

---

*Caractérisation des  
ressources hydriques des  
Pyrénées : present et  
scénarios à venir*

---

*Rapports scientifiques du projet PIRAGUA - Vol 1*



**Beguería S. (coord.), 2023. Caracterización de los recursos hídricos de los Pirineos en la actualidad, y escenarios futuros.** Memorias científicas del proyecto PIRAGUA, vol. 1. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Zaragoza, España, 122pp.

**DOI:** <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/15256>

**Auteurs (par ordre alphabétique):** Santiago Beguería (EEAD-CSIC)

**Autores (por orden alfabético):** Iñaki Antigüedad (UPV-EHU), Anaïs Barella (OE), Santiago Beguería (EEAD-CSIC), Yvan Caballero (BRGM), Roxelanne Cakir (CNRS), Omar Cenobio (OE), Roger Clavera-Gispert (OE), Youen Grusson (CNRS), Jorge Jódar (IGME-CSIC), Luis Javier Lambán (IGME-CSIC), Pierre Le Cointe (BRGM), María del Carmen Llasat (UB), Leticia Palazón (EEAD-CSIC), Pere Quintana-Seguí (OE), José Miguel Sánchez Pérez (CNRS), Sabine Sauvage (CNRS), Jean-Philippe Vidal (INRAE), Ane Zabaleta (UPV-EHU)

**Edition graphique et mise en page:** Samuel Barrena

**Photographie de couverture:** Antoine L.E.

### **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.

### **Derechos de autor**

Ce travail est sous [Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale 4.0 International \(CC BY-NC 4.0\)](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.



## *Résumé exécutif*

Ce travail présente une partie des résultats du projet de coopération internationale PIRAGUA (EFA210/16), cofinancé par le Programme Interreg EFA (Espagne-France-Andorre). Entre 2018 et 2021, le projet PIRAGUA a abordé, par le biais de la coopération transfrontalière, l'évaluation du cycle hydrologique et des ressources hydriques dans les Pyrénées, pour le présent et l'avenir, dans le contexte du changement climatique. Pour cela, les partenaires du projet ont unifié et homogénéisé les informations hydrologiques existantes, proposé des indicateurs hydrologiques, analysé les tendances observées pour ces indicateurs, développé des modèles de simulation pour connaître les détails du bilan hydrique et réalisé des expériences de simulation numérique, afin d'évaluer les conséquences de scénarios de changement climatique sur le cycle hydrologique et les ressources hydriques des Pyrénées.

L'objectif de ce volume est de réaliser une caractérisation des ressources hydriques de surface et souterraines des Pyrénées, de la gestion et de l'emploi des ressources (Chapitre 1) ; analyser les registres de débit, le niveau des aquifères et les inondations afin de déterminer des schémas spatiaux ainsi que les tendances temporelles observées ces dernières décennies (Chapitre 2) ; appliquer des outils de simulation pour réaliser un diagnostic des différents éléments du bilan hydrique des Pyrénées (Chapitre 3); réaliser une série d'expériences de simulation pour déterminer les éventuels changements du bilan hydrique et des ressources hydriques des Pyrénées tout au long du XXI<sup>e</sup> siècle, dans un contexte de changement climatique (Chapitre 4).

Toutes les informations présentées dans ce volume sont consultables et étoffées sur le géoportail de l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique, à l'adresse <https://opcc-ctp.org/geoportail>. Les couches statiques (cartes) se trouvent dans les sections "Ressources en eau", "Hydrologie" et "Bilan hydrique", tandis que l'outil d'analyse du même géoportail permet de générer des cartes et des graphiques de séries chronologiques en fonction des besoins de l'utilisateur, offrant énorme flexibilité.

Toutes les données générées par le projet PIRAGUA sont librement accessibles et peuvent être téléchargées à partir du portail de science ouverte Digital CSIC à l'adresse <https://digital.csic.es/handle/10261/270632>. Vous trouverez ci-dessous les noms des différents ensembles de données et une brève description, ainsi que le lien permanent vers la ressource en ligne.



<b>Nom</b>	<b>Description</b>	<b>Référence</b>
<a href="#">PIRAGUA_resources</a>	Information géospatiale sur les usages et l'exploitation des ressources en eau dans les Pyrénées.	Beguiría et al. (2022c)
<a href="#">PIRAGUA_indicators</a>	Indicateurs des débits journaliers et niveaux des aquifères sur la période 1950-2019, et analyse des tendances.	Zabaleta et al. (2022)
<a href="#">PIRAGUA_flood</a>	Informations géospatiales sur les inondations pour la période 1981-2015 à partir de sources documentaires.	Llasat et al. (2022)
<a href="#">PIRAGUA_atmos_analysis</a>	Grille de variables météorologiques près de la surface à résolution journalière pour forcer les modèles hydrologiques et de surface pour la période 1981-2010.	Quintana-Seguí y Le Cointe (2022)
<a href="#">PIRAGUA_atmos_climate</a>	Base de données maillée des scénarios climatiques des Pyrénées pour forcer les modèles hydrologiques et de surface, couvrant la période 1981-2100.	Quintana-Seguí et al. (2022)
<a href="#">PIRAGUA_hydro_analysis</a>	Informations géospatiales sur les composantes du bilan hydrique sur les Pyrénées issues de la modélisation hydrologique, pour la période 1981-2010.	Beguiría et al. (2022a)
<a href="#">PIRAGUA_hydro_climate</a>	Projections futures du bilan hydrique sur les Pyrénées pour un ensemble de projections climatiques, pour la période 1981-2100.	Beguiría et al. (2022b)

