion directe entre le ravin de Góriz et la grotte de Garcés, ainsi que l'existence de temps de transit extrêmement courts (Box 6.2), de 5 à 7 heures, qui ont lieu dans le système lorsque les débits de décharge sont importants. Cela met en évidence l'ampleur et la connexion de la structure interne du karst et la vulnérabilité de celui-ci à un éventuel épisode de pollution.

L'essai sur le terrain à l'aide de traceurs a démontré la connexion directe entre le ravin de Góriz et la grotte de Garcés, ainsi que l'existence de temps de transit extrêmement courts. Cela met en évidence l'ampleur et la connexion de la structure interne du karst et la vulnérabilité de celui-ci à un éventuel épisode de pollution et aux conséquences du changement climatique.

6.3.4 Évaluation des effets du changement climatique et du tourisme sur la qualité des ressources hydriques disponibles

Cette évaluation s'est à nouveau concentrée sur le secteur compris entre le massif du Monte Perdido et la Cola de Caballo, deux des points les plus visités et les plus emblématiques du parc. Pour cela, diverses campagnes d'échantillonnage d'eau ont été réalisées aux points du réseau de contrôle (Figure 6.7), ainsi qu'à l'intérieur du système Garcés (Figure 6.11).

Box 6.2. Temps de transit

Le temps de transit indique le temps qu'il faut à la recharge pour atteindre la sortie du système. Cela inclut le temps que met l'eau infiltrée à percoler à travers la zone non saturée de l'aquifère, qui peut facilement dépasser les 500 m d'épaisseur dans le PNOMP, jusqu'à arriver au point de décharge chaque fois que l'eau infiltrée atteint le niveau phréatique. Ces informations sont obtenues grâce à un modèle de mélange piston-exponentiel (Małoszewski et Zuber, 1982 ; Jódar et al., 2014). La valeur de temps de transit obtenue pour le système aquifère est de 3,87 (Jódar et al., 2020). D'autre part, les temps d'arrivée obtenus dans l'essai de traceurs en 2019 (en l'absence de précipitations) oscillent entre 5 et 9 jours, confirmant l'existence d'un flux souterrain très rapide à travers les fissures et les éléments du réseau karstique les plus conductifs, ce qui confirme l'extrême vulnérabilité du système au changement climatique.

Les paramètres physiques et chimiques de l'eau ont été mesurés sur le terrain aux points du réseau de contrôle, et des échantillons d'eau ont été prélevés pour réaliser des analyses biologiques (macro-invertébrés et chlorophylle), chimiques (éléments majoritaires, métaux lourds et médicaments) et isotopiques. Aux points situés dans le système Garcés (Figure 6.11), des échantillons ont été prélevés pour des analyses chimiques (éléments majoritaires, métaux lourds et médicaments) et isotopiques.

Durant les mois d'été, où il y a une plus grande

affluence de visiteurs, on observe à ce point : a) une température plus élevée, une conductivité électrique plus élevée et moins d'oxygène dissous dans l'eau, b) une haute teneur en NO_3 , NH_4 , PO_4 , As, Cu, Fe, Mn, PO_4 et en As, c) un nombre plus faible de familles de macro-invertébrés (NFAM), avec prédominance de taxons tolérants aux conditions de stress, d) un indice de qualité de l'eau plus faible (IBMWP) et e) une présence significative des médicaments Hydrochlorotiazida, Gemfibrozil, Carbamazépine, Albuterol et Atenolol. En ce qui concerne les

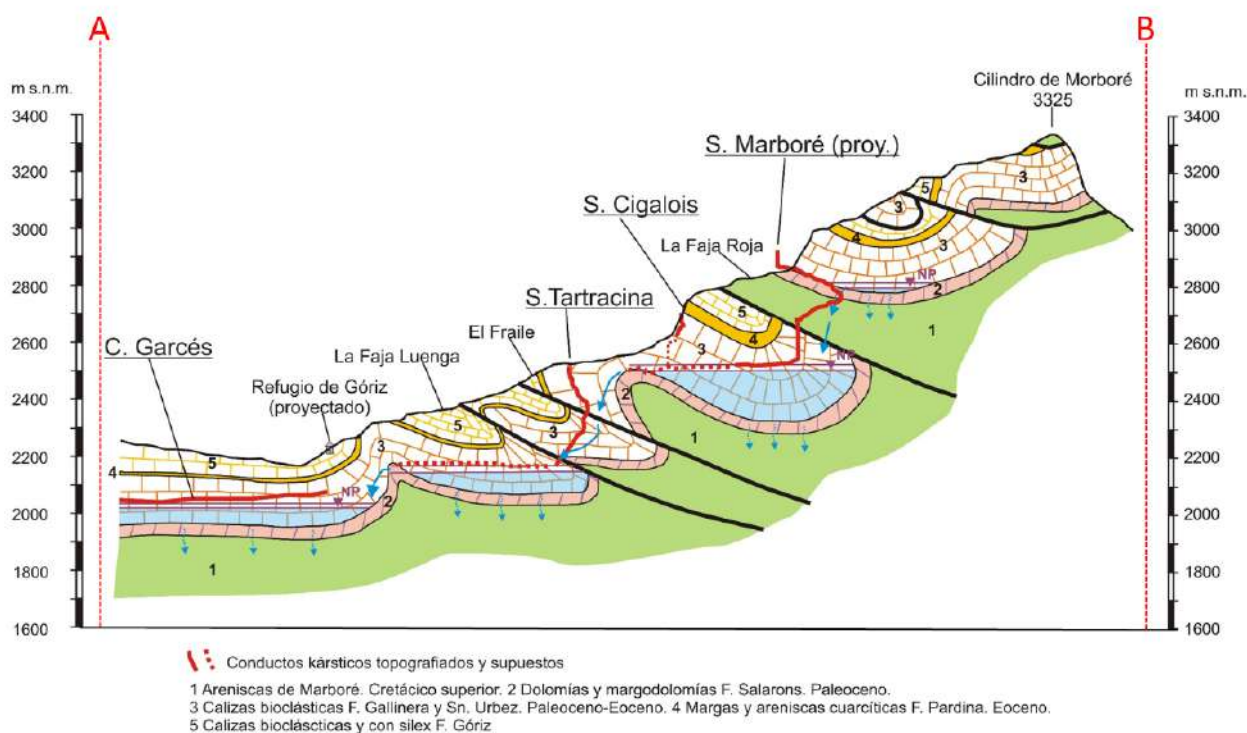


Figure 6.10. Coupe géologique en suivant le profil A-B dans la Figure 11. Au-dessus de la coupe figure la projection des gouffres par lesquels les différents traceurs ont été injectés. La ligne rouge discontinue indique la possible trajectoire des traceurs avec le flux souterrain dans le système karstique.

(Source : modifié de González-Ramón et al., 2020.)

autres points de contrôle, nous ne disposons pas pour le moment d'informations suffisantes pour pouvoir évaluer l'éventuel impact du tourisme et du CC sur la qualité de l'eau. C'est pourquoi nous recommandons de continuer à contrôler la qualité de l'eau au-delà de la fin de ce projet.

L'étude conjointe des analyses de qualité des eaux effectuées durant les campagnes 2018 et 2019 indiquent un clair impact du refuge sur la qualité de l'eau du ravin de Góriz.

Néanmoins, la plus faible quantité des ressources hydriques disponibles en raison de la diminution de la recharge, les temps courts de transit obtenus dus à la nature karstique du système, ainsi que l'augmentation du nombre de visiteurs confirment l'extrême vulnérabilité que présente la qualité de l'eau au changement climatique et au tourisme.

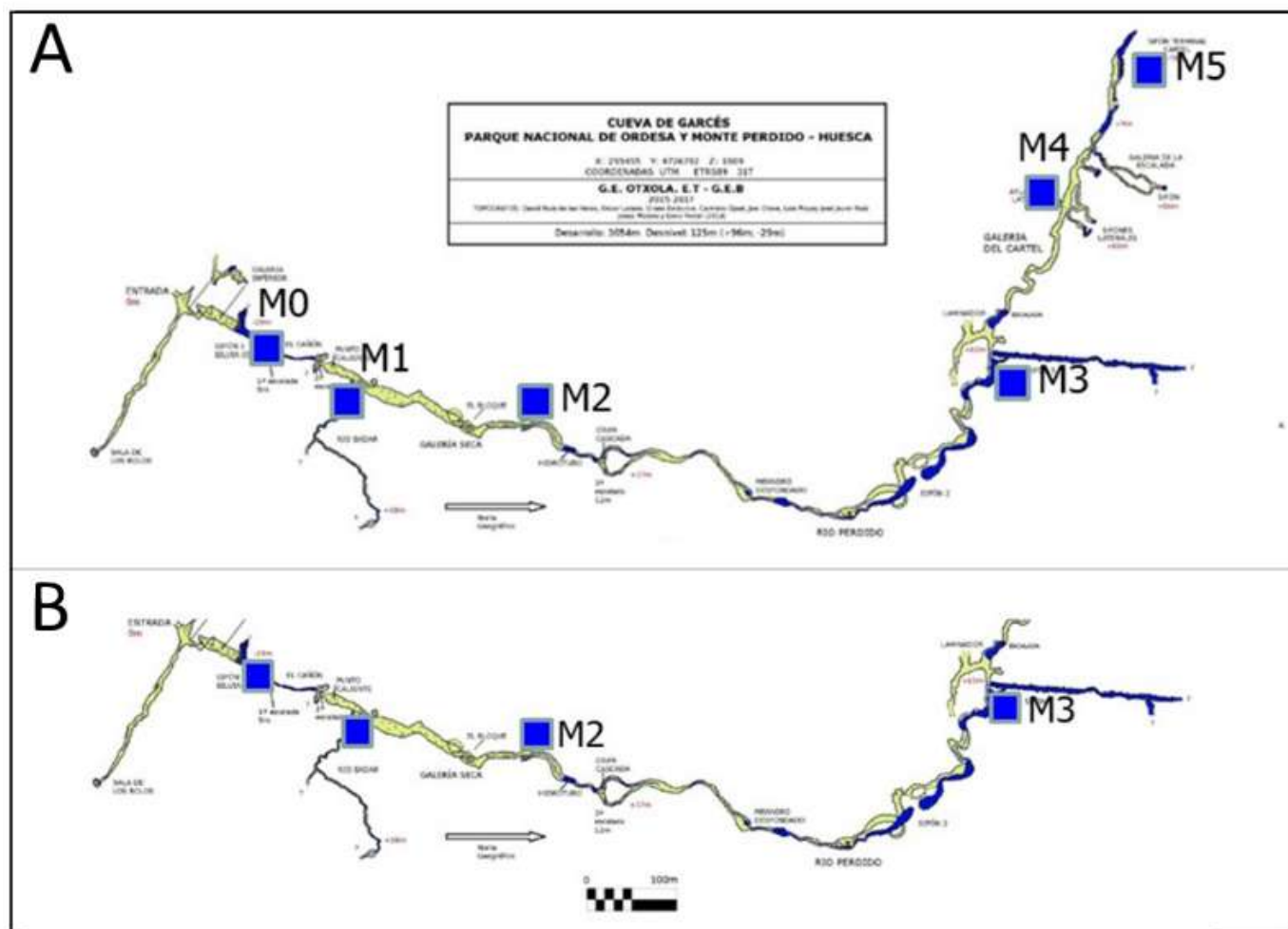


Figure 6.11. Points d'échantillonnage d'eau souterraine dans le système Garcés. (A) Campagne d'échantillonnage 29/09/2018. (B) Campagne d'échantillonnage 05/08/2019.

(Source : élaboration propre).

6.3. Conclusions

L'étude de l'impact du CC dans des zones des Pyrénées ayant une valeur environnementale spéciale est essentielle pour évaluer ses effets sur la biodiversité et pour maintenir un moteur économique aussi important que le tourisme. Les études de modélisation effectuées dans le cadre de ce projet indiquent que la hausse des températures en raison du CC va réduire la couverture de neige dans toutes les Pyrénées, impliquant une plus faible accumulation de neige dans la zone de recharge et une anticipation progressive de l'époque de fonte.

Dans le parc national d'Ordesa et de Monte Perdido, les résultats obtenus indiquent que (1) la recharge provenant de la fusion nivale est celle qui contrôle le fonctionnement hydrogéologique, permettant de maintenir un certain débit de décharge durant l'étiage ; et (2) l'aquifère se comporte comme un système à double porosité, qui est décrit par une porosité primaire correspondant aux conduits karstiques et aux fractures plus conductives du système, et par une porosité secondaire correspondant aux fractures peu perméables, à la schistosité et à la porosité de drainage de la roche. Les structures de porosité primaire et secondaire contribuent à hauteur de $\frac{1}{4}$ et de $\frac{3}{4}$, respectivement, au débit total de la décharge souterraine ; et 3) les temps de transit de l'eau de recharge, depuis que celle-ci s'infiltre jusqu'à ce qu'elle jaillisse dans la source sont relativement rapides, variant de quelques jours (5 jours de La Tartracina et S-60, et 9 jours des gouffres Cigalois et Marboré) à un peu plus d'un an (débit d'étiage). Tout cela confirme l'extrême vulnérabilité du système au changement climatique.

La plus faible quantité des ressources hydriques, les temps courts de transit, ainsi que l'augmentation du nombre de visiteurs confirment l'extrême vulnérabilité que présente la qualité de l'eau au changement climatique et au tourisme.

La plupart de l'eau des précipitations de pluie et de neige s'infiltre dans le sous-sol, alimentant les aquifères. Les travaux de modélisation réalisés indiquent que de 50 à 60 % des précipitations moyennes annuelles rechargent les aquifères,

maintenant une bonne partie des débits écologiques durant l'époque de l'étiage. Souvent, comme c'est le cas pour le Parc national d'Ordesa et de Monte Perdido, la plupart des ressources hydriques, sources et/ou rivières proviennent de la décharge de l'eau souterraine. C'est pourquoi une diminution de la recharge affectera gravement la disponibilité de la ressource hydrique et, par conséquent, la biodiversité et la valeur environnementale des zones protégées.

Que la réponse du système soit contrôlée par la fusion nivale et que l'aquifère présente des temps de transit courts, en raison de la nature karstique du terrain, met en évidence l'extrême vulnérabilité des ressources hydriques superficielles et souterraines au changement climatique.

Les résultats obtenus dans le Parc national d'Ordesa et de Monte Perdido peuvent être extrapolés à d'autres zones protégées des Pyrénées. La hausse des températures, la diminution des précipitations sous forme de neige, la plus courte durée de la couverture de neige, notamment au printemps et à l'automne, et une époque de fonte progressivement plus précoce, provoqueront une baisse de la recharge et de la décharge souterraine durant l'étiage, affectant de façon significative la biodiversité. Cet impact sera d'autant plus élevé dans des zones protégées associées aux aquifères carbonatés et/ou karstifiés. Dans ces zones, la haute perméabilité caractéristique de ces aquifères provoque de grandes vitesses de flux, ce qui, uni à la diminution des débits qui fluent dans le système, aura des implications importantes sur le transport des polluants qui pourraient exister dans l'environnement et arriver à l'aquifère.

Comme mesures d'adaptation en ce qui concerne la quantité des ressources hydriques, nous proposons : a) le stockage des précipitations au moyen de citernes ou de réservoirs adaptés, installés et distribués de façon stratégique à différents points du PNOMP, b) l'utilisation conjointe des eaux superficielles et souterraines, et c) la conception et la construction de puits pour l'approvisionnement aux époques d'étiage.

Comme mesures d'adaptation en ce qui concerne la qualité des ressources hydriques, nous proposons :

- des mesures de gestion : a) le contrôle du nombre de visiteurs et de nuitées dans des refuges de montagne, zones de camping et points de plus grande affluence de visiteurs et b) les recommandations pour l'optimisation tant dans la génération que dans le traitement des déchets produits dans des refuges de montagne et des zones de camping.
- des mesures de sensibilisation : par des discussions, ateliers, brochures de vulgarisation, etc. destinés aux gardes des refuges, personnel qui travaille dans des zones protégées, APN, population locale et visiteurs.

7. Adaptation au changement climatique à partir de la gestion de la fonctionnalité hydrologique du territoire : le bassin du fleuve Bidassoa

Iñaki Antigüedad, Maite Meaurio, María Valiente, Jesus Uriarte, Ane Zabaleta (Grupo Investigación “Procesos Hidro-Ambientales”, Dpto Geología, Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea, UPV/EHU)

Ce chapitre tente de rendre visible le besoin de considérer les processus du cycle de l’eau dans la planification et la gestion du territoire (à l’échelle du bassin-versant), en adaptant l’occupation des sols à la conservation et à la récupération des différents services écosystémiques, notamment tous les hydrologiques. L’objectif est donc d’adapter le territoire à partir de sa fonctionnalité hydrologique, en priorisant des zones du bassin fournissant des services hydrologiques (approvisionnement en eau, en quantité et en qualité, dans l’espace et dans le temps) et en prenant en compte leur relation complexe avec d’autres services écosystémiques (approvisionnement, régulation, soutien, culturels). La diversité et la complémentarité des services sur le territoire seraient données par une mosaïque de différentes occupations des sols, planifiée à partir, et pour, l’adaptation hydrologique. Nous considérons que, comme le carbone est l’axe des mesures d’atténuation à l’échelle globale, l’eau est l’axe de l’adaptation à l’échelle du bassin. Comme l’objectif du projet PIRAGUA est d’établir des mesures à l’incidence territoriale pour l’adaptation au changement climatique, certains aspects liés à la gestion de la demande d’eau ne sont pas considérés ici. Il s’agit d’agir sur les espaces les plus changeants du territoire (c’est-à-dire, les zones du bassin-versant où des changements dans l’occupation des sols se sont produits dans le passé le plus récent), afin de déterminer comment adapter leurs futurs usages au changement climatique à partir de la considération de l’amélioration des services hydrologiques. Cet objectif est davantage prioritaire pour les espaces territoriaux qui définissent les zones de recharge des captages d’eau (superficielles et souterraines), actuelles ou futures, qui doivent être considérées comme des zones stratégiques dans l’aménagement du territoire, et pas uniquement dans la planification hydrologique. Deux types d’usages sont pris en compte sur le territoire : ceux qui sont consolidés dans le temps et qui ne supposent pas de changements importants de l’état des masses végétales (et du sol qui les nourrit), et ceux qui connaissent un changement, naturel ou planifié, et supposent une altération importante de l’état des masses végétales (et du sol). Les premiers sont surtout liés aux masses boisées de plusieurs dizaines d’années, où le type de gestion réalisé ne suppose pas de changements importants d’un point de vue hydrologique. De plus, s’agissant de masses adultes, l’évapotranspiration n’est pas aussi importante que pour les masses arborées les plus jeunes. Les seconds sont liés aux différents types d’usages et de situations : des prés qui sont en processus d’abandon aux plantations d’espèces à la croissance rapide, avec des cycles de rotation courts, altérant les conditions de l’évapotranspiration en plus des conditions des sols eux-mêmes. Dans ce cas, nous ne devons pas attribuer la même priorité à toutes les zones : pour certaines, il convient de donner la priorité aux services hydro-écosystémiques (liés à l’existence de captages, superficiels et souterrains, ou au besoin de maintenir des débits environnementaux dans les cours d’eau) ; et pour d’autres, il est possible de donner la priorité à un autre type de services, tel que la fixation de carbone ou la production de bois, l’élevage, etc. en recherchant la complémentarité des services sur le territoire, grâce à une mosaïque planifiée d’occupation des sols. L’adaptation territoriale (résilience territoriale) doit commencer par certaines zones en situation de changement où les services hydrologiques sont une priorité. Pour cela, il est nécessaire d’établir des critères basés sur des preuves obtenues sur le terrain sur la fonctionnalité hydrologique du territoire. Les critères peuvent inclure le pari pour la propriété publique ou communale des zones territoriales définies comme de « priorité hydrologique ». Nous avons mené des recherches pour l’étude de cas du bassin de la Bidassoa (Navarre) dans cette optique.

7.1. Introduction

Nous vivons une époque d'incertitudes dans tous les domaines et dont nous ne connaissons souvent pas la portée. D'où la nécessité d'approfondir nos connaissances à partir de là où nous nous trouvons, de comment sommes-nous arrivés ici et de que pouvons-nous faire face aux différents scénarios possibles à court, moyen et long terme, sur nos territoires. Cela revient à dire qu'il faut s'accommoder de la complexité des processus sociaux et territoriaux, ainsi que de la flexibilité robuste des décisions, apprendre à gérer le territoire et ses ressources d'un point de vue adaptatif aux changements en cours. Il s'agit de déterminer les transformations nécessaires pour que les sociétés, dans le cas qui nous concerne, dans le domaine pyrénéen, puissent se maintenir dans le temps.

Les zones de priorité hydrologique (EPH, dans ses sigles en espagnol) sont les parties du territoire dont la priorité doit être la garantie de la disponibilité, dans l'espace et le temps, des ressources hydriques nécessaires pour l'avenir, pour une quantité et une qualité adéquates.

Autrement dit, la durabilité est, sans aucun doute, le défi le plus important et le plus difficile auquel les sociétés du XXI^e siècle doivent faire face, entendue comme capacité d'un système social pour s'adapter à l'environnement territorial, prenant en compte toutes les dimensions responsables de la détérioration environnementale. Dans le rapport présenté par l'ONU au sommet de la Terre en 2002, son secrétaire général disait que pour atteindre la durabilité sur la planète, il était nécessaire de l'atteindre en tout lieu et la sustenter dans l'intégration de cinq piliers : l'eau, l'énergie, la santé, l'agriculture et la biodiversité (WEHAB, dans ses sigles en anglais). L'eau est un axe essentiel dans le pari pour la durabilité et c'est l'eau, ainsi que le territoire, l'axe central du projet PIRAGUA.

En nous concentrant sur l'eau, agir en termes d'adaptation implique de connaître la dynamique de l'environnement (territoire) auquel nous devons

nous adapter, cette dynamique étant évolutive dans le temps et soumise à des incertitudes. De fait, si les futurs scénarios climatiques dérivés des modèles de circulation générale englobent, avec des incertitudes, un vaste éventail de possibilités ; cet éventail est bien plus grand lorsque nous faisons référence aux scénarios hydrologiques. C'est ici où le territoire (sol : nature, usages et gestion, couverture végétale) a une influence cruciale, fréquemment marginalisée dans la planification hydrologique. L'importance de la fonction hydrologique du territoire dans la dynamique du fleuve a été mise en évidence dans de nombreuses études. Pour référence, Fohrer et al. (2005) critiquent que les changements dans l'occupation des sols ne sont, en général, pas considérés comme des processus dynamiques dans la modélisation hydrologique, en assumant qu'ils n'ont pas d'effet sur les propriétés des sols ou sur le microclimat. Cette simplification, ajoutent-ils, peut avoir des conséquences significatives sur les résultats de la modélisation. D'après ces auteurs, l'évaluation du risque associé aux changements futurs dans l'occupation des sols quant à leur impact écologique, y compris l'hydrologique, est une question qui n'est pas encore résolue. Pour cela, la mise en œuvre de concepts liés à l'« occupation durable des sols » qui, à leur tour, requièrent une méthodologie capable de quantifier les effets de ces changements dans le régime hydrique des bassins, est nécessaire.

Nous faisons référence à la résilience hydrologique du territoire et de la population qui y est établie. Dans le premier cas, il s'agit d'augmenter la capacité de régulation du bassin grâce à des mesures à l'incidence territoriale, orientées à ordonner une occupation des sols selon un point de vue hydrologique ; et dans le second cas, d'établir des critères fondés sur les changements à réaliser dans la gestion des services de l'eau comme adaptation à des scénarios à venir. C'est-à-dire, une vision BASSIN du fleuve, au-delà de sa vision LIT. Pour la vision BASSIN (figure 7.1), il s'agit de considérer le territoire non seulement comme récepteur d'effets dérivés du changement climatique, mais aussi comme cause supplémentaire ou amortissante (effets hydrologiques de l'aménagement du territoire, qui touchent notamment l'évapotranspiration et la capacité de régulation des différentes parties

du territoire). D'après cette vision, la gestion adaptative du territoire doit aider à atténuer (atténuation) les effets non désirés du changement, concrètement, sur les ressources hydriques.

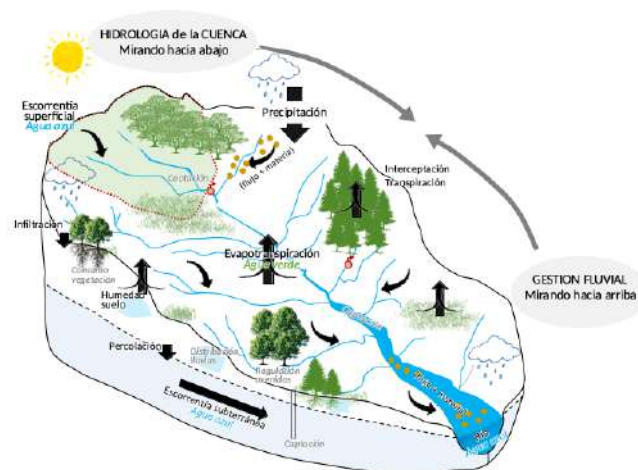


Figure 7.1. Le bassin-versant comme système intégré de processus : vision BASSIN, essentielle pour la gestion adaptative du territoire, au-delà de celle du lit (modifié de Zabaleta et al., 2021). Nous avons signalé en rouge une zone de priorité hydrologique (EPH, dans ses sigles en espagnol) associée à un captage.

(Source : adapté de Zabaleta et al., 2021.)

Évidemment, il faut agir avec des projections d'éventuels scénarios à venir (scenario-based approach), mais celles-ci doivent se baser sur les connaissances des processus actuels et leur dynamique spatio-temporelle (process-based hydrological models), ce qui requiert un plus grand effort dans la recherche du territoire (monitoring). Il s'agit de comprendre le court terme et l'échelle locale dans le contexte du long terme et de l'échelle régionale, en assumant la complexité des décisions.

À mesure que la sensibilisation sur les impacts environnementaux provoqués par nos modes de vie augmente, il est devenu plus habituel de faire référence aux Services écosystémiques (SE), en considérant comme tels les bénéfices que le fonctionnement-même des écosystèmes apportent à la société et qui améliorent la santé, l'économie et la qualité de vie des personnes. La reconnaissance de ces services associe la préservation des écosystèmes avec leur utilisation et leur gestion durables.

Il existe quatre types de SE, en fonction des bénéfices qu'ils offrent : approvisionnement, régulation, soutien et culturels (<https://mma.gob.cl/servicios-ecosistemas/>). L'attribution de bénéfices spécifiques aux écosystèmes d'un même territoire n'est pas aisée, car ils peuvent se chevaucher, voire même se compenser (trade-offs, par exemple, la fixation de carbone réduit la disponibilité en eau), et c'est pourquoi il faudrait établir des priorités de bénéfices pour les différentes zones du territoire, ce qui nous mène à une mosaïque de couvertures-usages dans la gestion adaptative du territoire (territorialisation de l'adaptation).

Malgré la notoriété que les SE acquièrent dans les stratégies de récupération environnementale, les bénéfices liés à l'eau n'y sont pas toujours bien représentés. En ce sens, une référence incontournable est Brauman et al. (2007), qui ont mis en valeur les Services hydrologiques (SH) offerts par les écosystèmes et catégorisé les bénéfices dérivés des processus écohydrologiques en quatre domaines : quantité, qualité, localisation et moment. Portela et al. (2019) mettent l'accent sur la valeur comme Service écosystémique de l'approvisionnement en eau.

Dans la ligne de ce qui a été commenté jusqu'alors, ce chapitre vise à diffuser la nécessité de changer de paradigme dans la façon de comprendre l'eau et le territoire parmi les populations du milieu pyrénéen. Le changement climatique en cours, ainsi que le réchauffement global inhérent, a des répercussions sur le cycle de l'eau à l'échelle du bassin (avec différentes conséquences dans l'espace et le temps, en fonction des zones tout le long des Pyrénées) et, dans une plus grande mesure, sur des processus-clés (l'évapotranspiration qui est directement liée à l'aménagement de l'occupation des sols, dépendant déjà des décisions qui sont actuellement prises).

Le changement de paradigme est nécessaire pour progresser vers une gestion adaptative du territoire face à des scénarios à venir. Plus concrètement, nous nous intéressons ici aux zones de priorité hydrologique (EPH), les parties

du territoire dont la priorité doit être la garantie de la disponibilité, dans l'espace et le temps, des ressources hydriques nécessaires pour l'avenir, en quantité et en qualité. Autant dire que, comme cas concret essentiel, les zones de captage d'eaux pour l'approvisionnement, actuel ou futur, quelles que soient la nature et l'échelle du système de captage considéré, doivent immédiatement être considérées dans la planification territoriale comme zones stratégiques de priorité hydrologique, comprenant aussi les bassins d'alimentation, superficiels et/ou souterrains, des captages.

Box 7.1 : La fonctionnalité hydrologique des sols ou le système plante-sol-eau.

BOX Le sol continue à être le « patient oublié » de la planification territoriale et de l'hydrologie, bien que ses valeurs écosystémiques et ses fonctions d'approvisionnement, de régulation et hydrologique (FAO, 2015) soient justement reconnues. Toutefois, en Europe, le sol n'a pas encore obtenu la considération donnée à l'eau par la directive-cadre de l'eau (directive 2000/60/EC). Les essais à partir de la stratégie thématique du sol (COM (2002) 179 final), qui ont mené à une proposition de directive (COM (2006) 232 final), n'ont jamais atteint cet objectif, la brèche existante entre ces deux matrices élémentaires de la durabilité étant trop grande à l'heure actuelle, en termes de législation.

Le sol possède une fonctionnalité hydrologique qui détermine la distribution des précipitations en eau bleue (ruissellement superficiel, souterrain) et en eau verte (évapotranspiration), la variation temporelle de l'humidité du sol agissant comme service de régulation de cette distribution. L'humidité conditionne le développement de la végétation que le sol supporte et, celle-ci conditionne l'humidité du sol, une relation complexe et changeante sol-plante-eau s'établissant et pouvant être très différente d'un endroit à un autre, en fonction de ses caractéristiques. Cette relation est un facteur-clé des flux d'eau et d'énergie entre le sol et l'atmosphère (Asbjornsen et al., 2011). En tout cas, l'hydrologie du sol est un facteur-clé dans la gestion durable du territoire, de façon à ce que les changements planifiés dans l'occupation des sols et leur gestion, doivent considérer les éventuels effets dans les services que le sol offre et agir en conséquence, en garantissant la disponibilité temporelle en eau dans les zones considérées de priorité hydrologique.

De fait, la propriété la plus importante du sol, qui conditionne sa fonctionnalité hydrologique est la capacité de rétention de l'eau. Cette propriété est intrinsèque au sol (texture, structure, matière organique, etc.) bien qu'elle puisse être altérée par la gestion de son occupation. Cependant, l'humidité du sol est un processus dynamique affecté par des conditions externes et internes du milieu. De fait, cette rétention se présente comme un Service écosystémique de régulation (Burkhard et al., 2019) dont dépendent d'autres services terrestres plus usuellement reconnus en tant que tels (biodiversité, production de biomasse, fixation de carbone, régulation de nutriments, entre autres). Keys et al. (2016) considèrent le recyclage de l'humidité du sol comme un Service écosystémique, analysant l'évapotranspiration dans une partie du bassin comme source d'humidité atmosphérique génératrice de précipitations à un autre endroit du bassin, dans le sens du vent, bien que l'importance de cette rétro-alimentation soit à prendre en compte, notamment pour les grands bassins et non pour les bassins d'une étendue réduite, comme de nombreux bassins pyrénéens en amont.

Dans un rapport récent (EEA, 2017), l'Agence européenne de l'environnement indique que le contenu en humidité des sols européens dans des régions méditerranéennes a diminué de façon notable depuis les années 50 à la suite du réchauffement global et de changements dans le régime des précipitations, alors qu'il a augmenté dans les régions du nord de l'Europe. Les projections pour les décennies à venir montrent une consolidation de ces tendances, avec une baisse encore plus significative au cours des mois d'été dans le milieu méditerranéen. Au vu de ces tendances, qui touchent particulièrement les Pyrénées méditerranéennes, il est d'autant plus important, si cela est possible, d'opter pour une gestion adaptative du sol/végétation favorisant l'humidité du sol pendant la saison estivale, tout en garantissant la disponibilité temporelle de l'eau bleue (eau qui coule) dans les zones de priorité hydrologique.

Fin 2020, l'Observatoire pyrénéen du changement climatique (OPCC) a présenté l'Alliance des sols des Pyrénées (ASPIr) comme un « réseau d'entités et de personnes pour la coopération transfrontalière dans le domaine des sols » et un « instrument très utile pour pouvoir harmoniser des politiques et des actions dans les Pyrénées entre les trois états ». L'objectif principal est « la conservation du sol et le maintien ou l'amélioration de sa qualité, par l'application de pratiques de gestion durable », et parmi les objectifs particuliers, et pour avoir une base de données, connaître les réserves et le potentiel de stockage de carbone, et éviter des processus d'érosion, se trouve « la protection des sols qui réalisent une fonction de recharge des aquifères, comme mesure d'adaptation au changement climatique ».

Cette approche, bien que nécessaire pour la reconnaissance implicite des fonctions du sol est, néanmoins, assez limitée en ce qui concerne la fonction hydrologique du sol, car elle la réduit à la recharge des aquifères (et à l'effet régulateur face aux inondations, également cité) et ne laisse pas entrevoir le rapport sol-plante-eau, qui conditionne la distribution des précipitations et, de fait, l'évapotranspiration réelle et sa saisonnalité. Il serait nécessaire que dans son développement, l'Alliance incorpore ces aspects, essentiels aux politiques territoriales d'adaptation, générant des connaissances et de la sensibilisation, notamment dans l'axe 1 d'action : Action pour le climat.

7.2. Défis de la gestion du territoire face au changement global.

Le changement climatique, avec ses incertitudes inhérentes sur les différents scénarios spatiaux et temporels, a des impacts notables sur le cycle de l'eau (amplifie ses processus extrêmes) qui altèrent la quantité, la qualité et la distribution des ressources et, de fait, leur disponibilité spatiale (où) et temporelle (quand). Le changement climatique comme générateur d'impacts sur les systèmes hydriques n'est pas discuté et sa considération, plus ou moins scientifiquement argumentée, est habituelle dans la planification hydrologique (et dans les modélisations sur lesquelles sont basés les scénarios hydrologiques futurs possibles), mais pas dans la planification territoriale.

Il est essentiel de connaître et d'explorer les possibilités d'adaptation à partir du territoire-même en considérant la fonction hydrologique du sol et les nécessités hydriques des différentes couvertures végétales.

Il y a d'ailleurs un autre changement à considérer, celui de la couverture/occupation des sols (y compris l'éventuel changement de leur gestion), qui dépend déjà directement des décisions actuelles des administrations publiques à différentes échelles territoriales (notamment par l'aménagement du territoire, d'importantes politiques forestières dans des zones de montagne et agricoles). Les impacts découlant de ce changement ne sont, en général, pas considérés dans la planification hydrologique. Autrement dit, la planification hydrologique ne considère pas dans sa juste mesure la fonctionnalité hydrologique des différentes parties du territoire.

S'il est vrai qu'il peut être assez difficile de séparer les effets hydrologiques des deux changements (climat et occupation des sols), bien plus à l'échelle temporelle, il n'en est pas moins certain que les deux doivent être pris en compte de façon adéquate et que les décisions qui sont prises doivent être éclairées par les preuves issues de la recherche basée sur le contrôle temporel des processus hydrologiques à l'échelle du bassin. La séparation des effets est très importante car, en plus de permettre de projeter des scénarios hydrologiques futurs (à l'échelle du bassin), en fonction des scénarios climatiques prévus, elle

permet également d'établir, à partir de la situation présente, des mesures d'impact territorial, par le biais de la planification spatiale et de la gestion de l'occupation des sols, avec une vision stratégique de l'adaptation.

De fait, au moins en théorie, le principal objectif de la planification hydrologique devrait être la planification des précipitations (P) et pas autant la planification des débits circulants (Q), superficiels et/ou souterrains. Il est clair que le régime spatio-temporel des précipitations (pluie, neige) échappe au domaine de la planification, car il s'impose à celle-ci. C'est pour cela que la considération du troisième terme essentiel dans le bilan hydrique du bassin, l'évapotranspiration (ET), est si importante dans la planification.

Les débits circulants (Q) étant la partie non évapotranspirée des précipitations au cours d'une période de temps ($Q = P - ET$) et, d'autant plus, en prenant en compte les impacts, actuels et futurs, dus au changement climatique (notamment par le réchauffement global), il est logique que la planification hydrologique s'intéresse également à la planification de l'ET via la considération de la planification territoriale elle-même (couverture et occupations des sols).

C'est-à-dire, si dans un avenir proche, les P d'un territoire se maintiennent (ce serait plus grave si la tendance était décroissante), mais si son ET augmentait, les débits (Q) disponibles diminueraient. Il n'est pas logique que la planification hydrologique se limite à planifier uniquement la partie finale de la séquence du cycle hydrologique, encore moins lors de grands changements environnementaux avec des résultats très incertains. Il faut garantir la disponibilité spatiale et temporelle des ressources en eau pour faire en sorte que les territoires soient résilients, comme base physique pour des sociétés résilientes. Cela suppose la réduction de l'augmentation attendue de l'ET par de nouvelles orientations, notamment dans la politique forestière, au moins, dans les zones de priorité hydrologique (EPH).

Autrement dit, la planification territoriale devrait faire partie de la planification hydrologique et, de fait, l'une et l'autre devraient être considérées comme des mesures élémentaires d'adaptation au changement climatique, à partir du territoire

lui-même. De fait, la première étape vers l'adaptation devrait être : planifier la réduction de la vulnérabilité aux changements. Pour cela, il est nécessaire de déterminer et de séparer les causes, climatiques et non climatiques, qui conditionnent cette vulnérabilité, car ces dernières sont les seules pouvant être abordées à partir de politiques territoriales.

L'évapotranspiration (ET)

Malgré l'intérêt croissant donné aux précipitations-températures et aux débits dans la planification hydrologique, l'évapotranspiration est l'un des termes qui conditionne le plus le bilan hydrique. Tout comme nous pouvons dire que le sol est le terme oublié de la planification hydrologique, l'évapotranspiration est le terme oublié du bilan hydrique.

L'évapotranspiration est l'un des termes élémentaires du bilan hydrique et, sans aucun doute, le plus difficile à mesurer. En général, il s'agit du processus global de transfert de l'eau à l'atmosphère à partir d'un sol et de sa couverture végétale. Concrètement, c'est le processus combiné de l'évaporation à partir de surfaces liquides, du sol et/ou de la partie aérienne de la végétation, et de la transpiration de l'eau des tissus des plantes. Le processus varie en fonction de la radiation, la température, l'humidité atmosphérique et de la vitesse du vent. Les deux premières (terme énergétique) sont liées à l'énergie nécessaire pour transformer le liquide en vapeur. Les deux dernières (terme aérodynamique), sont liées à la capacité de l'air pour recevoir la vapeur d'eau et au renouvellement de l'air (FAO, 1998).

En hydrologie, il est habituel de faire référence à l'évapotranspiration réelle (ETR, mm) comme la quantité d'eau réellement évapotranspirée à partir d'un sol avec végétation, en un temps donné, en fonction de la disponibilité en eau (humidité), à la différence de l'évapotranspiration potentielle (ETP, mm) qui serait la quantité d'eau évapotranspirée s'il n'y avait aucune limitation d'humidité dans le sol. D'où l'importance de l'humidité du sol comme facteur conditionnant la

disponibilité de l'eau nécessaire à la croissance de la végétation.

Dans la pratique, la planification hydrologique assume assez fréquemment que l'ETR dépend uniquement des conditions externes, celles liées au climat, en sous-estimant le fait que cela dépend également, dans une large mesure, des conditions d'occupation du territoire (humidité des sols, type et état-âge de la végétation, structure de la couverture végétale, etc.). De plus, il est fréquent de parler de l'ETR (mm) en termes annuels lorsqu'en réalité, son évolution saisonnière (la vulnérabilité hydrique à venir a une composante clairement saisonnière) est bien plus importante. La saisonnalité est une question qui n'est pas reflétée dans le bilan hydrique annuel ou multi-annuel.

Dans de nombreuses zones des Pyrénées, les forêts occupent, en termes généraux, des surfaces importantes des bassins-versants et c'est pourquoi il est nécessaire de regarder les preuves collectées dans la littérature sur l'hydrologie forestière. Les études scientifiques du monde entier ont clairement établi que l'augmentation de la présence des forêts implique une diminution des ressources hydriques (eau bleue, celle qui coule) et vice-versa (Bosch et Hewlett, 1982 ; Zhang et al., 2001), bien qu'il soit également nécessaire de considérer l'échelle spatiale du bassin, car dans des bassins très étendus, le rapport peut changer si une partie de l'eau évapotranspirée retourne au bassin sous forme de précipitations (Ellison et al., 2012). À quelques exceptions près, ce rapport englobe un vaste éventail de climats et d'espèces végétales. Cela est dû au fait que les arbres évapotranspirent davantage d'eau (eau verte) que d'autres types de végétation plus basse.

En tout cas, les forêts sont de grands consommateurs d'eau (ET). L'effet que cela peut provoquer sur le bilan hydrique du bassin dépend des conditions limitantes dans chaque cas. Ainsi, dans des bassins où la limitation à l'ET est énergétique, c'est-à-dire que les précipitations (P) sont plus importantes que l'ETP, l'ETR est très proche de l'ETP (à l'échelle annuelle, cela dépendrait de l'évolution saisonnière des P et de l'ETP) ; ce serait le cas des zones humides. Cependant, pour des climats secs, où la limitation à l'ET est la disponibilité en eau, l'ETR peut

représenter une partie très importante des précipitations annuelles, ayant une incidence négative sur les débits (eau bleue). Évidemment, en prenant en considération le type, l'âge, l'état et la densité de la végétation (Ellison et al., 2017).

La figure 7.2 illustre les implications pratiques des deux situations dans les extrémités cantabrique et méditerranéenne des Pyrénées. D'une part, les données annuelles de P (mm), d'ETR (mm) et de débit (Q, mm, enregistrées dans des stations de jaugeage), dans cinq bassins de Gipuzkoa, couvrant presque tout le territoire (1 980 km²), pour la période 2001-2019, sont représentées. D'autre part, pour les mêmes paramètres, les données annuelles du bassin de l'Avic (52 km²) dans la chaîne de montagnes de Prades (Tarragone), pour la période 1986-2003 sont représentées. Ces données ont été prises de Bellot et al. (2004) et représentées de la même façon que celles de Gipuzkoa, afin de faciliter leur comparaison (nous avons pris le bassin de Prades comme référence de comportement hydrologique d'un bassin forestier pour un climat méditerranéen, du fait de la disponibilité de données pour une vaste période d'années, bien qu'au sens strict, il sorte du domaine territorial des Pyrénées).

En ce qui concerne les précipitations annuelles, il est évident que Gipuzkoa se situe dans une région humide, avec une vaste fourchette de valeurs, atteignant des valeurs supérieures à 3 000 mm dans la limite avec la Navarre (bassin de la Bidasoa), alors que dans le bassin de l'Avic, les précipitations ne dépassent habituellement pas les 750 mm. En ce qui concerne la couverture végétale, dans la région de l'Avic, la forêt de chênes verts couvre presque tout le bassin, alors que dans la région de Gipuzkoa, les pâturages couvrent 23 %, la forêt est native (chênes et hêtres) à 31 % et exotique (plantations à croissance rapide, avec des espèces de pins) à 41 % (Zabaleta et al., 2018). Dans les deux cas, les sols sont d'une épaisseur réduite, inférieure à 1,5 m en général. La géologie correspond largement à des formations à la perméabilité faible ou très faible.

En observant la figure, il est évident que les deux cas sont liés en termes de limites auparavant commentées pour l'ET. Dans la région de

Gipuzkoa, la limitation est énergétique, et non de disponibilité en eau. Le rapport P-Q est très bon, indiquant qu'une augmentation (diminution) des précipitations annuelles implique clairement une augmentation (diminution) du débit annuel (Q), alors que les valeurs annuelles d'ETR varient relativement peu (500-800 mm, avec une valeur moyenne de 670 mm), indépendamment des précipitations. Nous pourrions dire que, d'une façon approximative (sans descendre à l'échelle du bassin et sans considérer la saisonnalité), l'ETR est proche de l'ETP sur le territoire (bien que nous n'ayons pas observé de tendance à l'augmentation de l'ETR au cours de ces 20 dernières années. Il faudrait considérer à l'avenir l'augmentation espérée du fait de la hausse des températures). En exprimant ces rapports en termes de pourcentages, nous observons qu'une diminution des précipitations annuelles suppose une diminution du débit (Q) et l'augmentation correspondante de l'ETR (une baisse de 200 mm dans les précipitations annuelles suppose une baisse de 3,4 dans le pourcentage de Q et la même hausse de l'ETR).

Néanmoins, le cas de l'Avic est typique d'un

bassin où la limite à l'ET est la disponibilité en eau. Ainsi, le rapport le plus évident et hautement significatif est P-ETR, bien que le rapport P-Q soit aussi à prendre en compte, les deux positifs. Dans ce cas, une augmentation (diminution) des précipitations annuelles implique clairement une augmentation (diminution) de l'ETR annuelle, processus qui prévaut sur celui de la génération de flux (Q) qui est favorisé à mesure que les précipitations (P) augmentent. Malgré l'augmentation de l'ETR avec les précipitations, nous n'arrivons pas à atteindre l'ETP que les auteurs (Bellot et al., 2004) établissent dans la fourchette approximative de 1 000-1 100 mm. En termes de pourcentages, la diminution des précipitations annuelles suppose une augmentation de l'ETR et la diminution conséquente de Q (une baisse de 200 mm des précipitations annuelles suppose une augmentation de 3,6 dans le pourcentage d'ETR et la même baisse de Q, c'est-à-dire, des tendances similaires au cas précédent).

Comme nous l'avons vu auparavant, ces deux situations correspondent aux extrémités orientale et occidentale des Pyrénées, caractérisées

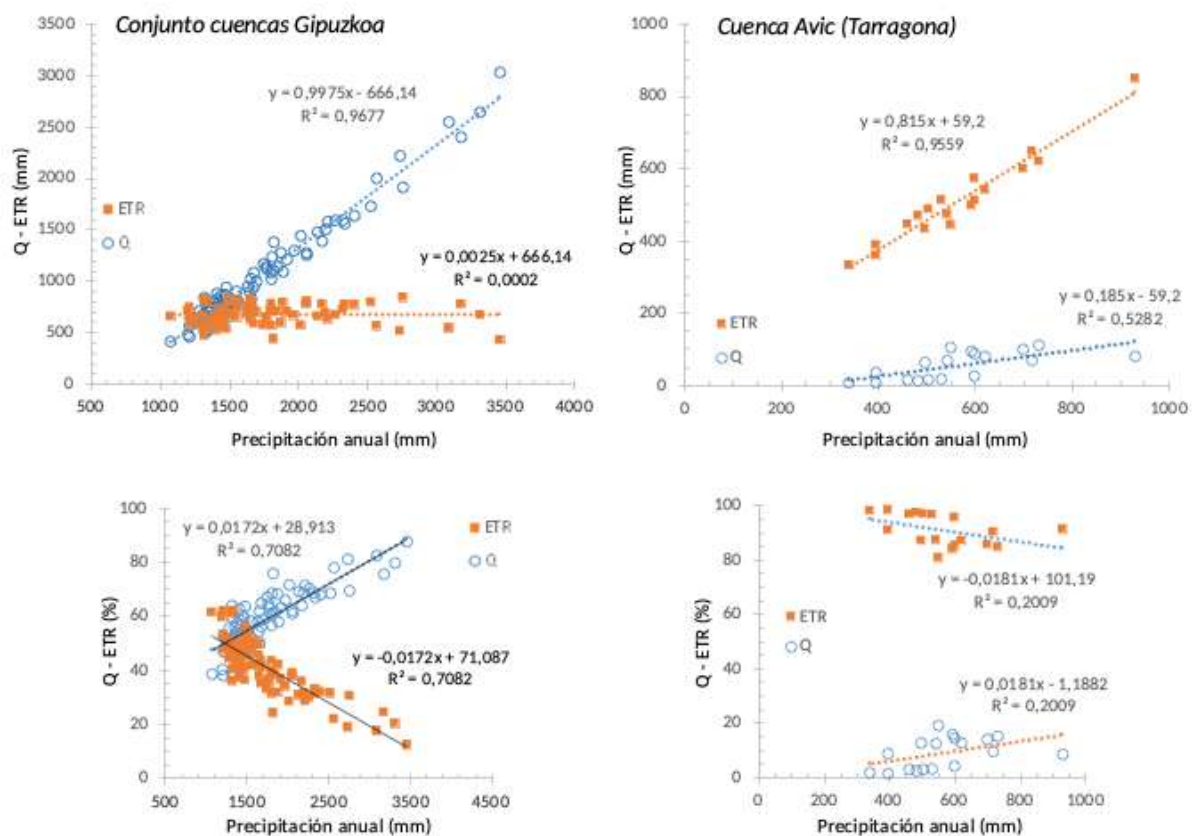


Figure 7.2. Rapport entre les valeurs annuelles des précipitations (P), de l'évapotranspiration réelle (ETR) et du débit (Q) dans les bassins de l'Avic (droite) et de Gipuzkoa (gauche).

(Source : modifié de Bellot et al., 2004, et élaboration propre.)

Box 7.2 : Micro-étude de cas des sources des rivières Llobregat et Ter (Pyrénées catalanes)

Gallart et al. (2011) ont mené une étude de cas sur les sources de ces deux rivières des Pyrénées catalanes (Barcelone, Gérone). Le climat est méditerranéen, avec des pluies au printemps et à l'automne, des hivers secs ; les épisodes neigeux sont rares et se limitent à la zone des sommets. La végétation native est une forêt caducifoliée de chênes, avec des arbustes pérennes, bien que dans les zones les plus hautes dominent les pins et les hêtres, ainsi que des prairies d'altitude, favorisées par l'activité de pâturage. Tout comme dans d'autres zones pyrénéennes, la colonisation humaine a modifié de façon notable le paysage original : la plupart des zones basses et douces ont été utilisées pour l'agriculture, les terres hautes ont été déboisées pour accroître les zones de pâturage et les forêts ont été utilisées de façon intense afin d'obtenir du bois et du combustible. L'abandon de toutes ces activités a eu lieu dans le bassin après le milieu du XXe siècle.

Les registres historiques des débits ont été analysés pour la période 1940-2000 et comparés avec les changements dans le forçage climatique et l'occupation des sols. Les registres des débits ont montré une variabilité interannuelle élevée, avec une succession de périodes décennales humides et sèches, ce qui a rendu difficile la détection de tendances sur le long terme dans la plupart des stations de jaugeage. La comparaison des débits mesurés avec ceux simulés par des modèles hydrologiques a montré certaines divergences claires. Les tendances des débits mesurés pour la période d'étude ont été négatives, alors que ceux expliqués par le forçage climatique n'avaient pratiquement pas de tendance. Les différences trouvées entre les débits observés et les débits simulés ont montré des tendances négatives qui sont attribuées aux changements d'occupation des sols.

En effet, les montagnes moyennes des bassins étudiés avaient souffert une importante augmentation de la couverture forestière au cours des dernières décennies. Le principal changement observé a été dans la couverture de la forêt, qui est devenue plus dense, ainsi que dans le changement d'occupation des sols de l'agriculture au pâturage. L'effet prévisible de ce changement est une augmentation de l'évapotranspiration par l'augmentation de la couverture forestière, qui n'a pas été prise en compte dans la modélisation. La conclusion est que, bien que les débits aient montré une grande variabilité décennale et des tendances significatives, forcées par le climat durant certaines périodes à l'échelle décennale, les débits modélisés pour toute la période 1940-2000 n'ont pas montré de tendances significatives. Au contraire, les débits réels montraient une diminution annuelle d'environ 0,25 % des ressources moyennes annuelles au cours de cette période de temps, du fait de l'augmentation de la couverture forestière.

Précisément sur l'un des bassins étudiés (Cardener, tributaire du Llobregat), Gallart et al. (2013) proposent des critères de gestion du bassin dans le but de garantir les ressources en eau. Ils affirment qu'il est nécessaire de développer une nouvelle génération de plans de gestion du bassin en prenant en compte de façon adéquate les interactions entre les différents types de couverture végétale et les processus hydrologiques. Dans le cas du bassin du Cardener (308 km²), les ressources ont connu une baisse significative de 22 % entre 1950 et 2000, pourcentage similaire à celui d'une augmentation de la couverture forestière qui a accompagné l'abandon rural. Bien qu'au cours de cette période les données climatiques n'aient pas montré de tendances claires, les prévisions indiquent une hausse de la température et une certaine diminution des précipitations, surtout en été, ce qui favorisera l'expansion de la forêt en altitude et le remplacement d'espèces à des altitudes basses. De fait, une diminution perceptible des ressources hydriques est prévue, notamment dans les zones où l'ET est limitée par l'énergie disponible.

Ainsi, face à l'alternative de régénération naturelle des champs abandonnés, « la gestion forestière du bassin devrait avoir pour objectif la diminution de la consommation naturelle d'eau, afin de compenser à l'avenir la réduction attendue des ressources hydriques » (ce bassin est l'une des sources d'eau de la ville de Barcelone). Sur cette même ligne, les auteurs proposent de « récupérer des scénarios d'occupation et de couverture des sols du passé récent » : changement permanent de certaines zones de forêt de pâturage à culture herbacée, et, d'autre part, réduction de la durée du cycle de taille des exploitations forestières. D'après leurs estimations, la conversion de forêt en pâturage représenterait, avec le climat actuel, une augmentation d'environ 0,13 hm³ annuels par km² dans les parties hautes du bassin et d'environ 0,08 hm³ dans les parties basses.

Ils concluent en affirmant que les actions proposées ne seraient pas rentables par elles-mêmes, mais que leur viabilité économique « nécessiterait des compensations pour l'augmentation des apports en eau dans le bassin ou le paiement pour des Services écosystémiques ». Néanmoins, ces actions « devraient être évitées dans les zones du bassin sujettes à des processus érosifs et à des glissements de terrain », où, évidemment, la priorité d'action doit être autre. Ce schéma d'actions, avec des priorités spatiales différentes, entre dans l'idée de mosaïque d'occupation des sols que ce chapitre propose.

par des climats méditerranéen et atlantique, respectivement. Il est logique de penser que le long de la cordillère les situations peuvent être très diverses, non seulement du fait des conditions climatiques du lieu (annuelles et saisonnières), mais aussi des conditions propres du bassin en question (altitude qui affecte la présence de la couche neigeuse, relief, géologie et, bien sûr, couverture/occupation des sols). C'est pourquoi, il est important de connaître les rapports entre les termes essentiels du bilan hydrique (P , ETR , Q) pour la série de données disponibles, comme diagnostic de la situation et point de départ pour estimer les scénarios hydrologiques futurs possibles, dérivés du changement climatique, et pour établir dès lors les mesures territoriales adéquates d'adaptation, qui vont passer par la gestion adaptative du territoire, notamment de l'occupation/couverture des sols.

Pour cela, il est nécessaire de considérer la séparation des effets que le changement climatique, par lui-même, et le changement de l'occupation des sols, peuvent avoir sur le bassin. Le changement du climat affecte surtout les précipitations (P) et l'évapotranspiration potentielle (ETP), alors que le changement de l'occupation des sols affecte surtout l'évapotranspiration réelle (ETR), avec différentes situations saisonnières selon la localisation spatiale du bassin. Ainsi, le rapport $(P-ETR)/ETP$ indique l'efficacité du système (bassin) dans l'usage

de l'eau disponible (excédent d'eau, P_{ex}) et le rapport $(ETP-ETR)/ETP$ indique l'efficacité de l'utilisation de l'énergie (excédent d'énergie, E_{ex}). C'est ce que Tomer et Schilling (2009) proposent comme approche conceptuelle de déplacement écohydrologique associé au changement dans le climat et l'occupation des sols. C'est l'intérêt de centrer l'étude de cette efficacité sur le long terme, qui fait que les auteurs qualifient leur approche d'« écohydrologique ».

La figure 7.3 provient de ces auteurs, modifiée pour centrer la question sur les politiques forestières (forêts, pâturages) dans des zones de montagne. Bien que les effets du changement climatique ne se limitent pas à ceux recueillis dans la figure (des changements peuvent avoir lieu en sens contraire des P et de l' ETP), nous pouvons admettre que ce changement comporte une augmentation de l' ETP , en raison d'une hausse de la température, indépendamment de ce qui se passe avec les P . Il s'agit, du point de vue de l'adaptation, de compenser l'éventuelle diminution climatique de la disponibilité en eau dans des zones hydrologiquement sensibles du territoire par des mesures à l'incidence territoriale, qui doivent sans aucun doute passer par des changements dans les utilisations et la gestion de la végétation, tendant à réduire l' ETR . Si l'on ne tient pas compte de cela, nous pourrions arriver à une gestion du territoire étrangère à l'adaptation, dont les conséquences

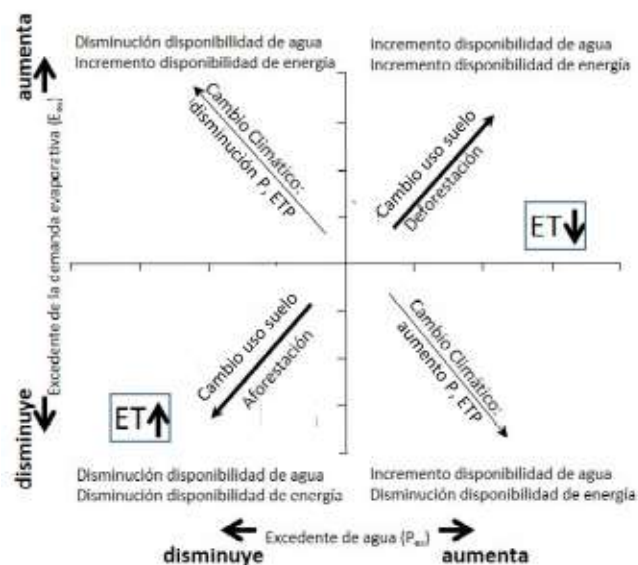


Figure 7.3. Approche conceptuelle de déplacement associée à des changements dans le climat et l'occupation des sols.

(Modifié de Tomer et Schilling, 2009).

Box 7.3 : Micro-étude de cas des bassins de Gipuzkoa (gradient de précipitations)

Zabaleta et al. (2018) ont mené une étude dans le but d'établir le rapport entre différentes couvertures du sol (forêts, native et exotique, et pâturages) et les services hydrologiques, en utilisant des indices hydrologiques obtenus, à l'échelle annuelle et saisonnière, à partir des séries de débits obtenues dans des stations de jaugeage. L'étude a couvert le territoire de Gipuzkoa (extrémité occidentale des Pyrénées), avec un fort gradient de précipitations d'ouest en est (de 900 à 2 600 mm/an) et des températures tempérées (moyenne annuelle de 13 °C ; 8-10 °C en hiver ; 18-20 °C en été). La fourchette d'altitudes va de la côte à 1 554 m. Les pentes sont assez fortes, avec des valeurs moyennes de 40 à 50 % sur la plupart du territoire. La zone d'étude est diverse d'un point de vue lithologique, avec des matériaux du paléozoïque au quaternaire, la plupart sont d'une perméabilité basse ou très basse.

L'épaisseur moyenne du sol est de 1 m, mais très variable dans l'espace. Le cambisol, à la texture franche, prédomine. La couverture arborescente atteint 63 % de la région de Gipuzkoa ; la forêt caducifoliée originale (hêtre, chêne) occupe une étendue réduite (28 %) et entre en compétition avec des plantations d'espèces exotiques à la croissance rapide (notamment, *Pinus radiata*). Ces espèces ont été introduites au cours de la deuxième moitié du XXe siècle, dans un pari pour le boisement comprenant également l'abandon de pâturages et leur remplacement par ces espèces qui ont occupé de 40 à 50 % de l'espace potentiel de la chênaie. L'expansion de ces plantations a supposé des changements dans le paysage, mais aussi dans la gestion-même des masses arborées, qui ont affecté le cycle hydrologique du bassin comme l'exportation de sédiments.

20 bassins répartis dans la région de Gipuzkoa ont été sélectionnés, de différentes tailles et pourcentages, pour les principaux usages considérés : végétation herbacée, forêt native, plantations exotiques et autres. Tous les bassins comptent sur un contrôle des débits et des précipitations sur le réseau hydrométéorologique du Conseil provincial de Gipuzkoa (<https://www.gipuzkoa.eus/eu/web/obrahidraulikoak/>). Nous considérons 10 années hydrologiques (2000-2011), avec des données quotidiennes de débit.

Les résultats de l'étude indiquent que la grande influence que le régime de précipitations a sur les débits (moyens, hauts et bas) masque les effets hydrologiques des différents types de couverture végétale. Cependant, ces effets existent et leur considération est nécessaire dans la planification hydrologique et forestière, d'autant plus sur un territoire (golfe de Bizkaia) situé dans une zone de transition climatique et au fort gradient spatial de précipitations, qui peut dès lors servir pour prévoir des effets de changements futurs dans les précipitations.

Ainsi, l'interaction entre les deux principaux facteurs de changement (précipitations et couverture végétale) permet d'établir qu'une plus grande présence de forêt diminue les apports annuels (service hydrologique d'approvisionnement), la diminution étant plus évidente lorsque la présence de plantations exotiques est plus grande et lorsque les précipitations sont plus importantes. D'autre part, le potentiel de la forêt pour réduire les débits les plus élevés est faible, bien qu'il soit plus grand pour des bassins aux précipitations plus faibles et à la présence de plantations exotiques plus grande. Au contraire, dans des bassins aux précipitations plus importantes, la forêt native ou les pâturages servent mieux la réduction des débits les plus élevés. En ce qui concerne les débits faibles, les plantations exotiques ont un léger effet positif sur les bassins aux faibles précipitations, alors qu'avec des précipitations élevées, les débits faibles, notamment en hiver et au printemps, sont favorisés par la plus grande présence de forêt native et de pâturages.

Cette étude met en évidence que les services hydrologiques (en termes de débit) sont conditionnés par les changements dans l'occupation des sols. Plus important encore, ils sont très dépendants des précipitations annuelles. De fait, garantir le service d'approvisionnement de la ressource implique de mettre l'accent sur les mesures territoriales à prendre, à l'échelle du bassin, en prenant en compte les précipitations actuelles et les prévisions, en recherchant la combinaison d'usages (mosaïque) qui peuvent mieux garantir les services hydrologiques.

s'ajoutent à celles du changement climatique, favorisant des diminutions inacceptables à venir de la disponibilité en eau dans ces zones.

C'est là que l'hydrologie forestière, en tant que domaine de connaissance de la relation forêt-eau, prend tout son sens. D'après Calder (2007), l'une des principales références dans ce domaine, bien que l'hydrologie forestière ait connu des progrès significatifs ces dernières années, les connaissances scientifiques ne sont pas toujours parvenues à la maîtrise de la politique forestière. Il ajoute que les programmes forestiers visent, souvent et avant tout, les aspects liés à la biodiversité, à la séquestration du carbone, à la production de bois, aux bénéfices récréatifs, etc. mais ne tiennent pas toujours compte des effets sur les ressources en eau. L'auteur souligne le fait que l'opinion public, à propos des avantages fournis par les forêts, n'est pas toujours en accord avec les preuves scientifiques, mettant l'accent sur la fonction hydrologique des forêts.

La délimitation des zones de priorité hydrologique (EPH, dans ses sigles en espagnol) comme domaines dont la priorité est celle d'assurer la disponibilité des ressources hydriques en quantité (combien), qualité (comment), lieu (où) et moment (quand) est la clé pour l'adaptation à partir des Services écosystémiques de régulation hydrologique.

Évidemment, les mesures concrètes doivent être intrinsèques au bassin considéré car, comme nous l'avons commenté auparavant, les conditions de départ, tant les externes au territoire (climat) que les internes (notamment, végétation) peuvent être très différentes d'une région à une autre des Pyrénées, d'où la nécessité de compter sur des diagnostics adéquats comme point de départ. La complexité associée à l'échelle spatio-temporelle des processus écohydrologiques et l'incertitude associée à l'évolution des mesures à prendre peuvent uniquement être gérées depuis le territoire lui-même, avec ses acteurs et ses connaissances intégrées pour l'adaptation.

7.2.1 Stratégies d'adaptation

Mettre en valeur les ressources en eau d'un territoire (bassin) et assurer leur disponibilité spatio-temporelle suppose d'agir directement sur le territoire (couverture, occupation et gestion des sols), notamment dans les zones où les processus hydrologiques conditionnent cette disponibilité. Nous faisons référence à la gestion adaptative du territoire selon une approche hydro-écosystémique comme stratégie-clé pour les mesures d'adaptation au changement climatique.

Nous proposons d'analyser l'adaptation au changement climatique d'un point de vue hydrologique, en considérant les Services écosystémiques de régulation hydrologique.

Le schéma de la figure 7.4 indique les aspects commentés dans ce chapitre. Il s'agit d'une feuille de route pour l'adaptation au changement climatique d'un point de vue hydrologique. Le point de départ est l'eau en tant qu'axe de l'adaptation, et la gestion du territoire en tant que cause supplémentaire ou amortissement contre les effets du changement, selon la façon dont sa fonctionnalité hydrologique est gérée.

Au cœur de ce défi se trouve la prise en compte des Services hydrologiques (SH) comme partie fondamentale de chacun des Services écosystémiques (SE) : approvisionnement, régulation, soutien aux écosystèmes et culturel (lié à la perception du paysage). Mettre l'accent sur les Services hydrologiques du territoire implique nécessairement de mettre en valeur le sol comme distributeur des précipitations (P). Le sol est le moyen de liaison entre le climat et le territoire, et sa capacité de retenir l'eau (humidité du sol) conditionne les termes élémentaires du bilan hydrique : débit (Q, eau bleue) et évapotranspiration (ET, eau verte). Ces termes se limitent mutuellement, dans les P actuelles ou futures, de telle façon que tout deux doivent faire partie de la planification hydrologique.

Néanmoins, planifier l'ET, c'est planifier le sol du territoire, fondamentalement en ce qui concerne les différentes façons de l'occuper et de le gérer. La viabilité économique des ressources du

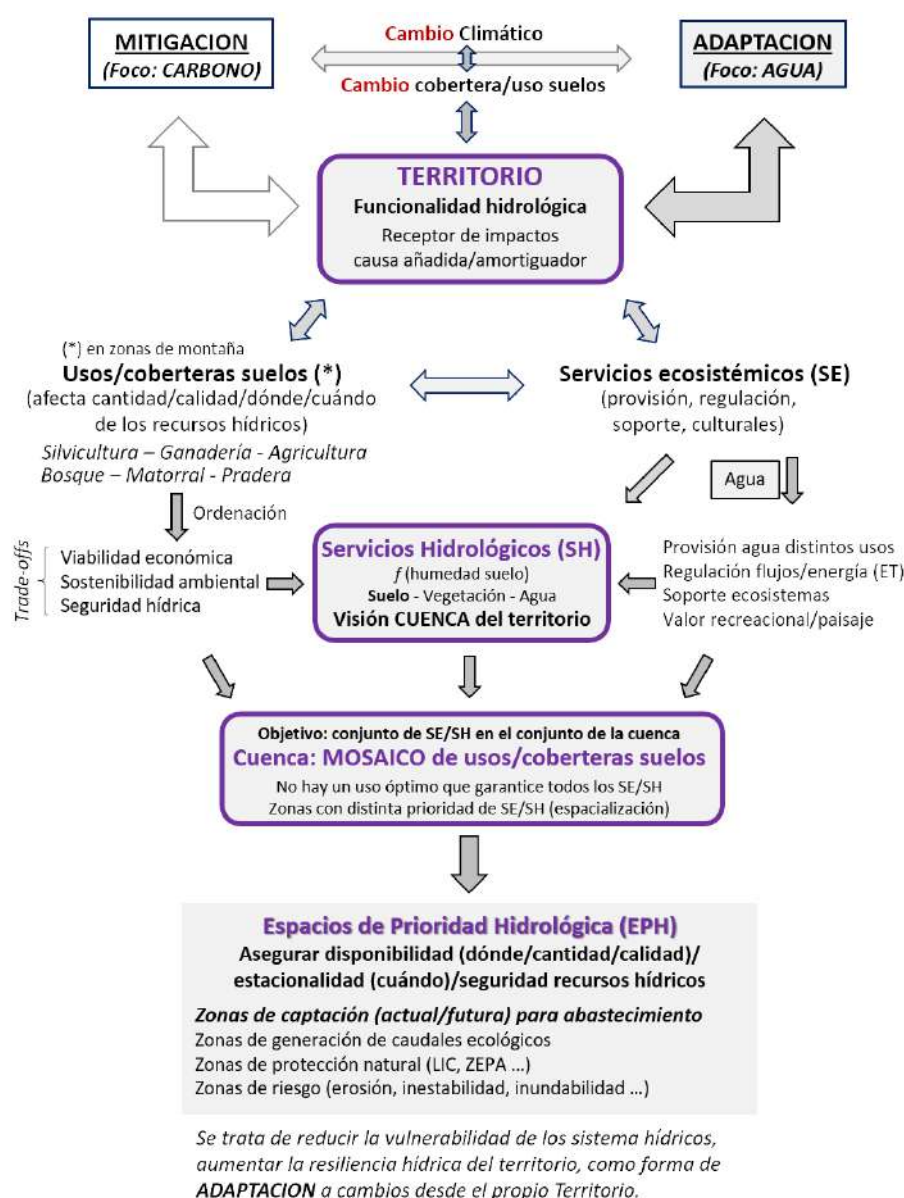


Figure 7.4. Schéma conceptuel pour la considération des Services hydrologiques et les zones de priorité hydrologique dans la planification territoriale orientée à sa fonctionnalité hydrologique.

(Source : élaboration propre).

territoire et la durabilité environnementale d'une région ne peuvent pas compromettre la sécurité hydrique, d'autant plus dans des situations de changements incertains et complexes. D'où la nécessité de la vision « bassin » du territoire, en considérant (conserver et récupérer) la fonctionnalité hydrologique de chacune de ses parties (la rivière comme conséquence du bassin), afin de garantir l'ensemble des Services écosystémiques dans l'ensemble du bassin.

Il n'existe pas une occupation optimale des sols qui garantisse à la fois tous les Services écosystémiques et hydrologiques. C'est pourquoi il est nécessaire d'établir, sur une base scientifique, différentes priorités dans diverses zones, avec différentes combinaisons d'occupation : territorialisation des services, le territoire comme mosaïque d'occupation.

C'est dans ce sens qu'il est proposé d'établir, et de délimiter les zones de priorité hydrologique (EPH), domaines territoriaux dont l'objectif fondamental doit être d'assurer la disponibilité des ressources hydriques en quantité (combien), qualité (comment), lieu (où) et moment (quand). Pour cela, il est essentiel de choisir et de gérer la couverture végétale, d'autant plus que la sylviculture est actuellement en train de traverser une crise économique dans certaines régions des Pyrénées.

Bien que la disponibilité en eau que les EPH cherchent à garantir peut servir à plusieurs fins, nous nous référons principalement dans ce chapitre aux captages d'eau (superficielle ou souterraine, quelle que soit l'échelle), qu'il faut considérer comme socialement stratégiques et dont la préservation future dans des conditions adéquates est fondamentale pour l'adaptation des communautés pyrénéennes. D'autres fins à considérer sont celles de génération de débits dans des zones de protection spéciale, le contrôle de flux dans des zones à risque (érosion, instabilité), le contrôle de l'humidité des sols dans des zones productives, etc.

7.3. Étude de cas du bassin de la Bidassoa (Navarre)

Le bassin présente des altitudes de 17 à 1 306 m au-dessus du niveau de la mer. La dureté des roches qui constituent une grande partie du territoire a donné lieu à des reliefs abrupts aux pentes prononcées. Dans le bassin de la Bidassoa, des matériaux géologiques très divers apparaissent, disposés dans des structures tectoniques complexes, générant des affleurements très compartimentés. Les sols développés sur ces lithologies sont principalement d'une texture franco-limoneuse et franco-argileuse, d'une épaisseur allant de 5-20 cm sur les versants jusqu'à 3 m dans des zones à la pente plus faible.

Le lit principal du fleuve Bidassoa a une longueur totale de 66 km. Il naît dans la vallée du Baztan (Navarre), où il prend une direction prédominante est-ouest, puis arrive à la confluence avec son principal affluent, l'Ezkurra, où la direction de la Bidassoa tourne soudain vers le nord. Il se jette à Hondarribia (Gipuzkoa), bien que ce soit dans la station de jaugeage d'Endarlatsa (limite Gipuzkoa-Navarre) où les débits sortants du bassin sont contrôlés (figure 7.5).

Le bassin de la Bidassoa est situé à l'extrémité occidentale de la cordillère pyrénéenne (figure 7.5) et comprend une zone de près de 681 km² (jusqu'à la station de jaugeage d'Endarlatsa, limitrophe de Gipuzkoa).

Le climat est défini comme tempéré et humide, de type océanique. Les précipitations moyennes du bassin pour la période 1980-2006 ont été de 1 700 mm/an, la température moyenne annuelle de 13,5 °C et l'évapotranspiration moyenne de 730 mm/an. Au cours de cette même période, l'apport du bassin à Endarlatsa a été de 850 hm³/an. Grâce au bilan hydrique réalisé au moyen du modèle « Soil and Water Assessment Tool » (SWAT) pour la période 2000-2017, une ETR de près de 30 % a été estimée. 66 % des apports au fleuve sont des eaux souterraines et sous-superficielles, et les 34 % restant représentent le ruissèlement superficiel.

La végétation potentielle du bassin de la Bidassoa (forêt de feuillus où les hêtres, les chênes et les frênes dominent) a été altérée par l'activité humaine. Actuellement, dans la moitié nord

du bassin, la couverture forestière (feuillus et conifères) prédomine, alors que dans la partie méridionale, notamment dans la région du Baztan (SE du bassin, figure 7.5), il existe d'importantes superficies de pâturages consacrées à l'élevage extensif.

7.2.1 Facteurs sociaux et économiques

Il existe 19 communes (Arantzaz, Baztan, Bera, Bertizarana, Donamaria, Donestebe/Santesteban, Elgorriaga, Eratsun, Etxalar, Ezkurra, Igantzi, Ituren, Labaien, Lesaka, Oitz, Saldias, Sunbilla, Urrotz et Zubietta) dans le bassin du fleuve Bidassoa. Les noyaux urbains les plus significatifs sont Bera, Lesaka, Sunbilla, Donestebe/Santesteban et Elizondo (Baztan).

21 080 habitants sont actuellement recensés dans le bassin. La perte de population a été constante au cours du XX^e siècle, mais le début du millénaire a entraîné un changement de tendance qui s'est achevé avec la crise économique de 2012. Actuellement, seuls Doneztebe/Santesteban, Bera, Lesaka et Elgorriaga ont une plus grande population qu'en 1930. Au cours de cette période, les autres communes de la zone de la Bidassoa, toutes de moins de 1 000 habitants, ont perdu de 40 à 70 % de leur population, et celles du Baztan 24 % de leur population (INE, 2019).

Si nous considérons les activités économiques, la plupart des établissements existant dans le bassin font partie du secteur des services (70 %), suivi par celui de la construction (15 %), l'industrie (11 %) et, enfin, le secteur primaire (4 %). Tous les secteurs, sauf celui de l'industrie, ont perdu des établissements de 2012 jusqu'à aujourd'hui (NASTAT, 2020). L'industrie est répartie dans de nombreuses localités, mais principalement dans les localités les plus peuplées. En général, il existe peu d'industrie en amont du bassin, alors que dans des zones plus basses apparaissent davantage de noyaux industriels (Lesaka, Bera, etc.).

Dans le secteur agricole les cultures non-irriguées sont prédominantes. De plus, la superficie de terres cultivées a augmenté ces deux dernières décennies, notamment sur les rives du fleuve.

Les cultures irriguées du bassin sont presque insignifiantes. Il existe de petites concessions d'eau d'irrigation, mais il s'agit de très faibles quantités, essentiellement liées aux potagers d'autoconsommation à la production faible. En ce sens, Doneztebe et Saldias sont deux exceptions, car environ 6 % de leurs cultures sont irriguées. En ce qui concerne l'élevage, Baztan se distingue, étant la commune ayant le plus grand élevage ovin, porcin et bovin. Dans la commune de Baztan, les exploitations agricoles et d'élevage occupent près de 46 % de la superficie totale qu'occupent les exploitations de tout le bassin. Au cours de la période 1999-2009, dans toutes les communes, le nombre d'exploitations a diminué et, par conséquent, la superficie consacrée aux activités agricoles ou à l'élevage. Lesaka, Oitz, Labaien et Ituren sont, en ce sens, des exceptions dans la zone d'étude, car la superficie consacrée à ces activités a augmenté.

7.2.2 Systèmes d'approvisionnement

D'après le Plan directeur pour le cycle complet de l'eau à usage urbain de Navarre (2019), le bassin étudié peut se diviser en deux zones d'approvisionnement principales, la zone de Bidassoa et la zone de Baztan Urdax-Zugarramurdi.

Dans la zone de Bidassoa, les communes de Sunbilla, Santesteban, Elgorriaga, Ituren et de Zubietta s'approvisionnent grâce à une solution conjointe dans la communauté de Malerreka, bien qu'elles maintiennent leurs anciennes sources. Les autres communes, conjointement ou individuellement, ont des solutions d'approvisionnement indépendantes. La consommation d'eau pour l'approvisionnement connecté à un réseau dans la zone est de 2,3 hm³/an, la plupart de la demande est urbaine (0,6 hm³/an), suivie de l'industrielle (0,2 hm³/an). Cependant, l'eau non-enregistrée est de 1,4 hm³/an, c'est-à-dire 63,1 % de l'approvisionnement en eau (Plan directeur pour le cycle complet de l'eau à usage urbain de Navarre, 2019 ; données pour la période 2010-2015).

Il y a cinq communes dans la zone de Baztan-Urdax-Zugarramurdi. Toutefois, les communes d'Urdax et de Zugarramurdi se situent en dehors du bassin et c'est pourquoi nous parlerons uniquement de la zone de Baztan dans ce rapport. Le conseil municipal de Baztan ne compte pas sur un organisme de gestion commune, mais chacun lieu possède ses propres sources. Certains d'entre eux ont des problèmes de légalité dans la concession, sans compteurs ni dans les réservoirs ni dans les logements eux-mêmes. La consommation d'eau de réseau est de 2,3 hm³/an (domestique : 0,4 hm³/an, industrielle : 0,2 hm³/an, et d'autres usages dans lesquels l'agriculture et l'élevage sont inclus : 0,3 hm³/an). Tout comme dans la zone de la Bidasoa, la quantité d'eau non-enregistrée est très haute : 1,3 hm³/an, c'est-à-dire 60 % de l'approvisionnement en eau. (Plan directeur pour le cycle complet de l'eau à usage urbain de Navarre, 2019 ; données pour la période 2010-2015).

Dans le cas de la Bidasoa, les captages d'eau jouent un rôle important, car il existe 145 distributeurs dans tout le bassin (figure 7.6). Parmi les 28 captages dans les rivières ou rigoles, 12 sont destinés à disparaître, un à se modifier et 15 sont définitifs. Il existe 16 autres captages catalogués comme « inconnus ». Dans certains cas, ils font

référence à des puits comme celui de Lesaka, qui fournit Lesaka et Bera, captages dans des mines et des centrales hydroélectriques. Du fait que les aquifères du bassin ont un caractère local, il existe 101 captages dans des sources. 11 de ces captages sont hors d'usage pour l'approvisionnement de la population. Il est prévu que 52 disparaissent, quatre soient modifiés et 34 sont aujourd'hui considérés définitifs.

Évidemment, la quantité, la qualité et la localisation des sources dépend de la géologie de la zone. La variété lithologique des matériaux existants et la tectonique complexe de la zone, conditionnent l'existence d'un grand nombre d'aquifères, en général peu significatifs, du fait de la faible perméabilité du substrat rocheux dominant, bien que d'une certaine importance à l'échelle locale. La partie septentrionale du bassin est dominée par des matériaux paléozoïques (alternance d'ardoise et de grès schisteux et dans une moindre mesure, des roches calcaires et des dolomies, figure 7.6). Dans cette zone, il est prévu que nombre des captages dans le fleuve Bidasoa et dans ses affluents disparaissent. Les sources qui apparaissent dans cette zone ne sont pas liées aux matériaux paléozoïques, mais aux dépôts quaternaires de bien plus petite dimension, et sans connexion entre elles.

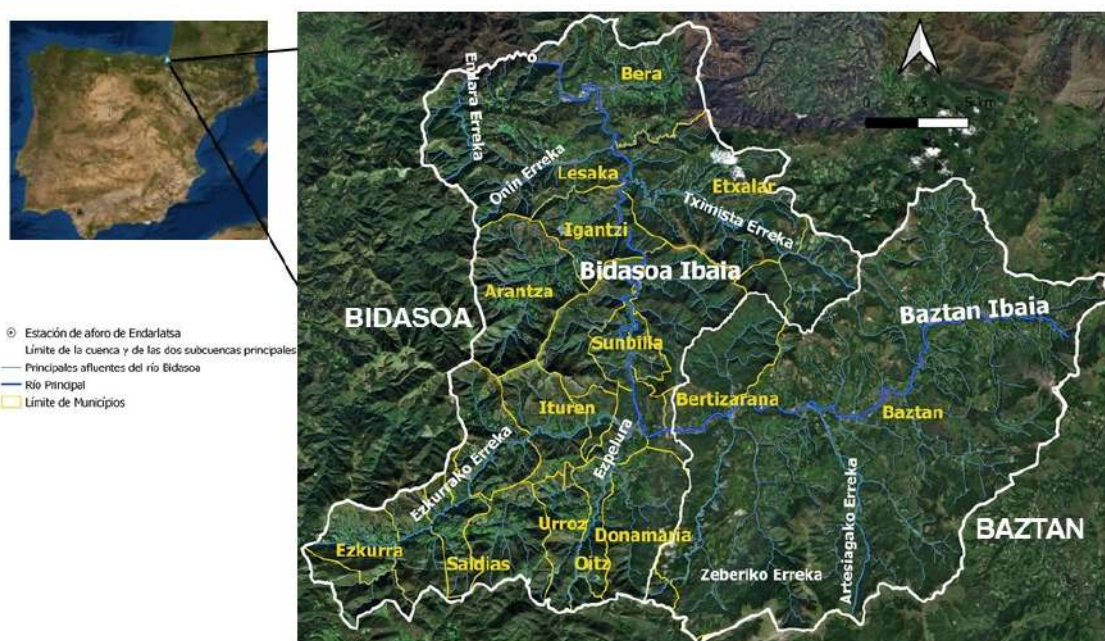


Figure 7.5. Situation géographique de la zone d'étude, les communes qui la composent, le réseau hydrographique et la sous-division du bassin par zones d'approvisionnement (zones de Bidasoa et de Baztan).