## *Table des matières*

<b>1. Les ressources hydriques des Pyrénées et leur importance régionale</b>	<b>1</b>
1.1. Introduction : le contexte géographique	2
1.1.1. Géologie et relief	2
1.1.2. Climat	5
1.1.3. Division administrative et population	9
1.2. Importance régionale des ressources hydriques des Pyrénées	12
1.3. Déroulement historique de l'exploitation des ressources hydriques des Pyrénées	14
1.4. Emplois de l'eau des Pyrénées	17
1.4.1. Utilisations environnementales et ressources touristiques	18
1.4.2. Exploitation hydroélectrique	21
1.4.3. Approvisionnement urbain et usage industriel	21
1.4.4. L'agriculture irriguée	23
<b>2. Changements récents des débits, niveaux des eaux souterraines et inondations dans les Pyrénées</b>	<b>27</b>
2.1. Introduction	28
2.2. Méthodologie	31
2.2.1. Délimitation des stations de jaugeage et niveau piézométrique en régime naturel	32
2.2.2. Statistiques représentatives du régime de débit quotidien	35
2.2.3. Statistiques représentatives du niveau piézométrique	36
2.2.4. Base de données d'évènements de crue à l'échelle municipale	37
2.2.5. Analyse des tendances	37
2.3. Résultats	38
2.3.1. Analyse détaillée des stations de jaugeage et de piézométrie	38
2.3.3. Tendances dans les niveaux piézométriques (eau souterraine)	44
2.3.4. Répartition spatiale des évènements d'inondation	44
2.3.5. Tendance temporelle des évènements d'inondation	48
2.3.6. Conséquences des évènements d'inondation	48
2.4. Conclusions	50

<b>3. Modélisation du bilan hydrique actuel des Pyrénées (1981-2010)</b>	<b>53</b>
3.1. Introduction	54
3.2. Méthodologie	56
3.3. Résultats	60
3.3.1. Principales variables climatiques : précipitations et température	60
3.3.2. Flux hydriques	63
3.3.3. Variables d'état	67
3.3.4. Contribution hydrique	74
3.3.5. Comparaison entre modèles	75
3.4. Conclusions	78
<b>4. Prospection des ressources hydriques des Pyrénées dans un contexte de changement climatique</b>	<b>81</b>
4.1. Introduction	82
4.2. Méthodologie	84
4.3. Résultats	87
4.3.1. Forçages climatiques	87
4.3.2. Changements de la température	91
4.3.3. Changements dans les flux hydriques	93
4.3.4. Changements dans les variables d'état	103
4.3.5. Changements d'autres variables : stress hydrique et apport	107
4.4. Conclusions	112

## Index des Figures

<p><i>Figure 1.1. Délimitation et principaux éléments de la zone d'étude, y compris la délimitation des administrations des ressources hydriques : la Confédération hydrographique du Cantabrique (CHC), l'Agence basque de l'eau (Ur Agentzia, URA), la Confédération hydrographique de l'Èbre (CHE), l'Agence catalane de l'eau (Agencia Catalana de l'Aigua, ACA), l'Agence de l'eau Adour-Garonne (AEG) et l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse (AERMC).</i></p>	3
<p><i>Figure 1.2. Classification climatique des Pyrénées, système Köppen-Geiger.</i></p>	4
<p><i>Figure 1.3. Température moyenne annuelle pour la période 1981-2010.</i></p>	4
<p><i>Figure 1.4. Température moyenne mensuelle pour la période 1981-2010.</i></p>	6
<p><i>Figure 1.5. Gradient altitudinal de la température moyenne annuelle (gauche) et régime moyen mensuel (droite) dans les Pyrénées.</i></p>	6
<p><i>Figure 1.6. Précipitations moyennes annuelles pour la période 1981-2010.</i></p>	7
<p><i>Figure 1.7. Gradients altitudinaux de précipitations annuelles dans les vallées des Pyrénées. Les chiffres à côté du nom de la vallée indiquent l'ampleur du gradient linéaire (mm 100 m<sup>-1</sup>).</i></p>	7
<p><i>Figure 1.8. Régimes mensuels de précipitations dans les vallées des Pyrénées.</i></p>	8
<p><i>Figure 1.9. Tendances annuelles des températures (en haut) et des précipitations (en bas) sur la période 1981-2010.</i></p>	10
<p><i>Figure 1.10. Densité de population et principales zones urbaines.</i></p>	11
<p><i>Figure 1.11. Bilan hydrique et climatique (précipitations annuelles moins évapotranspiration potentielle annuelle), moyenne pour la période 1981-2010.</i></p>	13
<p><i>Figure 1.12. Localisation des principaux barrages de retenue classés en fonction de leur capacité (hm<sup>3</sup>) et capacité totale de rétention par les conseils d'exploitation.</i></p>	15
<p><i>Figure 1.13. Histogramme de capacité de rétention en France (bleu) et en Espagne (orange).</i></p>	15
<p><i>Figure 1.14. Évolution temporelle du nombre de barrages de retenue (a) et de la capacité totale de rétention (b) en France (bleu) et en Espagne (orange).</i></p>	16
<p><i>Figure 1.15. Emploi moyen de l'eau par conseil d'exploitation (hm<sup>3</sup> annuels), emploi par secteur (%) et par origine de la ressource (%).</i></p>	18
<p><i>Figure 1.16. Zones de protection environnementale.</i></p>	22
<p><i>Figure 1.17. Localisation des stations de ski et du domaine skiable total par conseils d'exploitation (km).</i></p>	22
<p><i>Figure 1.18. Localisation des stations hydroélectriques en fonction de la capacité installée (MW) (a) et production moyenne annuelle par conseils d'exploitation (GWh) (b).</i></p>	23
<p><i>Figure 1.19. Histogramme des stations hydroélectriques de plus de 1 MW en fonction de la capacité installée (MW) en France (bleu) et en Espagne (orange).</i></p>	23
<p><i>Figure 1.20. Évolution temporelle du nombre de stations hydroélectriques (a) et de la capacité totale installée (b) en France (bleu) et en Espagne (orange).</i></p>	24
<p><i>Figure 1.21. Principaux centres urbains et régions.</i></p>	25
<p><i>Figure 1.22. Usage de l'eau en agriculture : zones non irriguées ou temporairement irriguées et zones irriguées en permanence.</i></p>	25
<p><i>Figure 2.1. Évolution temporelle du nombre de stations de jaugeage disponibles (ligne noire) et représentation graphique de la longueur des séries de données individuelles (lignes grises).</i></p>	32
<p><i>Figure 2.2. Évolution temporelle du nombre de stations piézométriques disponibles (ligne noire) et représentation graphique de la longueur des séries de données individuelles (lignes grises).</i></p>	33