(Source : élaboration propre).

Le sud-ouest du bassin (rivière Ezkurra) est fondamentalement formé par des matériaux mésozoïques (roches calcaires et dolomies du jurassique, roches calcaires, argiles, grès et conglomérats crétacés). Dans cette zone, il existe de nombreux captages définitifs, notamment dans les rivières et les rigoles. Les sources définitives sont liées aux dépôts quaternaires. La quantité de sources existant dans des matériaux triasiques est importante (couleurs violettes dans la figure 7.6) et dans des basaltes paléozoïques. La plupart de ces sources sont appelées à disparaître. Enfin, plusieurs sources du sud-est du bassin sont essentiellement liées à des contacts tectoniques ou limites entre différentes lithologies.

7.2.3 Planification territoriale de 1956 à 2019

Afin de quantifier l'importance de la fonction hydrologique du territoire et mieux connaître l'influence de la végétation dans les fonctions hydriques des sols, plusieurs capteurs de contrôle d'humidité en continu ont été installés dans la zone de Saldias. La situation de chaque parcelle a été sélectionnée de manière à ce qu'elle soit représentative des principaux types de végétation du bassin. De cette façon, les stations de mesure ont été situées dans quatre parcelles aux usages différents : une pinède (*Pinus radiata*), une chênaie (*Quercus rubra*), un pré mésophile et une fougère (*Pteridium aquilinum*). Des capteurs d'humidité du sol ont été installés dans toutes les parcelles, à trois profondeurs : 20, 45 et 80 cm, et à côté de l'une d'elles, une station météorologique automatique.

À ce jour, des séries de données d'humidité de vingt minutes ont été recueillies et stockées sur chaque parcelle pendant une période de près de trois ans (de juillet 2018 jusqu'à aujourd'hui). La figure 7.7 présente la dynamique de l'humidité pour tous les profils. L'étude de l'évolution de l'humidité sur chaque parcelle indique que la dynamique de l'eau dans les sols est différente sous différentes couvertures forestières, tant en surface qu'en profondeur. Alors que l'on voit dans le pré de plus grandes variations d'humidité, reflétant parfaitement les schémas de pluie

enregistrés dans la station météorologique ; pour les parcelles sous couverture forestière, les variations d'humidité sont plus atténuées. De plus, le sol sous le pré retient davantage d'eau que le sol forestier, où l'infiltration à des couches profondes est plus rapide. Dans la fougère, l'influence des précipitations est très atténuée en comparaison aux autres occupations des sols. Ces résultats sont cohérents avec le système racinaire de chaque parcelle, indiquant que la végétation est un facteur influant non seulement en surface, mais aussi en profondeur.

Les caractéristiques de la végétation et du sol sont des facteurs hydrologiques à considérer dans l'aménagement du territoire selon un point de vue hydrologique.

En outre, cette dynamique est cohérente avec les données de la caractérisation physique correspondant à chaque horizon du sol, notamment les paramètres de conductivité hydraulique saturée, densité apparente et porosité du profil de chaque parcelle.

Une fois l'importance hydrique de l'occupation des sols examinée, afin de mieux connaître l'évolution historique de ces usages, nous décrivons les changements les plus significatifs de l'occupation des sols survenus de 1956 à aujourd'hui dans le bassin de la Bidassoa. La plupart des informations qui sont ici exposées provient du document Évolution temporelle de l'occupation des sols dans le bassin de la Bidassoa, réalisé dans le cadre du projet PIRAGUA.

À titre de précision, le type « forestier non-arboré », qui est utilisé dans ce document, fait référence aux pâturages, aux maquis et aux fougères. Les cultures dans le bassin de la Bidassoa sont surtout des cultures herbacées non-irriguées (blé, asperges, etc.) et des cultures ligneuses non-irriguées (arbres fruitiers, etc.). Le type « feuillus » est fondamentalement constitué de forêts de hêtres, mais aussi de chênes, de châtaigniers, etc. Enfin, le type « improductif » fait référence aux zones urbaines, aux affleurements et aux zones inondables.

Évolution 1956-1990

La plupart de la superficie du bassin de la Bidassoa (97,61 %) correspondait, en 1956, à l'usage forestier. En un peu plus de trois décennies, les superficies forestières ont légèrement diminué (92,37 %), transférant l'usage de ces zones à des cultures agricoles, type dont la zone consacrée est passée de 1,24 % du bassin à 7,21 %. Dans les types forestiers, les superficies classées comme « forestier non-arboré » et « feuillus » ont diminué. Cette diminution est allée de pair avec l'augmentation de la superficie des conifères.

Évolution 1990-2000

Au cours de cette période, tout comme pour la précédente, la superficie consacrée à l'usage forestier a diminué, passant de 92,36 % de la superficie totale du bassin à 83,39 %. La cause directe de ce phénomène est la diminution prononcée du type « forestier non-arboré ».

Suivant la tendance identifiée au cours de la période 1956-1990, la superficie du type « cultures agricoles » a doublé, atteignant près de 15 % de la superficie du bassin. L'augmentation de la zone de type « improductif » a été de 314,62 %.

Évolution 2000-2007

En l'an 2000, les types « feuillus » et « forestier non-arboré » occupaient 73,66 % de la superficie du bassin, enregistrant 30 320,33 ha et 19 277,99 ha respectivement. Quant à la variation de la superficie des types les plus étendus, le type « feuillus » a légèrement augmenté (6,27 %), alors que la superficie consacrée au type « forestier non-arboré » a diminué de 9,83 %. Depuis 1956, la superficie consacrée aux cultures a considérablement augmenté, mais pendant cette période, elle a commencé à perdre 2,35 % de sa superficie.

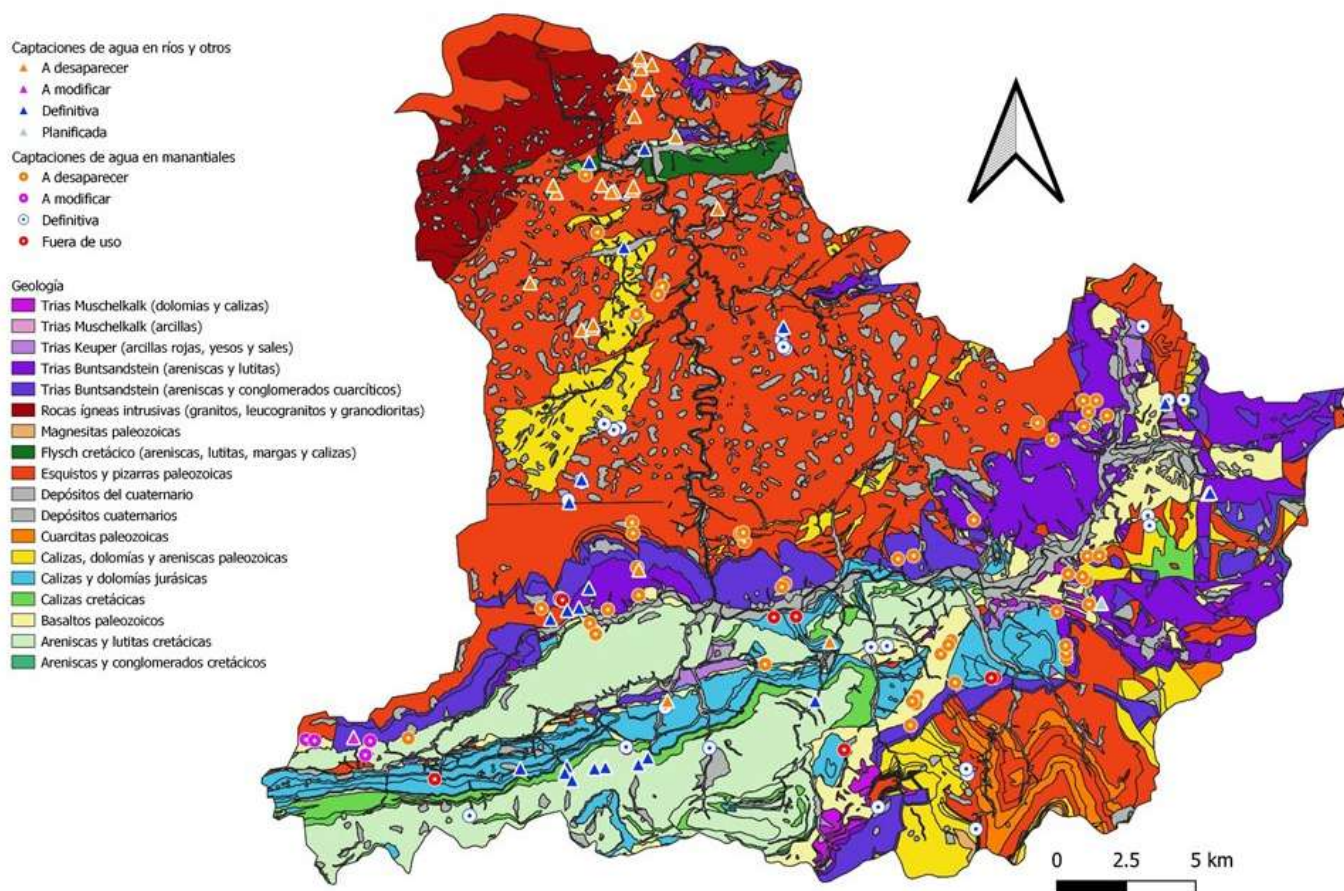


Figure 7.6. Géologie du bassin de la Bidassoa, localisation et type des captages d'eau.

(Source : <https://idena.navarra.es> et gouvernement de Navarre).

Évolution 2007-2012

Aucun changement majeur d'usage n'a été détecté sur la période 2007-2012.

Évolution 2012-2019

Au cours de cette période, les cultures ont augmenté leur superficie, notamment les cultures ligneuses non-irriguées ; leur superficie est passée de 29,80 ha à 62,49 ha. Pour la première fois, il y a un changement de tendance dans la variation de la superficie consacrée aux conifères, qui baisse de 18,44 %, soit 1 086,88 ha. Les usages « forestier non-arboré », « feuillus » et « improductif » ont légèrement augmenté.

En résumé, l'occupation des sols la plus étendue

au cours du XXe siècle a été du type « forestier non-arboré » et « feuillus ». La superficie occupée par cet usage a diminué jusqu'en 2007 où elle s'est stabilisée. La zone perdue de type « forestier non-arboré » s'est transformée essentiellement en « feuillus », provoquant son augmentation de superficie depuis l'an 2000 jusqu'aujourd'hui. Dans l'étude réalisée dans le cadre du projet PIRAGUA « Radiographie socio-économique et situation des pâturages à Baztan, Malerreka et Bortziriak », le type « forestier non-arboré » s'est dispersé de telle façon que l'évolution des pâturages, des prairies et des maquis a été étudiée. De 1956 à 2019, la baisse des pâturages qui sont passés de 25,6 % du bassin à 3,8 % est très significative. Par contre, les prairies ont augmenté ; elles

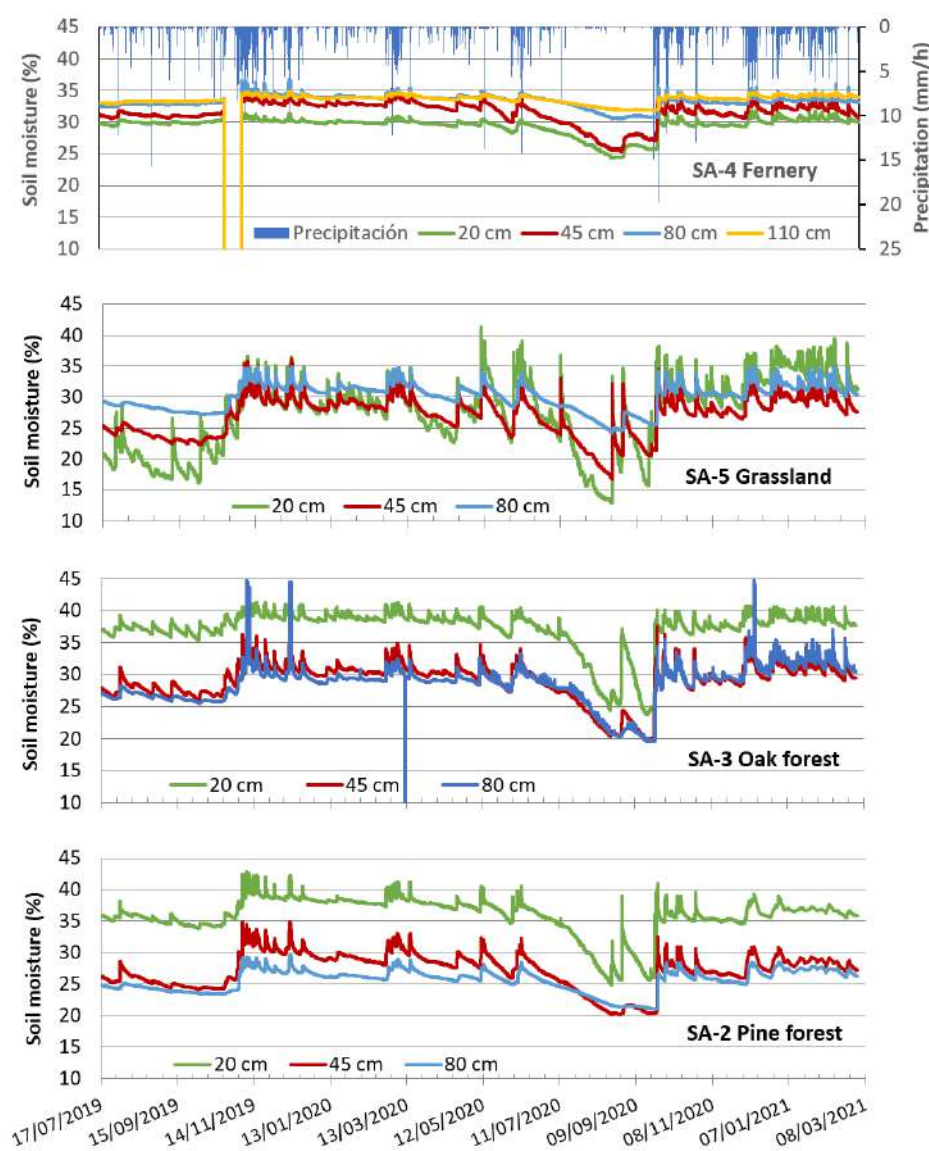


Figure 7.7. Série de données en continu sur l'évolution de l'humidité du sol dans le profil de chaque parcelle (fougère, pré, chênaie et pinède) et données de précipitations enregistrées dans la station météorologique. L'humidité est exprimée en contenu volumétrique d'eau (%) et les précipitations en mm/heure.

(Source : élaboration propre).

occupaient 3,7 % du bassin en 1956 et occupent aujourd'hui 10,7 %. L'usage classé comme « conifères » était à peine présent en 1956. Cette présence a augmenté jusqu'en 2007 lorsqu'elle a commencé à lentement diminuer. Tout comme le type « conifères », la superficie consacrée aux cultures agricoles était très petite en 1956. Elle a considérablement augmenté au cours du XXe siècle, atteignant près de 10 000 ha, chiffre qui se maintient à l'heure actuelle. La superficie consacrée au type « improductif » a également augmenté tout au long du XXe siècle. Depuis 2007 nous observons la stabilisation de ce type.

Le projet LIFE NAdapta a publié la catégorisation des polygones de la carte forestière espagnole (MFE, dans ses sigles en espagnol) 1:25.000, en fonction de leur vulnérabilité potentielle relative au changement climatique, estimée à partir de l'indice de sensibilité des espèces forestières, les indices thermique et ombrothermique moyens de chaque polygone de la MFE actuels et prévus selon les projections régionalisées de changement climatique d'AEMET selon un scénario intermédiaire. Les masses forestières identifiées à haute et très haute vulnérabilité sont situées tout le long de la limite sud et dans la zone centre du bassin, de sorte que l'espèce prédominante dans les zones identifiées à la vulnérabilité haute et très haute est *Fagus sylvatica*, le hêtre commun.

7.2.4 Définition de zones de priorité hydrologique (EPH) dans le bassin de la Bidassoa

Pour définir les EPH du bassin de la Bidassoa, nous avons pris en compte tous les emplacements qui fournissent un certain type de service hydrique tant aux habitants du bassin qu'aux écosystèmes de la zone, tout en donnant une importance spéciale aux systèmes de distribution. Pour cela, nous avons considéré :

- Les captages catalogués comme des captages dans des rivières ou des rigoles, inconnues et sources. Non seulement les définitifs ont été pris en compte, mais aussi ceux qui sont

appelés à être modifiés et ceux qui sont appelés à disparaître. (figure 7.6). Nous avons décidé de maintenir les captages qui vont disparaître, car ce type de captages est généralement employé durant les époques de sécheresse comme supplément à la distribution habituelle.

- Les masses d'eau à usage récréatif telles que déclarées par la directive 76/160/CEE, comprenant les zones déclarées pour les eaux de baignade. Dans le cas du bassin de la Bidassoa, il n'y en a aucune.
- Les masses d'eau liées aux zones protégées. La figure 7.8 indique les espaces naturels protégés et les espaces de protection de la faune dans le bassin de la Bidassoa.

Une fois les zones EPH les plus significatives du bassin définies, l'étape suivante consiste à délimiter la zone d'influence. Dans le cas des espaces protégés, nous avons considéré leur délimitation propre. Dans le cas des captages, nous avons délimité leur bassin de drainage, puisque tout changement dans cette zone peut affecter la quantité, la qualité et la disponibilité spatio-temporelle de la ressource dans le captage. Cette délimitation a été effectuée en utilisant un modèle numérique du terrain d'une résolution de 2 x 2 m.

L'étape suivante consistait à calculer la zone et l'occupation des sols des EPH dans le bassin de la Bidassoa. La figure 7.9 où des graphiques circulaires indiquent le pourcentage d'occupation des sols du bassin de drainage de chaque captage, dans le cas des sources, est signalée à titre d'exemple. Nous avons donc calculé les pourcentages d'occupation des sols correspondant aux bassins des captages et aux espaces naturels protégés (tableau 7.1).

Les résultats montrent que les EPH liées aux captages occupent 25 % du bassin. Si nous comparons la zone de Baztan avec celle de la Bidassoa, la différence la plus notable est celle des

conifères, puisqu'ils sont à peine présents dans les EPH du Baztan (1 %), alors qu'ils occupent 12 % dans la zone de distribution de la Bidassoa. Les espaces naturels protégés et les espaces de

protection de la faune occupent 31 % du bassin. De fait, la zone totale d'EPH dans le bassin est très étendue (plus de la moitié du bassin). Comme nous l'avons vu tout au long du document, de l'an



Figure 7.8. Espaces naturels protégés et espaces de protection de la faune dans le bassin de la Bidassoa.

(Source : Infrastructure des données spatiales de Navarre.)

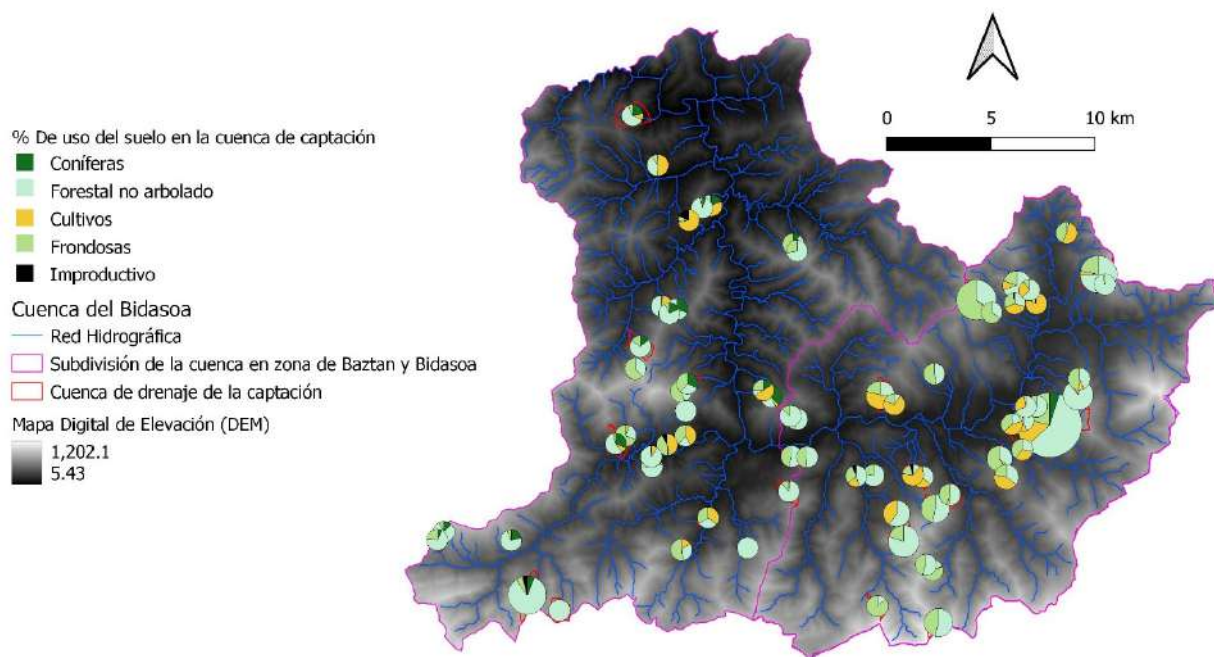


Figure 7.9. Bassins de drainage des sources de la Bidassoa. Graphiques circulaires avec la représentation du pourcentage d'occupation des sols de chacune d'elles. La taille du diagramme indique la zone du bassin de drainage : plus le bassin est grand, plus le diagramme est grand. Nous avons également représenté le relief (DEM), le réseau de drainage et la sous-division dans des zones de distribution (zone de Baztan à droite et zone de Bidassoa à gauche).

(Source : élaboration propre).

Tableau 7.1. Surface totale et répartition par utilisation des sols occupée par les bassins de drainage des captages (Espaces de Priorité Hydrologique, EPH), ainsi que par les espaces naturels protégés dans chacune des zones d'exploitation (zone de Baztán et zone de Bidasoa), et dans l'ensemble du bassin versant de la Bidassoa.

	EPH						Espaces naturels	
	Zone de Baztán		Zone de Bidasoa		Total		Total	
Utilisation des sols	Km2	%	Km2	%	Km2	%	Km2	%
Non productif	0,34	0,57	1,03	0,96	1,36	0,82	4,42	2,13
Feuillues	17,29	29,3	23,82	22,3	41,11	24,79	67,64	32,56
Forestier non boisé	35,04	59,4	60,42	56,57	95,46	57,58	116,19	55,94
Culture	5,76	9,77	8,83	8,27	14,6	8,8	16,75	8,06
Conifères	0,57	0,96	12,71	11,9	13,28	8,01	2,71	1,3
Total	58,99		106,81		165,81		207,71	

2000 à aujourd'hui, les pâturages ont diminué ; les prairies et les feuillus ont augmenté. Cela indique un changement de tendance qui, depuis un point de vue des services hydrologiques et, par conséquent, des ressources hydriques, peut avoir des conséquences. D'autant plus si nous prenons en compte que les aquifères qui approvisionnent la population (captages dans des sources) sont vulnérables aux changements climatiques et d'occupation des sols, du fait qu'ils sont petits et locaux. De fait, ce changement de tendance et l'augmentation de la masse forestière peut affecter les services hydriques. L'abandon de zones de culture peut avoir un effet similaire. De fait, dans la planification du territoire, il est absolument nécessaire de considérer les services hydrologiques qu'apportent ces EPH.

7.2.5 Perception sociale des services hydrologiques du territoire

Nous avons réalisé une enquête auprès de personnes liées à la thématique exposée dans ce rapport (travailleurs du secteur primaire, techniciens de l'environnement dans des entreprises privées et dans l'Administration, postes politiques du gouvernement de Navarre et presse spécialisée). Nous leur avons demandé la quantité d'eau du bassin et la plupart ont

coïncidé dans leur réponse. Ils ont répondu qu'il y en avait beaucoup, mais qu'en été, il pouvait y avoir pénurie. Quant à la qualité, la perception de la plupart est bonne, bien que certaines personnes soient inquiètes pour la qualité à venir. Lorsque nous leur demandons si elles ont observé des variations (par rapport au passé), nombre des personnes ont insisté sur l'idée que de plus en plus de sources s'assèchent en été et que la consommation urbaine a augmenté.

Toutes ces personnes indiquent que le climat est de plus en plus extrême, mais elles ne l'associent pas toutes à la plus faible quantité d'eau. Lorsque nous leur demandons quelles mesures peuvent-elles être prises pour freiner les impacts du climat sur les ressources hydriques, la plupart coïncident sur la nécessité d'une consommation plus responsable, certaines sur la nécessité d'un bon réseau d'observation et une seule personne signale la planification de l'aménagement du territoire comme une mesure pouvant servir pour améliorer la quantité et la qualité des ressources hydriques.

Bien que l'enquête ait été limitée en nombre de personnes, mais sélective dans son choix, et bien qu'elle n'ait aucune validité sociologique, elle fournit au moins une impression intéressante sur la perception que les personnes du bassin, de certains domaines liés à l'eau, au territoire et au changement climatique, ont du sujet. Dans notre cas, il existe un manque de connaissances des processus naturels qui conditionnent le cycle de

l'eau dans le bassin, et davantage dans sa relation avec l'occupation du territoire. Ce fait montre la grande nécessité d'informer de façon adéquate la société, en commençant par les secteurs les plus « touchés », et de considérer la socialisation des connaissances comme une mesure supplémentaire d'adaptation aux changements en cours.

7.2.6 Proposition d'actions d'adaptation

Comme mesures à prendre dans le bassin, d'un point de vue de la gestion adaptative, nous signalons les suivantes :

Mesures d'adaptation : La délimitation des zones de priorité hydrologique (EPH) de tous les captages, y compris ceux qui se maintiendraient comme soutien ponctuel pour des situations de sécheresse. Cette délimitation devrait avoir sa représentation cartographique et ses garanties juridiques pour pouvoir assurer une gestion adéquate de ces zones. La vaste présence de terrains communaux dans le bassin est un avantage de départ pour cette action.

Mesures de gestion : Il est important d'impliquer les acteurs territoriaux dans la gestion des EPH, en commençant par les conseils municipaux eux-mêmes, historiquement très liés à la gestion des communes. La gestion adaptative de ces zones de priorité hydrologique doit se baser sur la proximité de l'intervention, en tissant un réseau d'intérêts partagés avec les acteurs engagés qui assurent l'entretien adéquat de ces espaces, selon une perspective temporelle.

Mesures de sensibilisation : L'enquête réalisée auprès d'acteurs du bassin a mis en évidence la faiblesse des connaissances existantes sur les relations complexes eau-sol-territoire. Il est essentiel de socialiser les connaissances générées en profitant de tous les domaines de la communication et en distinguant des groupes objectifs (éducation, société, techniciens, décideurs, etc.). La gestion adaptative des zones de priorité hydrologique devrait être un domaine de rencontre d'acteurs et, à partir de là, de socialisation et de sensibilisation. Finalement, l'eau est un élément stratégique de notre vie, de la vie du territoire et un axe de l'adaptation. Si nous sommes capables de comprendre cela et d'agir en conséquence, nous serions plus à même de nous adapter aux changements mondiaux en cours et plus résilients.

7.3. Conclusions

Nous concentrons les conclusions du chapitre sur les zones de priorité hydrologique (EPH, dans ses sigles en espagnol) comme des espaces intégrés d'adaptation, appliqués aux zones de captage d'eau pour la distribution, actuelle et à venir. Nous considérons ces zones comme des références incontournables, car la distribution de l'eau est considérée par le Système de comptabilité environnementale et économique (SEEA, dans ses sigles en anglais) des écosystèmes comme un Service écosystémique fondamental (Portela et al., 2029) et essentiel pour l'adaptation. Nous le faisons à partir de la gestion adaptative hydrologique selon une vision territoriale, sans entrer dans l'autre domaine fondamental pour les politiques de l'eau, qui est la gestion sociale de la demande.

Mettre en valeur les ressources en eau d'un territoire (bassin) et assurer leur disponibilité spatio-temporelle suppose d'agir directement sur le territoire (couverture, occupation et gestion des sols), notamment dans les zones où les processus hydrologiques conditionnent cette disponibilité. Il s'agit de promouvoir une gestion adaptative du territoire selon une approche hydro-écosystémique comme stratégie-clé pour développer des mesures d'adaptation au changement climatique.

La figure 7.10 illustre les aspects à considérer dans cette mesure stratégique d'adaptation hydrologique. Dans le but de gérer le territoire comme une mosaïque d'usages, la première étape est de délimiter les zones de priorité hydrologique à considérer sur le territoire objet d'analyse (un bassin-versant, de préférence). Cette délimitation doit tenir compte de la nature du captage (eaux superficielles, eaux souterraines) et, par conséquent, du domaine spatial des processus qui conditionnent la présence de la ressource en ce point. Les espaces limités devraient figurer dans les différentes cartographies de l'approche territoriale et refléter leur « vocation » hydrologique. Il s'agit évidemment d'une

proposition dont la concrétisation dépendra des possibilités réelles dans chaque domaine de compétence, mais, il faut l'établir, en tout cas, comme un défi sur le chemin de l'adaptation, notamment à partir de la base municipale.

La seconde étape est l'élaboration d'un diagnostic sur les implications hydrologiques que pourraient avoir l'occupation actuelle des sols. Pour cela, il est nécessaire de considérer toutes les informations préalables disponibles : évolution temporelle des changements dans l'occupation ou la gestion des sols, données de la ressource sur le point de captage (éventuelles tendances dans les débits, qualité, etc.). Il est probablement possible de séparer les usages consolidés des usages non-consolidés dans l'EPH délimitée.

Par usage consolidé, nous comprenons la couverture végétale, quel que soit son type, n'ayant pas subi de changement durant des décennies et que nous pouvons considérer, au moins a priori, ayant atteint une certaine

efficacité hydrique, dans le sens où elle apporte plus d'eau (bleue) qu'elle n'en évapotranspire (verte). Cela favoriserait tant la disponibilité que la saisonnalité de la ressource. Il faudrait évaluer ces aspects à l'aide d'experts en la matière (hydrologie, géologie, édaphologie, botanique, géographie, etc.), tout en prenant en compte les conditions biophysiques spécifiques du bassin. Pour ces usages, il s'agirait d'établir la gestion adéquate pour le maintien de l'efficacité hydrique.

Par usages non-consolidés, nous comprenons les couvertures végétales qui sont assez fréquemment en situation de changement, naturel ou planifié, et qui, a priori, supposent une altération importante des processus hydrologiques, en augmentant de façon notable leur consommation d'eau, ce qui implique la diminution conséquente des débits. De fait, la littérature scientifique corrobore clairement que les impacts hydrologiques les plus importants ont lieu lors de situations de changements fréquents d'occupation des sols.

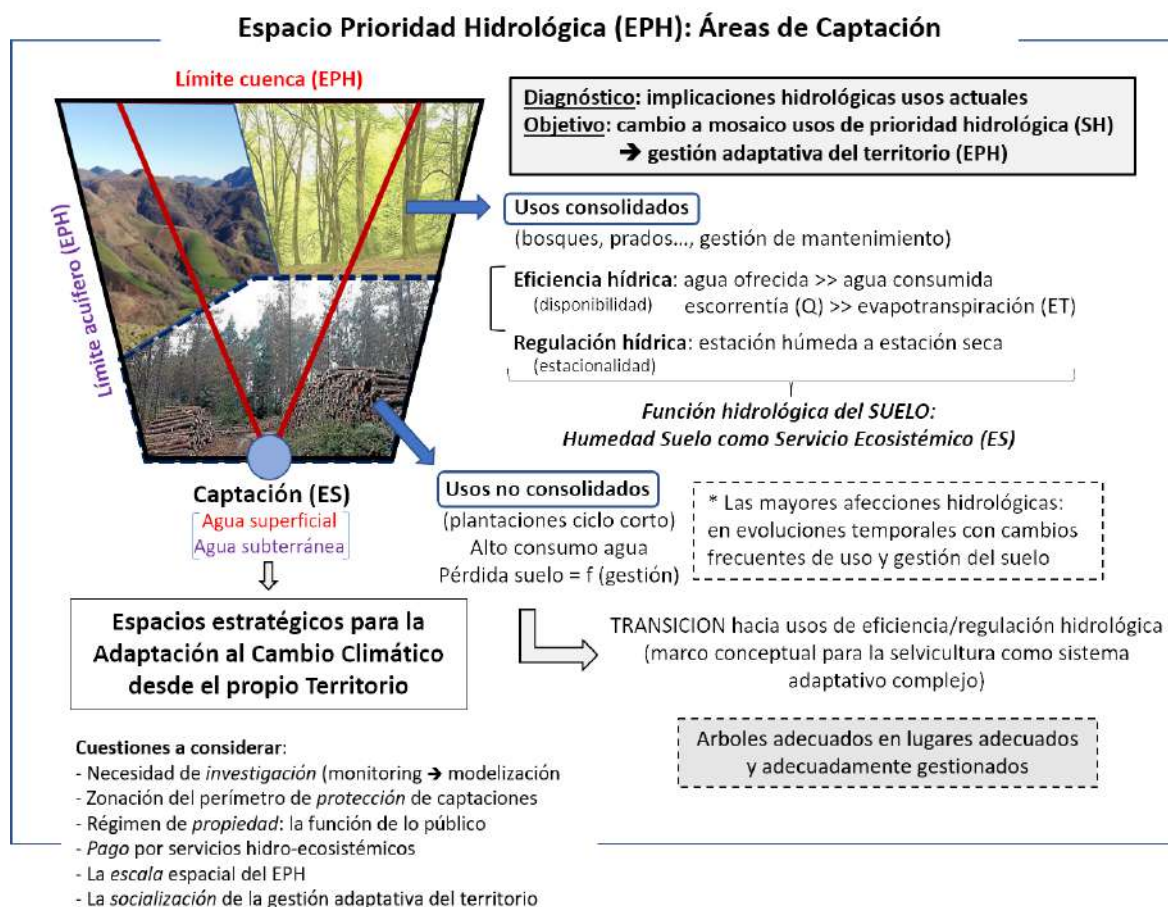


Figure 7.10. Feuille de route pour le développement des zones de priorité hydrologique (EPH).

(Source : élaboration propre).

En ce sens, l'existence dans l'EPH de plantations forestières à la croissance rapide et au cycle d'abattage court (habituels dans les milieux pyrénéens) est spécialement préoccupante, car la consommation élevée d'eau par les jeunes arbres se joint à la perte de sol (et l'entraînement de sédiments conséquent), parfois très importante, du fait de la gestion forestière inadéquate.

Dans la transition nécessaire vers des couvertures et des usages du bassin garantissant l'efficience hydrique de la végétation et la régulation hydrologique du sol, il est fondamental de repenser la sylviculture (hydrologie forestière) et de la diriger vers un cadre conceptuel comme système adaptatif complexe : espèces adéquates dans les lieux adéquats et géré de façon adéquate.

Ces étapes doivent être accompagnées d'une série d'aspects complémentaires que nous énumérerons seulement, car leur approfondissement et concrétisation est inhérente au bassin objet de l'étude (territorialisation des décisions). L'un est le régime de propriété des terrains dans la zone de priorité hydrologique : le fait que ce soient ou puissent devenir des terrains publics ou communaux facilite évidemment la gestion adaptative, bien que cela n'enlève rien au fait que les terrains privés soient soumis à une planification qui donne clairement la priorité à la fonctionnalité hydrologique. Le secteur public a beaucoup à dire et à faire, mais toujours à partir d'objectifs clairs et les moyens de les atteindre. Les mesures de paiement pour des Services écosystémiques (Tognetti et al., 2004) peuvent offrir un cadre adéquat afin de garantir les objectifs.

Un autre aspect à considérer est la gestion interne de l'EPH. En ce sens, et en fonction de l'échelle de la zone de priorité hydrologique, son zonage peut être envisagé en termes de différents niveaux de périmètres de protection, de sorte que les limitations sur l'occupation ou la gestion des sols peuvent être plus ou moins restrictives en fonction de la distance par rapport au point de captage ou au réseau de drainage. Cela nous amène à considérer un autre élément-clé, qui est celui des connaissances des processus impliqués dans la fonctionnalité hydrologique du territoire. De fait, un problème majeur pour faire face au changement climatique par le

biais de l'adaptation hydrologique est le peu de connaissances dont nous disposons généralement à ce sujet.

Pour cela, le suivi spatio-temporel des processus (monitorage), dans le cadre des relations sol-eau-végétation est essentiel et doit être pris comme mesure indispensable dans la stratégie d'adaptation. En outre, ce suivi est indispensable pour vérifier la qualité des sorties des modèles écohydrologiques qui, bien qu'ils soient totalement nécessaires, doivent être alimentés de façon continue par des séries de données représentant le bassin réel.

Enfin, l'adaptation est avant tout un processus social, collectif, des gens et pour les gens, des territoires et pour les territoires des Pyrénées. Il y a beaucoup de sagesse populaire non actualisée. Il y a beaucoup de mémoire historique à récupérer sur les implications des changements dans le territoire, et tout cela est nécessaire pour aider à comprendre le présent. De plus, pour progresser vers la résilience hydrologique du territoire et de ses habitants, il est nécessaire d'impliquer de nombreuses personnes aux connaissances académiques diverses, qui, en intégrant les connaissances partielles, aident au diagnostic précis et aux prévisions complexes, et, par conséquent, éclairent la prise de décision.

8. Transformation du territoire et dynamique hydrologique dans les têtes de bassin versant : le cas de la tourbière de Bernadouze en Ariège

**Roxelane Cakir et Gaël Le Roux,
José Miguel Sánchez Pérez (CNRS)**

La ressource en eau sur le territoire POCTEFA prend sa source essentiellement dans les zones montagneuses pour, ensuite, s'écouler dans le bassin versant selon une dynamique saisonnière. Les montagnes sont considérées comme des châteaux d'eau notamment grâce aux névés et glaciers pouvant s'y trouver. Le stock de neige est en nette diminution due au changement climatique. L'évolution sur le stock de neige a non-seulement un impact sur l'eau bleue mais également sur l'eau verte.

Depuis les cinquante dernières années, on observe des transformations sur le territoire pyrénéen notamment sur le bassin versant du Vicdessos situé en Ariège. La gestion forestière et les changements d'occupations du sol peuvent avoir un effet sur le fonctionnement hydrologique du bassin et sur les exports de carbone fluvial. A partir des observations de la tourbière de Bernadouze de ces dix dernières années ainsi qu'à partir d'une approche de modélisation se dessinent des résultats et des perspectives utilisables pour une meilleure cogestion des milieux de montagne que sont la forêt et les zones humides en fonction des impératifs économiques et climatiques. Des scénarios avec et sans gestion forestière ont été testés pour comprendre l'impact de la sylviculture sur les composantes hydrologiques. Les tendances montrent que le couvert neigeux hivernal durera moins longtemps et la fonte des neiges pourra être plus précoce engendrant un lissage de la variabilité hydrologique saisonnière. Si cette évolution de l'hydrologie n'est pas associée à un usage raisonné des sols et de la forêt, l'érosion des sols pourrait s'en trouver exacerbée.

Citar como: Cakir, R., Le Roux, G., Sánchez Pérez, J.M., 2022. Transformation du territoire et dynamique hydrologique dans les têtes de bassin versant : le cas de la tourbière de Bernadouze. En (Beguería et al., 2022) Adaptación al cambio climático en la gestión de los recursos hídricos de los Pirineos. Memorias científicas del proyecto PIRAGUA, vol. 2. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Zaragoza, España, xx-xx.
<https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14684>

8.1. Introduction

La vallée du Vicdessos correspond au bassin du Vicdessos, un affluent de l'Ariège à Tarascon sur Ariège (Figure 8.1). Le Haut-Vicdessos fait l'objet d'études scientifiques poussées par l'Université de Toulouse et le CNRS depuis de nombreuses années. Ce cadre s'est formalisé par la création de l'Observatoire Hommes et Milieu Haut-Vicdessos, il y a une dizaine d'années et le soutien par l'Agence Nationale de la Recherche via un Labex appelé DRIHM qui coordonne l'ensemble des OHM sur le territoire français et à l'international.

Etudier le rôle de l'évolution paysagère (tourbière et forêt) en relation avec les changements globaux comme le changement climatique, tel est l'intérêt du site instrumenté de la tourbière de Bernadouze en tête de bassin versant d'un petit ruisseau ariégeois.

Le territoire du Haut-Vicdessos était en effet dans le passé un haut lieu minier – depuis l'Antiquité – connu pour ses mines de Fer et d'Argent ainsi que plus récemment pour son industrie de l'aluminium (Pechiney). Les milieux de haute altitude puis les vallées sont marquées par un arrêt des activités minières au début du 20^{ème} siècle, une déprise pastorale au cours du 20^{ème} siècle et un arrêt des industries de l'aluminium à la fin du 20^{ème} siècle. L'activité de production d'aluminium à Auzat alimentée par l'énergie hydroélectrique a duré 100 ans de 1908 à 2003. Ces abandons d'activité sont marqués par une restructuration des activités économiques autour du tourisme ainsi qu'une modification importante des paysages (Davas et al., 2012).

Le territoire du Haut-Vicdessos se caractérise par la présence de nombreuses tourbières (par exemple tourbière de Bernadouze, tourbières des Etangs de Bassiès). Dans ce cadre, le laboratoire Ecologie Fonctionnelle et Environnement (OMP Université de Toulouse/CNRS) dans le cadre de l'OHM Haut Vicdessos et du Service National d'Observation des Tourbières suit l'évolution hydrobiogéochimique de la tourbière de Bernadouze, située à proximité du col de Lers. Ces études sont menées en étroite collaboration avec les laboratoires GEODE, CESBIO à Toulouse et ISTO à Orléans. Dans le Haut-Vicdessos, la vallée de Suc et Sentenac où se trouve la tourbière de Bernadouze occupe une

place singulière car elle se trouve à proximité du Col de Lers lien vers une autre région historique ariégeoise: le Couserans. Le col de Lers est une localisation touristique (ski de fond, tour de France, randonnées en famille ou sportive, pêche etc.). C'est également un lieu fréquenté par les enfants et adolescents qui séjournent à Suc et Sentenac pour des séjours éducatifs nature.

La tourbière de Bernadouze fait partie du site Natura 2000 "FR7300825 - Mont Ceint, mont Béas, tourbière de Bernadouze" et est gérée par l'Office National des Forêts. Il existe en effet une forêt entourant le site qui a fait l'objet d'une coupe forestière concertée avec les scientifiques où un arbre sur 3 seulement a été coupé en septembre 2016 (Figure 8.2).

Enfin les tourbières et plus généralement les sols ont été identifiés comme des zones tampons

essentiels pour retenir les micropolluants métalliques comme le plomb issus de l'histoire métallurgique de la vallée (Hansson et al., 2017 et 2019). L'étude paléo-écologique a mis en évidence des remobilisations de métaux comme le plomb lors de changements paysagers du 16^{ème} au 19^{ème} siècle. La matière organique des sols et des tourbes étant un piège à polluants, sont suivis de manière simultanée dans le cycle du carbone et des métaux dans le bassin versant de Bernadouze.

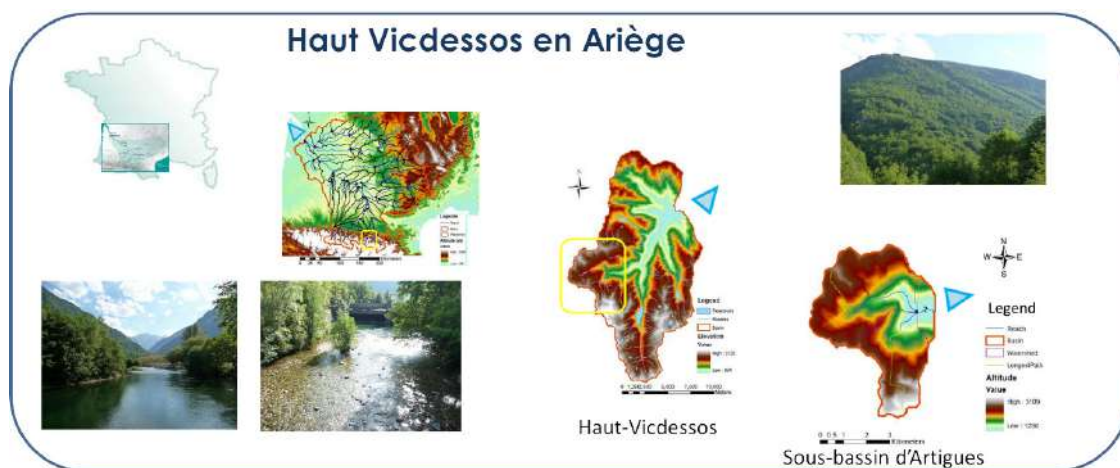


Figure 8.1. Illustrations du cas d'étude, localisation, type d'étendues d'eau.

(Source : fait maison.)



Figure 8.2. Coupe forestière autour de la tourbière de Bernadouze en 2016.

(Photos: T. Rosset.)

8.2. Simulation du fonctionnement du bassin versant

Le bilan hydrologique de la zone Poctefa a été simulé à partir du modèle Soil Water Assessment Tool à l'échelle de la masse d'eau.

Le bassin a une superficie de 23 194 ha. La Figure 8.3 représente le territoire modélisé.

L'exutoire se situe au niveau de Vicdessos. Banque Hydro suit le débit à Artigues et à Vicdessos. Les différents laboratoires de l'OMP suivent la station de Bernadouze. Le bassin présente plusieurs ouvrages hydrauliques (Figure 8.4) appartenant à Électricité De France (EDF).

Dans le projet PIRAGUA, les projections sont réalisées en utilisant un ensemble de données climatiques produites par le projet CLIMPY (Box 1). Compte tenu du temps et des ressources informatiques nécessaires pour mener à bien les différents projets hydrologiques avec chaque modèle climatique et chaque scénario, durant le projet PIRAGUA, une sous-sélection de 6 modèles a été considérée sous deux scénarios (RCP 4.5 et RCP 8.5). Les modèles sélectionnés sont présentés en Table 8.1.

Mise en place du modèle

La calibration et la validation ont été effectuées au pas de temps mensuel sur la période 1980-2013. La calibration a été effectuée de 1985 à 2005 dans un premier temps manuellement en s'aidant des études déjà effectuées (Grusson, 2016; Cakir, 2020). La calibration a ensuite été suivie d'une étape de calibration statistique à l'aide de l'outil SWAT-CUP. Les statistiques SUFI-2 ont été menées sur 1500 itérations. La validation a ensuite été effectuée sur la période 2006 à 2013.

L'hydrologie particulière de climat de montagne, nous ont poussé à mettre en place des bandes d'élévations pour calibrer la fonte de neige (plus d'explication dans Grusson et al., 2015). La présence des barrages perturbe tout l'aval du bassin de Vicdessos. Des barrages ont alors été mis en place au niveau du Pla de Soucelm et de la centrale d'Auzat.

Dans un objectif d'appliquer par la suite des scénarios de changements climatiques, l'évapotranspiration a été simulée à partir du module Hargreave et les fonctionnements des barrages ont été calibrés à partir de la capacité

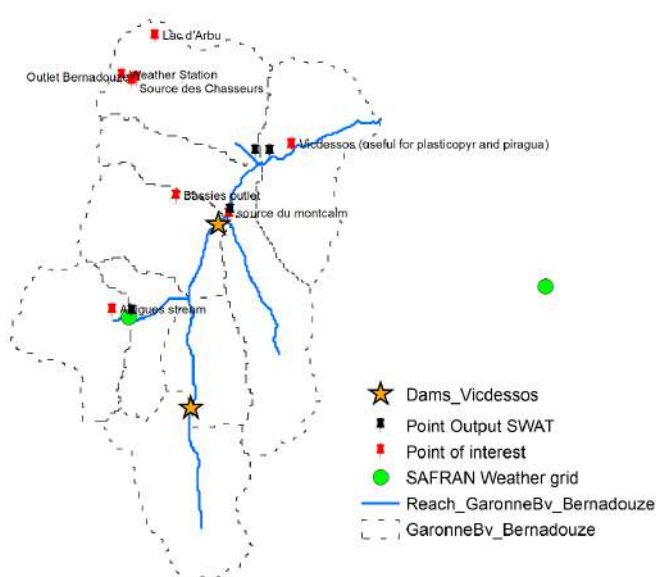


Figure 8.3. Visualisation du bassin versant de Videssos.

(Source : fait maison.)



Figure 8.4. Aménagement hydroélectrique d'Auzat.

(Source: EDF, 2019).

Tableau 8.1. Modèles de projections climatiques sélectionnés pour le cas d'étude.

Modèle	Institution	Référence
bcc.csm1.1	Beijing Climate center (China)	Xiao-Ge et al., 2013a; Xiao-Ge et al., 2013b.
CNRM.CM5	National center for meteorological research (France)	Voldoire et al., 2013.
inmcm4	Institute of Numerical Mathematics (Russia)	Volodin et al., 2013.
MIROC.ESM	Agency for Marine-Earth Science and Technology (Japan)	Watanabe et al., 2011.
MPI.ESM.MR	Max Plack Institut (Germany)	Giorgetta et al., 2013.
MRI.CGCM3	Meteorological research institute (Japan)	Yukimoto et al., 2012.

des barrages et des approximations des lâchers maximales et minimales mensuelles.

La Figure 8.5 représente les moyennes mensuelles interannuelles des débits sur la période 1980-2013 à la sortie du barrage de Pla de Soucelm. La Table 8.2 représente la comparaison des débits et la différence absolue qui est satisfaisante.

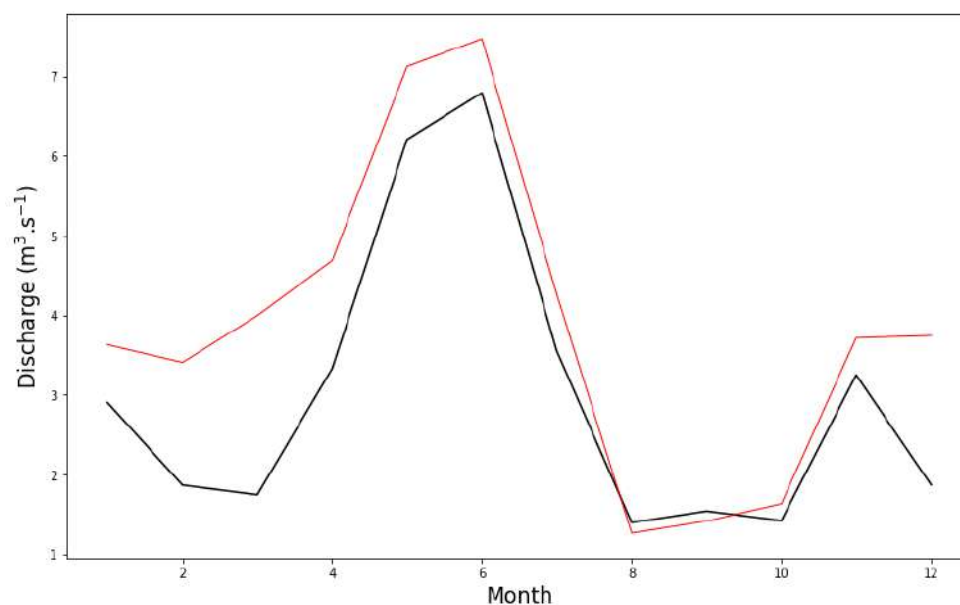


Figure 8.5. Comparaison entre les moyennes interannuelles mensuelles des débits observés (noir) et simulés (rouge) à la sortie du barrage du Pla de Soucelm entre 1980 et 2013.

(Source : fait maison.)

Box 8.1. Base de données climatiques et projections futurs.

Box 1. Le projet Interreg Poctefa CLIMPY (“Caractérisation de l’évolution du climat et apport d’informations pour l’adaptation des Pyrénées”) a produit un ensemble de données climatiques spécifiquement adapté à la région des Pyrénées. L’ensemble de données offert par CLIMPY est assez étendu et est basé sur des algorithmes dynamiques et statistiques, et sur la génération d’analyse de référence des températures et des précipitations journalières de haute résolution horizontale (grille de 5 km) et verticale (réanalyse SAFRAN par hauteurs de 300 m). CLIMPY comprend des projections obtenues à partir d’un ensemble de modèles climatiques globaux (GCM) du CMIP5 (19 modèles) et de combinaisons avec des modèles climatiques régionaux (RCM) d’Euro-Cordex (13 combinaisons GCM/RCM) en considérant quatre scénarios d’émissions (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5).

Tableau 8.2. Comparaison les moyennes interannuelles mensuelles des débits observés et simulés à la sortie du barrage du Pla de Soulcem entre 1980 et 2013 (unités: m³/s).

Mois	Débit simulé	Débit observé	Différence
1	3.1	2.9	-0.22
2	2.4	1.9	-0.57
3	2.8	1.7	-1.03
4	3.8	3.3	-0.49
5	6.1	6.2	0.13
6	7.2	6.8	-0.37
7	5.1	3.5	-1.55
8	2.4	1.4	-1.01
9	1.5	1.5	-0.02
10	1.6	1.4	-0.17
11	2.8	3.2	0.48
12	2.6	1.9	-0.77

8.3. Impact du changement climatique sur l'hydrologie

Depuis les cinquante dernières années, on observe une diminution significative de la couverture neigeuse et du débit annuel moyen dans les zones pyrénéennes (López-Moreno et al., 2008 ; Lorenzo-Lacruz et al., 2012). En considérant les effets du changement climatique (IPCC, 2014), les prédictions prévoient une augmentation générale des précipitations sur l'ensemble de l'année et notamment une augmentation de la variabilité des événements notamment par une aggravation des extrêmes. Quels sont les effets potentiels combinés des changements paysagers et du changement climatique (couvert neigeux).

Le couvert neigeux durera moins longtemps et sera moins important. Quel est l'impact sur l'hydrologie de têtes de bassins versants dans un contexte de changement paysager ?

La Figure 8.6 montre le régime mensuel des principales variables du bilan hydrologique (précipitations, débit, stock de neige, fonte des neiges, rendement en eau, infiltration, et évapotranspiration) à Artigue, en amont, pour chaque période et chaque scénario d'émission par rapport à la période de référence (1985-2013). Il présente ainsi des pluies plus importantes à Artigues durant la période estivale (Figure 8.6A). Les augmentations de température induisent directement des changements hydrologiques avec une influence sur l'évapotranspiration, mais également, sur la formation et la fonte des neiges. On observe une augmentation des débits particulièrement marquée sur la période de septembre à mai (Figure 8.6B). On a un effet notable de l'augmentation du ruissellement qui participe à l'augmentation des débits (Figure 8.6B). Ce phénomène est dû à plus de précipitations liquides en hiver en altitude, des stocks de neige moins importants (Figure 8.6D) et qui subissent des épisodes de fonte plus rapide et plus précoce (Figure 8.6D), et une augmentation significative des températures estivales. Le bilan hydrique est globalement impacté avec une inversion des courbes entre période de références et projections entre les saisons estivales et hivernales (Figure 8.6E). Il y a également des modifications dans l'infiltration de l'eau dans les nappes avec une augmentation sur l'ensemble de l'année excepté pour la période de mai à juillet.

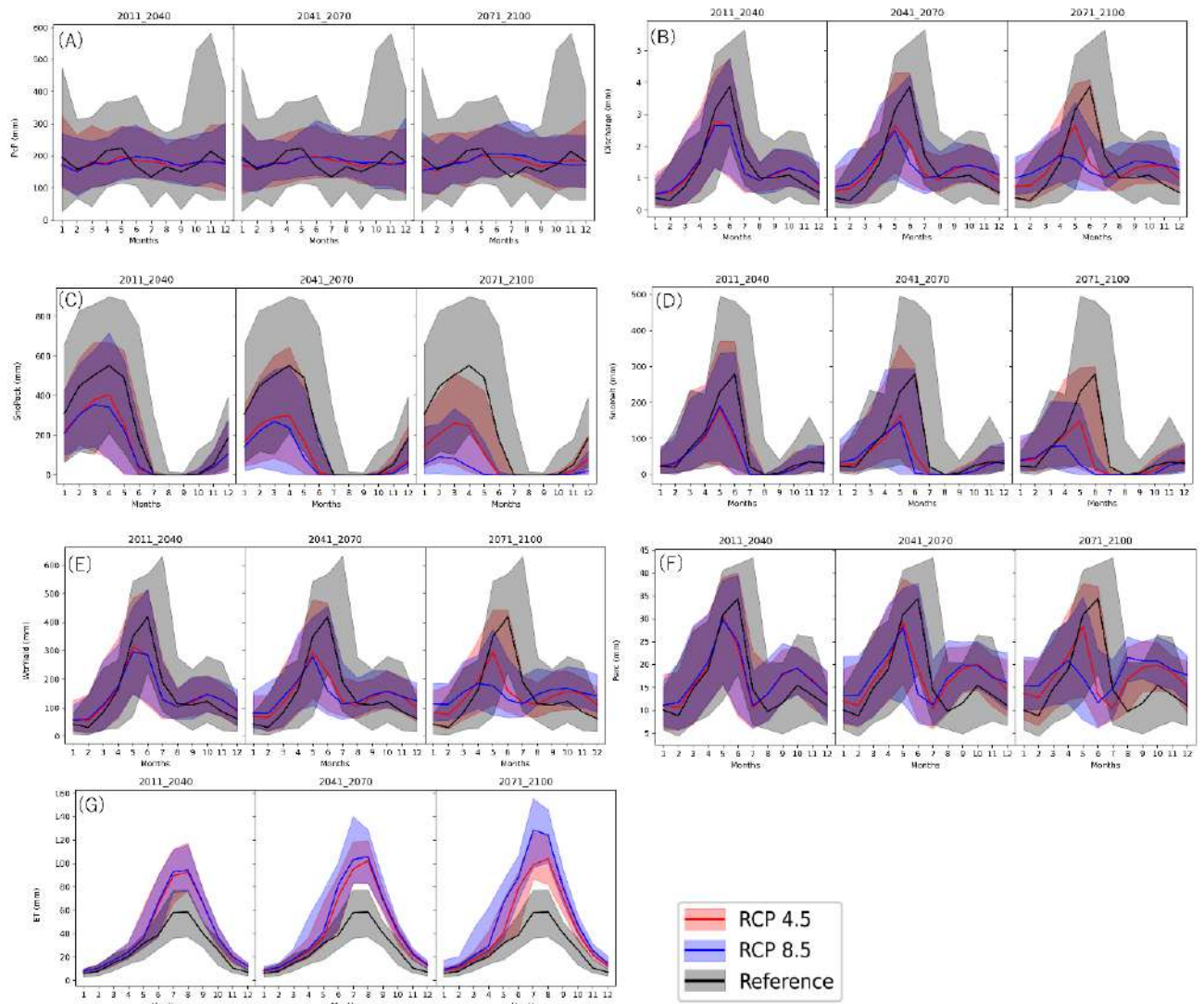


Figure 8.6. Précipitations mensuelles moyennes (Pcp), débit (discharge), stock de neige (SnoPack), fonte des neiges (SnoMelt), rendement en eau (WtrYield), infiltration (Perc) et évapotranspiration (ET) à Artigue, en amont, pour chaque période et chaque scénario d'émission par rapport à la période de référence (1985-2013). Les "enveloppes" ombrées indiquent la variabilité de l'ensemble des modèles, les lignes bleues indiquent les médianes pour le scénario RCP 8.5, les lignes rouges indiquent les médianes pour le scénario RCP4.5 et les lignes noires représentent la période de référence. L'unité est le millimètre.

(Source: fait maison.)

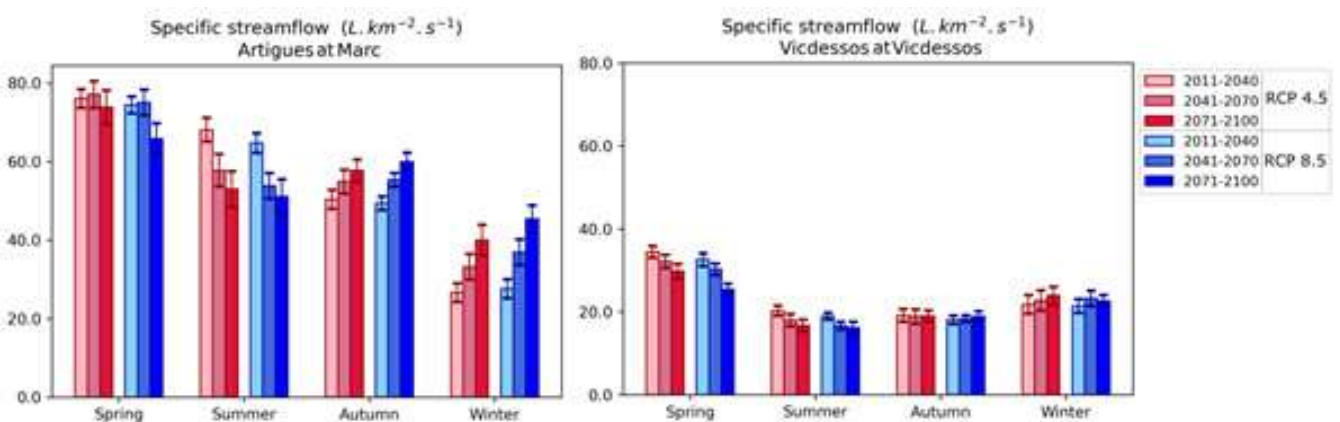


Figure 8.7. Débit spécifique saisonnier moyen à Artigue et Videssos pour chaque période de temps et chaque scénario d'émission. Les histogrammes rouges représentent les scénarios RCP 4.5 alors que les histogrammes bleus représentent le RCP 8.5. Printemps = AMJ, été = JAS, automne = OND, hiver = JFM.

(Source : fait maison.)

De plus, il y a globalement un décalage des processus hydrologiques avec des crues survenant plus tôt dans l'année et des périodes d'étiage plus sévère. De même, la Figure 8.6B montre que la durée des crues automnales est plus longue aux horizons 2050 et 2100 à Artigues.

Si les simulations hydrologiques associées aux modèles de changement climatique ne montrent pas forcément une modification future du volume d'eau annuel, la saisonnalité du flux d'eau va évoluer car le couvert neigeux hivernal va diminuer.

La Figure 8.7 présente les débits spécifiques saisonniers moyens à Artigue et Vicdessos en fonction de la période de référence et comparé aux deux scénarios d'émission RCP 4.5 et RCP 8.5. A Artigues, on observe une diminution significative des débits en été dès l'horizon 2050 et au printemps pour l'horizon 2100. Au contraire, le débit augmente de manière significative en hiver et en automne à l'horizon 2100. Le débit spécifique à Vicdessos est impacté par le barrage en amont. On observe ainsi une atténuation de l'augmentation des débits durant les saisons automnale et hivernal en stockant davantage d'eau dans les barrages. Cependant, les périodes d'étiage étant plus fréquentes et plus sévères, la présence de barrage avec la gestion actuelle ne

sera pas suffisante pour atténuer le manque d'eau au printemps et en été.

La variation des débits à l'horizon 2050 est significative si l'on regarde la variation saisonnière, mais est négligeable si l'on regarde la variation annuelle, les augmentations de débit de septembre à mai compensant les diminutions estivales (Figure 8.6B). À l'horizon 2100, les variations de débit semblent plus marquées, mais elles s'accompagnent également d'incertitudes plus grandes. Concernant les différentes composantes du cycle hydrologique, les résultats montrent un fort impact sur la teneur en eau du sol et une augmentation substantielle de l'évapotranspiration en hiver. En été, cependant, les flux d'évapotranspiration sont plus faibles (Figure 8.6G) en raison d'un manque de teneur en eau du sol pour répondre à la demande en évaporation, mettant en évidence d'éventuels déficits futurs des stocks d'eau utile au développement végétal. Les flux d'eau de surface diminuent considérablement en été, alors qu'en hiver, le débit augmente dans les têtes de bassin versant montagneuses en raison d'un stock de neige plus faible associé à une augmentation des précipitations liquides, ce qui profite au ruissellement de surface.

8.4. Stratégies d'adaptation : impact d'une coupe forestière sur les changements paysagers

L'exploitation du bois est une économie importante dans les Pyrénées et cette exploitation est susceptible d'augmenter avec l'utilisation de la biomasse comme source d'énergie et l'utilisation de bois comme matériau. Le CNRS a pu étudier une « coupe raisonnée et son impact » en concertation avec l'ONF maître d'œuvre de cette coupe. Au-delà de l'impact potentiel sur la biodiversité, la question se posait de l'impact de la coupe sur les cycles biogéochimiques en particulier sur les exports de matière organique issus de la tourbière de Bernadouze situé à proximité de la zone de coupe.

Ce cas d'étude illustre les relations imbriquées entre changements paysagers et changement climatique en montagne où à la fois la montagne est une sentinelle du changement climatique mais peut-être également vu comme une ressource en réponse aux stratégies d'adaptation au changement climatique.

Le schéma suivant (Figure 8.8) illustre les relations entre coupe forestière et le fonctionnement du bassin versant, en particulier les exports de carbone fluvial (Rosset, 2019). Si la coupe forestière a eu lieu encore récemment, les premiers suivis hydrogéochimiques ne semblent pas montrer de perturbation importante du milieu. La coupe raisonnée (1 arbre sur trois) a vraisemblablement limité les impacts dans un milieu à forte pente où une coupe à nue aurait eu un impact fort.

Simuler des situations extrêmes de gestion paysagère (coupe forestière à nue, reconquête forestière suite à la déprise pastorale) permet d'éclairer les relations complexes entre écosystèmes sensibles forestiers et tourbeux et changement climatique.

À la vue de ce schéma, de la reconquête actuelle par les fourrés voire les conifères dans le Haut-Vicdessos, et de la littérature scientifique, la reforestation de zones pastorales est un scénario à considérer. En effet, des études antérieures (Galop et al., 2013; MacDonald et al., 2000; Marquer et al., 2020) soulignent l'importance de la reforestation du bassin du Vicdessos au cours des dernières décennies, notamment des zones pastorales. De plus, des études soulignent

Box 2. Elaboration des stratégies d'adaptation dans la vallée du Haut-Vicdessos.

Box Les Pyrénées centrales dont le territoire du Haut-Vicdessos sont caractérisés par une mosaïque évolutive de paysages.

Afin de mieux gérer la ressource en eau dans le futur, nos travaux ont montré qu'il est nécessaire de considérer une approche intégrée associant gestion concertée des paysages et des ressources en eau.

Les écosystèmes forestiers sont des zones tampons régulant le cycle de l'eau et de la matière (sédiments, polluants).

L'amenuisement de la couverture neigeuse voire sa disparition à certaine altitude aura un impact sur la saisonnalité des flux d'eau et de sédiments.

Une évolution drastique future des paysages montagnards via une exploitation forestière exacerbée associée au changement climatique peut contribuer à modifier considérablement le cycle hydrologique et les flux de sédiments associés à l'érosion des pentes.

Afin d'établir une gestion durable des ressources en eau face aux changements climatiques en montagne, il est également nécessaire d'associer les gestionnaires des écosystèmes sensibles de montagne comme les tourbières ou les forêts.

A cette fin, il est nécessaire de connaître correctement les volumes des sols de forêt et des zones tourbeuses.

l'impact des coupes forestières sur les processus hydrologiques (Binet et al., 2020). Pour analyser l'impact des scénarios de gestion des milieux naturels dont la forêt sur les ressources en eau en tenant compte du changement climatique, trois scénarios hypothétiques de gestion des forêts ont été développés :

- Scénario 0 : aucun changement ;
- Scénario 1 : on considère une reforestation des zones de pâturage (18% de la superficie du bassin);
- Scénario 2 : aucun changement dans l'occupation des sols mais 30% de la surface forestière totale est coupée à blanc (16,3 km²) ;

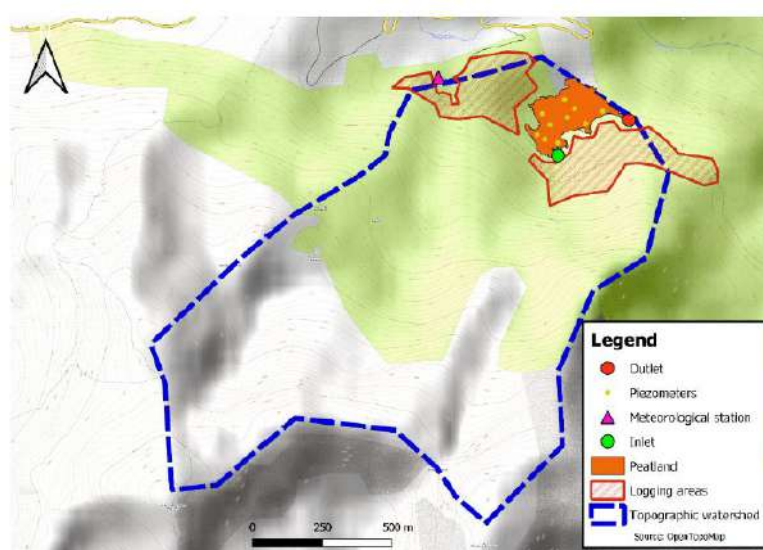


Figure 8.8. Cartographie de la coupe forestière menée dans le bassin versant de la tourbière de Bernadouze à l'automne 2016.

(Source : fait maison.)

- Scénarios 3 : on considère une reforestation des zones de pâturage et 30 % de la superficie forestière totale est coupée à blanc.

Les résultats de l'analyse montrent que le changement d'occupation des sols et de pratiques ainsi que la végétalisation des massifs pyrénéens pourrait avoir un impact important sur les

processus des cours d'eau. La Figure 8.10 montre l'évolution des variables de débit, de ruissellement et de rendement sédimentaire selon la gestion actuelle (S0) et trois scénarios d'aménagement (S1 à S3). Des études préliminaires à Bernadouze ont montré que l'impact de la coupe forestière raisonnée sur la période passée était limité (Rosset, 2019). L'exploitation forestière a un

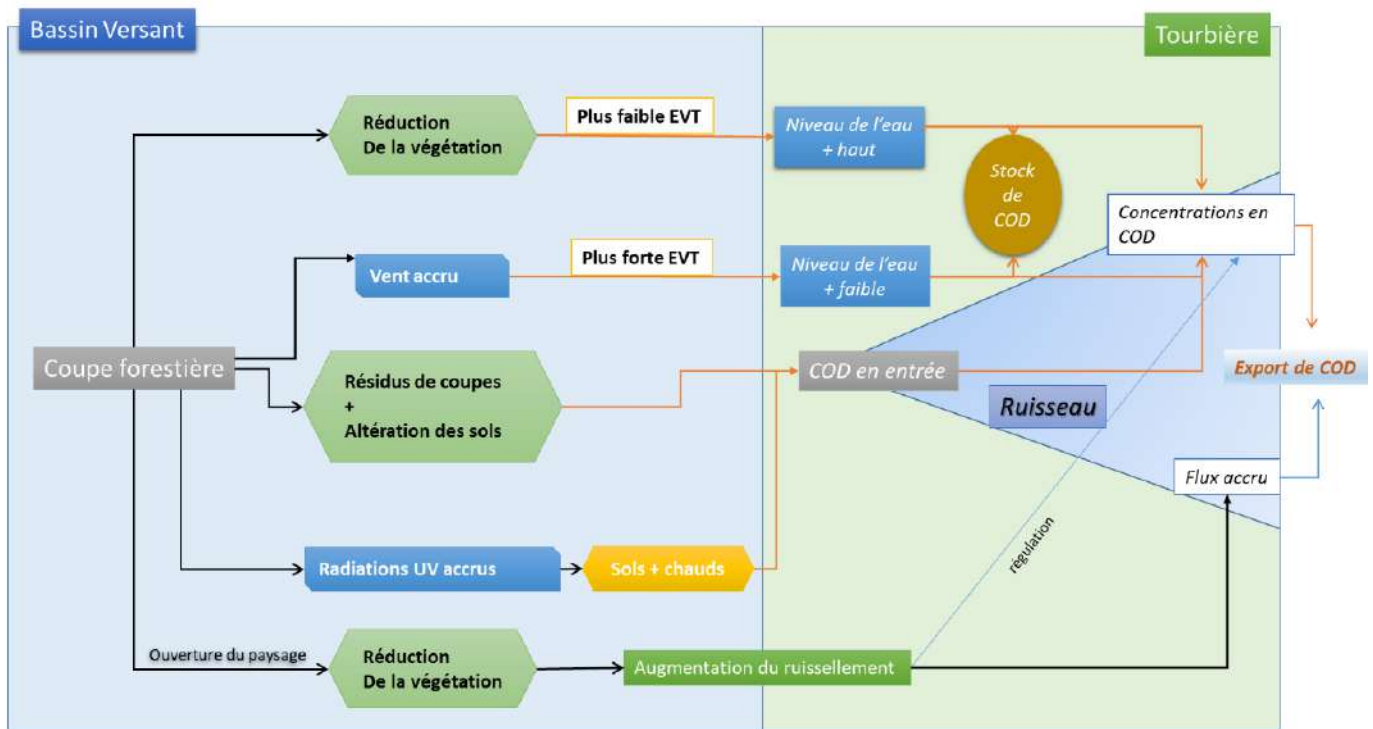


Figure 8.9. Sketch représentant les inter-relations entre les différentes variables hydrogéochimiques affectées potentiellement par une coupe forestière autour d'une tourbière. EVT : évapotranspiration, COD : carbone organique dissout.

(Source : d'après Rosset, 2019.)

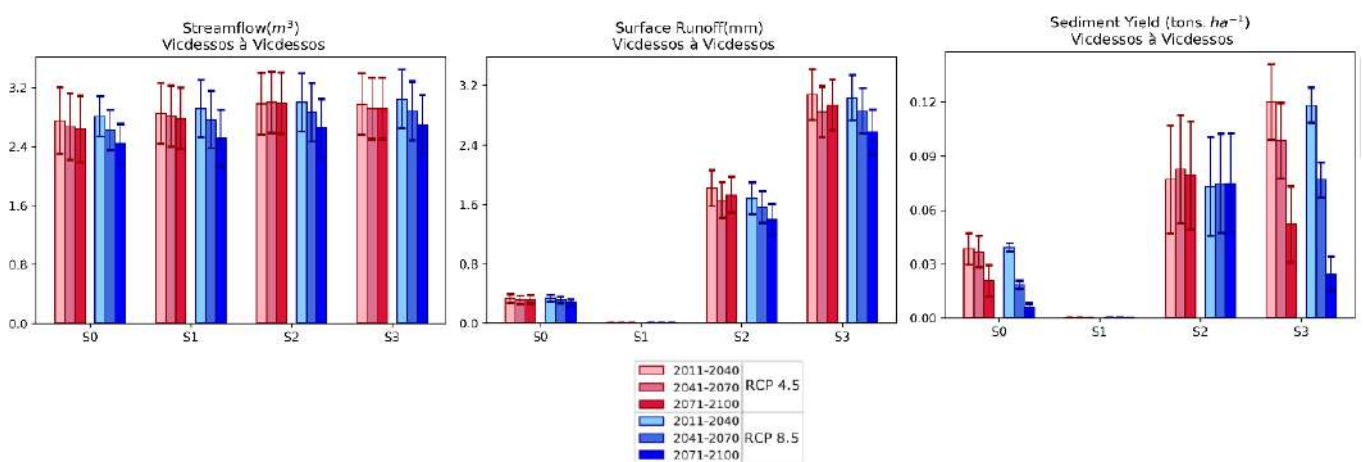


Figure 8.10. Débit annuel moyen ($m^3.s^{-1}$), ruissellement de surface (Hm^3) et l'apport en sédiments ($tons.ha^{-1}$) à Videssos pour chaque période et chaque scénario d'émission selon quatre scénarios de gestion. (S0: base; S1: pâturages transformés en forêt; S2: 30% de la superficie forestière totale est coupée à blanc; S3: pâturages transformés en forêt et 30% de la superficie forestière totale est coupée à blanc).

(Source : fait maison.)

impact sur les tourbières (Binet et al., 2020) et pourrait influencer le débit des cours d'eau. Une approche de modélisation de coupe forestière aux horizons 2050 et 2100 montre une influence significative sur le ruissellement, l'érosion et le débit. La coupe forestière entraîne une augmentation non significative du débit et une augmentation de l'érosion (+4.7 kg/ha/mois à l'horizon 2050 et + 6.7 kg/ha/mois à l'horizon 2100) et du ruissellement (+ 0.3 Hm³/mois aux horizons 2050 et 2100). A l'inverse, la végétalisation des terres pastorales entraîne une diminution de l'érosion et du ruissellement de respectivement -1.2 tons/ha/mois et -0.1 Hm³/mois aux horizons 2050 et 2100. Les principales recommandations pour l'élaboration d'une stratégie d'adaptation qui ressortent de l'étude de cas sont présentées dans le Box 2.

L'évolution paysagère est un facteur clé dans l'hydrologie des têtes de bassin versant de montagne. Non seulement l'hydrologie peut s'en trouver modifiée, mais l'érosion par une coupe forestière à nue est importante et selon nos simulations sera accrue par le changement climatique.

8.5. Conclusions

Dans le cas d'étude du bassin du Haut-Vicdessos, il a été montré une influence de la gestion des paysages sur le cycle de l'eau du bassin Haut-Vicdessos aux horizons 2050 et 2100. Une étude locale autour du site instrumenté de la tourbière de Bernadouze a quant à elle montré l'impact limitée d'une coupe forestière raisonnée.

Le suivi hydro-géochimique de la tourbière de Bernadouze (OHM Haut-Vicdessos, Service National d'Observation des Tourbières) dans le cadre de l'OPCC permet d'appréhender un grand nombre de variables hydro-écologiques sur plusieurs années. Ce suivi est indispensable pour comprendre les relations complexes entre changement climatique et changement paysager. Il permet également de valider les approches par modélisation avant d'étendre nos simulations hydrologiques à l'ensemble d'un bassin versant voire des Pyrénées.

Notre étude montre l'intérêt également de suivre un bassin versant sur plusieurs années pour comprendre les relations complexes entre hydrologie, services écosystémiques et usages de la montagne.

Les conclusions observées pour le bassin du Vicdessos pourraient être élargies à l'ensemble de la zone pyrénéenne présentant les mêmes caractéristiques hydrologiques et les mêmes estimations de la variabilité du grand cycle de l'eau aux horizons 2050 et 2100. Le phénomène de reforestation est similaire dans de nombreuses vallées pyrénéennes et la demande en énergie verte et en bois constituera une pression accrue sur les ressources forestières.

Le second constat est qu'il y a actuellement une sous-estimation de la superficie des tourbières dans les Pyrénées, qui ne tient pas compte de la structure en patchwork des tourbières. La couche Corine Land Cover 2018 utilisée dans la partie modélisation de ce projet estime que 275 ha de la superficie du massif pyrénéen est occupée par des zones humides. Elle ne tient pas compte également du facteur tridimensionnel et essentiel pour le cycle de l'eau d'une tourbière. La tourbière de Bernadouze est par exemple profonde de plus de 8m ! Ces sous-estimations peuvent avoir une influence dans les scénarios d'aménagement. En effet, il pourrait y avoir

une disparition accidentelle des tourbières due à l'anthropisation et aux changements globaux (sécheresse, incendies) si l'inventaire n'a pas été correctement effectué pouvant avoir une influence sur le cycle hydrologique et sédimentaire du bassin versant associé. De même, cet inventaire permettrait d'initialiser des discussions avec les acteurs du territoire pour mettre en place des plans d'aménagement pour prévenir les changements globaux (Figure 8.11).

Une étape importante et indispensable pour progresser dans la connaissance de l'influence de l'aménagement du territoire sur les tourbières et le cycle hydrologique, est la réalisation d'un inventaire 3D des tourbières pyrénéennes.