<i>Figure 2.3. Stations de jaugeage sélectionnées pour l'étude des débits et de leurs bassins-versants.</i>	34	<i>Figure 2.15. Répartition mensuelle du nombre d'épisodes d'inondation importants qui ont touché la région des Pyrénées sur la période 1981-2015.</i>	47
<i>Figure 2.4. Localisation des stations de niveau piézométrique sélectionnées pour l'étude.</i>	34	<i>Figure 3.1. Unités spatiales pour l'extraction de résultats de la modélisation : bassins hydrographiques et superficies versantes à des masses d'eau employées dans SWAT et SASER (carte supérieure) et masses d'eau souterraine employées dans RECHARGE (carte inférieure).</i>	58
<i>Figure 2.5. Hydrogramme complet (évolution temporelle des débits quotidiens) et changements décennaux de la fonction de distribution cumulée (ECDF) des débits observés dans les jaugeages 9063 (rivière Esca à Sigüés) et Q7002910 (Gave d'Oloron à Oloron-Sainte-Marie).</i>	39	<i>Figure 3.2. Typologie de masses d'eau souterraines des Pyrénées en fonction de leurs conditions de flux et de leurs caractéristiques lithologiques dominantes.</i>	59
<i>Figure 2.6. Séries temporelles annuelles et mensuelles d'indicateurs de débit dans le jaugeage 9018 (rivière Aragon à Jaca), période 1950-2019. Les lignes rouges indiquent les tendances significatives, ainsi que l'ampleur de la tendance (chiffres rouges).</i>	40	<i>Figure 3.3. Température moyenne annuelle sur la période 1981-2010 : modélisation SWAT (carte supérieure) et RECHARGE (carte inférieure).</i>	61
<i>Figure 2.7. Résultats des analyses de tendances dans les débits historiques observés des Pyrénées pour la période 1960-2019.</i>	41	<i>Figure 3.4. Précipitation moyenne annuelle sur la période 1981-2010 : modélisation SWAT (carte supérieure), SASER (carte centrale) et RECHARGE (carte inférieure).</i>	62
<i>Figure 2.8. Résultats des analyses de tendances des débits des Pyrénées pour le mois de mai pour différentes périodes temporelles.</i>	42	<i>Figure 3.5. Évapotranspiration moyenne annuelle sur la période 1981-2010 : modélisation SWAT (carte supérieure) et SASER (carte inférieure).</i>	64
<i>Figure 2.9. Résultats des analyses de tendances des débits des Pyrénées pour le mois d'octobre sur différentes périodes temporelles.</i>	43	<i>Figure 3.6. Indice d'aridité (ratio entre évapotranspiration réelle et potentielle) sur la période 1981-2010 : modélisation SWAT (carte supérieure) et SASER (carte inférieure).</i>	65
<i>Figure 2.10. Résultats des analyses de tendances des niveaux piézométriques moyens annuels des Pyrénées pour la période 1995-2019.</i>	44	<i>Figure 3.7. Fusion nivale moyenne annuelle sur la période 1981-2010 : modélisation SWAT (carte supérieure) et SASER (carte inférieure).</i>	66
<i>Figure 2.11. Répartition municipale du nombre total d'évènements d'inondation qui ont touché la région des Pyrénées sur la période 1981-2015.</i>	45	<i>Figure 3.8. Recharge moyenne annuelle sur la période 1981-2010 : modélisation SWAT.</i>	68
<i>Figure 2.12. Répartition du nombre d'évènements d'inondation aux dégâts importants (extraordinaires et catastrophiques) qui ont touché la région des Pyrénées sur la période 1981-2015.</i>	45	<i>Figure 3.9. Recharge annuelle potentielle sur la période 1981-2010 : modélisation RECHARGE.</i>	68
<i>Figure 2.13. Répartition du nombre d'évènements extraordinaires d'inondation qui ont touché la région des Pyrénées sur la période 1981-2015.</i>	46	<i>Figure 3.10. Génération de ruissellement annuel sur la période 1981-2010 : modélisation SWAT (carte supérieure) et SASER (carte inférieure).</i>	69
<i>Figure 2.14. Répartition du nombre d'évènements catastrophiques d'inondation qui ont touché la région des Pyrénées sur la période 1981-2015.</i>	47	<i>Figure 3.11. Génération de ruissellement annuel sur la période 1981-2010 : modélisation SWAT (carte supérieure) et SASER (carte inférieure).</i>	

Figure 3.12. Eau dans le sol (moyenne annuelle) sur la période 1981-2010 : modélisation SWAT (carte supérieure) et SASER (carte inférieure). Observez la différence dans les unités.

Figure 3.13. Couverture neigeuse (équivalent moyen en eau) sur la période 1981-2010 : modélisation SWAT (carte supérieure) et SASER (carte inférieure).

Figure 3.14. Contribution annuelle de débit superficiel sur la période 1981-2010 : modélisation SWAT.

Figure 3.15. Comparaison du schéma saisonnier des principaux flux simulés par SWAT et SASER : précipitations (PRECIP, mm), évapotranspiration (ET, mm), fusion nivale (SNOMELT, mm) et génération de débit (WYLD, mm).