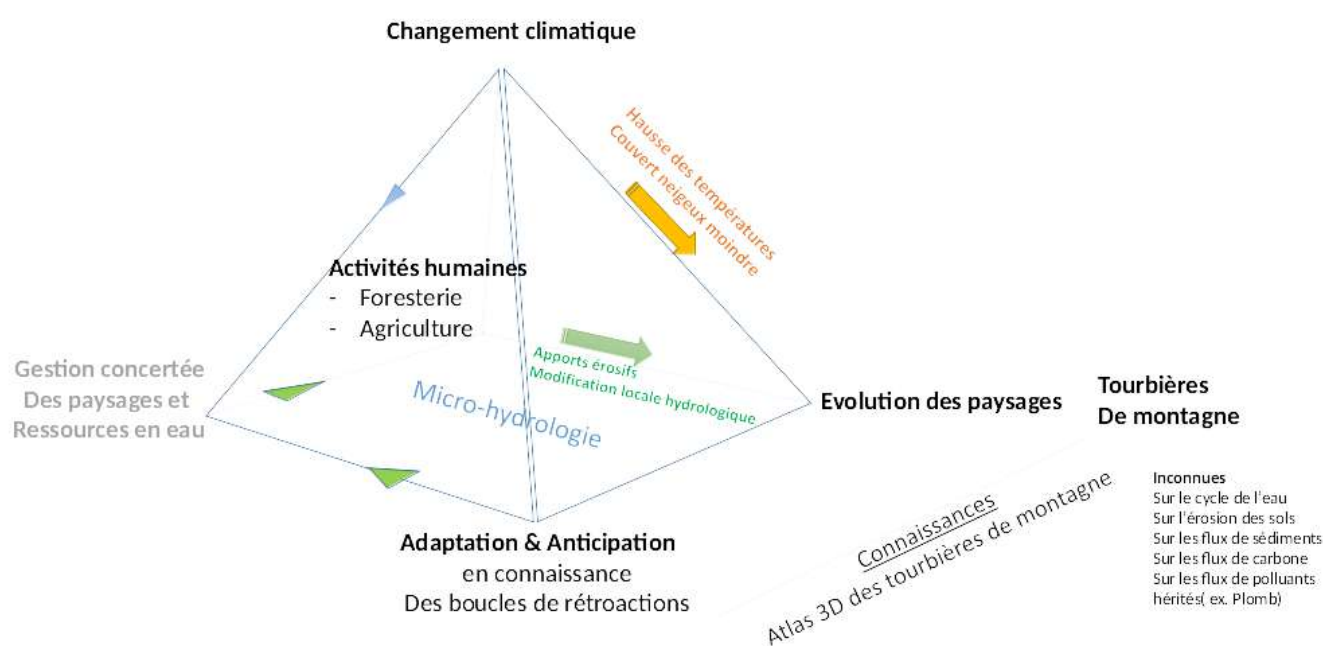


Figure 8.11. Micro-hydrologie des bassins versants de montagne : illustration des inconnues à caractériser pour une meilleure gestion concertée des paysages et des ressources en eau. (Fuente: elaboración propia.)

9. Impacts des inondations et des événements extrêmes sur les ressources hydriques des Pyrénées dans un contexte de changement climatique

**Montserrat Llasat-Botija (UB), María del Carmen Llasat (UB),
Erika Pardo (UB), Pere Quintana-Seguí (OE)**

Cette étude de cas aborde les mesures d'adaptation au risque d'inondation et à l'impact du changement climatique sur celui-ci. Nous présentons tout d'abord les différents types de mesures d'adaptation et précisons celles qui existent déjà dans les Pyrénées, en présentant une synthèse exhaustive de l'état de l'art dans le massif. Dans le but d'améliorer l'adaptation grâce à une meilleure coordination et de meilleures connaissances de ce qui existe déjà, la première proposition est axée sur le répertoriage des mesures déjà existantes, afin d'aider les territoires des Pyrénées dans la prise de décisions concernant les mesures à mettre en œuvre à l'avenir. Nous présentons ensuite la première cartographie d'épisodes d'inondations à l'échelle municipale, qui a été réalisée jusqu'à présent pour l'ensemble de la région pyrénéenne, couvrant la période 1981-2015. Son utilité est de faire connaître un phénomène qui est bien plus fréquent et nuisible que ce que l'on croit. Il convient de prendre en compte qu'en plus des dommages que les inondations peuvent provoquer, elles affectent aussi la distribution de l'eau, sa qualité et ses différentes utilisations. Cette cartographie et sa base de données associée sont également considérées comme des mesures d'adaptation qui aideront à l'identification des zones les plus affectées par les inondations, à la récupération de la mémoire historique et à la sensibilisation. Sur cette ligne a été développée la troisième proposition qui consiste en une application mobile, dans toutes les langues des Pyrénées et en anglais, dans le but d'impliquer les citoyens dans leur propre processus d'autonomisation contre les événements extrêmes et le changement climatique, et de compiler des informations utiles pour l'amélioration de leur connaissance. Les trois propositions font partie des dites mesures sociales d'adaptation et constituent des outils utiles pour le développement de processus participatifs qui permettent de trouver des solutions adaptées aux spécificités locales, ainsi que pour l'aide aux systèmes de prise de décision contre les inondations à l'échelle supramunicipale et suprarégionale. Enfin, nous avons intégré un paragraphe sur la sécheresse, où nous indiquons une étude comparative entre deux sécheresses qui ont affecté les Pyrénées à la fin des années 80 et au début du XXI^e siècle, et le rôle que les mesures d'adaptation ont joué.

9.1. Introduction

Il existe une fausse croyance selon laquelle les inondations constituent un phénomène peu commun et peu fréquent dans les régions pyrénéennes. Et le rapport avec les ressources hydriques se fait à peine. Cependant, les faits démontrent le contraire. Il suffit de penser aux inondations d'octobre 1940, qui ont touché les Pyrénées orientales, sur le versant français et le versant espagnol, au cours desquelles certaines sources signalent un dépassement de plus de 900 mm et d'une centaine de victimes. Ou aux inondations du 6 au 8 novembre 1982, qui ont dévasté une grande partie de l'Andorre et ont été spécialement violentes en Catalogne, en Aragon et en Occitanie. Ou les plus récentes du 19 juin 2013, connues pour leurs effets sur le bassin de la Garonne, mais aux graves impacts sur les autres bassins pyrénéens de Lérida et de Huesca. D'autre part, les inondations qui, dans le cas des Pyrénées sont dues à d'intenses pluies qui peuvent, de façon exceptionnelle, être associées à la fonte des neiges, affectent aussi gravement la qualité de l'eau, tant par l'apport solide et dissout qu'elles entraînent que par l'interruption, voire même la destruction, des services de dépuración et de distribution d'eau potable et d'autres effets en cascade. Il faut ajouter à tout cela qu'elles donnent souvent lieu à des glissements de terrain, des avalanches d'éboulis ou des chutes de pierres qui peuvent détruire des canalisations, couper des voies de communication ou interrompre les approvisionnements en énergie.

Outre les éventuels impacts sur les vies et les biens, les inondations affectent gravement la qualité de l'eau, tant par l'apport solide et dissout qu'elles entraînent que par l'interruption, voire même la destruction des services de dépuración et d'approvisionnement en eau. De même, elles peuvent toucher la production d'énergie hydroélectrique et les installations d'irrigation.

Le fonctionnement des bassins de retenue, en tant que réserves d'eau et d'énergie, est étroitement lié à leur impact sur les ressources hydriques. Les pluies intenses ou leur prévision peuvent obliger à leur utilisation comme bassins de laminage et c'est pourquoi, si ces derniers sont proches de leur niveau de sécurité, une vidange peut être nécessaire. À cela s'ajoute l'effet de colmatage et

d'envasement, dus à l'entraînement de la crue d'entrée, qui finit par affecter la durée de vie du bassin de retenue et du type de dépôts restant au fond.

D'autre part, les Pyrénées et leurs régions limitrophes montrent une grande hétérogénéité dans l'occupation et l'utilisation du territoire, tant spatiale que saisonnière. La conséquence en est une vulnérabilité et une exposition changeantes, aggravées par le fait qu'il n'existe pas un modèle de gestion et de prévention des inondations commun, mais six modèles qui répondent aux différentes administrations régionales et, à leur tour, des actions à l'échelle municipale et supramunicipale, ainsi que tant d'autres aux critères divers, à l'échelle du massif ou des parcs nationaux et naturels.

Dans ce chapitre, nous analysons tout d'abord les types de stratégies et de mesures d'adaptation les plus habituelles d'un point de vue général. Nous nous concentrons ensuite sur les stratégies spécifiques contre les inondations existant dans les différents programmes d'adaptation, en distinguant parmi les structurelles ou les physiques, les sociales et les institutionnelles. Puis, nous passons à l'analyse de l'état de l'art des mesures d'adaptation qui existent actuellement. Étant donné que pour pouvoir s'adapter, il est nécessaire d'avoir des connaissances approfondies de la problématique, nous introduisons la première base de données et cartographie d'inondations réalisée à l'échelle du massif en suivant une méthodologie systématique qui garantit l'intégration de tous les événements. La dernière partie se conclue par une proposition de science citoyenne (FLOODUP), utile à l'amélioration de l'adaptation à l'échelle individuelle.

9.2. Défis du changement climatique par rapport au risque d'évènements hydrologiques extrêmes

L'impact du changement climatique sur les précipitations n'est pas aussi évident que l'impact sur les températures et les risques qui y sont associés, la perte de couverture nivale et la montée du niveau de la mer. Bien qu'une hausse des températures implique une augmentation de la capacité pour contenir de la vapeur d'eau dans l'atmosphère et une augmentation de l'énergie convective potentielle disponible, ce qui mène à penser à une augmentation des pluies intenses, ce n'est pas le cas. Les facteurs responsables de ces précipitations, qui est le type habituel associé aux inondations, sont très divers et répondent aux causes thermodynamiques et dynamiques. La conséquence est qu'il n'existe pas un schéma commun dans la réponse des précipitations au changement climatique. Si dans le centre et le nord de l'Europe, les évidences et les probabilités d'une augmentation des pluies et des inondations sont élevées, ce n'est pas le cas dans la région méditerranéenne. De la péninsule ibérique à la péninsule d'Anatolie, nous rencontrons des régimes de précipitations très divers, comme le massif des Pyrénées lui-même (Box 9.1).

Le changement climatique et la plus grande exposition humaine (que ce soit par l'augmentation du nombre de résidences ou par la prolifération des utilisations de loisirs et de repos) peuvent gravement accroître l'incidence des inondations dans les Pyrénées à l'avenir. Cela est aggravé par l'augmentation du risque d'incendies, l'érosion des terrains et l'état des bassins, pouvant mener à un grand entraînement d'apport solide.

Le projet INTERREG POCTEFA CLIMPY concluait sur une diminution des précipitations de 2,5 % par décennie, en moyenne, avec une grande variabilité interannuelle depuis 1959, tandis qu'aucun changement significatif n'était prévu pour les projections des précipitations (OPCC, 2019). Sur la même ligne, aucun changement significatif n'était détecté pour les pluies intenses. L'une des difficultés de ce type d'étude est que les précipitations sont généralement à l'échelle quotidienne ou supérieure, lorsqu'une grande partie des évènements d'inondation subite sont la conséquence de pluies qui durent moins d'une journée. C'est pourquoi elles ne sont pas détectées. Pour le moment, les seules informations

Box 9.1: Impacts du changement climatique sur les événements hydrologiques extrêmes dans la région méditerranéenne.

Dans la régionalisation que l'IPCC a suivie dans tous ses rapports, ainsi que dans le « First Mediterranean Assessment Report on Environmental and Climate Change » (MedECC, 2020), les Pyrénées font partie de la région méditerranéenne. Dans cette région, il existe un accord notable sur l'augmentation de la durée et de la fréquence des périodes sèches, tant par rapport aux tendances observées qu'aux projections futures. Ces périodes, unies à la hausse des températures et, par conséquent, à la perte évaporative, indique une plus grande fréquence et une plus grande intensité des sécheresses. Dans le cas des pluies intenses et bien qu'une augmentation soit aussi attendue, il n'y a pas encore suffisamment de preuves pour soutenir une tendance commune significative. Une partie du manque d'évidences réside sur le fait que la plupart des fortes pluies dans le bassin méditerranéen se produit à l'échelle infra-quotidienne et n'est pas captée par les sorties des modèles. Un problème similaire a lieu avec les inondations, car il s'agit, en général, d'inondations subites (flash-floods) qui affectent des bassins non jaugés et dont il reste des évidences que lorsque des dommages se produisent. La difficulté de détection est plus grande dans les régions peu peuplées, telles que les Pyrénées.

élaborées sur une base infra-horaire est celle de Llasat et al. (2020), basée sur l'étude des précipitations à l'échelle 5-minutale, qui indique une augmentation de la contribution de la pluie convective dans le haut bassin du Llobregat face à une diminution dans les bassins pyrénéens de l'Ampurdán. Les résultats présentés au chapitre 3.2 de ce livre sont conformes à ceux du projet CLIMPY, n'étant pas possible de trouver une tendance significative commune des épisodes d'inondations dans les Pyrénées. Les dommages augmentent quand même et c'est pourquoi il est important d'aborder l'amélioration des stratégies d'adaptation.

9.3. Coordination des stratégies d'adaptation aux inondations dans les Pyrénées

Le territoire des Pyrénées et ses régions limitrophes montrent une grande hétérogénéité spatiale et temporelle dans la vulnérabilité et l'exposition aux inondations, aggravées par le fait qu'il n'existe pas de modèle commun de gestion et de prévention des inondations. La recherche des meilleures mesures d'adaptation requiert une connaissance préalable des types de mesures existantes, leurs avantages et leurs limites.

Le rapport de l'IPCC (IPCC, 2014) définit l'adaptation comme un processus d'ajustement au climat réel ou projeté et à ses effets. Dans les systèmes humains, l'adaptation essaie de modérer ou d'éviter les dommages ou de profiter des opportunités bénéfiques, ainsi que de faciliter l'ajustement au climat projeté et à ses effets. Les différents types de mesures d'adaptation sont détaillées dans la Box 9.2.

Nous présentons ci-après une sélection de mesures génériques d'adaptation aux inondations, catégorisées en fonction de la classification de l'IPCC de la Box 9.2 (Tableaux 9.1, 9.2 et 9.3), bien qu'il y ait des mesures qui, pour leurs caractéristiques, puissent se situer dans plusieurs catégories. Les mesures indiquées proviennent de différents documents tels que le rapport de l'IPCC ou des plans de gestion des risques d'inondations, tant à l'échelle européenne que nationale ou régionale. À côté de chaque catégorie sont indiqués des aspects qui peuvent supposer des restrictions et rendre difficile leur mise en œuvre.

Les mesures d'adaptation aux inondations proposées dans ce chapitre peuvent être considérées de type réactif, car elles sont basées sur les évidences (inondations et tendances observées), mais ont aussi un caractère proactif certain, étant données les projections qui indiquent une éventuelle augmentation des précipitations torrentielles et d'une hausse de l'exposition dans certaines zones des Pyrénées. D'après la proposition de l'IPCC (Box 9.2), il s'agirait de mesures sociales orientées à l'amélioration du comportement, à l'éducation et à l'information de la population. Elles auraient également une composante institutionnelle, car elles fournissent des informations à l'administration publique à l'échelle locale,

Tableau 9.1. Mesures structurelles contre les inondations

Mesures structurelles	Exemples	Restrictions
Ingénierie et construction	Digues, protections, barrages, bassins de régulation et de laminage, endiguements, amélioration du drainage des infrastructures linéaires. Corrections hydrologiques et forestières. Suivi des activités extractives près des zones flux préférentiel. Adaptation d'infrastructures de transport et de routes, codes de construction, adaptation de centrales hydroélectriques. Changements emplacements et systèmes protection campings.	Coûts, impact environnemental, impacts collatéraux (déplacement population, effets en cascade, défaillances critiques), « levee effect ». Incertitude associée aux scénarios futurs. « Longévité » de certaines infrastructures.
Technologie	Technologie de monitoring et de répertoriage des risques, systèmes traditionnels de construction. Alerte hydrométéorologique : systèmes alerte précoce, réseaux de surveillance, systèmes informations hydrologiques, inventaire et amélioration de points de contrôle passifs, améliorations de pronostic météorologique, plateformes de recherche. Technologies pour la diffusion d'alertes et les processus de « crowdsourcing ».	Limites informatiques, critères différents entre organismes, chaîne communication, croissance incertitude. Difficultés (technologiques/culturelles/sociales) d'accès.
Solutions fondées sur la nature	Adaptation basée sur les écosystèmes : reforestation bassins, entretien et conservation des lacs. Restauration et conservation des zones humides et des marais littoraux. Installation de « haies » pour freiner les crues. Infrastructures vertes dans zones urbaines : parcs urbains, toitures végétalisées, revêtements perméables, systèmes durables drainage, corridors verts.	Requiert la coopération entre institutions. Mesures au coût élevé, qui requièrent de grandes superficies (vs. demande élevée du sol), concurrence avec d'autres utilisations (voies de communication, etc.).
Services	Réseaux communautaires de soutien, nettoyage systèmes drainage (égouts), espaces publics ouverts en cas d'urgence ou de récupération post-événement. Infrastructure qui garantit un fonctionnement correct des services élémentaires (eau, électricité, routes, voies ferroviaires, transport public, etc.). Systèmes d'alerte précoce, d'urgence et de sauvetage pour les personnes pratiquant des sports de montagne (canyoning, randonnée), établissements touristiques vulnérables (campings), population isolée, etc. Diversification offre touristique (promotion patrimoine et culture). Services d'attention et de soutien aux bergers/transhumance.	Ignorance du cycle urbain de l'eau, vandalisme, comportements qui endommagent, salissent les rues, égouts, etc. Faible résilience des infrastructures aux phénomènes météorologiques extrêmes.

régionale et supranationale, pour pouvoir mener à bien les mesures économiques, programmes, régulation sur des utilisations du sol, etc.

Conformément à la classification précédente, nous indiquons dans ce paragraphe une compilation des mesures et stratégies d'adaptation existantes contre le risque d'inondation dans les Pyrénées. Il s'agit de la première proposition d'adaptation car, bien qu'elle semble simple, un répertoriage tel que celui présenté ici n'a pas été développé jusqu'à présent. Il s'agit d'un bon outil

d'adaptation sur la base de l'amélioration de la coordination et de l'apprentissage mutuel à partir d'autres expériences. Le Tableau 9.4 indique le nombre de mesures existantes regroupées en cinq types, conformément au paragraphe précédent. Le Tableau 9.5 développe chacune des mesures alors que la Figure 9.1 indique un répertoriage des mesures par territoire.

Afin d'élaborer la présente liste, nous avons consulté diverses plateformes telles qu'AdapteCCa, Climate-ADAPT et OPCC.

Tableau 9.2. Mesures sociales contre les inondations

Mesures sociales	Exemples	Restrictions
Comportement	Adaptation basée sur la communauté (réseaux sociaux), réduction vulnérabilité, autonomisation. Préparation des logements et plan d'évacuation, conservation de l'eau, diversification moyens subsistance, réseaux sociaux	Manque de sentiment d'appartenance à une communauté ou d'identité de la communauté, individualisme. Faible niveau d'éducation et économique. Phénomènes de marginalisation et de gentrification pour des raisons culturelles ou économiques. Inégalités sur la question de genre.
Éducation	Compilation informations historiques, intégration dans programmes éducatifs, formation technique, ateliers, etc. activités sensibilisation, expositions, science/participation citoyenne, réseaux sociaux, APP Apprentissage-service Partager connaissances locales et traditionnelles, mémoire historique, réseaux de recherche, génération d'indices holistiques pour la communication du risque et de l'alerte. Augmentation des équipements d'éducation environnementale et guides de montagne.	Mémoire court terme, faux sentiment de sécurité, information publique insuffisante, expériences individuelles/collectives différentes. Accès inégal à l'éducation et aux activités éducatives informelles.
Information	Cartographie, cartes des risques, services climatiques, systèmes d'alerte précoce, prévisions météorologiques, séries de données. Informations adressées aux touristes et immigrants. Services d'alerte et d'urgence. Plateformes information (AdapteCCa, Climate-Adapt, etc.). Analyses/études post-événement. Indicateurs et monitoring.	Cartographie, cartes des risques, services climatiques, systèmes d'alerte précoce, prévisions météorologiques, séries de données. Informations adressées aux touristes et immigrants. Services d'alerte et d'urgence. Plateformes information (AdapteCCa, Climate-Adapt, etc.). Analyses/études post-événement. Indicateurs et monitoring.

Tabla 9.3. Medidas institucionales frente a las inundaciones.

Mesures institutionnelles	Exemples	Restrictions
Économiques	Assurances, CCS, AGROSEGUROS, ENESA, déclaration de zone gravement touchée par une urgence de protection civile (loi 17/2015). Programmes UE (LIFE, FEADER, FEDER, FSE, etc.), Espagne : PIMA, Fond. Biodiversité, programmes autonomiques Paielements par services écosystémiques	Systèmes réassurance ne favorisent pas toujours les bonnes pratiques. Impopulaire (impôt) ou cher (aides). Incertitude dans leur utilité pour changer des comportements.
Politiques gouvernementales et programmes	Protection civile, gestion urgence. Plans d'adaptation européens, nationaux, régionaux, municipaux (directive de base sur les risques d'inondation, etc.), protocoles évacuation, amélioration communication alerte. Évaluation et gestion des risques d'inondation, participation citoyenne aux plans. Planification et gestion des bassins. Coordination administrative entre tous les acteurs impliqués dans la gestion des risques. Agendas 2030 locaux.	Manque (ou non-application) des plans locaux, manque de cartes d'évacuation. Mise en œuvre difficile par manque de priorité/intérêt politique. Nécessité de coopération des différents acteurs.
Lois et régulations	Planification et aménagement du territoire : Division en zones inondables, régulation occupation des sols, plans d'urbanisme autonomiques et municipaux, régulation domaine public hydraulique, réglementation constructions Lois pour la réduction des désastres, figures protection de zones.	Accès difficile aux cartes, compréhension difficile, intérêts (modifications prix sol). Parfois impopulaire (du fait de son imposition) et du risque politique. Requiert un suivi, inflexibilité. Mise en œuvre chère.

Box 9.2: Classification des mesures d'adaptation..

Il existe de nombreuses propositions pour classer les mesures d'adaptation, les plus habituelles étant les suivantes :

- anticipées ou proactives : elles se produisent avant que des impacts du changement climatique ne soient observés, sur la base des scénarios climatiques - réactives : elles se produisent en réponse aux preuves, après avoir observé des impacts du changement climatique
- planifiées : le processus d'adaptation est le résultat d'une décision politique délibérée en réponse aux changements observés ou attendus - autonomes ou spontanées : elles se produisent en fonction de l'évolution-même des systèmes, non comme une réponse consciente au changement climatique (changements écologiques dans les systèmes naturels, changements dans le marché, etc.)
- incrémentales ou progressives : l'objectif central du processus est de maintenir l'intégrité du système actuel (technologique, institutionnel, gouvernance, etc.) - transformationnelles : leur principal objectif est de changer des attributs fondamentaux de systèmes en réponse au climat actuel ou à celui espéré et à ses effets. Ce type d'adaptation est, en général, plus ambitieux et pour une plus grande échelle que l'incrémentale
- privée : celle qui est menée par des individus, des collectifs ou des entreprises privées - publique : celle qui est réalisée par une entité gouvernementale (municipale, régionale, etc.)

Il existe, néanmoins, d'autres classifications, en fonction de l'ampleur des mesures ou d'autres facteurs. Les mesures sont ainsi classées comme :

- grises (grey) ou molles (soft)
- options no-regrets, low-regrets ou win-win
- aux bénéfices à court ou à long terme
- localisées dans l'espace ou dans le secteur, ou généralisées
- à caractère normatif, ou à l'approche indicative ou promotionnelle
- individuelles ou collectives
- implicites ou explicites
- de protection, d'accommodement ou de régression

D'après le cinquième rapport de l'IPCC (2014), elles sont classées comme suit :

- structurelles/physiques : ingénierie et construction, technologie, services, fondées sur la nature
- sociales : comportement, éducation, information
- institutionnelles : économiques, politiques gouvernementales et programmes, lois et régulations

Nous avons également consulté différents plans d'adaptation au changement climatique et d'autres rapports. L'organisation s'est faite conformément à la classification indiquée dans le paragraphe précédent, bien que dans certains cas, la ressource identifiée puisse se situer dans différentes catégories, étant donné son caractère transversal. Le Tableau 9.5 détaille les différentes mesures existantes à l'heure actuelle et la

localisation de l'information si l'on souhaite la consulter.

La Figure 9.1 indique la distribution des différentes mesures d'adaptation qui existent à l'heure actuelle dans les sept régions pyrénéennes considérées. Nous observons une certaine prédominance des études/rapports/projets de recherche, notamment en Andorre et en Navarre. Les mesures institutionnelles/économiques

dominant dans les régions françaises. Dans le cas de la Catalogne et de l'Aragon, elles occupent un lieu similaire aux précédentes, ainsi que les institutionnelles/normatives-stratégies-plans, qui, dans le cas du Pays basque, sont celles qui ont le plus de poids.

Tableau 9.4. Résumé des mesures contre les inondations dans les Pyrénées existant à l'heure actuelle.

Tipos medidas recopiladas	Número	Ejemplo
Estructurales	10	Restauración espacios naturales, diques...
Sociales	10	Cartografía de riesgos en Andorra (AN-Haz-01)
Guías, manuales de buenas prácticas	12	Guía para la Reducción de la Vulnerabilidad de los Edificios Frente a las Inundaciones (MAPAMA,...)
Estudios, informes y proyectos de investigación	8	Proyecto LIFE Nadapta. Estrategia integrada para la adaptación al cambio climático en Navarra
Institucionales	14	Estrategia Vasca de Cambio Climático 2050

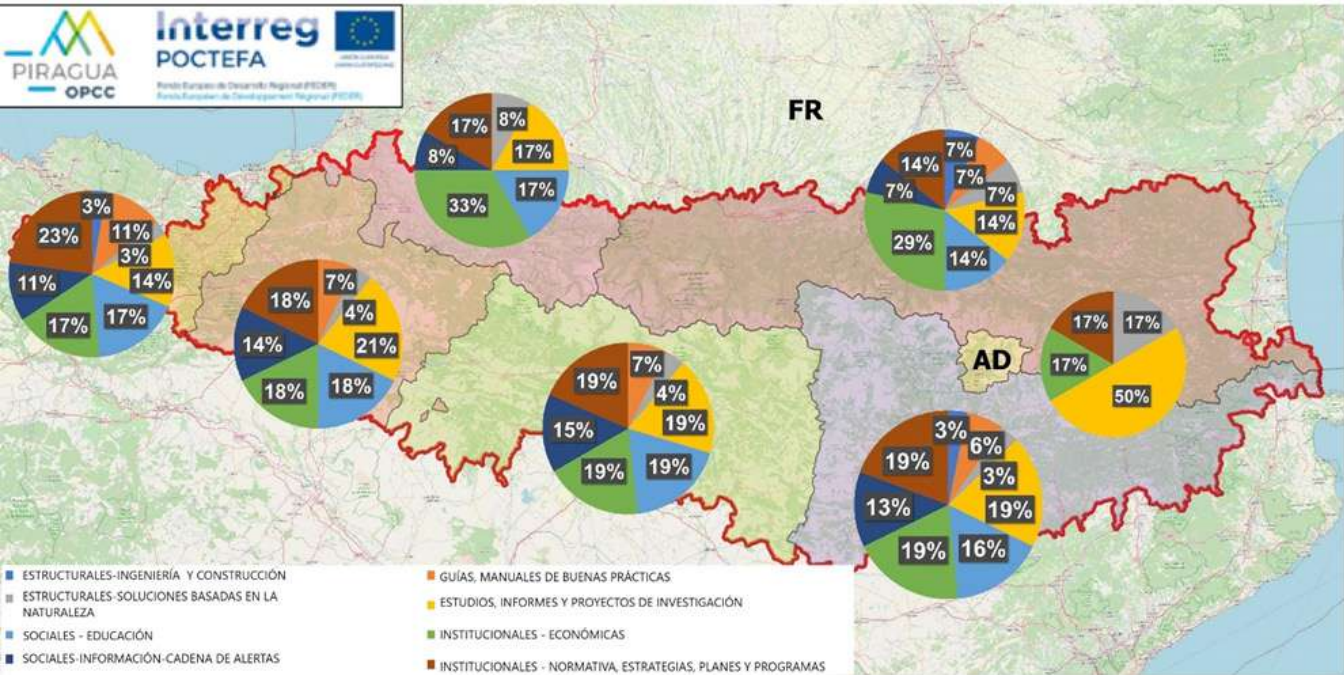


Figure 9.1. Répertoire des mesures d'adaptation aux inondations dans la région pyrénéenne.
(Source : élaboration propre).

Tabla 9.5. Medidas existentes frente a las inundaciones en los Pirineos.

Medida	Année	Référence
Structurelles : Ingénierie et construction		
Amélioration de l'adaptation par des digues et des barrages	2015	CLIMATE-ADAPT
Suppression de zones à haut risque	2015	CLIMATE-ADAPT
Structurelles : solutions fondées sur la nature		
Haies contre les inondations dans le sud de la France	2015	CLIMATE-ADAPT, European Natural Water Retention Measures (NWRM) platform
Restauration fluviale des écosystèmes des rivières Arga et Aragon, Espagne	2015	CLIMATE-ADAPT, European Natural Water Retention Measures (NWRM) platform
Récupération environnementale de marais littoraux de la Vega del Jaizubia	2017	ADAPTECCA
Récupération environnementale de la rive droite du fleuve Oria	2017	ADAPTECCA
Réhabilitation et restauration des rivières et des plaines fluviales	2019	CLIMATE-ADAPT
Espaces et corridors verts dans des zones urbaines	2015	CLIMATE-ADAPT
Établissement et restauration de végétation de rive comme mesure d'atténuation.	2015	CLIMATE-ADAPT
Gestion forestière sensible aux utilisations de l'eau.	2015	CLIMATE-ADAPT
Sociales : éducation		
Développement d'une culture du risque	2013	OPCC, 2013
Sociales : information et chaînes d'alertes		
Indicateur global d'adaptation aux impacts du changement climatique en Catalogne	2014	CLIMATE-ADAPT
Établissement de systèmes d'alerte précoce	2015	CLIMATE-ADAPT
Mise en œuvre de systèmes de monitoring continu et de contrôle permanent des débits (TRA-Wat-10, TRA-Wat-11 et TRA-Wat-13)	2013	
Cartographie des risques en Andorre (AN-Haz-01)	2013	OPCC, 2013
Cartographie des inondations de l'Èbre (TRA-Wat-14)	2013	OPCC, 2013
Cartographie des inondations en Navarre (TRA-Wat-18)	2013	OPCC, 2013
Mise en œuvre d'un réseau de suivi, d'analyse de la ressource et d'information en temps réel dans la CHE (Prévention des inondations et gestion de la ressource eau)	2011	OPCC, 2013b
Projet évolution des forêts de montagne et climat (TRA-FOR-02)	2013	OPCC, 2013
Prévention des inondations et gestion de la ressource eau. 2011. CHE. Mise en œuvre d'un réseau de suivi, d'analyse de la ressource et d'information en temps réel	2013	OPCC, 2013
Sociales : guides et manuels de bonnes pratiques		
Guide pour la réduction de la vulnérabilité des bâtiments contre les inondations	2017	ADAPTECCA
Solutions naturelles pour l'adaptation au changement climatique dans le domaine local de la Communauté autonome du Pays basque	2017	ADAPTECCA
Bonnes pratiques pour des mesures locales d'adaptation au changement climatique applicables au Pays basque	2017	ADAPTECCA
Adaptation au changement climatique des entités locales à partir d'une planification urbanistique. Guide méthodologique pour des communes navarraises. Propositions d'instructions techniques de planification	2018	ADAPTECCA
Normes résistantes au climat pour la conception, la construction et l'entretien des routes	2020	CLIMATE-ADAPT
Mesures d'opération et de construction pour garantir des infrastructures ferroviaires résistantes au climat	2021	CLIMATE-ADAPT

Systèmes hydrométéorologiques de suivi, de modélisation et de prévision	2021	CLIMATE-ADAPT
Guides d'adaptation au risque d'inondation : systèmes urbains de drainage durable	2019	ADAPTECCA
Guides d'adaptation au risque d'inondation : exploitations agricoles et élevages	2019	ADAPTECCA
Solutions. Cas pratiques d'adaptation au changement climatique	2020	ADAPTECCA
Guide pour la résilience locale, opportunités et défis de l'économie locale et de la société pour s'adapter au changement climatique	2020	ADAPTECCA
Guide d'adaptation des destinations touristiques au changement climatique. Destinations de montagne : les Pyrénées aragonaises	2020	ADAPTECCA

Sociales : études, rapports et projets de recherche

Étude sur les assurances des risques de catastrophes météorologiques et climatiques : inventaire et analyse des mécanismes de soutien à la prévention des dommages dans l'UE	2017	ADAPTECCA
Développement d'une méthodologie pour la mise en œuvre d'infrastructures vertes comme mesure d'adaptation au changement climatique dans des zones de montagne de la Péninsule ibérique (rapport final projet IVERCAM)	2018	ADAPTECCA
Projet Climate Change Adaptation Practices Across the EU	2017	CLIMATE-ADAPT
Projet LIFE NAdapta. Stratégie intégrée d'adaptation au changement climatique en Navarre	2017	Mapa buenas practicas adaptacion OPCC
Centre de recherche d'excellence BC3 (Basque Centre for Climate Change)	2017	ADAPTECCA
Projet européen interrégional « Territoires fluviaux d'Europe », qui concerne la Navarre, les Midi-Pyrénées et l'Aquitaine (TRA-Wat-17).	2013	OPCC, 2013
Risque d'inondation en Espagne : analyse et solutions pour la génération de territoires résilients	2021	ADAPTECCA
Adapting to rising river flood risk in the EU under climate change (PESETA IV project)	2020	ADAPTECCA

Institutionnelles : économiques

Financial tools for risk management	2015	CLIMATE-ADAPT
Plan PIMA Adapta AGUA	Desde 2015	
Compensation économique de biens assurés (CCS) ou dommages agricoles (AGROSEGURRO, ENESA) (Espagne)		RD 307/2005
Aides, crédits préférentiels, etc. Déclaration de zone gravement affectée par une urgence de protection civile (Espagne)		Ley 17/2015

Institutionnelles : réglementation, stratégies, plans et programmes

Stratégie d'adaptation au changement climatique sur la côte espagnole	2016	ADAPTECCA
Plan national d'adaptation au changement climatique 2021-2030	2021	ADAPTECCA
Stratégie espagnole de changement climatique et d'énergie propre	2007	ADAPTECCA
Adaptation à la directive sur les inondations en Europe	2019	CLIMATE-ADAPT
Plan basque de lutte contre le changement climatique 2008-2012	2012	ADAPTECCA
Stratégie basque de changement climatique 2050	2015	ADAPTECCA
Stratégie de gestion du risque d'inondation réalisée par l'Agence basque de l'eau (EK-Wat- 03)	2013	URAGENTZIA
Programme de mesures du domaine hydrologique	2019	Pla de gestió del risc d'inundació del districte de conca fluvial de Catalunya
Stratégie d'adaptation au changement climatique dans les Pyrénées	2021	OPCC
Stratégie européenne d'adaptation au changement climatique, 2021	2021	ADAPTECCA

9.4. Deux expériences pilotes pour l'amélioration des connaissances et la participation citoyenne dans l'adaptation au risque d'inondation dans les Pyrénées : la base de données PIRAGUA_flood et l'application FLOODUP

Nous pouvons affirmer qu'il existe une faible perception du risque d'inondation dans la région pyrénéenne : les crues sont plus fréquentes et ont un plus grand impact que ce que ses habitants et visiteurs perçoivent. C'est pour cela que la première mesure d'adaptation est basée sur l'amélioration de la connaissance dudit risque. Ainsi, dans le projet PIRAGUA, deux initiatives ont été menées afin d'améliorer la connaissance et l'évaluation du risque d'inondation dans la région pyrénéenne, ainsi que pour diffuser cette information et impliquer les citoyens : la base de données PIRAGUA_flood et l'application FLOODUP.

9.4.1 La base de données PIRAGUA_flood

La base de données PIRAGUA_flood (Llasat et al., 2022) est la première compilation à l'échelle de tout le massif pyrénéen d'épisodes d'inondation à l'échelle municipale et a été réalisée à partir d'une recherche intensive et exhaustive d'informations pour la période 1981-2015. Toutes les bases de données officielles ont été consultées à l'échelle nationale et territoriale, ainsi que la presse et des rapports scientifiques. Le résultat est une base de données, au libre accès et téléchargement via une licence open source, qui contient tous les épisodes d'inondations identifiés, classés en fonction de la gravité de leurs impacts et à la résolution spatiale municipale. La méthodologie, les sources d'information et les critères utilisés pour la classification des événements a été détaillée dans Zabaleta et al. (2022). Les principaux résultats de l'analyse de la base de données sont synthétisées dans la Box 9.3.

Sur la période 1981-2015, 181 événements d'inondation ont été enregistrés dans les Pyrénées. La création d'une base de données sur les épisodes d'inondation à l'échelle municipale et sa diffusion interactive via la plateforme de l'Observatoire pyrénéen du changement climatique est une mesure d'adaptation basée sur l'amélioration de la connaissance du territoire face aux événements extrêmes et à l'impact socioéconomique de ceux-ci.

La Figure 9.2 indique la fréquence avec laquelle ont été enregistrés les épisodes d'inondation avec des dommages notables (catastrophiques et extraordinaires) dans chacune des communes pyrénéennes entre 1981 et 2015, notamment la région orientale qui comprend une partie de l'Occitanie et de la Catalogne et, deuxièmement, les Pyrénées centrales.

L'analyse des tendances indique une augmentation significative des épisodes d'inondations dans la région pyrénéenne considérée dans sa totalité, conséquence notamment de l'augmentation des épisodes à caractère extraordinaire, la plupart d'entre eux provoqués par des pluies intenses et locales. Les régions d'Aquitaine et d'Occitanie présentent également une hausse significative du nombre d'inondations, notamment du fait de l'augmentation des inondations extraordinaires dans la première région, et des inondations ordinaires dans la seconde. Cette hausse peut être liée, partiellement ou totalement, à une augmentation de l'exposition et de la vulnérabilité, conséquence de la plus grande occupation du territoire, des activités en montagne et des biens exposés. Sous l'influence du changement climatique, une augmentation des pluies intenses est prévue, tant en ampleur qu'en fréquence, ce qui impliquerait aussi une hausse du

nombre d'inondations catastrophiques.

L'une des mesures d'adaptation au changement climatique et ses impacts est de diffuser ce type d'informations à la population grâce à des cartographies. Pour cela, hormis la base de données elle-même et les résultats analysés dans Zabaleta et al. (2022), la cartographie associée et toutes les informations de la base de données peuvent se consulter de façon interactive sur le géoportail de l'Observatoire pyrénéen du changement climatique (OPCC) (<https://www.opcc-ctp.org/es/geoportal>), dans la section Hydrologie. Quant aux inondations, plusieurs couches cartographiques ont été intégrées, avec le nombre d'épisodes d'inondations entre 1981 et 2015, à l'échelle municipale, par types d'ampleur (Figure 9.3).

Sur la carte, les communes apparaissent avec une échelle en dégradé bleu, en fonction du nombre d'épisodes total enregistrés sur la période (Figure 9.4).

En cliquant sur une commune en particulier, il est possible de connaître le nombre total d'événements et le nombre de chaque catégorie en fonction de l'impact de l'épisode : les catastrophiques ont provoqué de grands dommages dans un endroit des Pyrénées, entraînant la destruction totale ou partielle

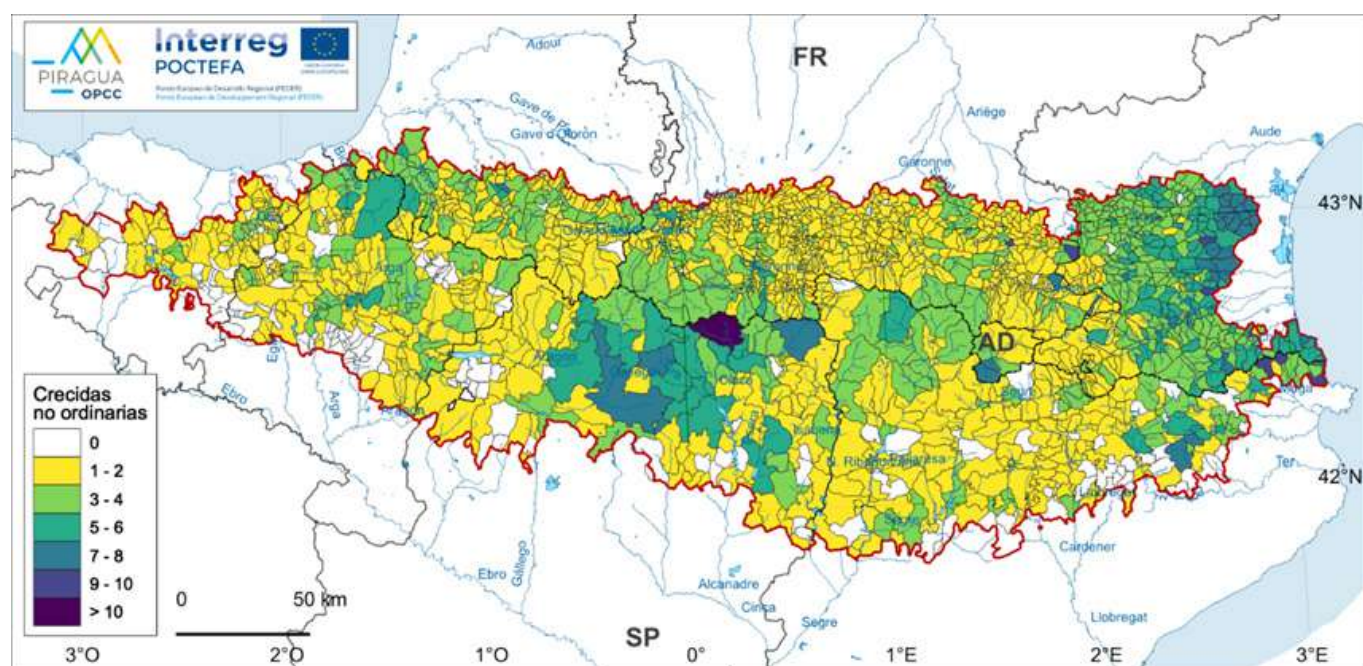


Figure 9.2. Nombre d'épisodes d'inondation avec des dommages extraordinaires et catastrophiques qui ont affecté chaque commune entre 1981 et 2015.

(Source : Zabaleta et al., 2022.)

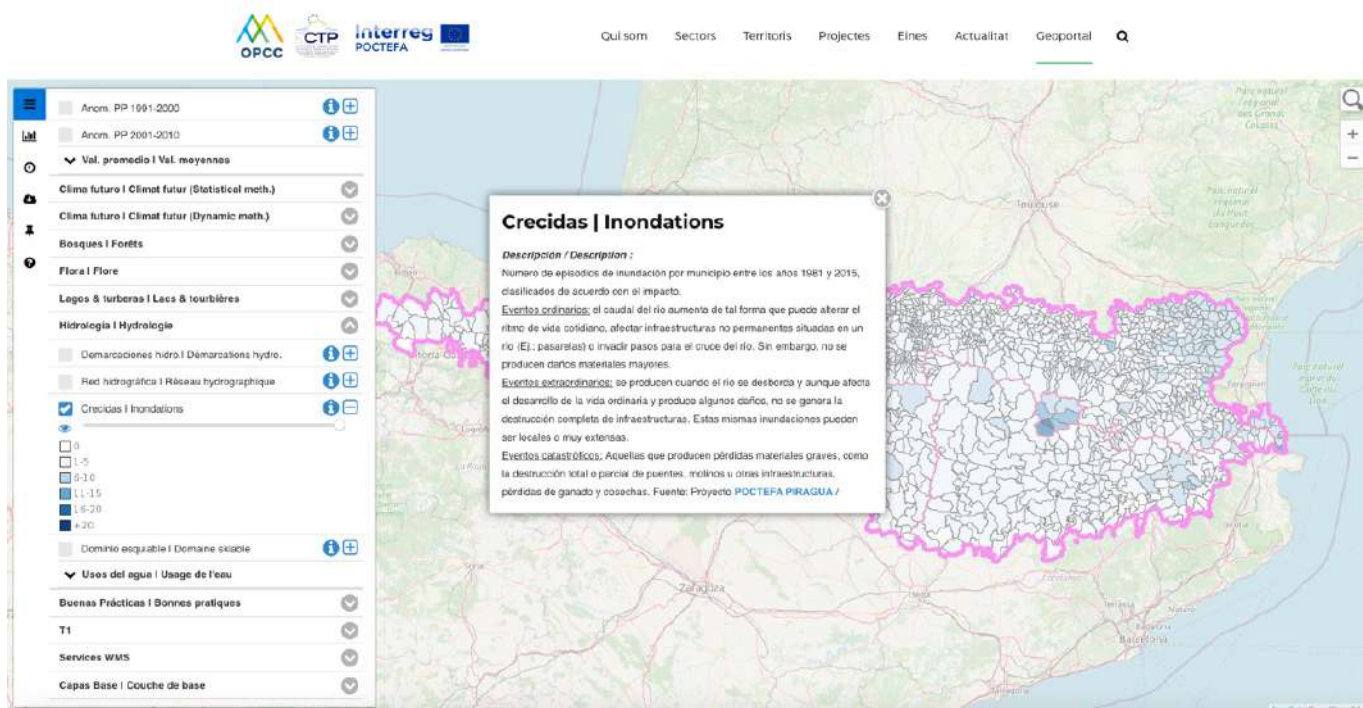


Figure 6.3. Menu contextuel qui indique le nombre d'épisodes classés par impact, pour la commune de Bielsa (province de Huesca).

(Source : OPCC, <https://www.opcc-ctp.org/ca/geoportal>).

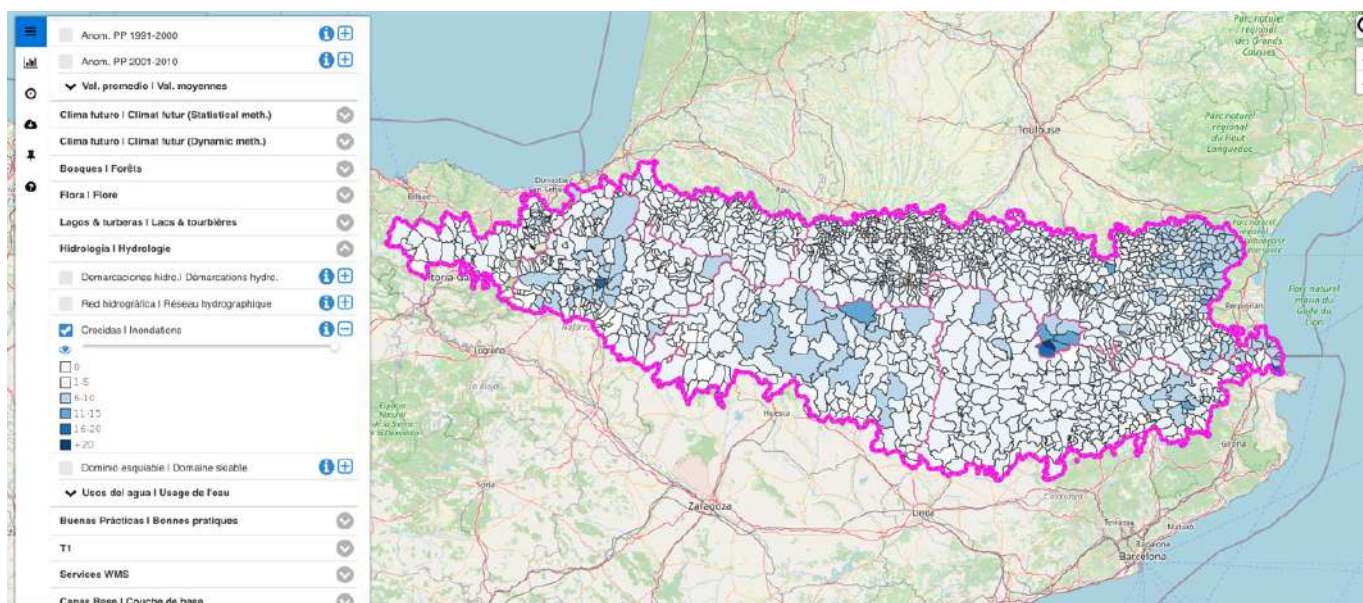


Figure 9.4. Couche du nombre de crues par commune colorée en fonction du nombre d'épisodes identifiés entre 1981 et 2015.

(Source : OPCC, <https://www.opcc-ctp.org/ca/geoportal>).

d'infrastructures. Les extraordinaires ont provoqué des dommages dans des sous-sols, rez-de-chaussée, champs, services (électricité, etc.), réseau de transports, etc. Les ordinaires font habituellement référence aux crues subites très locales qui produisent à peine des dommages, mais peuvent emporter des véhicules ou des personnes (Figure 9.5).

La diffusion d'une cartographie d'épisodes d'inondation à résolution municipale et de la base de données associée via la plateforme de l'OPCC est une mesure d'adaptation basée sur l'amélioration de la connaissance du territoire, utile pour la gestion du territoire, la sensibilisation de la population et le développement de solutions. Par conséquent, elle est en synergie avec les plans d'adaptation nationaux et internationaux.

L'adaptation au changement climatique et les inondations requiert la synergie entre politiques de différents niveaux. C'est l'un des grands enjeux de la Commission européenne pour l'adaptation au changement climatique. La mise en œuvre de la directive Inondations est en accord avec la mise en œuvre des directives Habitats et Oiseaux, Red Natura 2000. La gestion des forêts (EU Forest Strategy, 2013) et l'évaluation de l'impact environnemental (Environmental Impact

Assessment/Strategic Impact Assessment, EIA/SEA) sont également liées aux politiques du sol et de l'agriculture dans des zones inondables (EU Common Agricultural Policy).

Dans ce paragraphe sont indiquées les synergies du cas présenté avec le PNACC et la stratégie européenne :

Synergies avec le Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC) 2021-2030 :

- Ligne d'action 1.5. Formation pour l'utilisation d'informations climatiques (viseurs, plateformes de téléchargement de données, etc.)
- Ligne d'action 3.4. Gestion coordonnée et contingente des risques d'inondation
- Ligne d'action 15.1. Évaluation prospective des risques de désastre en considérant les projections et scénarios de changement climatique
- Ligne d'action 15.3. Soutien et renfort à la préparation contre les risques de désastres : observation, alerte précoce, communication et éducation selon des critères d'adaptation au changement climatique

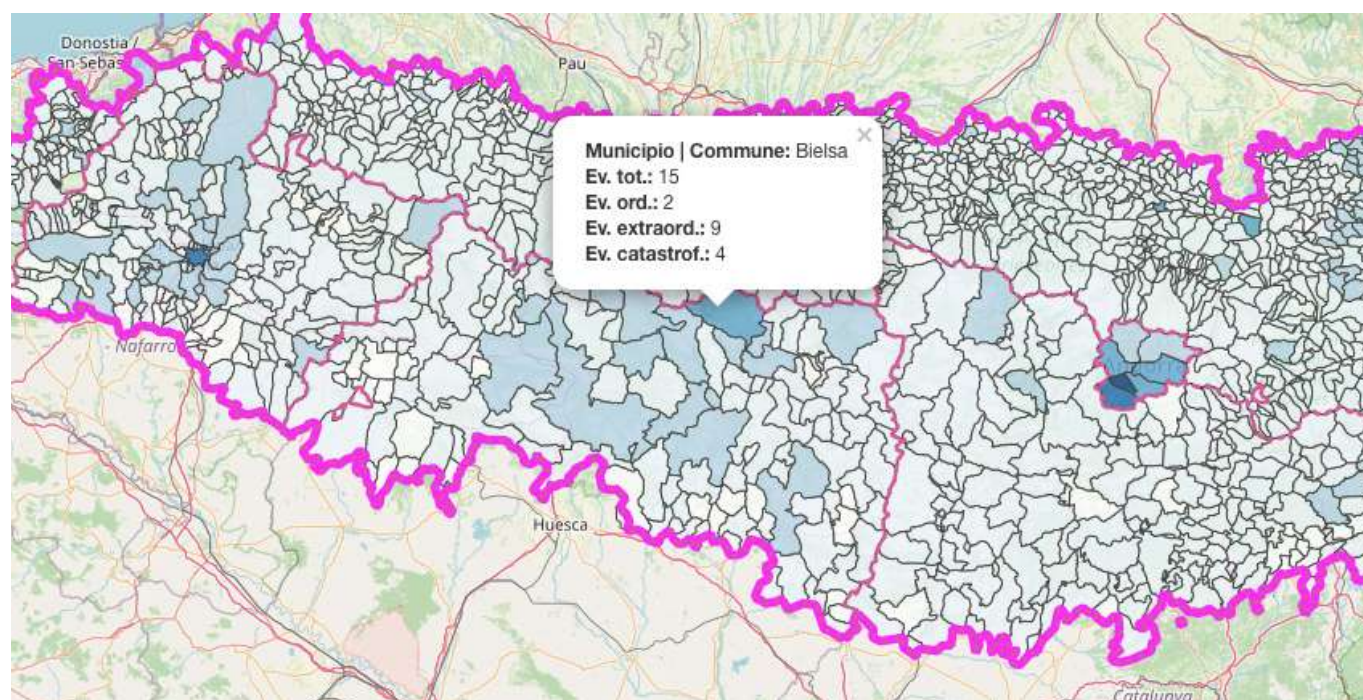


Figura 9.5. Menú emergente mostrando el número de episodios dentro clasificados por su impacto, para el municipio de Bielsa (provincia de Huesca).
(Fuente: OPCC, <https://www.opcc-ctp.org/ca/geoportal>).

Box 9.3 : Synthèse de la base de données PIRAGUA_flood.

Sur la période 1981-2015, 181 événements d'inondation se sont produits dans les Pyrénées, dont 128 ont affecté la partie espagnole, 43 la partie française et 46 l'Andorre. Certains d'entre eux ont été communs à deux ou trois pays, 41 épisodes transrégionaux ayant été identifiés. Les régions au plus grand nombre d'épisodes d'inondation sur cette période sont la Catalogne (66) et l'Andorre (46). De fait, à l'échelle municipale, le plus grand nombre d'épisodes a été enregistré à Andorra la Vella (27), bien que Pampelune soit la commune qui a enregistré le plus grand nombre d'épisodes aux dommages importants (17). À l'échelle de toute la région, 29 épisodes ont provoqué des dommages très graves et sont donc considérés catastrophiques ; 92 ont provoqué des dommages notables, bien que plus faibles que dans le cas précédent et sont donc considérés extraordinaires ; et 60 épisodes ont provoqué des débordements, des crues ou des inondations locales avec des dommages moindres et sont considérés ordinaires.

Entre 1996 et 2015, le Consortium de compensation d'assurances a indemnisé pour les inondations un total de 142,5 millions d'euros sur le versant pyrénéen espagnol. Le nombre total de victimes par inondation s'élève à 121 en Espagne, 31 en Andorre et 20 en France. Alors qu'en août 1996, le cas du camping Las Nieves de Biescas fut le plus meurtrier, avec 87 victimes mortelles, ce fut en novembre 1982 qu'a été enregistré l'épisode le plus vaste et le plus coûteux à l'échelle du massif, notamment pour les dommages subis en Andorre.

Synergies avec la stratégie d'adaptation au changement climatique de l'UE (février 2021) :

En ce qui concerne la cartographie signalée : « Les données sur les risques et les pertes liés au changement climatique sont cruciales pour améliorer la précision des évaluations des risques climatiques... Favorisera et soutiendra l'usage de son centre de données sur les risques pour harmoniser le registre et la compilation de données exhaustives et détaillées sur les risques et les pertes liés au changement climatique, et favorisera des collaborations publiques et privées à l'échelle nationale pour compiler et échanger ces données. »

9.4.2 Les inondations dans les Pyrénées dans le contexte du changement climatique : FLOODUP, un projet éducatif et de science citoyenne

Tout au long du projet PIRAGUA, il a été possible de partager et de connaître des expériences orientées à accroître la sensibilisation de la population sur le risque d'inondation. Ces pratiques visent aussi à provoquer des changements dans la société qui la rendront

plus résiliente à ce risque. Ces mesures sont les suivantes :

- Connaître le phénomène : différents types d'événements d'inondations.
- Connaître son territoire : catalogue des inondations dans les Pyrénées sur la période 1981-2015, quand et comment. Impacts.
- Prendre des mesures préventives : identification de zones à risque, occupation des sols, valeurs exposées.
- Être attentif aux prévisions : amélioration des prédictions (limites et améliorations potentielles) et de la chaîne d'alertes.
- Tenir compte des plans d'urgence et de la capacité de réponse : analyse de vulnérabilité.
- Ne pas oublier que la sécurité personnelle et celle des autres dépendent de chaque individu. C'est pourquoi, la collaboration est nécessaire pour résoudre le problème : processus de participation et « autonomisation », science citoyenne, collaboration interrégionale.
- Intervenir dans la « construction » de l'avenir : scénarios, solutions fondées sur la nature.

Box 9.4 : Les projets de science citoyenne comme stratégie d'adaptation.

La science citoyenne comprend les recherches effectuées par des citoyens, de façon partielle ou totale, pour lesquelles il est nécessaire que les participants réalisent une contribution active et soient conscients de leur participation. Les projets de science citoyenne peuvent se classer en fonction du niveau d'implication des participants. Au niveau le plus élémentaire, les participants agissent comme des capteurs ou en contribuant avec des données, mais sans s'impliquer dans d'autres phases de la recherche. Les projets de crowdsourcing se trouvent dans cette catégorie. En général, ils requièrent la participation d'un nombre élevé de personnes. Au niveau suivant se trouvent les projets pour lesquels les participants doivent réaliser une microtâche ou une observation élémentaire. Dans ces projets, il devient nécessaire qu'il y ait une préparation des participants, bien qu'il s'agisse d'une formation minimale. En général, les réseaux d'amateurs d'observation météorologique se situent à ce niveau. Au niveau suivant, les participants peuvent participer à la définition du problème, la conception de la méthodologie, la collecte de données, l'analyse, etc. c'est-à-dire à un plus grand nombre de phases du processus de recherche. Cela requiert davantage de préparation, car les participants jouent un rôle beaucoup plus actif et plus important. À ce niveau se situent, notamment, les projets qui viennent des citoyens, comme la demande d'évaluation du niveau de pollution atmosphérique d'une zone déterminée et, pour cela, l'installation (et, parfois, la construction) de capteurs pour leur mesure. Au niveau le plus haut, tout le projet de recherche est à la charge de personnes non professionnelles et, si des chercheurs professionnels y participent, ils jouent un rôle de facilitateurs.

Il existe de plus en plus d'accords pour lesquels il est nécessaire de réaliser des estimations bottom-up, participatives et basées sur la communauté, dans les études de résilience au changement climatique (IPCC, 2014 ; PNACC, 2021 ; Paul et al, 2019). Ces dernières années, de grands progrès ont été réalisés en science citoyenne, grâce aux avancées technologiques, la transformant en une grande opportunité. En outre, cette participation suppose une importante contribution pour disposer davantage d'informations sur les impacts et les besoins, notamment dans des zones où il n'est pas facile de disposer de données. Enfin, les processus participatifs de recherche ont un potentiel éducatif, de sensibilisation et transformateur important. La science citoyenne est très utile pour réaliser des études post-épisode, car elle permet de disposer d'un maximum d'informations, au-delà des sources traditionnelles d'information, telles que la presse ou les rapports officiels (Llasat-Botija et al, 2019 et 2018).

Dans ce contexte, une étude-pilote de cas de science citoyenne a été élaborée comme stratégie d'adaptation au changement climatique (Box 9.4). FLOODUP est un projet éducatif et de science citoyenne, dont la finalité est de compiler des informations sur les risques naturels et le changement climatique, notamment les inondations et les sécheresses, tout en sensibilisant, en éduquant et en autonomisant la population afin de réduire l'impact et d'augmenter la résilience.

Les objectifs de FLOODUP en tant qu'outil d'adaptation au changement climatique et aux inondations dans les Pyrénées sont les suivants :

- améliorer la capacité d'adaptation du territoire au changement climatique grâce à la connaissance et à la science citoyenne
- accroître le volume d'informations et de données disponibles concernant les impacts des risques hydrométéorologiques dans les Pyrénées, utiles pour la communauté scientifique
- retrouver la mémoire historique des épisodes d'inondations et de sécheresses, et devenir un dépositaire d'épisodes, de connaissances et de pratiques

La science citoyenne et les processus participatifs constituent une bonne stratégie d'adaptation au changement climatique et aux inondations. Ils permettent de connaître, d'apprendre, de cocréer et de participer à la prise de décisions, en favorisant une attitude plus responsable.

- améliorer l'éducation et la sensibilisation de la population sur le changement climatique et son impact sur les inondations et les sécheresses
- fournir un outil pour le développement de processus participatifs
- rendre visible l'impact du changement climatique au reste du territoire, au-delà des Pyrénées

De plus, nous pouvons indiquer des sous-objectifs liés aux capacités et aux comportements :

- observer et découvrir l'environnement avec un regard scientifique
- apprendre qu'il ne faut pas construire en zone inondable
- améliorer la capacité d'autoprotection et les comportements prudents, et partager les bonnes pratiques

Une App, un profil Twitter, un site web éducatif (<https://www.floodup.ub.edu>) et des supports pédagogiques ont été développés dans le cadre du projet. Le site web éducatif présente le projet et fournit des informations sur les inondations selon différents niveaux de complexité. Il est

possible d'accéder aux autres outils du projet, tels que les enquêtes post-épisode (après un épisode d'inondations) et la carte (Figure 9.6), au moyen du site web. Des activités éducatives et des ateliers participatifs ont également été réalisés (Box 9.5).

L'application pour mobile ou App FLOODUP a pour objectif de faciliter la compilation des informations susmentionnées (observations d'impacts de risques hydrométéorologiques et changement climatique, bonnes et mauvaises pratiques d'adaptation). Elle a été conçue pour des téléphones mobiles Android et iOS, en castillan, français, catalan, euskera et en anglais. Grâce à cette application, on accède à une carte pour consulter les observations partagées, et à des ressources informatives. Les usagers enregistrés peuvent télécharger des observations à l'aide d'un bref formulaire. Ce formulaire comprend des questions liées aux observations, leur rapport avec le changement climatique et avec l'acceptabilité des mesures d'adaptation (Figure 9.7).

Les projets de science citoyenne et les processus participatifs peuvent constituer une excellente stratégie d'adaptation au changement climatique et aux inondations. Ils permettent de connaître,



Figure 9.6. Flux de fonctionnement de la app FLOODUP.

(Source : www.floodup.ub.edu.)

Box 9.5 : Ateliers FLOODUP.

Des ateliers participatifs ont été réalisés dans la région du Ripollés afin de connaître la perception du risque d'inondation, de compiler des informations historiques et d'évaluer les principaux obstacles et motivations pour mettre en œuvre des mesures d'adaptation. Un questionnaire en ligne a également été élaboré et l'application pour mobile Floodup a été utilisée. 21 personnes, des représentants de partenaires importants du territoire, tels que des représentants de conseils municipaux, des techniciens de centrales hydroélectriques, du secteur de la gestion des urgences, du tourisme, de l'enseignement, des experts et des chercheurs, ont participé aux ateliers. Grâce aux ateliers, nous avons pu identifier plus de 20 points vulnérables ou de mauvaises pratiques en cas d'inondation dans la région. Nous avons également identifié des facteurs pouvant accroître le risque d'inondation, tels que des aspects liés à l'occupation de zones inondables ou des interventions dans des zones naturelles telles que les forêts rivulaires.

Grâce aux ateliers, nous avons pu distinguer des éléments et des impacts qui causent davantage de perturbations et de gênes lorsque des inondations se produisent, tels que les dommages sur des ponts et des voies de communication. Nous avons pu compiler plus de 40 images et plusieurs documents sur des inondations historiques. Pour la plupart, il s'agit d'épisodes historiques qui ont eu des conséquences catastrophiques (90 %), et un épisode récent qui a provoqué des dommages importants, notamment sur des routes et des zones de culture.

D'autre part, nous avons identifié les principaux défis et difficultés de la mise en œuvre de mesures d'adaptation, comme le manque ou la difficulté d'accès aux connaissances expertes par les décideurs et la résistance aux changements dans la physionomie des villages de haute montagne. Enfin, 20 mesures d'adaptation ont été identifiées et analysées pour leur donner la priorité. Parmi les mesures sélectionnées par les participants comme les plus importantes et les plus adéquates ressortent celles liées à l'amélioration de la connaissance et à l'éducation de la population (du territoire et les visiteurs) en ce qui concerne les risques naturels.

d'apprendre, de cocréer et de participer à la prise de décisions, en favorisant une attitude plus responsable et plus consciente.

Des mécanismes ont été définis pour évaluer l'impact qualitatif et quantitatif. Ils consistent en des enquêtes de satisfaction, des entretiens informels et des analyses de l'impact sur les réseaux sociaux. Des indicateurs ont également été définis pour réaliser cette évaluation :

- **Quantitatifs** : nombre de participants (plus de 300), nombre d'observations reçues (plus de 500), mesures d'adaptation identifiées (plus de 30), nombre d'institutions impliquées (plus de 20), mauvaises pratiques et points de risque identifiés (plus de 50).

- **Qualitatifs** : mesures d'adaptation compilées, nécessités et inquiétudes identifiées, niveau de satisfaction des participants, etc. Parmi les mesures sélectionnées comme les plus importantes et les plus adéquates se distinguent celles liées à l'amélioration de la connaissance et à l'éducation

de la population (du territoire et les visiteurs) sur les risques naturels. Concernant les inquiétudes identifiées, il convient de souligner celles liées à l'occupation de zones inondables, les interventions incorrectes dans des zones naturelles ou la difficulté d'accès aux connaissances expertes par les décideurs. Après la participation à des activités du projet, le niveau de satisfaction est élevé. Les personnes se montrent disponibles et intéressées à participer à des activités futures.

En ce qui concerne les coûts, il faut considérer les frais de la(les) personne(s) en charge de la dynamisation de la participation (y compris les réseaux sociaux), la réalisation d'activités, l'organisation et le traitement des informations compilées, les frais de développement (fonctionnel et de contenus) et de maintenance de l'application et des serveurs, ainsi que l'infrastructure informatique associée.

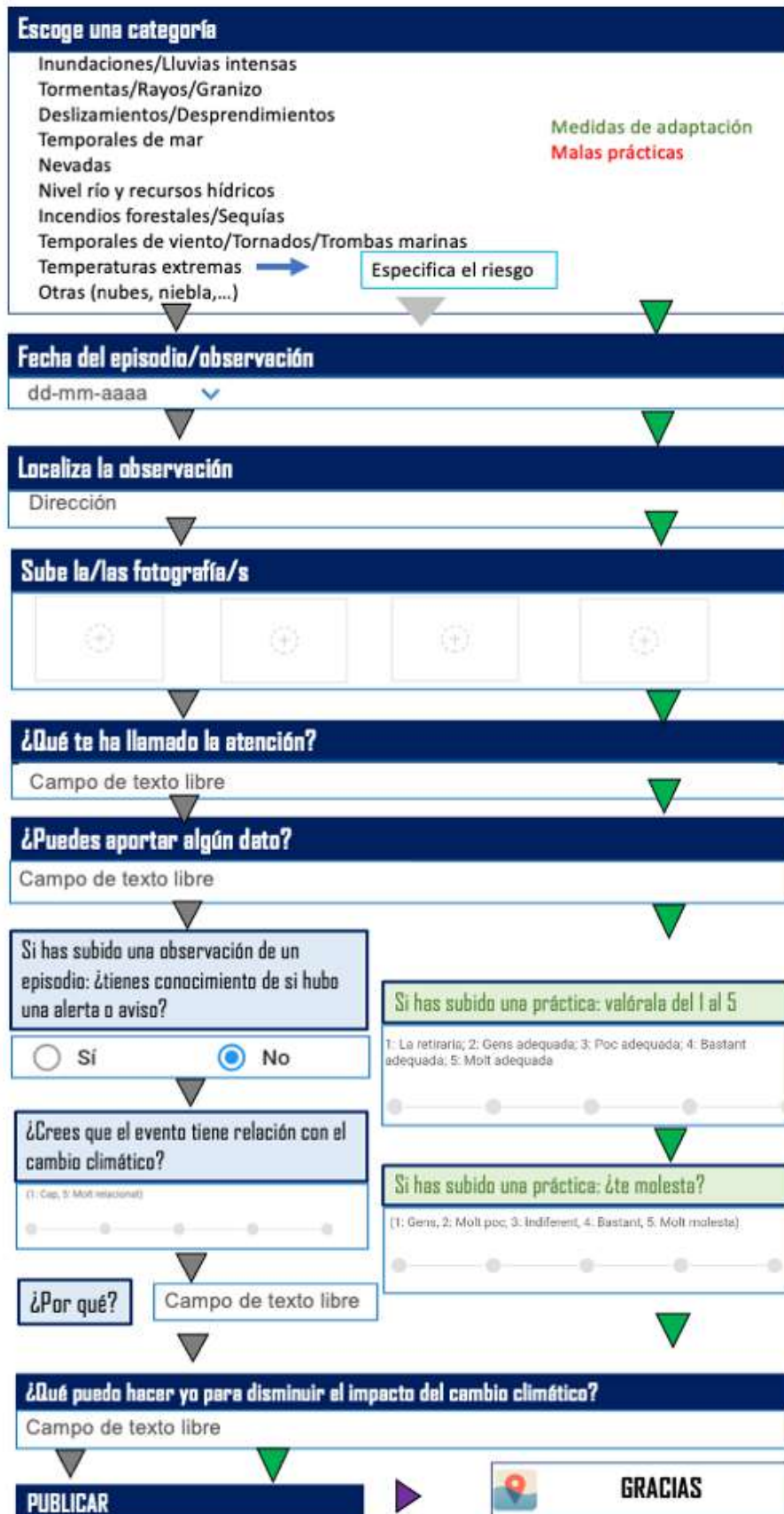


Figura 9.7. Flujo de funcionamiento de la app FLOODUP.
(Fuente: www.floodup.ub.edu.)

Les bénéfices sont nombreux, notamment :

- Aspects sociaux : augmentation de la sensibilisation des personnes impliquées, sentiments positifs et d'autonomisation des participants, sentiment de communauté et d'estime de soi grâce à l'environnement proche, compréhension des réseaux de personnes intra et interterritoriales pour faire face aux risques.
- Aspects techniques et scientifiques : l'augmentation des données disponibles et la mise à disposition des citoyens d'informations sur le risque d'inondations, l'augmentation de la visibilité de la région des Pyrénées, la création d'un outil basé sur la technologie liée à la réduction des désastres.

Les facteurs de succès de cette mesure sont basés sur :

- L'obtention de données et les participations/observations de qualité. Bien que la quantité soit importante, le projet doit aussi garantir la qualité. Pour cela, les observations suivent un processus de validation.
- L'identification des forces et faiblesses pour contribuer à des sociétés mieux préparées.
- L'identification des inquiétudes et des nécessités des communautés locales.
- L'obtention de l'implication des organisations locales.
- D'autre part, les facteurs limitants sont les suivants :
- Les technologies peuvent constituer une contrainte en termes de difficultés d'accès pour certains usagers (personnes âgées, etc.). Des mécanismes pour réduire ces difficultés sont envisagés. Une faible participation dans une zone se traduirait par une zone avec moins d'informations. On s'attend à ce qu'au fil du temps, la participation soit mise en œuvre et qu'elle augmente.

- Comme pour beaucoup d'autres mesures, le plus grand défi est le maintien futur. Le cas présent est envisagé selon un point de vue sur le long terme, tel que le démontre le chemin parcouru jusqu'à présent.
- Complexité en ce qui concerne le développement et la maintenance de l'application. Nécessité de valider et de gérer les observations.

Quant à la synergie avec des stratégies et des plans existants, il convient de signaler les synergies les plus importantes du cas qui nous occupe ici, avec le PNACC et la stratégie européenne, en considérant ses versants éducatifs, de science citoyenne et comme espace d'échange de connaissances :

Synergies avec le Plan national d'adaptation au changement climatique 2021-2030 :

- Ligne d'action 8.4. Communication, vulgarisation et participation citoyenne dans le domaine urbain
- Ligne d'action 9.2. Identification et transfert des connaissances vernaculaires utiles pour l'adaptation au changement climatique
- Ligne d'action 15.4. Renfort des systèmes d'autoprotection contre les désastres climatiques dans des communautés à risque
- Ligne d'action 17.2. Promotion de l'éducation pour la durabilité dans le système éducatif formel face aux défis du changement climatique
- Ligne d'action 17.4. Communautés d'adaptation
- Ligne d'action 17.5. Promotion de modes de vie résilients et adaptés au climat

Synergies avec la nouvelle stratégie d'adaptation au changement climatique de l'UE (février 2021)

« Encouragera une résilience locale, individuelle et juste (coalition Éducation pour le climat)... et Autonomisera les citoyens, qui jouent un rôle-clé dans le succès de la stratégie d'adaptation (Pacte européen pour le climat). »

9.5. Analyse du développement et application de mesures d'adaptation à la sécheresse en Catalogne

Les leçons tirées des événements hydriques extrêmes, tels que les sécheresses, et leur application dans les mesures d'adaptation réduisent considérablement la vulnérabilité face aux événements extrêmes.

Nous présentons ici une comparaison entre deux épisodes de sécheresse qui ont affecté la Catalogne, dans le but d'analyser l'impact des mesures d'adaptation développées après le premier épisode. Cette analyse fait partie des 60 cas d'épisodes d'inondations et de sécheresses dans le monde entier, qui ont été comparés dans l'article de Kreibich et al. (2022).

9.5.1 Introduction aux épisodes de sécheresse de 1986-1989 et de 2004-2008

Les deux épisodes météorologiques de sécheresse analysés ici ont affecté la Catalogne et se sont étendus sur une grande partie du nord de la péninsule ibérique (Figure 9.8). Le déficit de précipitations a été associé à des vagues de chaleur durant les mois d'été, qui ont accru l'évapotranspiration potentielle. Ils ont notamment touché le système Ter-Llobregat, constitué des fleuves Llobregat et Ter, ainsi que de la rivière Segre, qui s'alimentent principalement des précipitations qui tombent dans les Pyrénées. Les bassins de retenue existant dans ces fleuves sont essentiels dans la distribution des ressources hydriques en Catalogne, pour les raisons suivantes : 1) ils fournissent de l'eau à un grand nombre de villes, telles que Barcelone et Gérone, où se concentre la plupart de la population ; 2) ils fournissent de l'eau d'irrigation pour l'agriculture ; 3) ils fournissent de l'énergie hydroélectrique ; 4) ils s'utilisent comme un système de prévention contre les inondations ; 5) ils doivent maintenir des décharges écologiques. C'est donc un exemple de bassins de retenue polyvalents (contrôle d'inondations, hydroélectriques, décharges écologiques, approvisionnement en eau, irrigation).

9.5.2 L'épisode de sécheresse de 1986-1989

Cette période de quatre années s'est caractérisée par de longues sécheresses (jusqu'à quatre mois sans précipitations) et des vagues de chaleur. SAFRAN a permis d'analyser l'évolution des indices SPI-12 et SSMI2.1, qui donnent une bonne perspective de la sécheresse météorologique et hydrologique. Bien qu'aucune vague de chaleur n'ait été enregistrée en 1986, les mois de juillet et d'août ont enregistré de fortes anomalies négatives de SPI-12 et SSMI2.1 (inférieur à -3) dans la plupart de la péninsule ibérique. Il y a eu de nombreux incendies forestiers qui furent particulièrement nuisibles en Catalogne. Deux vagues de chaleur de six jours, qui ont affecté 13 et 27 provinces, respectivement, ont été enregistrées en août et en septembre 1987 en Espagne. Néanmoins, les mois les plus secs dans la plupart de l'Espagne furent mai et juin 1987, et uniquement dans le cas de la Catalogne, une vague de chaleur a coïncidé avec des valeurs négatives du SPI-12 en août. En octobre 1987, une inondation catastrophique a affecté la Catalogne et Valence (zone est de l'Espagne), avec plus de 400 mm et 700 mm en moins de cinq jours, respectivement. SPI et SSMI ont récupéré des valeurs positives jusqu'à septembre 1988, lorsque SPI-3 fut <-3 sur une grande partie de

la péninsule, principalement en Catalogne où SSMI2-1 a enregistré des valeurs <-3. Une brève vague de chaleur a été enregistrée en Espagne en septembre 1988 (23 provinces). Malgré les fortes pluies survenues en novembre 1988 en Catalogne, le déficit de précipitations et l'humidité du sol ne se sont pas récupérés et les valeurs négatives de SPI-12 et de SSMI2.1 ont dominé en Catalogne jusqu'en novembre 1989 (Figure 9.9). La situation s'est aggravée à cause de deux vagues de chaleur enregistrées en juillet 1989, la première pendant six jours, affectant 36 provinces.

Entre 1986 et 1989, plusieurs sécheresses presque consécutives se sont produites et ont provoqué de grandes pertes en raison du manque de planification. Cependant, elles ont constitué le point de départ de la création de mesures d'adaptation aux sécheresses.

À la suite des deux années sèches consécutives (1988 et 1989), les bassins de retenue du système Ter-Llobregat ont atteint les réserves minimales absolues, situation qui fut spécialement délicate, car la frange la plus touchée fut celle du Ter, lorsque celui-ci offre généralement l'apport le plus important et le plus régulier. Cette sécheresse a amené les bassins de retenue à des niveaux critiques, en général pires qu'en 2008, bien que climatiquement moins sévère. Mais ses effets furent plus graves, car le bassin de retenue de

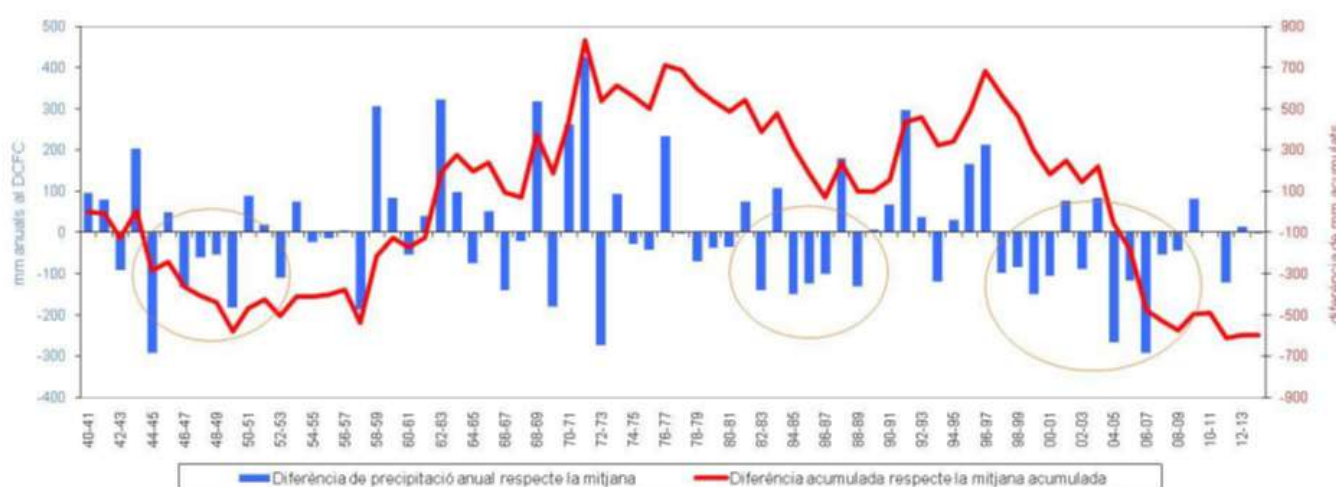


Figure 9.8. Évolution des anomalies des précipitations moyennes annuelles dans le district du bassin fluvial de Catalogne (DCFC) depuis l'année hydrologique 1940-1941 (de septembre à octobre) jusqu'à l'année hydrologique 2013-2014.

(Source : Agència Catalana de l'Aigua.)

la Llosa del Cavall n'existait pas encore, mais, surtout, parce que la plus faible perception des risques de désastre a permis une haute priorité aux décharges hydroélectriques, ce qui serait impensable aujourd'hui. Des restrictions dans le service de l'eau ont été sur le point d'être réalisées à Barcelone, ce qui signifie que le niveau maximal d'alerte a été atteint, bien qu'à cette époque, aucun plan de gestion de la sécheresse n'ait encore été mis en œuvre. Finalement, aucune restriction n'a été appliquée à la ville de Barcelone, car des pluies généralisées se sont produites dans toute la région en octobre 1990. Les impacts les plus importants en 1989 dus à la sécheresse furent les pertes sévères dans le secteur de l'agriculture, notamment les cultures de céréales, le manque d'eau potable, les pertes économiques dans les stations de ski du fait du manque de neige (pertes de plus de 5 milliards de pesetas, soit 67 193 153,3 € 2019, dans le secteur du tourisme d'hiver), et les pertes dans la production hydraulique. La sécheresse a aussi touché le reste de l'Espagne, où les pertes dans le secteur hydroélectrique à cause de la sécheresse entre octobre 1988 et janvier 1989 s'élevèrent à 3,5 milliards de pesetas, soit 503 948 649 € 2019, et de 20 à 25 % de la production de céréales ont été perdus. À la suite de la pénurie d'eau et de l'augmentation de la consommation d'électricité, les importations de pétrole et de charbon se sont accrues. Outre les impacts hydrologiques, plus de 350 incendies forestiers se sont produits et

45 000 ha ont brûlé en Catalogne en 1986, le cas le plus grave étant celui survenu dans la montagne de Montserrat, où plusieurs personnes sont mortes et plus de 41 % du Parc naturel protégé fut détruit. Des incendies forestiers d'hiver se sont également produits en Catalogne en 1986, fait qui n'est pas habituel. L'expérience de ces moments critiques a permis de tirer de nombreux enseignements qui ont été appliqués aux mesures d'adaptation aux sécheresses et de prévention contre les incendies forestiers au cours des années suivantes.