Figure 3.16. Comparaison du schéma saisonnier des principaux flux simulés par SWAT et SASER : précipitations (PRECIP, mm), évapotranspiration (ET, mm), fusion nivale (SNOMELT, mm) et génération de débit (WYLD, mm).

Figure 3.17. Comparaison des indicateurs de performance des simulations réalisées avec SASER et SWAT pour l'ensemble des stations de jaugeage de référence. Un indicateur général de concordance entre les débits prévus et observés (KGE) et le biais relatif (PBIAS) est présenté.

Figure 4.1. Différences dans les forçages climatiques : température moyenne mensuelle dans l'ensemble des Pyrénées pour trois horizons temporels et deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5), à partir de six modèles globaux (GCM). Lignes continues : downscaling statistique sans correction de biais - Lignes discontinues : avec correction de biais.

Figure 4.2. Différences dans les forçages climatiques : précipitations moyennes mensuelles dans l'ensemble des Pyrénées pour trois horizons temporels et deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5), à partir de six modèles globaux (GCM). Lignes continues : downscaling statistique sans correction de biais - Lignes discontinues : avec correction de biais.

Figure 4.3. Différences de forçage climatique : évolution des précipitations annuelles moyennes pour l'horizon 2011-2040 par rapport à 1981-2010 sous le scénario RCP 4.5. Valeurs obtenues à partir de la réduction d'échelle statistique de six modèles GCM sans correction de biais.

Figure 4.4. Différences de forçage climatique : évolution des précipitations annuelles moyennes pour l'horizon 2011-2040 par rapport à 1981-2010 sous le scénario RCP 4.5. Valeurs obtenues à partir de trois modèles GCM avec correction de biais.

Figure 4.5. Changement de la température moyenne annuelle par rapport à 1981-2010 pour trois horizons temporels et deux scénarios d'émissions : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER).

Figure 4.6. Température moyenne mensuelle de l'ensemble des Pyrénées pour deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5) et trois horizons temporels : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER), ligne rouge continue, intervalle de crédibilité (10 %-90 %), lignes rouges discontinues, et valeur moyenne de référence (1981-2010), ligne bleue.

Figure 4.7. Changement des précipitations moyennes annuelles par rapport à 1981-2010 pour trois horizons temporels et deux scénarios d'émissions : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER). Les rayures indiquent un faible niveau d'accord entre les simulations (moins de 80 % des simulations s'accordent sur le signe du changement).

Figure 4.8. Précipitations moyennes annuelles sur l'ensemble des Pyrénées pour deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5) et trois horizons temporels : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER), ligne rouge continue, intervalle de crédibilité (10 %-90 %), lignes rouges discontinues, et valeur moyenne de référence (1981-2010), ligne bleue.

Figure 4.9. Changement de l'évapotranspiration moyenne annuelle par rapport à 1981-2010 pour trois horizons temporels et deux scénarios d'émissions : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER). Les rayures indiquent un faible niveau d'accord entre les simulations (moins de 80 % des simulations s'accordent sur le signe du changement).

Figure 4.10. Évapotranspiration moyenne mensuelle de l'ensemble des Pyrénées pour deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5) et trois horizons temporels : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER), ligne rouge continue, intervalle de crédibilité (10 %-90 %), lignes rouges discontinues, et valeur moyenne de référence (1981-2010), ligne bleue

Figure 4.11. Changement dans la génération de débit moyenne annuelle par rapport à 1981-2010 pour trois horizons temporels et deux scénarios d'émissions : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER). Les rayures indiquent un faible niveau d'accord entre les simulations (moins de 80 % des simulations s'accordent sur le signe du changement).

Figure 4.12. Génération de débit moyenne mensuelle sur l'ensemble des Pyrénées pour deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5) et trois horizons temporels : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER), ligne rouge continue, intervalle de crédibilité (10 %-90 %), lignes rouges discontinues, et valeur moyenne de référence (1981-2010), ligne bleue.

98

Figure 4.13. Changement dans la fusion nivale moyenne annuelle par rapport à 1981-2010 pour trois horizons temporels et deux scénarios d'émissions : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER). Les rayures indiquent un faible niveau d'accord entre les simulations (moins de 80 % des simulations s'accordent sur le signe du changement).

99

Figure 4.14. Fusion nivale moyenne mensuelle sur l'ensemble des Pyrénées pour deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5) et trois horizons temporels : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER), ligne rouge continue, intervalle de crédibilité (10 %-90 %), lignes rouges discontinues, et valeur moyenne de référence (1981-2010), ligne bleue.

100

Figure 4.15. Changement dans la recharge des aquifères moyenne annuelle par rapport à 1981-2010 pour trois horizons temporels et deux scénarios d'émissions : valeurs moyennes de six modèles GCM (6 simulations SWAT). Les rayures indiquent un faible niveau d'accord entre les simulations (moins de 80 % des simulations s'accordent sur le signe du changement).

101

Figure 4.16. Recharge moyenne mensuelle sur l'ensemble des Pyrénées pour deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5) et trois horizons temporels : valeurs moyennes de six modèles GCM (6 simulations SWAT), ligne rouge continue, intervalle de crédibilité (10 %-90 %), lignes rouges discontinues, et valeur moyenne de référence (1981-2010), ligne bleue.

102

Figure 4.17. Changement de la réserve moyenne en eau du sol par rapport à 1981-2010 pour trois horizons temporels et deux scénarios d'émissions : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER). Les rayures indiquent un faible niveau d'accord entre les simulations (moins de 80 % des simulations s'accordent sur le signe du changement).

103

Figure 4.18. Réserve moyenne mensuelle en eau du sol sur l'ensemble des Pyrénées pour deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5) et trois horizons temporels : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER), ligne rouge continue, intervalle de crédibilité (10 %-90 %), lignes rouges discontinues, et valeur moyenne de référence (1981-2010), ligne bleue.