9.5.3 L'épisode de sécheresse de 2004-2008

Après la vague de chaleur qui a touché l'Europe en 2003, une période de pluies a été enregistrée dans le Levante en Espagne jusqu'à la fin 2004. En juin et juillet 2004, deux courtes vagues de chaleur, de trois jours chacune, ont été enregistrées. Dans certaines zones de cette région, des valeurs négatives de SPI-1 et de SPI-3 ont été enregistrées en août 2004 et ce déficit de précipitations s'est prolongé jusqu'en août 2005 (le déficit a affecté toute la péninsule ibérique durant l'année 2005). Au printemps et à l'été 2005, la sécheresse a touché la plupart de la péninsule ibérique, des valeurs de SPI-12 et de SSMI2.1 < -2 ayant été enregistrées, jusqu'à la fin

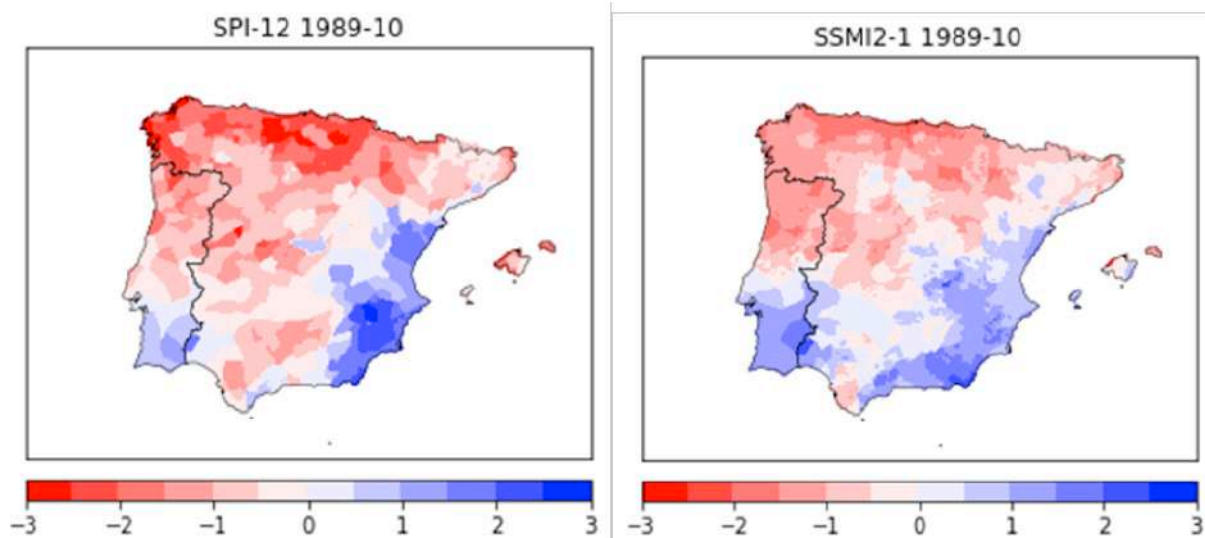


Figure 9.9. SPI-12 et SSMI2-1 en octobre 1989 en Espagne et au Portugal (gauche : ré-analyse de SAFRAN ; droite : SURFEX LSM forcé par SAFRAN).

(Source : élaboration propre.)

octobre 2005 en Catalogne, où deux inondations ont affecté cette région en octobre et novembre 2005 (Figure 9.10). Cependant, les valeurs négatives du SPI-12 se sont prolongées jusqu'à l'été 2006 sur le Levant en Espagne. Deux vagues de chaleur de quatre jours chacune ont été enregistrées dans certaines régions d'Espagne en juillet et août 2005 et deux autres de trois jours en juillet et septembre 2006. Un événement météorologique consécutif de sécheresse a débuté en Catalogne en avril 2006 et a duré jusqu'en août 2006 et a recommencé en novembre 2006 et a duré jusqu'en avril 2007, si nous considérons les valeurs de SPI-3. Mais si nous considérons celles du SPI-12, cet événement pourrait être considéré comme le même événement de sécheresse des Pyrénées, où naît la plupart de ses rivières. Après un printemps pluvieux, des valeurs négatives de SPI-3 dans le nord-est de l'Espagne ont été enregistrées de juillet 2007 à mai 2008, et des valeurs négatives de SSMI2.1 ont confirmé un sol sec dans toute la péninsule ibérique, sauf dans la communauté de Valence (est de l'Espagne). Une courte vague de chaleur (quatre jours) a été enregistrée en juillet 2007.

Entre 2004 et 2009, une succession d'épisodes de sécheresse a eu lieu et a mené la Catalogne à une situation critique. Dans de nombreuses sphères, l'intensité et l'étendue de cette période de sécheresse a été liée à l'action du changement climatique.

La sécheresse a provoqué de très lourdes pertes économiques dans le secteur primaire. Dans les activités agricoles, la sécheresse a affecté tant les cultures non irriguées que celles irriguées. Pour les premières, du fait de l'absence de précipitations, et pour les secondes, du fait du manque d'eau dans les bassins de retenue. Les céréales de la région de Lérida ont été les premières cultures à être touchées, avec des pertes, dans certains cas, de 100 % de la récolte. Les cultures de fruits secs, l'olive et la vigne ont été touchées par l'insuffisance de pluies dans les régions de Tarragone et de Lérida. Le réseau de canaux d'irrigation dans les régions occidentales a adopté différentes stratégies pour doser l'approvisionnement en eau. Par exemple, la Communauté d'irrigants du canal d'Urgell a fermé le canal durant quelques jours au printemps, afin de prolonger la saison d'irrigation. Toutefois, l'adoption de toutes ces mesures extrêmes a fait diminuer de façon significative la production de cultures irriguées. Le manque d'eau pour l'élevage dans les régions du piémont pyrénéen et de Lérida a impliqué le transport d'eau dans des camions-citernes. Les coûts d'exploitation de l'élevage ont augmenté en grande partie à cause de cela. Les secteurs les plus touchés ont été l'élevage ovin et l'élevage caprin. Dans la zone pyrénéenne, la transhumance estivale devait se faire par la vallée d'Aran, la région la moins affectée par la sécheresse. Dans le reste des Pyrénées, les pâturages étaient très

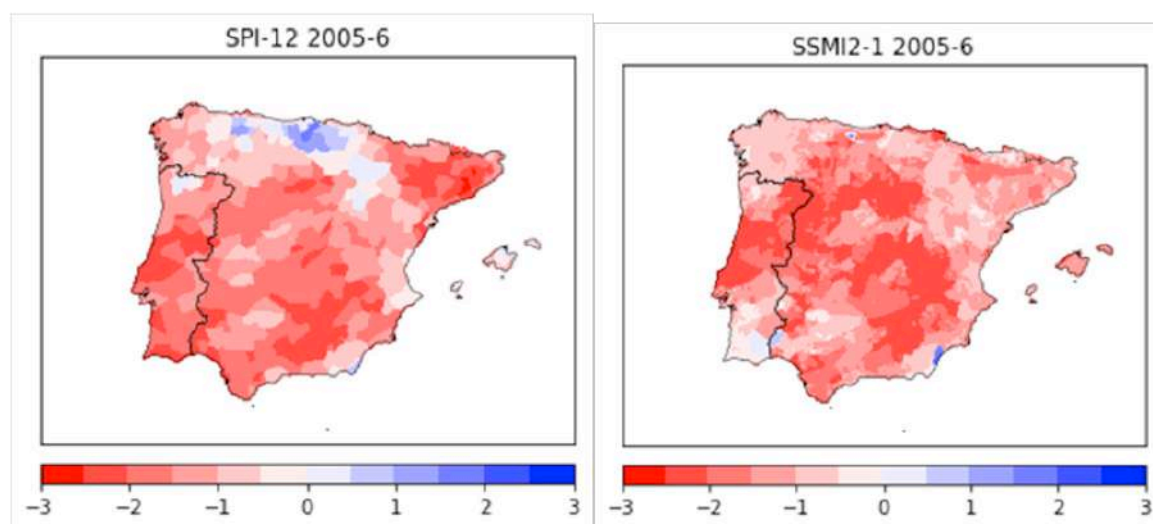


Figure 9.10. SPI-12 et SSMI2-1 en juin 2005 en Espagne et au Portugal (gauche : ré-analyse de SAFRAN ; droite : SURFEX LSM forcé par SAFRAN).

secs. Le déficit de précipitations a aussi affecté les forêts et s'est traduit, d'une part, par un risque d'incendies élevé et, d'autre part, par une dessiccation de nombreux arbres en raison du stress hydrique, et la réduction de la production forestière.

À mesure que l'année 2005 avançait, les réserves d'eau des bassins de retenue et des aquifères ont peu à peu diminué. Au mois de mai, plus de 70 noyaux de population de 22 communes de la région de Lérida ont connu des restrictions d'eau. Paradoxalement, les communes les plus affectées ont été celle de l'Alta Ribagorça, du Pallars Jussà et de l'Alt Urgell (piémont pyrénéen), c'est-à-dire, des zones où les précipitations sont généralement élevées. La première semaine de juin, la sécheresse touchait déjà 95 % des communes de Catalogne. En été, les réserves ont continué à diminuer. Les bassins de retenue des bassins du Ter et du Llobregat, qui fournissaient en eau les régions de Barcelone et de Gérone, étaient en dessous de 45 % de leur capacité. Si en juin 2004 l'eau stockée dans les barrages du Llobregat-Ter atteignait environ 600 hm³, en juin 2005 elle était inférieure à 290 hm³, arrivant à un minimum en octobre 2005 de moins de 200 hm³, au niveau d'alerte qui dura jusqu'en décembre 2005. Le volume total du bassin de retenue du système Llobregat-Ter n'est jamais revenu aux valeurs initiales de 2003, malgré certains épisodes de fortes pluies. Les pluies d'automne ont atténué la sécheresse. Le retour des pluies à l'automne 2005 (principalement sur la côte) a évité de restreindre la distribution pour l'usage domestique dans plus de la moitié de la population de Catalogne, mais il y avait encore des restrictions dans 60 localités en novembre. Les bassins de retenue se trouvaient encore à 47 % de leur capacité à la fin novembre. En août 2007, le niveau d'alerte a de nouveau été atteint et s'est maintenu jusqu'en juin 2008, atteignant en avril 2008 le niveau d'urgence avec moins de 150 hm³ stockés dans les barrages du système Llobregat-Ter qui menaçait gravement la distribution d'eau potable à Barcelone et Gérone. Le 1er avril 2008, l'eau totale stockée en Catalogne s'élevait à 125 hm³ (près de 20 % de la capacité maximale). De fortes pluies ont mis un terme à la situation de sécheresse en mai 2008.

9.5.4 Descriptions des mesures d'adaptation développées entre les deux événements

Il n'y a pas eu de campagnes de sensibilisation sur la pénurie d'eau durant l'événement de 1986-1989. Une importante campagne de sensibilisation a été réalisée durant l'événement de 2004-2008, qui a conduit à une baisse très importante de la consommation dans la zone métropolitaine de Barcelone.

Après la sécheresse de 1986-1989, les bassins de retenue de La Llosa del Cavall (79,4 hm³), Rialb (402,8 hm³) et de la Palma d'Ebre (1 hm³) ont été construits pour l'approvisionnement en eau potable et en eau d'irrigation, ainsi que la construction de la mini-dérivation de l'Èbre à Tarragone. Cela a aidé à gérer la sécheresse de 2004-2008. En raison de la sécheresse de 2004-2005, une usine de dessalement a été construite à Barcelone et 200 puits d'eau (principalement urbains) ont été récupérés afin d'exploiter leurs eaux souterraines pour approvisionner les besoins du système. En 2003-2004, le volume d'eau urbaine fournie par les puits d'eau s'est élevé à 35 hm³/an et a augmenté en 2007-2008 à 65 hm³/an.

Les mesures d'adaptation à la sécheresse, développées en Catalogne après l'épisode qui se termina en 1989, ont réduit de façon considérable la vulnérabilité, malgré l'augmentation de l'exposition, conduisant à des dommages moindres que ceux enregistrés lors des sécheresses de 1986-1989, malgré leur plus grande dangerosité.

La prévention et l'extinction d'incendies forestiers s'est beaucoup améliorée après ceux qui ont touché la Catalogne en 1986, 1994 et en 2003, grâce à l'élaboration de la planification INFOCAT. Par conséquent, aucun grand incendie forestier ne s'est produit à cause de la sécheresse et des vagues de chaleur qui ont affecté la Catalogne entre 2004 et 2008, malgré la hausse de la masse forestière (Turco et al, 2013).

Il est important de prendre en compte que les agriculteurs se réunissent généralement en avril

avec la commission qui décide la distribution de l'eau des bassins de retenue de la campagne d'irrigation, afin de décider les cultures qui seront semées cette année-là, en fonction des probabilités du volume d'eau disponible. Si à ce moment-là, les réserves dépassent les 367 hm³, il est très probable que la campagne se déroule normalement. Les pronostics se basent sur des valeurs climatiques. Le pronostic saisonnier n'a été appliqué dans aucun des événements de sécheresse analysés ici. Cependant, lors de la sécheresse de 2004-2008, un modèle de pronostic basé sur plus de 60 ans d'apports aux bassins de retenue du système a été appliqué. Le pronostic a fourni le niveau d'alerte pour différents scénarios de ressources hydriques dans chaque bassin. Actuellement, les prédictions saisonnières sont en train d'être intégrées dans la prise de décisions.

Durant le premier épisode analysé (1986-1989), il n'existait aucune procédure officielle pour faire face aux sécheresses. L'eau stockée dans le système Ter-Llobregat est arrivée au seuil critique de 20 % (moins de 100 hm³ par rapport à un stockage maximum de 500 hm³). Des restrictions ont été sur le point d'être appliquées à la ville de Barcelone, mais aucun décret officiel de sécheresse n'a été publié. Les restrictions d'eau ont uniquement été appliquées à l'agriculture et aux petits villages. La production hydroélectrique a même primé sur les autres utilisations de l'eau. En Catalogne, le premier décret officiel de sécheresse a été appliqué en 1999, lorsque le volume d'eau stockée dans le système se trouvait à environ 200 hm³. Lors de l'épisode de 2004-2008, le décret de sécheresse a été promulgué deux fois par la Generalitat de Catalunya. La première fois en mai 2005 (93/2005 du 17 mai) sur proposition de l'ACA (Agence catalane de l'eau). Le décret prétendait adopter immédiatement des mesures pour économiser l'eau stockée et en faire un usage plus efficient afin de remédier au déficit pluviométrique dans toutes les communes, dû aux restrictions d'approvisionnement en eau pour les usages agricoles et industriels, y compris l'hydroélectricité. Le décret prévoyait différents niveaux d'urgence et donnait la priorité à l'approvisionnement en eau domestique, usage prioritaire conformément à la législation. Le décret obligeait les compagnies des eaux et toutes les municipalités à présenter des mesures

d'économies d'eau et à les appliquer, ce qui n'a pas été respecté à 100 %. Le décret de sécheresse a été modifié (décret 187/2005, du 6 septembre) pour indexer davantage les réserves et garantir ainsi l'eau pour l'usage domestique jusqu'au printemps 2006. Le décret a été en vigueur jusqu'à la fin 2005, bien qu'il fut abrogé fin novembre, grâce aux précipitations et à l'amélioration du niveau des bassins de retenue. L'ACA a appliqué de nombreuses mesures pour respecter le décret de sécheresse. Elle a ordonné la dérivation de l'eau du bassin de retenue de Sau a Susqueda, afin de profiter au maximum des ressources. Elle a sanctionné plusieurs entreprises hydroélectriques qui ont fait un usage intensif de l'eau, provoquant la dessiccation de certains tronçons des principales rivières et une mortalité élevée de poissons. Elle a proposé aux entreprises de distribution de l'eau de faire un meilleur usage des eaux souterraines.

En mars 2007, l'eau stockée dans des bassins de retenue en Catalogne était inférieure à 42 % et un nouveau décret de sécheresse (84/2007, du 3 avril 2007) a été approuvé. Il a été opérationnel jusqu'au 13 janvier 2009. Le Comité permanent de la sécheresse a été constitué à l'ACA en tant qu'organe exécutif pour le suivi d'épisodes de manque de ressources et la planification d'actions, ainsi que la Commission de gestion de la sécheresse (CGS) qui s'est chargée de la double tâche de rédaction du nouveau décret de mesures exceptionnelles et d'urgence pour la gestion du probable épisode de sécheresse de cette année-là, et la rédaction et le traitement du Plan de gestion de la sécheresse. Conformément au décret 84/2007, du 3 avril, les scénarios d'alerte qui sont promulgués dans le cadre de ce plan sont les suivants :

- Scénario de pré-alerte : intensifier le suivi de l'état des réserves et des actions d'information et de sensibilisation, visant à promouvoir les économies d'eau
- Scénario d'exceptionnalité ou d'alerte de niveau 1 : situation où, étant donnée la pénurie exceptionnelle des ressources hydriques, il est nécessaire d'adopter les mesures d'économies d'eau quant aux usages et à l'environnement, prévues dans ce décret, afin de garantir la distribution sur le moyen terme. Lorsque le

niveau 1 dure plusieurs mois ou lorsque les conditions sèches sont très intenses, on passe au niveau 2.

- Scénario d'exceptionnalité de niveau 2 : situation où, étant donnée l'intensification de l'état de pénurie exceptionnelle des ressources hydriques, il est nécessaire d'adopter les mesures restrictives quant aux usages et à l'environnement, prévues dans ce décret, afin de garantir la distribution sur le court terme.
- Scénario d'urgence : situation où, étant donnée la pénurie exceptionnelle des ressources hydriques, il est nécessaire d'établir des restrictions et des limitations extraordinaires dans les usages de l'eau afin de garantir sa distribution.

Le niveau d'alerte et d'exceptionnalité est défini en fonction de l'eau stockée dans les bassins de retenue. C'est pourquoi les seuils varient selon les bassins et le mois de l'année. Dans le cas du système Ter-Llobregat, les seuils seraient : a) niveau 1 : 205-225 hm³ (près de 35 %), b) niveau 2 : 145 hm³ (25 %), c) urgence : 122 hm³ (20 %).

9.6. Conclusions et recommandations

Dans cette étude de cas, nous avons travaillé à l'échelle de tout le massif pyrénéen. L'impact des événements extrêmes dans les Pyrénées dans le contexte du changement climatique est croissant. C'est pour cela qu'il est nécessaire de concevoir des stratégies d'adaptation les plus efficaces et les plus holistiques possibles. La science citoyenne et la sensibilisation qui peuvent être mises en œuvre au moyen de ce projet répondent à ce défi. La participation active des usagers renforce l'implication des citoyens dans leur propre adaptation. Dans cette mesure, la science citoyenne ne s'utilise pas uniquement comme un canal pour obtenir des données et des informations, mais aussi pour la transformation sociale.

Un autre des défis actuels est de disposer de la quantité maximale d'informations, au-delà des traditionnelles sources d'information telles que la presse ou les rapports officiels (Llasat-Botija et al., 2018). Dans le cas des Pyrénées, la disponibilité des informations sur les impacts d'événements extrêmes peut être difficile, étant donné leur faible impact à de nombreuses reprises dans les journaux et les médias, d'où l'importance d'une initiative de ce type. De plus, ces contributions sont et seront positives pour réaliser des recherches scientifiques sur ce territoire. Les participants doivent répondre à de brèves questions sur l'événement observé ou la pratique (bonne ou mauvaise) recueillie. Par exemple : « Pensez-vous que cela est lié au changement climatique ? », ou : « Cette mesure vous semble-t-elle adéquate ? ». Grâce à cela, nous cherchons à ce que le processus de téléchargement d'une observation aille au-delà d'un acte mécanique et devienne un processus de réflexion critique.

Enfin, des barrières rendant difficile la mise en œuvre de mesures d'adaptation ont été observées. Certaines sont liées à la perception et à l'acceptation par la population. C'est pour cela que travailler avec la communauté est une opportunité pour identifier ses besoins et inquiétudes, et l'impliquer dans les processus d'adaptation.

L'éducation et la sensibilisation citoyenne constituent une puissante stratégie d'adaptation. Le développement et l'application du projet contribuent à l'amélioration des connaissances

de la population sur les risques naturels en général. Dans le cadre du projet, par la réalisation d'ateliers et le développement de supports, un espace d'échange de connaissances et de dialogue sur les risques naturels est créé, impliquant une amélioration des connaissances de tous les participants indépendamment de leur rôle dans celui-ci (chercheur, collaborateur, etc.). Un exemple est la carte qui est créée grâce aux observations envoyées, rendant visible l'impact du changement climatique et les risques hydrométéorologiques sur le territoire. La récupération de la mémoire historique et l'amélioration de la culture communautaire du risque est l'un des résultats de ces projets. FLOODUP vise aussi à mettre en valeur les aspects positifs des inondations, comme un phénomène qui fait partie de notre environnement et de notre culture et, par conséquent, favorise une attitude responsable et positive pour apprendre à vivre avec elles.

L'éducation (et la science citoyenne) consiste en une mesure non structurelle d'adaptation, car elle encourage une population informée. Et une population informée a une plus grande capacité pour la coexistence avec les risques naturels et la prise de décisions.

*Evaluación y prospectiva de los recursos hídricos de los
Pirineos en un contexto de cambio climático*

Bibliographie

ACA, Agencia Catalana de l'Aigua (2006). Protocol d'avaluació de la qualitat biològica dels rius (BIORI). <https://studylib.es/doc/4588027/protocol-d-avaluació-de-la-qualitat-biològica-dels-rius>.

Adamovic, M., Després, J. (2020). Seasonal impacts of climate change on electricity production. JRC Technical Report, JRC PESETA IV Project. <https://doi.org/10.2760/879978>.

ADAPYR-OPCC (2022). Capitalisation, observation, transfert et appropriation de stratégies d'adaptation au changement climatique dans les Pyrénées, dans un contexte de coopération transfrontalière. https://www.opcc-ctp.org/sites/default/files/documentacion/fr_informe_opcc_adapyr.pdf.

AEAG, Agence de l'Eau Adour Garonne. (2014). Garonne 2050 - Etude prospective sur les besoins et les ressources en eau, à l'échelle du bassin de la Garonne. Rapport final, 68 pages. https://www.garonne-amont.fr/wp-content/uploads/2019/03/2014_AEAG_Synthèse-Garonne2050-1.pdf.

AEMET, Agencia Estatal de Meteorología. (2017). Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR5. Madrid, Spain. http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/Guia_escenarios_AR5/Guia_escenarios_AR5.pdf (último acceso: julio de 2020).

Alcázar Montero, J. (2007). El método del Caudal Básico para la determinación de Caudales Mantenimiento Aplicada al Ebro. Tesis Doctoral, Universitat de Lleida.

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper, 56. FAO, Rome. ISBN 92-5-104219-5.

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. (2020). High resolution climate change projections for the Pyrenees region. *Advances in Science and Research*, 17, 191–208. <https://doi.org/10.5194/asr-17-191-2020>.

Andreu, J., Capilla, J., Sanchís, E. (1996). AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. *Journal of Hydrology*, 177 (3–4), 269–291. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02963-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02963-X).

A new EU Forest Strategy: For forests and the forest-based sector. In COM (2013) 659 Final; European Commission: Brussels, Belgium.

Antigüedad, I., Meaurio, M., Valiente, M., Uriarte, J., Zabaleta, A., 2023. Adaptation au changement climatique à partir de la gestion de la fonctionnalité hydrologique du territoire : le bassin du fleuve Bidassoa. Dans (Beguiría, S., ed.), *Adaptation au changement climatique dans la gestion des ressources hydriques des Pyrénées. Mémoires scientifiques du projet PIRAGUA*, vol. 2. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Saragosse, Espagne, 121-147. <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/15255>.

Arnett, J.L. (1976). Methodologies for the determination of stream resource flow requirements: an assessment. U.S. Fish and Wildlife Service, 76/03, 199 pp.

- Asbjornsen, H., Goldsmith, G., Alvarado-Barrientos, M., Rebel, K., Van Osch, F., Rietkerk, M., Chen, J., Gotsch, S., Tobón, C., Geissert, D., Gómez-Tagle, A., Vache, K., Dawson, T. (2011). Ecohydrological advances and applications in plant-water relations research: a review. *Journal of Plant Ecology* 4 (1/2), 3-22, <https://doi.org/10.1093/jpe/rtr005>.
- Auverlot, D., Follenfant, P., Joly, A., Le Coz, C. (2021). Conditions de mobilisation des retenues hydroélectriques pour le soutien d'étiage dans le bassin Adour-Garonne. Rapport CGEDD n°013099-01, CGAAER n°19109, 136. <https://agriculture.gouv.fr/telecharger/127602>.
- Avendaño Salas, C., Sanz Montero, E., Rayán, C., Gómez Montaña, J.L. (1997). Sediment yield at Spanish reservoirs and its relationship with the drainage basin area. *Proceedings of the 19th Symposium of Large Dams, Florence*, 54, 863-874. <https://eprints.ucm.es/20036/1/ICOLDSedimentyield.pdf>.
- Batalla, R.J., Vericat, D. (2011). An appraisal of the contemporary sediment yield in the Ebro basin. *Journal of Soils and Sediments*, 11, 1070-1081. <https://doi.org/10.1007/s11368-011-0378-8>.
- Barnett, T.P., Adam, J.C., Lettenmaier, D.P. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438, 303-309. <https://doi.org/10.1038/nature04141>.
- Beguiría, S. (ed.) (2023). Caractérisation des ressources en eau des Pyrénées : présent et scénarios à venir. Mémoires scientifiques du projet PIRAGUA, vol. 1. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Saragosse, Espagne, 120 pp. <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/15256>.
- Beguiría, S., Sans, F. (2023). Défis et opportunités pour l'adaptation au changement climatique dans la gestion des ressources hydriques des Pyrénées. Dans (Beguiría, S., ed.), *Adaptation au changement climatique dans la gestion des ressources hydriques des Pyrénées*. Mémoires scientifiques du projet PIRAGUA, vol. 2. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Saragosse, Espagne, 1-14. <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/15255>.
- Beguiría, S., López-Moreno, J.I., Lorente, A., Seeger, M., García-Ruiz, J.M. (2003). Assessing the effect of climate oscillations and land-use changes on streamflow in the Central Spanish Pyrenees. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 32, 283-286. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-32.4.283>.
- Beguiría, S., Haro-Monteagudo, D., Palazón, L., García-Ruiz, J.M. (2022). Interacciones montaña-llanura frente al cambio global: desafíos y oportunidades en la gestión del territorio y de los recursos hídricos en Riegos del Alto Aragón. *Pirineos*, 177, e072. <https://doi.org/10.3989/pirineos.2022.177005>.
- Beguiría S., Caballero Y., Le Cointe P, Palazón L. (2023a). Les ressources hydriques des Pyrénées et leur importance régionale. Dans Beguería, S. (coord.), *Caractérisation des ressources hydriques des Pyrénées : présent et scénarios à venir*. Mémoires scientifiques du projet PIRAGUA, vol. 1. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Saragosse, Espagne, 1-26. <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/15256>.

Beguería, S., Haro-Monteagudo, D., Palazón, L. (2023b). Adaptation au changement climatique dans l'agriculture irriguée : le cas de « Riegos del Alto Aragón » (irrigations du Haut-Aragon). Dans (Beguería, S., ed.), Adaptation au changement climatique dans la gestion des ressources hydriques des Pyrénées. Mémoires scientifiques du projet PIRAGUA, vol. 2. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Saragosse, Espagne, 77-98. <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/15255>.

Bellot, J., Chirino, E., Bellot, P., Sánchez, J.R. (2004). Importància del bosc de Poblet en la regulació del cicle hídric i la qualitat de l'aigua. En: Actes de les jornades el Bosc de Poblet: del règim senyorial a la gestió pública. Generalitat de Catalunya. ISBN 84-393-6616-7.

Benito Alonso, J.L. (2006). Vegetación del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. Serie Investigación 50. Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón, Zaragoza. http://www.jolube.net/pnomp/vegetacion/Indice_general_2.htm

Berga, L. (2016). The role of hydropower in climate change mitigation and adaptation: A review. Engineering, 2(3), 313-318. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.03.004>.

Bertoni, F., Castelletti, A., Giuliani, M., Reed, P.M. (2019). Discovering dependencies, trade-offs, and robustness in joint dam design and operation: An ex-post assessment of the Kariba dam. Earth's Future, 7, 1367–1390. <https://doi.org/10.1029/2019EF001235>.

Binet, S., Probst, J.L., Batiot, C., Seidel, J.L., Emblanch, C., Peyraube, N., Charlier, J.B., Bakalowicz, M., Probst, A. (2020). Global warming and acid atmospheric deposition impacts on carbonate dissolution and CO₂ fluxes in French karst hydrosystems: Evidence from hydrochemical monitoring in recent decades. Geochimica et Cosmochimica Acta, 270, 184-200. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.11.021>.

Birsan, M.V., Molnar, P., Burlando, P., Pfaunder, M. (2005). Streamflow trends in Switzerland. Journal of Hydrology, 314(1–4), 312–329. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.008>.

BOPA (2005). Reglament de protecció dels hàbitats aquàtics, 792–800. <https://www.bopa.ad/bopa/017019/Documents/3B83E.pdf>

BOPA (2018). Llei 21/2018, del 13 de setembre, d'impuls de la transició energètica i del canvi climàtic (LITECC), 1-33. https://www.consellgeneral.ad/fitxers/documents/lleis-2018/llei-21-2018-d2019impuls-de-la-transicio-energetica-i-del-canvi-climatic-litecc/at_download/file.

Bosch, J.M., Hewlett, J.D. (1982). A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. Journal of Hydrology, 55, 3–23. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(82\)90117-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90117-2).

Brauman, K.A., Daily, G.C., Duarte, T.K., Mooney, H.A. (2007). The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services. Annual Review of Environmental and Resources, 32, 6.1-6.32. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.32.031306.102758>.

Brunner, M.I., Björnson Gurung, A., Zappa, M., Zekollari, H., Farinotti, D., Stähli, M. (2019). Present and future water scarcity in Switzerland: Potential for alleviation through reservoirs and lakes. Science of the Total Environment, 666, 1033–1047. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.169>.

- Burkhard B., Guerra C.A., Davíðsdóttir B. (2019). Discussion paper 3: Soil retention (regulating) ecosystem services. Expert Meeting on Advancing the Measurement of Ecosystem Services for Ecosystem Accounting, New York. Available at: <https://seea.un.org/events/expert-meeting-advancing-measurement-ecosystem-services-ecosystem-accounting>.
- Caballero, Y., Voirin - Morel, S., Habets, F., Noilhan, J., LeMoigne, P., Lehenaff, A., Boone, A. (2007). Hydrological sensitivity of the Adour - Garonne river basin to climate change. *Water Resources Research*, 43 (7). <https://doi.org/10.1029/2005WR004192>.
- Cakir, R. (2020). Les fonctions écologiques de régulation des nitrates au sein des bassins versants : des cours d'eau aux territoires. Université Paul Sabatier - Toulouse III, Toulouse.
- Cakir, R., Le Roux, G., Sánchez Pérez, J.M. (2023). Transformation du territoire et dynamique hydrologique dans les têtes de bassin versant : le cas de la tourbière de Bernadouze. Dans (Beguería, S., ed.), *Adaptation au changement climatique dans la gestion des ressources hydriques des Pyrénées. Mémoires scientifiques du projet PIRAGUA*, vol. 2. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Saragosse, Espagne, 149-164. <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/15255>.
- Calder I.R. (2007). Forests and water - Ensuring forest benefits outweigh water costs. *Forest Ecology and Management*, 251, 110-120. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.015>.
- Candela, L., Tamoh, K., Olivares, G., Gomez, M. (2012). Modelling impacts of climate change on water resources in ungauged and data-scarce watersheds. Application to the Siurana catchment (NE Spain). *Science of the Total Environment* 440, 253–260. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.062>.
- Casamor, J.L., Calafat, A. (2018). El problema del aterramiento de embalses y el cálculo de las reservas hidráulicas. *Tierra y Tecnología*, 52. <http://dx.doi.org/10.21028/jlc.2018.10.01>.
- CHE (1998). Catalogación de los acuíferos de la Cuenca del Ebro. Oficina de Planificación Hidrológica. Confederación Hidrográfica del Ebro, Zaragoza.
- CHE (2016). Plan hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Ebro 2015-2021. Confederación Hidrográfica del Ebro, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio ambiente, Gobierno de España.
- CHE (2018). Plan Especial de actuación en situación de alerta o eventual sequía. Confederación Hidrográfica del Ebro, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio ambiente, Gobierno de España. <http://www.chebro.es/contenido.visualizar.do?idContenido=53999&idMenu=5560>.
- CHE (2021). Propuesta de Proyecto de Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Ebro Revisión de tercer ciclo (2015-2021). Confederación Hidrográfica del Ebro, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio ambiente, Gobierno de España. <https://www.chebro.es/plan-hidrologico-del-ebro-2015-2021>.
- Clarimont, S. (2008). Turismo de invierno y cambio climático: La producción de nieve artificial en los Pirineos, ¿un uso sostenible del agua? In 6º Congreso Ibérico sobre gestión y planificación del agua, 1-11. <https://www.divulgameteo.es/uploads/Turismo-invierno-CC.pdf>.

Climate-ADAPT (2022). Sharing knowledge for a climate-resilient Europe. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/>.

CMNUCC (2011). Convenio Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>.

Cobo, R. (2008). Los sedimentos de los embalses españoles. Ingeniería del Agua, 15, 231–241. <https://doi.org/10.4995/ia.2008.2937>.

Cognard, J., François, H. (2019). Review of ski resort operating costs and market analysis (PROSNOW project). <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5be2d7b9a&appId=PPGMS>

COM (2002), 179 final. Comunicación de la Comisión al Consejo, el Parlamento Europeo, el Comité Económico y Social y el Comité de las Regiones: Hacia una estrategia temática para la protección del suelo. <https://ec.europa.eu/transparency/documents-register/detail>.

COM (2006), 232 final. Comisión de las Comunidades Europeas. Propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se establece un marco para la protección del suelo. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52006PC0232>.

Comité de Bassin Adour Garonne. (2021). Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) du bassin Adour-Garonne 2022-2027. <https://eau-grandsudouest.fr/sites/default/files/2022-04/SDAGE%202022-2027%20ADOUR%20GARONNE.pdf>.

Commission Européenne (2019). Rapport de la commission au parlement européen et au conseil sur la mise en œuvre de la directive-cadre sur l'eau (2000/60/CE) et de la directive « inondations» (2007/60/CE). Deuxièmes plans de gestion de district hydrographique. Premiers plans de gestion.

Corine Land Cover (CLC) 2018, Version 2020_20u1. <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018?tab=download>.

Davasse, B., Briffaud, S., Carré, J., Henry, D., Rodriguez, J.F. (2012). Using landscapes to observe the environment: Landscape changes, local political actions and socio-territorial images within the realm of the «OHM Pyrénées-Haut Vicdessos». Sud-Ouest européen, 57–68. <https://doi.org/10.4000/soe.226>.

Debarbieux, B., Oiry, M., Rudaz, G., Maselli, D., Kohler, T., Jurek, M. (2014). El Turismo en las Regiones de Montaña Esperanzas, Temores y Realidades. Serie sobre el desarrollo sostenible de las montañas. El Turismo en las Regiones de Montaña Esperanzas, Temores y Realidades. https://www.eda.admin.ch/dam/deza/es/documents/themen/klimawandel/Tourism-in-Mountain-Regions_ES.pdf.

DGA (2018a). Estrategia Aragonesa de Cambio Climático. Horizonte 2030. <http://www.estrategiaaragonesacambioclimatico.es/documento/>.

DGA (2018b). Catálogo aragonés de buenas prácticas agrarias para un desarrollo bajo en carbono y un sector agrario más resiliente al cambio climático. <https://www.aragon.es/documents/20127/4964055/Cat%C3%A1logo+aragon%C3%A9s+de+buenas+pr%C3%A1cticas+agrarias.pdf/43d45403-abb2-ea19-f255-d96bae5ee4ab?t=1562926820774>.

Di Baldassarre, G., Wanders, N., AghaKouchak, A., Kuil, L., Rangelcroft, S., Veldkamp, T.I.E., Garcia, M., van Oel, P.R., Breinl, K., Loon, A.F.V. (2018). Water shortages worsened by reservoir effects. *Nature Sustainability*, 1, 617–622. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0159-0>.

Diaz, H.F., Eischeid, J.K., Duncan, C., Bradley, R.S. (2003). Variability of Freezing Levels, Melting Season Indicators, and Snow Cover for Selected High-Elevation and Continental Regions in the Last 50 Years. *Climatic Change*, 59(1/2), 33–52. <https://doi.org/10.1023/A:1024460010140>.

Dingman, S.L. (2002). *Physical Hydrology*. 2nd ed. New Jersey, Prentice-Hall. ISBN: 9780130996954.

Domènech, M., Travasset, O., Pons, M. (2023). La concurrence pour les ressources hydriques aujourd’hui et leur évolution future : le cas de la principauté d’Andorre. Dans (Beguería, S., ed.), *Adaptation au changement climatique dans la gestion des ressources hydriques des Pyrénées. Mémoires scientifiques du projet PIRAGUA*, vol. 2. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Saragosse, Espagne, 37-57. <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/15255>.

Donoso, I., Stefanescu, C., Martinez-Abraín, A., Traveset, A. (2016). Phenological asynchrony in plant-butterfly interactions associated with climate: a community-wide perspective. *Oikos*, 125(10), 1434-1444. <https://doi.org/10.1111/oik.03053>.

Durán, J., Salamanca, S. (2008). Impacto del cambio climático sobre la producción agrícola española: ETP y necesidades hídricas de los cultivos. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 77 pp. https://ceigram.upm.es/wp-content/uploads/2020/07/2008_TFC_Susana-Salamanca.pdf.

EDF (2019). Aménagement hydroélectrique d’Auzat. https://www.edf.fr/sites/default/files/Hydraulique/Sud-Ouest/documents/plaquette_edf_hydro_auzat_2019.pdf

Ellison, D., Futter, M.N., Bishops, K. (2012). On the forest cover–water yield debate: from demand- to supply-side thinking. *Global Change Biology*, 18, 806-820, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02589.x>.

Ellison, D., Morris, C.E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyarso, D., Gutierrez, V., van Noordwijk, M., Creed, I.F., Pokorny, J., Gaveau, D., Spracklen, D., Bargués-Tobella, A., Ilstedt, V., Teuling, A., Gebreyohannis, S., Sands, D., Muys, B., Verbist, B., Springgay, E., Sugandi, J., Sullivan, C.A. (2017). Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change*, 43, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002>

Emmanouil, S., Nikolopoulos, E. I., François, B., Brown, C., Anagnostou, E. N. (2021). Evaluating existing water supply reservoirs as small-scale pumped hydroelectric storage options – A case study in Connecticut. *Energy*, 226, 12035. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120354>.

ENBA (2016). Estratègia Nacional de la Biodiversitat d’Andorra. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/and175857Catal.pdf>.

Escudero, A., García-Camacho, R., García-Fernández, A., Gavilán, R.G., Giménez-Benavides, L., Iriondo, J.M., Lara-Romero, C., Morente, J., Pescador, D.S. (2012). Vulnerabilidad al cambio global en la alta montaña mediterránea. *Ecosistemas*, 21(3), 63-72. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2012.21-3.08>.

EUROPARC-España (2018). Las áreas protegidas en el contexto del cambio global Incorporación de la adaptación al cambio climático en la planificación y gestión. Manual 13, 7-157. <https://redeuroparc.org/wp-content/uploads/2022/05/anuario2018.pdf>.

European Communities. (2009). Common implementation strategy for the water framework directive (2000/60/EC).

FAO (2015). Status of the World's Soil Resources. Chapter 2: The role of soils in ecosystem processes. ISBN 978-92-5-109004-6. <http://www.fao.org/3/bc591e/bc591e.pdf>.

Fletcher, S., Lickley, M., Strzepek, K. (2019). Learning about climate change uncertainty enables flexible water infrastructure planning. *Nature Communications*, 10, 1782. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09677-x>.

Fohrer, N., Haverkamp, S., Frede, H.G. (2005). Assessment of the effects of land use patterns on hydrologic landscape functions: development of sustainable land use concepts for low mountain range areas. *Hydrological Processes*, 19, 659-672. <https://doi.org/10.1002/hyp.5623>.

François, B., Hingray, B., Hendrickx, F., Creutin, J. D. (2014). Seasonal patterns of water storage as signatures of the climatological equilibrium between resource and demand. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 3787-3800. <https://doi.org/10.5194/hess-18-3787-2014>.

Gallart, F., Delgado, J., Beatson, S.J.V., Posner, H., Llorens, P., Marcé, R. (2011). Analysing the effect of global change on the historical trends of water resources in the headwaters of the Llobregat and Ter river basins (Catalonia, Spain). *Physics and Chemistry of the Earth*, 36, 655-661. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.04.009>.

Gallart, F., Llorens, P., Manzano, A. (2013). Gestión de la cuenca del Cardener para garantizar los Recursos de agua. En: CREA (E. Doblas ed.) *Conservar aprovechando. Cómo integrar el cambio global en la gestión de los montes españoles*. ISBN: 978-84-695-8587-0.

García-Ruiz, J.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I., Lorente, A., Seeger, M. (2001). Los recursos hídricos superficiales del Pirineo aragonés y su evolución reciente. *Geoforma*, Logroño, 192. ISBN: 848777931X

García-Ruiz, J.M., Lana-Renault, N. (2011). Hydrological and erosive consequences of farmland abandonment in Europe, with special reference to the Mediterranean region - A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 140 (3-4), 317-338. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.01.003>.

García-Ruiz, J.M., López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Lasanta-Martínez, T., Beguería, S. (2011). Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth Science Reviews*, 105 (3-4), 121-139. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.006>.

Garzón, B.M., Alía, R., Robson, M., Zavala, M.A. (2011). Intra-specific variability and plasticity influence potential tree species distributions under climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 20 (5), 766 - 778. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00646.x>.

Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H., Arnold, J.G. (2007). The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 50 (4), 1211-1250. <https://doi.org/10.13031/2013.23637>.

Gaudard, L., Gilli, M., Romerio, F. (2013). Climate change impacts on hydropower management. *Water Resources Management*, 27, 5143–5156. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0458-1>.