104

Figure 4.19. Changement de la couverture neigeuse moyenne annuelle (snow water equivalent) par rapport à 1981-2010 pour trois horizons temporels et deux scénarios d'émissions : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER).

105

Figure 4.20. Couverture neigeuse moyenne annuelle de l'ensemble des Pyrénées pour deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5) et trois horizons temporels : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER), ligne rouge continue, intervalle de crédibilité (10 %-90 %), lignes rouges discontinues, et valeur moyenne de référence (1981-2010), ligne bleue.

106

Figure 4.21. Changement de l'indice d'aridité annuelle (évapotranspiration réelle / évapotranspiration potentielle) par rapport à 1981-2010 pour trois horizons temporels et deux scénarios d'émissions : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER). Les rayures indiquent un faible niveau d'accord entre les simulations (moins de 80 % des simulations s'accordent sur le signe du changement).

107

Figure 4.22. Aridité moyenne mensuelle (évapotranspiration réelle / évapotranspiration potentielle) de l'ensemble des Pyrénées pour deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5) et trois horizons temporels : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER), ligne rouge continue, intervalle de crédibilité (10 %-90 %), lignes rouges discontinues, et valeur moyenne de référence (1981-2010), ligne bleue.

108

Figure 4.23. Changement de la contribution (apport de débit) annuelle par rapport à 1981-2010 pour trois horizons temporels et deux scénarios d'émissions : valeurs moyennes de six modèles GCM (6 simulations SWAT). La ligne discontinue indique un faible niveau de convergence entre les simulations (moins de 80 % des simulations concordent sur le signe du changement).

109

Figure 4.24. Contribution moyenne mensuelle de l'ensemble des rivières des Pyrénées pour deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5) et trois horizons temporels : valeurs moyennes de six modèles GCM (6 simulations SWAT), ligne rouge continue, intervalle de crédibilité (10 %-90 %), lignes rouges discontinues, et valeur moyenne de référence (1981-2010), ligne bleue.

110

Figure 4.25. Changement dans la contribution moyenne mensuelle de l'ensemble des rivières des Pyrénées pour deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5) et trois horizons temporels : valeurs moyennes de six modèles GCM (6 simulations SWAT), ligne rouge continue, intervalle de crédibilité (10 %-90 %), lignes rouges discontinues, et valeur moyenne de référence (1981-2010), ligne bleue.

111



## *1. Les ressources hydriques des Pyrénées et leur importance régionale*

---

**Santiago Beguería (EEAD-CSIC), Yvan Caballero (BRGM), Pierre  
Le Cointe (BRGM), Leticia Palazón (EEAD-CSIC)**

---

Les Pyrénées forment une grande chaîne de montagnes située au nord de la péninsule Ibérique entre l'Espagne, la France et l'Andorre. À la faible densité de population en comparaison avec les territoires qui l'entourent, les Pyrénées revêtent une importance régionale exceptionnelle quant à la génération de ressources hydriques. Les ressources hydriques des Pyrénées ont ainsi une importance qui dépasse les limites de la chaîne de montagnes elle-même, alimentant les besoins en eau pour l'agriculture, l'industrie et l'approvisionnement d'une vaste région du sud-ouest européen.

L'exploitation de ces ressources s'est développée tout au long du XX<sup>e</sup> siècle, par la construction de systèmes de régulation (barrages) sur les deux versants de la chaîne de montagnes. À l'heure actuelle, les ressources hydriques des Pyrénées sont gérées par plusieurs organismes. 7 500 hm<sup>3</sup> d'eau des Pyrénées sont utilisés par an, avec une forte prédominance de l'usage des ressources de surface (débits circulants). Il existe de grandes différences entre les pays, car sur le versant espagnol, l'utilisation de l'eau des Pyrénées est beaucoup plus intensive, de même que la prédominance de l'utilisation des eaux de surface. L'usage agricole prédomine, notamment sur le versant sud, suivi de l'approvisionnement urbain et de l'usage industriel. De vastes superficies irriguées, qui s'alimentent de ressources de surface stockées dans de grands bassins de retenue se distinguent sur le versant sud, tandis qu'il n'existe pas de grands systèmes de distribution pour l'irrigation sur le versant nord, et l'utilisation de débits circulants et du sous-sol prédomine. L'aménagement hydroélectrique est très important sur les deux versants de la chaîne de montagnes, avec de nombreuses centrales, d'une importante capacité installée. Enfin, l'eau et ses différentes manifestations dans la chaîne de montagnes (glaciers, manteau neigeux, lacs de montagne, sources, cascades et rivières) constituent des ressources environnementales extrêmement importantes et contribuent de manière significative à l'attrait touristique de la région.

---

*Citer comme suit : Beguería S., Caballero Y., Le Cointe P., Palazón L., 2023. Les ressources hydriques des Pyrénées et leur importance régionale. Dans Beguería, S. (coord.), Caractérisation des ressources hydriques des Pyrénées : présent et scénarios à venir. Rapports 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>*

---

## 1.1. Introduction : le contexte géographique

### 1.1.1. Géologie et relief

La chaîne de montagnes des Pyrénées est l'un des systèmes montagneux les plus occidentaux du système Alpino-himalayen, un complexe orogénique qui s'étend de l'Atlantique (chaîne Cantabrique) jusqu'aux îles de Java et de Sumatra, parcourant la Méditerranée (système Bétique, Atlas-Rif, Alpes, Apennins, Alpes dinariques, Carpates, Balkans), le Moyen-Orient (Caucase, Elbourz, Zagros) et l'Asie (Hindou Kouch, Pamir, Karakorum et l'Himalaya). Ce système complexe est né de plusieurs impulsions tectoniques entre le paléocène (il y a environ 60 millions d'années) et le miocène (il y a environ 10 millions d'années) du fait de la convergence entre les plaques africaine, indienne et cimmérienne contre la plaque eurasiennne.