Gerbaux, M., Spandre, P., François, H., George, E., Morin, S. (2020). Fiabilité de l'enneigement et disponibilité des ressources en eau pour la production de neige dans les domaines skiables du Département de l'Isère (France), en conditions climatiques actuelles et futures. *Revue de Géographie Alpine*, 108–1, 0–20. <https://doi.org/10.4000/rga.6724>.

GIEC (2014). Changements climatiques 2014 : Incidences, adaptation et vulnérabilité. Résumés, foire aux questions et encarts thématiques. Contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. [Publié sous la direction de Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L.] Organisation météorologique mondiale, Genève (Suisse), 201 pp, (publié en anglais, en arabe, en chinois, en espagnol, en français et en russe) ISBN 978-92-9169-241-5. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar5_wgII_spm_fr-2.pdf.

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., Kornbluh, 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. (2013). 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. <https://doi.org/10.1002/jame.20038>.

Giuliani, M., Castelletti, A. (2016). Is robustness really robust? How different definitions of robustness impact decision-making under climate change. *Climatic Change*, 135, 409–424. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1586-9>.

Gobierno de Aragón (2018). Catálogo aragonés de buenas prácticas agrarias: Para un desarrollo bajo en carbono y un sector agrario más resiliente al cambio climático en desarrollo de Agroclima. Dirección General de Sostenibilidad del Departamento de Desarrollo Rural y Sostenibilidad del Gobierno de Aragón. Zaragoza, España, 8 pp.

González-Ramón, A., Jódar, J., Samsó, J.M., Martos-Rosillo, S., Heredia, J., Zabaleta, A., Antigüedad, I., Custodio, E., Lambán, L.J. (2020). Hydrometeorological factors determining the development of water table cave patterns in high alpine zones. The Ordesa and Monte Perdido National Park, NE-Spain. *International Journal of Speleology*, 49(3):249-270. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.49.3.2346>.

Govern d'Andorra (2014). Resultats del procés participatiu. <http://www.participa2014.cat/resultats/dades/ca/escr-tot.html>.

Govern d'Andorra (2016). Estratègia nacional de la biodiversitat d'andorra (ENBA). <https://www.mediambient.ad/biodiversitat>.

Govern d'Andorra (2018a). Pla sectorial d'infraestructures energètiques d'Andorra.

Govern d'Andorra (2018b). Projecte de llei d'impuls de la transició energètica i del canvi climàtic (LITECC) - BCG 6/2018. 1–36.

Govern d'Andorra (2021a). Estudi per a l'elaboració anual de l'inventari i quantificació de la despesa hídrica per usos del Principat d'Andorra -Any 2019-.

Govern d'Andorra (2021b). Projecte de llei d'economia circular (LEC) - (BCG 76/2021). [http://www.consellgeneral.ad/aplics/Butlleti_Consell.NSF/d358b6a33e7b878f412566c100390c61/e2b7406d2b60691fc1256ba30024bdaf/\\$FILE/but23-2002.doc](http://www.consellgeneral.ad/aplics/Butlleti_Consell.NSF/d358b6a33e7b878f412566c100390c61/e2b7406d2b60691fc1256ba30024bdaf/$FILE/but23-2002.doc).

Grusson, Y., Sun, X., Gascoin, S., Sauvage, S., Raghavan, S., Anctil, F., Sánchez-Pérez, J.-M. (2015). Assessing the capability of the SWAT model to simulate snow, snow melt and streamflow dynamics over an alpine watershed. *Journal of Hydrology*, 531, 574–588. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.070>.

Grusson, Y. (2016). Modélisation de l'évolution hydroclimatique des flux et stocks d'eau verte et d'eau bleue du bassin versant de la Garonne. Laval University: Quebec City, Canada.

Haasnoot, M., Kwakkel, J.H., Walker, W.E., ter Maat, J. (2013). Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. *Global Environmental Change*, 23(2): 485-498. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.12.006>.

Hallegatte, S. (2009). Strategies to adapt to an uncertain climate change. *Global Environmental Change*, 19, 240– <https://doi.org/247>. 10.1016/j.gloenvcha.2008.12.003.

Hansson, S.V., Claustres, A., Probst, A., De Vleeschouwer, F., Baron, S., Galop, D., Mazier, F., Le Roux, G. (2017). Atmospheric and terrigenous metal accumulation over 3000 years in a French mountain catchment: Local vs distal influences. *Anthropocene*, 19, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2017.09.002>.

Hansson, S.V., Grusson, Y., Chimienti, M., Claustres, A., Jean, S., Le Roux, G. (2019). Legacy Pb pollution in the contemporary environment and its potential bioavailability in three mountain catchments. *Science of The Total Environment*, 671, 1227–1236. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.403>.

Haro-Monteagudo, D., Palazón, L., Beguería, S., (2020). Long-term sustainability of large water resource systems under climate change: A cascade modeling approach. *Journal of Hydrology*, 582: 124546.2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.124546>.

Hashimoto, T., Stedinger, J.R., Loucks, D.P. (1982). Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research*, 18, 14–20. <https://doi.org/10.1029/WR018i001p00014>.

Hauer, F.R., Baron, J.S., Campbell, D.H., Fausch, K.D., Hostetler, S.W., Leavesley, G.H., Leavitt, P.R., McKnight, D.M., Stanford, J.A. (1997). Assessment of climate change and freshwater ecosystems of the Rocky Mountains, USA and Canada. *Hydrological Processes*, 11, 903-924. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-1085\(19970630\)11:8<903::aid-hyp511>3.0.co;2-7](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-1085(19970630)11:8<903::aid-hyp511>3.0.co;2-7).

Hawkins, E., Sutton, R. (2010). The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. *Climate Dynamics*, 37, 407–418. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0810-6>.

Healy, R.W., Cook, P.G. (2002). Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, 91–109. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0178-0>.

Hendrickx, F., Sauquet, E. (2013). Impact of warming climate on water management for the Ariège River basin (France). *Hydrological Sciences Journal*, 58, 976–993. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.788790>.

Huang, P. (2022). Representation of a multipurpose reservoir system and vulnerability of water management under global change. Application to the Neste water system. Université Grenoble Alpes.

IGME-OAPN (2013). Guía geológica del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. Guías Geológicas de Parques Nacionales. Instituto Geológico y Minero de España- Organismo Autónomo de Parques Nacionales, Madrid (Editorial Everest: 1–214). https://www.igme.es/librosE/GuiasGeo/ordesa_sp_2ed/II/.

INE, Instituto Nacional de Estadística (2019). Población de derecho y Padrón municipal. <https://www.ine.es/>

Jlassi, W., Nadal-Romero, E., García-Ruiz, J.M. (2016). Modernization of new irrigated lands in a scenario of increasing water scarcity: from large reservoirs to small ponds. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 42 (1): 233–259. <https://doi.org/10.18172/cig.2918>.

Jódar, J., Lambán, L.J., Medina, A., Custodio, E. (2014). Exact analytical solution of the convolution integral for classical hydrogeological lumped-parameter models and typical input tracer functions in natural gradient systems. *Journal of Hydrology*, 519: pp 3275–3289. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.027>.

Jódar, J., Custodio, E., Lambán, J.L., Martos-Rosillo, S., Herrera, C., Sapriza, G. (2016). Vertical variation in the amplitude of the seasonal isotopic content of rainfall as a tool to jointly estimate the groundwater recharge zone and transit times in the Ordesa and Monte Perdido National Park aquifer system, north-eastern Spain. *Science of The Total Environment*, 573, 505–517. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.117>.

Jódar, J., González-Ramón, A., Martos-Rosillo, S., Heredia, J., Herrera, C., Urrutia, J., Caballero, Y., Zabaleta, A., Antigüedad, I., Custodio, E., Lambán, L.J. (2020). Snowmelt as a determinant factor in the hydrogeological behaviour of high mountain karst aquifers: The Garcés karst system, Central Pyrenees (Spain). *Science of The Total Environment*, 748–141363. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141363>.

Jódar, J., Herms, I., Lambán, L.J., Martos-Rosillo, S., Herrera, C., Urrutia, J., Soler, A., Custodio, E. (2021). Isotopic content in high mountain karst aquifers as a proxy for climate change impact in Mediterranean zones: The Port del Comte karst aquifer (SE Pyrenees, Catalonia, Spain). *Science of The Total Environment*, 790, 148036. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148036>

Joyce, L. A., Janowiak, M. K. (2011). Climate Change Assessments. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Climate Change Resource Center. <https://www.fs.usda.gov/ccrc/topics/climate-change-assessments>

Keiler, M., Knight, J., Harrison, S. (2010). Climate change and geomorphological hazards in the eastern European Alps. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1919), 2461-2479. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0047>.

Kellner, E. (2021). The controversial debate on the role of water reservoirs in reducing water scarcity. *WIREs Water*, e1514. <https://doi.org/10.1002/wat2.1514>.

Keys, P.W., Wang-Erlandsson, L., Gordon, L.J. (2016). Revealing Invisible Water: Moisture Recycling as an Ecosystem Service. *PLoS ONE* 11(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151993>.

Kreibich, H., Van Loon, A.F., Schröter, K., Ward, P.J., Mazzoleni, M., Sairam, N., Abeshu, G.W., Agafonova, S., AghaKouchak, A., Aksoy, H., Alvarez-Garreton, C., Aznar, B., Balkhi, L., Barendrecht, M.H., Biancamaria, S., Bos-Burginger, L., Bradley, C., Budiyono, Y., Buytaert, W., Capewell, L., Carlson, H., Cavus, Y., Couasnon, A., Coxon, G., Daliakopoulos, I., de Ruiter, M.C., Delus, C., Erfurt, M., Esposito, G., François, D., Frappart, F., Freer, J., Frolova, N., Gain, A.K., Grillakis, M., Grima, J.O., Guzmán, D.A., Huning, L.S., Ionita, M., Kharlamov, M., Khoi, D.N., Kieboom, N., Kireeva, M., Koutroulis, A., Lavado-Casimiro, W., Li, H.-Y., Llasat, M.C., Macdonald, D., Mård, J., Mathew-Richards, H., McKenzie, A., Mejia, A., Mendiando, E.M., Mens, M., Mobini, S., Mohor, G.S., Nagavciuc, V., Ngo-Duc, T., Thao Nguyen Huynh, T., Nhi, P.T.T., Petrucci, O., Nguyen, H.Q., Quintana-Seguí, P., Razavi, S., Ridolfi, E., Riegel, J., Sadik, M.S., Savelli, E., Sazonov, A., Sharma, S., Sörensen, J., Arguello Souza, F.A., Stahl, K., Steinhausen, M., Stoelzle, M., Szalińska, W., Tang, Q., Tian, F., Tokarczyk, T., Tovar, C., Tran, T.V.T., Van Huijgevoort, M.H.J., van Vliet, M.T.H., Vorogushyn, S., Wagener, T., Wang, Y., Wendt, D.E., Wickham, E., Yang, L., Zambrano-Bigiarini, M., Blöschl, G., Di Baldassarre, G. (2022). The challenges of unprecedented floods and droughts in risk management. *Nature*, 608, 80–86. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04917-5>.

Kuusisto, E. (1984). Snow accumulation and snow melt in Finland. Helsinki Finland, National Board of Waters. Publications of the Water Research Institute, 55, 149pp, ISBN 951-46-7494-4.

Lambán, L.J., Jódar, J., Custodio, E., Soler, A., Sapriza, G., Soto, R. (2015). Isotopic and hydrogeochemical characterization of high-altitude karst aquifers in complex geological settings. The Ordesa and Monte Perdido National Park (Northern Spain) case study. *Science of The Total Environment*, 506, 466–479. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.11.030>.

Lambán, L.J., Jódar, J. (2023). Impacts du changement climatique sur les zones à haute valeur environnementale : pression touristique, changement climatique et qualité environnementale dans le Parc national d'Ordesa et de Monte Perdido. Dans (Beguería, S., ed.), *Adaptation au changement climatique dans la gestion des ressources hydriques des Pyrénées. Mémoires scientifiques du projet PIRAGUA*, vol. 2. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Saragosse, Espagne, 101-118. <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/15255>.

Lambán, L.J., Jódar, J., Martos-Rosillo, S., González-Ramón, A., Heredia, J. (2022). Assessment of climate change impact in mountain areas of special environmental value. 1st Scientific-Technical Conference of the Geological and Mining Institute of Spain-National Center (IGME, CSIC). *PROCEEDINGS*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7092554>.

Lecina, S., Isidoro, D., Playán, E., Aragüés, R. (2010). Irrigation modernization and water conservation in Spain. The case of Riegos del Alto Aragón. *Agricultural Water Management*, 97: 1663–1675. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.05.023>.

Lee, L.J.E., Lawrence, D.S.L., Price, M. (2006) Analysis of water level response to rainfall and implications for recharge pathways in the Chalk aquifer, SE England. *Journal of Hydrology*, 330: 604–620. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.04.025>.

Leenhardt, D., Trouvat, J.-L. (2004). ADEAUMIS, un outil pour estimer la demande en eau d'irrigation à l'échelle régionale - Exemple d'utilisation en temps de crise. *Ingénieries eau-agriculture-territoires*, 40, 37-49. <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00475750>

Lempert, R.J., Groves, D.G., Popper, S.W., Bankes, S.C. (2006). A general, analytic method for generating robust strategies and narrative scenarios. *Management Science*, 52, 514–528. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1050.0472>

Lewis, V. (2006). *The Wild Trout Survival Guide: Habitat and Fishery Management Guidelines* (Wild Trout Trust, ed.).

LIFE NAdapta: Estrategia integrada para la adaptación al cambio climático en Navarra. <https://lifenadapta.navarra.es/es/>.

LITECC (2018). Ley de Impulso a la Transición Energética y del Cambio Climático. <https://www.boe.es/buscar/pdf/2021/BOE-A-2021-8447-consolidado.pdf>.

Llasat, M.C., del Moral, A., Cortès, M., Rigo, T. (2021). Convective precipitation trends in the Spanish Mediterranean region. *Atmospheric Research*, 257, 105581. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105581>.

Llasat, M.C., Pardo, E., Llasat-Botija, M. (2022). PIRAGUA_flood [Dataset]. Universidad de Barcelona (UB). <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14650>.

Llasat-Botija, M., Cortès, M., Llasat, M.C. (2018). FLOODUP. Una herramienta para aumentar la información y mejorar el conocimiento colectivo sobre eventos meteorológicos extremos, *El Clima: aire, agua, tierra y fuego*, pp. 645-654, Publicaciones de la Asociación Española de Climatología, D.L.: M-31443-2018.

Llasat-Botija, M., Cortès, M., Llasat, M.C. (2019). The use of citizen information in post-event analysis of flash floods in Catalonia, *Retours d'expériences post-catastrophes naturelles*, Collection “Géorisques”, 8, 31-42. ISBN 978-2-36781-327-1.

Llasat-Botija, M., Llasat, M. C., Pardo, E., Quintana-Seguí, P. (2023). Impacts des inondations et des événements extrêmes sur les ressources hydriques des Pyrénées dans un contexte de changement climatique. Dans (Beguería, S., ed.), *Adaptation au changement climatique dans la gestion des ressources hydriques des Pyrénées. Mémoires scientifiques du projet PIRAGUA*, vol. 2. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Saragosse, Espagne, 167-197. <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/15255>.

Lloret, F. (2016). Un paseo por la resiliencia. Blog del Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF), <https://blog.creaf.cat/es/conocimiento/un-paseo-por-la-resiliencia/>.

López-Moreno, J.I. (2005). Recent Variations of Snowpack Depth in the Central Spanish Pyrenees. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 37 (2), 253–260. [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(2005\)037\[0253:RVOSDI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(2005)037[0253:RVOSDI]2.0.CO;2).

López-Moreno, J.I., Beguería, S., García-Ruiz, J.M. (2006). Trends in high flows in the central Spanish Pyrenees: response to climatic factors or to land-use change?. *Hydrological Sciences Journal*, 51(6), 1039-1050. <https://doi.org/10.1623/hysj.51.6.1039>.

López-Moreno, J.I., Beniston, M., García-Ruiz, J.M. (2008). Environmental change and water management in the Pyrenees: Facts and future perspectives for Mediterranean mountains. *Global and Planetary Change*, 61(3-4), 300-312. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.10.004>.

López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Zabalza, J., Revuelto, J., Gilaberte, M., Azorin-Molina, C., Morán-Tejeda, E., García-Ruiz, J.M., Tague, C. (2014). Respuesta hidrológica del Pirineo central al cambio ambiental proyectado para el siglo XXI. *Pirineos* 169, e004. <http://dx.doi.org/10.3989/Pirineos.2014.169004>.

Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Morán-Tejeda, E., Zabalza, J. (2012). Recent trends in Iberian streamflows (1945-2005). *Journal of Hydrology*, 414–415, 463–475. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.023>.

MacDonald G.M., Velichko A.A., Kremenetski C.V., Borisova O.K., Goleva A.A., Andreev A.A., Cwynar L.C., Riding R.T., Forman S.L., Edwards T.W.D., Aravena R., Hammarlund D., Szeicz J.M., Gattaulin V.N. (2000). Holocene treeline history and climate change across northern Eurasia. *Quaternary Research*, 53(3), 302-311. <https://doi.org/10.1006/qres.1999.2123>.

Maier, H., Guillaume, J., van Delden, H., Riddell, G., Haasnoot, M., Kwakkel, J. (2016). An uncertain future, deep uncertainty, scenarios, robustness and adaptation: How do they fit together? *Environmental Modelling & Software*, 81, 154–164. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.03.014>.

Małoszewski, P., Zuber, A. (1982). Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers, I. Models and their applicability. *Journal of hydrology*, 57(3-4), 207-231. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(82\)90147-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90147-0).

Manzano, A. (2009). Exemples de modelització hidrològica en règim mitjà del riu catalans en escenaris futurs. En: *Aigua i canvi climàtic: Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya*. Generalitat de Catalunya - Agència Catalana de l'Aigua, Barcelona, pp. 127–141.

Maran, S., Volonterio, M., Gaudard, L. (2014). Climate change impacts on hydropower in an Alpine catchment. *Environmental Science & Policy*, 43, 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2013.12.001>.

Marquer, L., Mazier, F., Sugita, S., Galop, D., Houet, T., Faure, E., Gaillard, M.J., Haunold, S., de Munnik, N., Simonneau, A., De Vleeschouwer, F., Le Roux, G. (2020). Pollen-based reconstruction of Holocene land-cover in mountain regions: Evaluation of the Landscape Reconstruction Algorithm in the Vicdessos valley, northern Pyrenees, France. *Quaternary Science Reviews*, 228, 106049. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.106049>.

Martos-Rosillo, S., González-Ramón, A., Ruiz-Constán, A., Marín-Lechado, C., Guardiola-Albert, C., Moral Martos, F., Jódar, J., Pedrera-Parias, A. (2019). El manejo del agua en las cuencas de alta montaña del Parque Nacional de Sierra Nevada (Sur de España). Un ejemplo ancestral de Gestión Integral del Agua. *Boletín Geológico y Minero*, 130 (4): 729-742. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin.130.4.008>

McMillan, H., Montanari, A., Cudennec, C., Savenije, H., Kreibich, H., Krueger, T., Liu, J., Mejia, A., Loon, A. V., Aksoy, H., Baldassarre, G. D., Huang, Y., Mazvimavi, D., Rogger, M., Sivakumar, B., Bibikova, T., Castellarin, A., Chen, Y., Finger, D., Gelfan, A., Hannah, D. M., Hoekstra, A. Y., Li, H., Maskey, S., Mathevet, T., Mijic, A., Acuña, A. P., Polo, M. J., Rosales, V., Smith, P., Viglione, A., Srinivasan, V., Toth, E., vanNooyen, R., Xia, J. (2016). Panta Rhei 2013–2015: Global perspectives on hydrology, society and change. *Hydrological Sciences Journal*, 1–18. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1159308>.

MedECC (2020). First Scientific Report on Climate and Environmental Change in the Mediterranean. <https://ufmsecretariat.org/climate/>.

Metzger, J.P., Villarreal-Rosas, J., Suárez-Castro, A.F., López-Cubillos, S., González-Chaves, A., Runtz, R.K., Hohlenwerger, C., Rhodes, J.R. (2021). Considering landscape-level processes in ecosystem service assessments. *Science of The Total Environment*, 796, 149028. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149028>.

Morán-Tejeda, E., Lorenzo-Lacruz, J., López-Moreno, J.I., Rahman, K., Beniston, M. (2014). Streamflow timing of mountain rivers in Spain: Recent changes and future projections. *Journal of Hydrology*, 517, 1114-1127. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.06.053>.

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W., Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in watershed Simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>.

Mountain Agenda (2001). Mountains of the world. Mountains, Energy and Transport. <https://lib.icimod.org/record/10814>.

MTES (2019). <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/hydroelectricite>.

NASTAT, Instituto Navarro de estadística (2020). <http://www.navarra.es> (visitado 15 julio de 2021).

Navas, A., Valero, B., Machín, J., Walling, D. (1998). Sediments of Joaquin Costa reservoir and the history of its deposit. *Limnetica*, 14, pp. 93-102.

Navas, A., Garcés, B.V., Machín, J. (2004). An approach to integrated assessment of reservoir siltation: The Joaquín Costa reservoir as a case study. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8 (6), pp. 1193-1199.

Navas, A., Valero-Garcés, B., Gaspar, L., Machín, J. (2009). Reconstructing the history of sediment accumulation in the Yesa reservoir: an approach for management of mountain reservoirs. *Lake and Reservoir Management*, 25: 15-27. <https://doi.org/10.1080/07438140802714304>.

OECC (2006). Plan nacional de adaptación al cambio climático. Marco para la coordinación entre administraciones públicas para las actividades de evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático. Madrid, Spain. https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactosvulnerabilidad-y-adaptacion/pna_v3_tcm7-12445_tcm30-70393.pdf

OECC (2021). Estratègia energètica nacional i de lluita contra el canvi climàtic 2020-2050. https://www.bopa.ad/bopa/033019/Documents/Memòria_GD20210204_16_16_19.pdf

OPCC-CTP (2013). Estudio sobre la adaptación al cambio climático en los Pirineos. Análisis de las iniciativas de adaptación en los Pirineos. Observatorio Pirenaico del cambio Climático. <http://www.opcc-ctp.org/images/espacedocumentaire/publications/ADAPTATION/adaptacion-perfil-definitivo.pdf>

OPCC-CTP (2018). El cambio climático en los Pirineos: impactos, vulnerabilidades y adaptación - Bases de conocimiento para la futura estrategia de adaptación al cambio climático en los Pirineos. Observatorio Pirenaico del Cambio Climático (OPCC), Jaca, 149 pp. <https://www.opcc-ctp.org/sites/default/files/documentacion/opcc-informe-es-print.pdf>.

OPCC-CTP (2019). Informe final 2019. Resultados del proyecto OPCC2 y proyectos asociados: CLIMPY, REPLIM, CANOPEE, FLORAPYR, PIRAGUA. <https://opcc-ctp.org/sites/default/files/documentacion/opcc-informe-es-paginas.pdf>.

OPCC-CTP (2021). La Estrategia Pirenaica de Cambio Climático: una estrategia para la cooperación en la acción climática. https://www.opcc-ctp.org/sites/default/files/editor/document-epicc_version5_es.pdf.

PAACC (2015). Procés Participatiu d'Adaptació d'Andorra al Canvi Climàtic. https://www.mediambient.ad/images/stories/PDF/PAACC/ProcesAdaptacioAndorra_CC2014.pdf.

Palau, A., Alcázar, J. (2012). The basic flow method for incorporating flow variability in environmental flows. *River Research and Applications* 28, 93–102. <https://doi.org/10.1002/rra.1439>.

Palazón, L. (2016). Spatio-temporal dynamic of soil erosion and sediment supply in a Pyrenean catchment: modelling erosion and fingerprinting sediment apportionments. Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza.

Paul, J.D., Hannah, D.M., Liu, W. (2019). Editorial: Citizen Science: Reducing Risk and Building Resilience to Natural Hazards. *Frontiers in Earth Science*, 7, 320. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00320>.

Payne, J., Wood, A., Hamlet, A., Palmer, R., Lettenmaier, D. (2004). Mitigating the effects of climate change on the water resources of the Columbia River basin. *Climatic Change*, 62, 233–256. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000013694.18154.d6>.

Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A. (2007). Updated world map of the Köppen–Geiger climate classification. *Hydrology and earth system sciences*, 11(5), 1633–1644. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.

- Pereira-Cardenal, S.J., Madsen, H., Arnbjerg-Nielsen, K., Riegels, N., Jensen, R., Mo, B., Wangenstein, I., Bauer-Gottwein, P. (2014). Assessing climate change impacts on the Iberian power system using a coupled water-power model. *Climatic Change*, 126, 351–364. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1221-1>.
- PIRAGUA (2021). Evaluación y prospectiva de los recursos hídricos de los Pirineos en un contexto de cambio climático. Caracterización de los recursos hídricos y escenarios futuros.
- Pisani, B. (2008). Acoplamiento de modelos hidrológicos semidistribuidos y sistemas de información geográfica. Tesis Doctoral. Universidade da Coruña. <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/1102>.
- Plan Director del Ciclo Integral del Agua de Uso Urbano de Navarra (2019). Gobierno de Navarra. <https://gobiernoabierto.navarra.es/es/participacion/procesos/plan-director-del-ciclo-integral-del-agua-uso-urbano>.
- PNACC (2021). Documento del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/pna_v3_tcm7-12445_tcm30-70393.pdf.
- Polo, E. (2015). Uso y manejo de nuevas tecnologías y herramientas SIG a partir de datos hidrogeológicos en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza.
- Pons, M., López-Moreno, J., Revuelto, J., Alonso, E., Vilella, M., Travesset-Baro, O., Apodaka, J., Pesado, C., Margalef, M., Iravani, P. (2018). Remote sensing techniques for helping decision-making in the management of ski areas. *International Snow Science Workshop Proceedings 2018*, 548–552. Innsbruck, Austria. <https://oa.mg/work/3175961144>.
- Popa, F., Dumitran, G.E., Vuta, L.I., Tica, E.I., Popa, B., Neagoe, A. (2020). Impact of the ecological flow of some small hydropower plants on their energy production in Romania. *Journal of Physics: Conference Series*, 1426(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1426/1/012043>.
- Portela, R., Bezerra, M.O., Alam, M., Shaad, K., Banerjee, O., Honzák, M. (2019). Discussion paper 8: Water Supply Services. Expert Meeting on Advancing the Measurement of Ecosystem Services for Ecosystem Accounting, New York. <https://seea.un.org/events/expert-meeting-advancing-measurement-ecosystem-services-ecosystem-accounting>.
- Price, M.F., Neville, G.R. (2003). Designing strategies to increase the resilience of alpine/montane systems to climate change. En: WWF. *Buying time: a user's manual for building resistance and resilience to climate change in natural systems*. WWF Climate Program, Berlin.
- Prudencio, G. (2021, April 9). La nieve artificial ya cubre más de la mitad de las pistas de las principales estaciones de esquí por el cambio climático. *El Diario.Es*. https://www.eldiario.es/ballenablanca/economia/nieve-artificial-cubre-mitad-pistas-principales-estaciones-esqui-cambio-climatico_1_7394296.html.
- Pushpalatha, R., Perrin, C., Moine, N., Mathevet, T., and Andréassian, V. (2011). A downward structural sensitivity analysis of hydrological models to improve lowflow simulation. *Journal of Hydrology*, 411, 66–76. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.09.034>.

Quintana, P., Beguería, S., Barella, A., Caballero, Y., Cakir, R., Cenobio, O., Clavera-Gispert, R., Dewandel, B., Grusson, Y., Hevin, G., Jódar, J., Lambán, L.J., Lanini, S., Le Cointe, P., Palazón, L., Sánchez-Pérez, J.M., Sauvage, S. (2023a). Modélisation du bilan hydrique actuel des Pyrénées (1981-2010). Dans (Beguería S., ed.), *Caractérisation des ressources hydriques des Pyrénées : présent et scénarios à venir*. Mémoires scientifiques du projet PIRAGUA, vol. 1. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Saragosse, Espagne, 55-80. <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/15256>.

Quintana, P., Beguería, S., Barella, A., Caballero, Y., Cakir, R., Cenobio, O., Clavera-Gispert, R., Dewandel, B., Grusson, Y., Hevin, G., Jódar, J., Lambán, L.J., Lanini, S., Le Cointe, P., Palazón, L., Sánchez-Pérez, J.M., Sauvage, S. (2023b). Prospection des ressources hydriques des Pyrénées dans un contexte de changement climatique. Dans (Beguería S., ed.), *Caractérisation des ressources hydriques des Pyrénées : présent et scénarios à venir*. Mémoires scientifiques du projet PIRAGUA, vol. 1. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Saragosse, Espagne, 83-114. <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/15256>.

Raia, S., Alvioli, M., Rossi, M., Baum, R.L., Godt, J.W., Guzzetti, F. (2014). Improving predictive power of physically based rainfall-induced shallow landslide models: a probabilistic approach. *Geoscientific Model Development*, 7 (2), pp. 495-514. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-495-2014>.

Recaño, J. (2021). *Projecció de la població d'andorra, 2021-2031*.

RECO (2021). *Cahier Régional Occitanie sur les Changements. Climatiques, édition 2021*.

Reynard, E. (2020). Mountain Tourism and Water and Snow Management in Climate Change Context. *Revue de Géographie Alpine*, 108-1, 0-7. <https://doi.org/10.4000/rga.6816>.

Riegos del Alto Aragón (2018). *Memoria anual año 2018*. https://issuu.com/riegosaltoaragon/docs/memoria_2018.

Ríos-Aragüés, L.M. (2003). Introducción al mapa geológico del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. *Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del Karst (SEDECK)*. Boletín 5, 84-99. ISBN: 978-84-9138-104-4. https://www.igmc.es/librosE/GuiasGeo/ordesa_sp_2ed/2/.

Rosset, T. (2019). Transfert de carbone organique des tourbières vers les eaux de surfaces : quantification, identification des mécanismes de contrôles et détermination de l'influence des activités anthropiques locales. *Ecologie Fonctionnelle*, Institut National Polytechnique de Toulouse.

RTE (2019). <https://bilan-electrique-2019.rte-france.com/production-totale>.

Saa, A., Almorox, J., García, R., Rueda de la Puerta, J.P. (1995). Erosión y aterramiento de embalses. *Agricultura: Revista agropecuaria*, 751, 151-154. ISSN 0002-1334. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1059&orden=0&info=link>.

Samper, J., Huguet, Ll., Ares, J., García Vera, M.A. (1999). *Manual del usuario del programa VISUAL BALAN v.1.0: Código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga*. Publicación Técnica de ENRESA, 5/99, Madrid. 132 pp.

Samper, J., Pisani, B., Espinha Marques, J. (2015). Hydrological models of interflow in three Iberian mountain basins. *Environmental Earth Sciences* (73-6), 2645-2656. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3676-9>.

Sánchez-Chóliz, J., Sarasa, C. (2013). Water resources analysis in Riegos del Alto Aragón (Huesca) in the first decade of the 21st Century. *Economía Agraria y Recursos Naturales - Agricultural and Resource Economics*, 13(1), 97–124. <https://doi.org/10.7201/earn.2013.01.05>.

Sans, F., Beguería, S. (2023). Gouvernance des ressources en eau dans les Pyrénées et stratégies d'adaptation. Dans (Beguería, S., ed.), *Adaptation au changement climatique dans la gestion des ressources hydriques des Pyrénées. Mémoires scientifiques du projet PIRAGUA*, vol. 2. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Saragosse, Espagne, 17-33. <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/15255>.

Sauquet, E., Arama, Y., Blanc-Coutagne, E., Bouscasse, H., Branger, F., Braud, I., Brun, J.-F., Chérel, Y., Cipriani, T., Datry, T., Ducharne, A., Hendrickx, F., Hingray, B., Krowicki, F., Le Goff, I., Le Lay, M., Magand, C., Malerbe, F., Mathevet, T., Mezghani, A., Monteil, C., Perrin, C., Poulhe, P., Rossi, A., Samie, R., Strosser, P., Thirel, G., Tilmant, F. and Vidal J.-P. (2016) Le partage de la ressource en eau sur la Durance en 2050 : vers une évolution du mode de gestion des grands ouvrages duranciens ? *La Houille Blanche*, 5, 25-31. <https://doi.org/10.1051/lhb/2016046>.

Sauquet, E., Le Coent, Ph., Huang, P., Vidal, J.-P. (2023). Impacts du changement climatique sur la gestion de réservoirs de production hydroélectrique : le cas des vallées des Nestes d'Aure et du Louron. Dans (Beguería, S., ed.), *Adaptation au changement climatique dans la gestion des ressources hydriques des Pyrénées. Mémoires scientifiques du projet PIRAGUA*, vol. 2. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Saragosse, Espagne, 59-75. <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/15255>.

Scott, D. (2006). Global environmental change and mountain tourism. *Tourism and Global Environmental Change*, 3, 54-75. ISBN: 9780203011911

Scott, D., McBoyle, G. (2007). Climate change adaptation in the ski industry. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 12, 1411-1431. <https://doi.org/10.1007/s11027-006-9071-4>.

Seguret, M. 1972. Étude tectonique des nappes et séries décollées de la partie centrale du versant sud des Pyrénées. *Laboratoire de géologie structurale-USTL* (ed.), 2, 1-155, Montpellier. <https://www.sudoc.fr/012768294>.

Schlef, K.E., Francois, B., Robertson, A.W., Brown, C. (2018). A general methodology for climate-informed approaches to long-term flood projection—Illustrated with the Ohio river basin. *Water Resources Research*, 54(11), 9321-9341. <https://doi.org/10.1029/2018WR023209>.

Simonneau, A., Chapron, E., Courp, T., Tachikawa, K., Le Roux, G., Baron, S., Galop, D., Garcia, M., Di Giovanni, C., Motellica-Heino, M., Mazier, F., Foucher, A., Houet, T., Desmet, M., Bard, E. (2013). Recent climatic and anthropogenic imprints on lacustrine systems in the Pyrenean Mountains inferred from minerogenic and organic clastic supply (Videssos valley, Pyrenees, France). *The Holocene*, 23, 1764–1777. <https://doi.org/10.1177/0959683613505340>.

Stefanescu, C., Penuelas, J., Filella, I. (2003). Effects of climatic change on the phenology of butterflies in the northwest Mediterranean Basin. *Global Change Biology*, 9, 1494–1506. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00682.x>.

- Tennant, D.L. (1976). Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources. *Fisheries*, 1(4), 6–10. [https://doi.org/10.1577/1548-8446\(1976\)001<0006:ifrffw>2.0.co;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1976)001<0006:ifrffw>2.0.co;2).
- Tognetti, S., Mendoza, G., Aylward, B., Southgate, D., García, L. (2004). A Knowledge and Assessment Guide to Support the Development of Payment Arrangements for Watershed Ecosystem Services (PWES). Prepared for the World Bank Environment Department.
- Tomer, M.D., Schilling, K.E. (2009). A simple approach to distinguish land-use and climate-change effects on watershed hydrology. *Journal of hydrology*, 376(1-2), 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.hydrol.2009.07.029>.
- Turco, M., Llasat, M. C., Tudela, A., Castro, X., Provenzale, A. (2013). Decreasing fires in a Mediterranean region (1970–2010, NE Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 649–652. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-649-2013>.
- UICN, 2018. Les Solutions fondées sur la Nature pour lutter contre les changements climatiques et réduire les risques naturels en France. Paris, France.
- Valero-Garcés, B.L., Navas, A., Machín, J., Walling, D. (1999). Sediment sources and siltation in mountain reservoirs: a case study from the Central Spanish Pyrenees. *Geomorphology*, 28, 23–41. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(98\)00096-8](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(98)00096-8).
- van der Kamp, G., Maathuis, H. (1991). Annual fluctuations of groundwater levels as a result of loading by surface moisture. *Journal of Hydrology*, 127, 137–152. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(91\)90112-U](https://doi.org/10.1016/0022-1694(91)90112-U).
- van Vliet, M.T.H., Sheffield, J., Wiberg, D., Wood, E.F. (2016a). Impacts of recent drought and warm years on water resources and electricity supply worldwide. *Environmental Research Letters*, 11. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/124021>.
- van Vliet, M.T.H., Wiberg, D., Leduc, S., Riahi, K. (2016b). Power-generation system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources. *Nature Climate Change*, 6, 375–380. <https://doi.org/10.1038/nclimate2903>.
- Vanrheenen, N.T., Wood, A.W., Palmer, R.N., Lettenmaier, D.P. (2004). Potential implications of PCM climate change scenarios for Sacramento–San Joaquin River basin hydrology and water resources. *Climatic Change*, 62, 257–281. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000013686.97342.55>.
- Veijalainen, N. (2008). Climate change effects on water resources and regulation in Eastern Finland. *Nordic Hydrological Conference 2008*.
- Velychko, S., Dupliak, O. (2021). Estimation of the Ecological Flow of Mountain River in Ukrainian Carpathians for Small Hydropower Projects. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 100 LNCE, 490–498. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_60.
- Voldoire, A., Sanchez-Gomez, E., Salas y Mélia, D., Decharme, B., Cassou, C., Sénési, S., Coquart, L., Chauvin, F. (2013). The CNRM-CM5. 1 global climate model: description and basic evaluation. *Climate dynamics*, 40, 2091–2121. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1259-y>.

Volodin, E.M., Diansky, N.A., Gusev, A.V. (2013). Simulation and prediction of climate changes in the 19th to 21st centuries with the Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, model of the Earth's climate system. *Izvestiya - Atmospheric and Ocean Physics*, 49 (4), 347-366. <https://doi.org/10.1134/S0001433813040105>.

VVAA FAO (2008). Sistemas de Riego. Factores que se deben considerar para seleccionar el sistema de riego más adecuado. *Sistemas de Riego*, 148, 29–37.

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. (2011). MIROC-ESM 2010: Model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geoscientific Model Development*, 4, 845–872. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-845-2011>.

Wilson, D., Hisdal, H., Lawrence, D. (2010). Has streamflow changed in the Nordic countries? - Recent trends and comparisons to hydrological projections. *Journal of Hydrology*, 394(3–4), 334–346. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.09.010>.

Xiao-Ge, X., Tong-Wen, W., Jiang-Long, L., Zai-Zhi, W., Wei-Ping, L., Fang-Hua, W. (2013a). How Well does BCC_CSM1.1 Reproduce the 20th Century Climate Change over China? *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 6, 21–26. <https://doi.org/10.1080/16742834.2013.11447053>.

Xiao-Ge, X., Tong-Wen, W., Jie, Z. (2013b). Introduction of CMIP5 experiments carried out with the climate system models of Beijing Climate Center. *Advances in Climate Change Research*, 4, 41–49. <https://doi.org/10.3724/SPJ.1248.2013.041>.

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. (2012). A new global climate model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3—Model description and basic performance—. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 90A, 23–64. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2012-A02>.

Zabaleta, A., Garmendia, E., Mariel, P., Tamayo, I., Antigüedad, I. (2018). Land cover effects on hydrologic services under a precipitation gradient. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(10), 5227-5241. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5227-2018>.

Zabaleta, A., Izagirre, E., Meaurio, M., Valiente, M., Uriarte, J.A., Antigüedad, I. (2021). 2030 Agendako Helburuetatik Lurra-Ura hartzera (From Agenda 2030 goals to land-water management). EKAIA, EHUKo Zientzia eta Teknologia Aldizkaria. Número especial Agenda 2030, 229-246. UPV/EHU Press. E-ISSN: 2444-3255, <https://doi.org/10.1387/ekaia.22113>.

Zabaleta, A., Llasat, M.C., Antigüedad, I., Lambán, L.J., Jódar, J., Caballero, Y., Beguería, S. (2023). Modifications récentes des débits, des niveaux des eaux souterraines et des inondations dans les Pyrénées. Dans (Beguería S., ed.) *Caractérisation des ressources hydriques des Pyrénées : présent et scénarios à venir. Mémoires scientifiques du projet PIRAGUA*, vol. 1. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Saragosse, Espagne, 29-52. <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/15256>.

Zamarbide, G., Salles, D., Bosche, C., Cazals, C. (2018). Rapport de la performance de la participation du public. *Projet AGUAMOD*.

Zamora, R., Pérez-Luque, A.J., Bonet, F.J., Barea-Azcón, J.M. y Aspizua, R. (editores) 2015. La huella del cambio global en Sierra Nevada: retos para la conservación. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía. 208 pp. <https://www.miteco.gob.es/red-parques-nacionales/nuestros-parques/sierra-nevada/dossierelcambioglobalsierranevada/tcm30-68957.pdf>.

Zarfl, C., Lumsdon, A.E., Berlekamp, J., Tydecks, L., Tockner, K. (2015). A global boom in hydropower dam construction. *Aquatic Sciences*, 77, 161–170. <https://doi.org/10.1007/s00027-014-0377-0>.

Zhang, L., Dawes, W.R., Walker, G.R. (2001). Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 37, 701-708. <https://doi.org/10.1029/2000WR900325>.

Partenaires



Associés



Avec le soutien de



Govern d'Andorra

Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER)
Fonds Européen de Développement Régional (FEDER)