Les Pyrénées sont situées au nord de la péninsule Ibérique, s'étendant sur plus de 400 km entre l'océan Atlantique (golfe de Gascogne) à l'ouest et la mer Méditerranée (cap de Creus) à l'est, atteignant une largeur de près de 150 km dans sa partie centrale (Figure 1.1). Elles se sont formées entre le crétacé supérieur et le miocène inférieur, dans le contexte du grand plissement alpino-himalayen, du fait de la convergence entre la microplaque ibérique et la plaque eurasiennne. Ce raccourcissement a produit un plissement intense et une fracturation des sédiments qui remplissaient le bassin marin mésozoïque et une partie de son soubassement paléozoïque. L'activité tectonique compressive a duré environ 60 millions d'années ; la chaîne de montagnes est considérée comme inactive à l'heure actuelle.

Contrairement aux Alpes, dont la structure est dominée par des couches de glissement, la chaîne des Pyrénées est considérée comme étant principalement de plissement autochtone. D'un point de vue structurel, on distingue généralement une zone septentrionale au nord de la faille dite nord-pyrénéenne, avec une vergence vers le nord, et une zone méridionale avec une vergence vers le sud. Dans cette dernière, d'un plus grand développement de surface, on distingue généralement la zone axiale, constituée de roches paléozoïques (principalement granite et gneiss) et la zone sud-pyrénéenne, constituée de roches mésozoïques et tertiaires (principalement

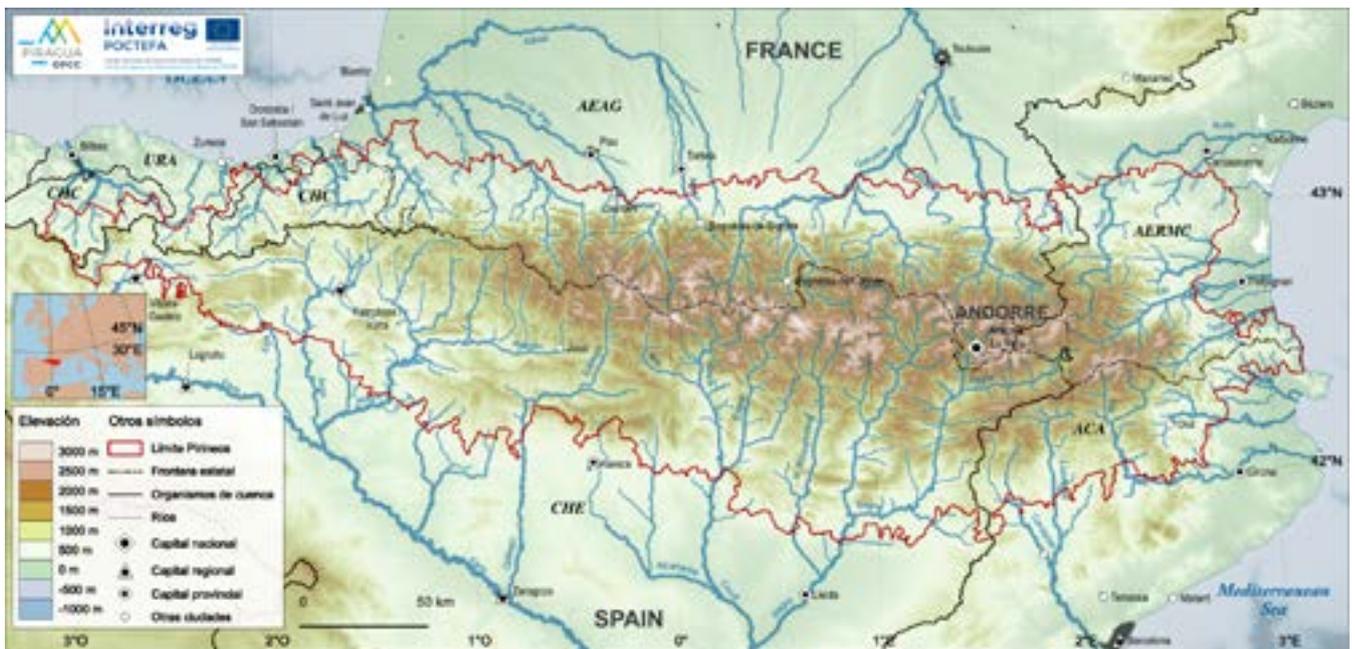


Figure 1.1. Délimitation et principaux éléments de la zone d'étude, y compris la délimitation des administrations des ressources hydriques : la Confédération hydrographique du Cantabrique (CHC), l'Agence basque de l'eau (Ur Agentzia, URA), la Confédération hydrographique de l'Èbre (CHE), l'Agence catalane de l'eau (Agencia Catalana de l'Aigua, ACA), l'Agence de l'eau Adour-Garonne (AEAG) et l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse (AERMIC).

(Source : élaboration propre.)

calcaire). Les piémonts de la chaîne sont composés des bassins tertiaires d'Aquitaine au nord et de l'Èbre au sud. Vous pouvez trouver une excellente introduction à la géologie et au relief des Pyrénées chez Babault et Teixell (2007).

D'un point de vue physiographique, les Pyrénées sont généralement divisées en trois parties. Les Pyrénées atlantiques vont des monts basques et du golfe de Gascogne jusqu'à la vallée de l'Aragon, avec des élévations croissantes d'ouest en est. Les Pyrénées centrales, entre les vallées de l'Aragon et d'Arán, accueillent les massifs et les pics les plus hauts de la chaîne (l'Aneto de 3 404 m, le Posets de 3 375 m, le Mont-Perdu de 3 355 m). Les Pyrénées orientales, entre la vallée d'Arán et la mer Méditerranée, présentent une altitude également élevée, qui descend brusquement vers la mer. En ce qui concerne leur organisation nord-sud, le versant sud ou espagnol se caractérise par une succession de chaînes qui descendent progressivement en altitude, constituant un piémont remarquable, tandis que le versant nord ou français présente une descente plus abrupte en altitude, sans présence de piémont.

Les principales rivières des Pyrénées drainent vers l'Atlantique dans leur versant nord

(systèmes de l'Adour et de la Garonne) et vers la Méditerranée dans leur versant sud (système de l'Èbre). En outre, il existe de plus petits bassins aux extrémités occidentale (Bidassoa, Oria, Ega) et orientale (Llobregat, Ter, Muga, Tech, Tet, Aude). Le réseau hydrographique se caractérise par la présence de nombreux cours d'eau, qui adoptent généralement une disposition nord-sud, bien que certains tronçons s'alignent dans le sens ouest-est. À la différence d'autres chaînes alpines telles que les Alpes, les Pyrénées n'ont pas de grands lacs de fond de vallée. Néanmoins, il existe d'innombrables lacs de haute montagne petits et moyens. La présence de cirques glaciers et de nombreuses cascades dans les zones en amont est caractéristique du massif.

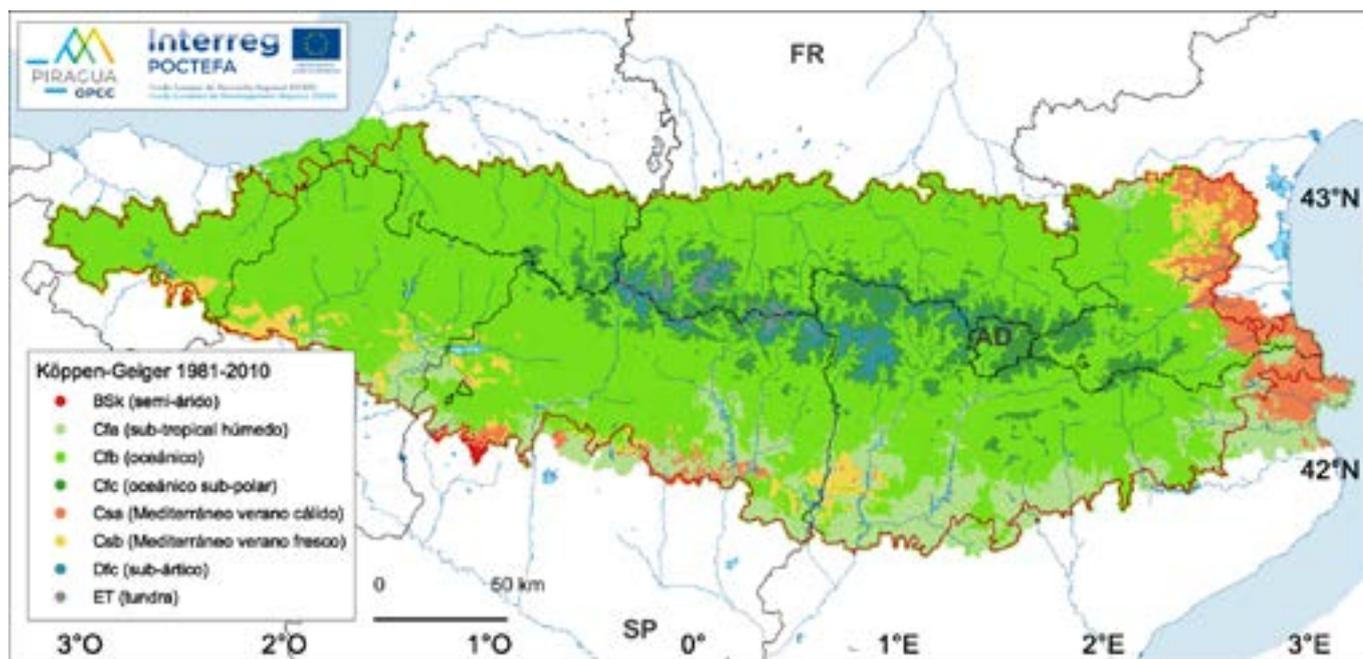


Figure 1.2. Classification climatique des Pyrénées, système Köppen-Geiger.

(Source: CLIMPY-OPCC, 2019; elaboración propia.)

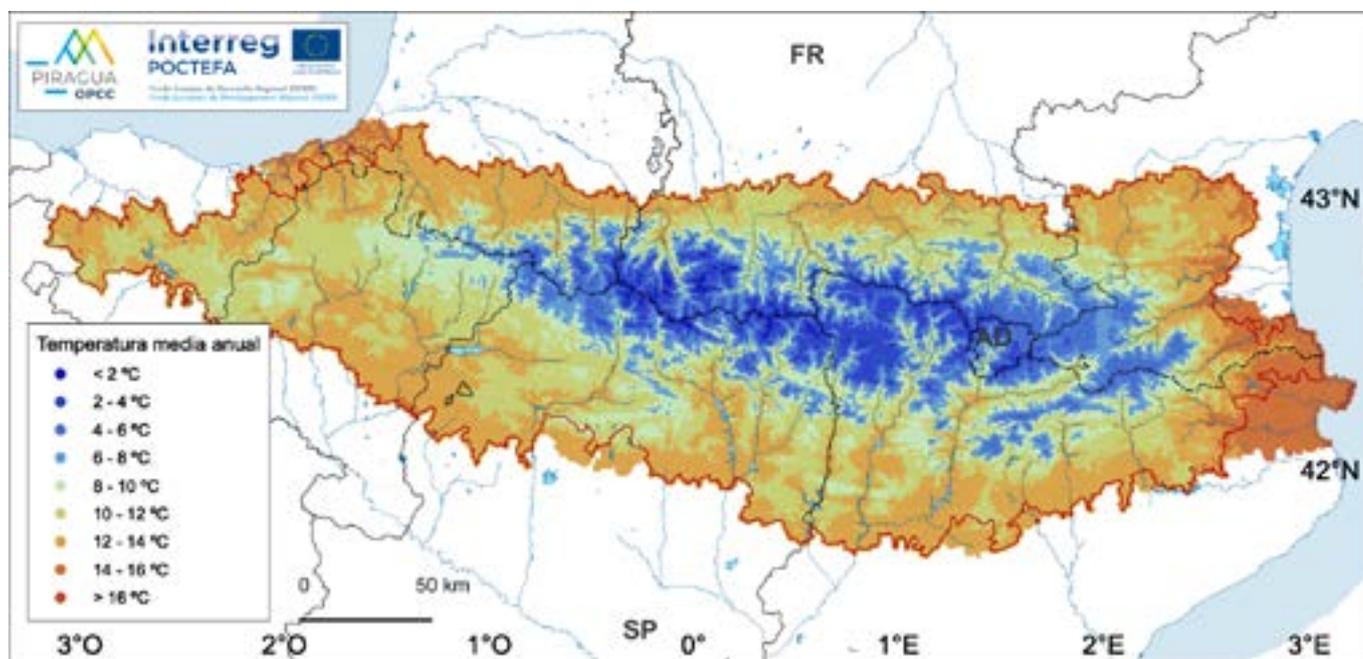


Figure 1.3. Température moyenne annuelle pour la période 1981-2010.

(Source : CLIMPY, 2019 ; elaboración propia.)

### 1.1.2. Climat

Le contexte climatique est fondamental pour comprendre le cycle hydrologique des Pyrénées et les changements que l'on peut attendre dans le contexte du changement climatique. Les gradients altitudinaux et l'exposition aux masses d'air océaniques (atlantique et méditerranéenne) et continentales (euro-sibériennes et africaines) déterminent le climat des Pyrénées. La grille de données basée sur les observations météorologiques développée par le projet CLIMPY (CLIMPY-OPCC, 2019) a été utilisée pour l'élaboration de cette section, pour la période de référence 1981-2010.

Selon la classification climatique de Köppen-Geiger (Figure 1.2), la majeure partie du territoire des Pyrénées a un climat Cfb océanique tempéré, caractérisé par des étés doux et des hivers peu froids, et sans grands contrastes saisonniers de précipitations. Sur sa marge orientale, le climat méditerranéen à été chaud (Csa) prédomine, se transformant progressivement en méditerranéen à été frais (Csb) vers l'intérieur. Les climats de type Cs méditerranéens se caractérisent par des températures douces et un fort contraste de précipitations entre les saisons, avec des hivers humides et des étés secs à très secs. Les températures estivales font la différence entre les sous-types a et b. Dans la marge sud, le climat le plus fréquent est le climat de type Cfa subtropical humide, similaire aux climats de type Cs mais avec des étés moins secs ; c'est-à-dire qu'il s'agit d'un climat de transition océanique-méditerranéen. Dans les secteurs les plus élevés de la chaîne de montagnes, il y a une transition vers des climats froids. Ainsi, le climat de type Cfc (océanique sub-polaire) présente de un à trois mois avec des températures moyennes inférieures à 10 °C. On passe alors à des climats nettement froids, typiques de latitudes beaucoup plus élevées, comme le type Dfc (sub-arctique), avec des températures inférieures à 0°C pendant au moins un mois, et le type ET (toundra), pour lequel la température moyenne du mois le plus chaud est inférieure à 10 °C.

La température moyenne de l'air dans les Pyrénées est de 10,5 °C, bien qu'il existe d'importantes différences spatiales entre les secteurs les plus élevés et les plus froids, dépassant rarement les 0 °C de moyenne annuelle, et les plus chauds atteignant les 16 °C (Figure 1.3). La variabilité interannuelle de la température moyenne des Pyrénées est de 0,5 °C, ce qui nous indique que la différence moyenne entre une année et une autre est de modérée à faible. Saisonnièrement, les valeurs extrêmes ont lieu en janvier (3,4 °C) et en juillet (18,9 °C), avec un schéma spatial qui varie à peine d'un mois à un autre (Figure 1.4).

La répartition spatiale des températures dans les Pyrénées obéit fondamentalement à un schéma altitudinal, sans différences significatives entre les régions. Il existe ainsi un gradient thermique altitudinal caractéristique pour toute la chaîne, avec un rapport presque linéaire entre l'altitude et la température moyenne annuelle, caractérisé par un gradient caractéristique de -5°/1 000 m d'altitude (Figure 1.5). Saisonnièrement, le gradient est un peu moins accentué en hiver (décembre, -4,18 °C 1 000 m<sup>-1</sup>) et plus accentué au printemps (avril, -5,69 °C 1 000 m<sup>-1</sup>). Ces gradients sont très consistants tout le long du massif, sans que des changements notables soient détectés le long des gradients ouest-est ou nord-sud.

Il n'existe pas non plus de différences importantes dans la variabilité saisonnière des températures, existant un régime mensuel de températures très similaire le long de la chaîne. Les températures minimales sont atteintes en décembre-janvier, et les maximales en juillet-août, la baisse des températures étant légèrement plus prononcée à l'automne que leur hausse au printemps (Figure 1.5).

Les précipitations annuelles cumulées présentent aussi d'importants contrastes spatiaux, avec une plage variant de 500 à 3 000 mm annuels (Figure 1.6). La répartition spatiale des précipitations s'organise en fonction de deux gradients principaux. D'une part, il existe un gradient ouest-est très net, qui est lié à l'importance majeure des flux de masse d'air chargés d'humidité en provenance de l'Atlantique dans la génération des précipitations. D'autre part,

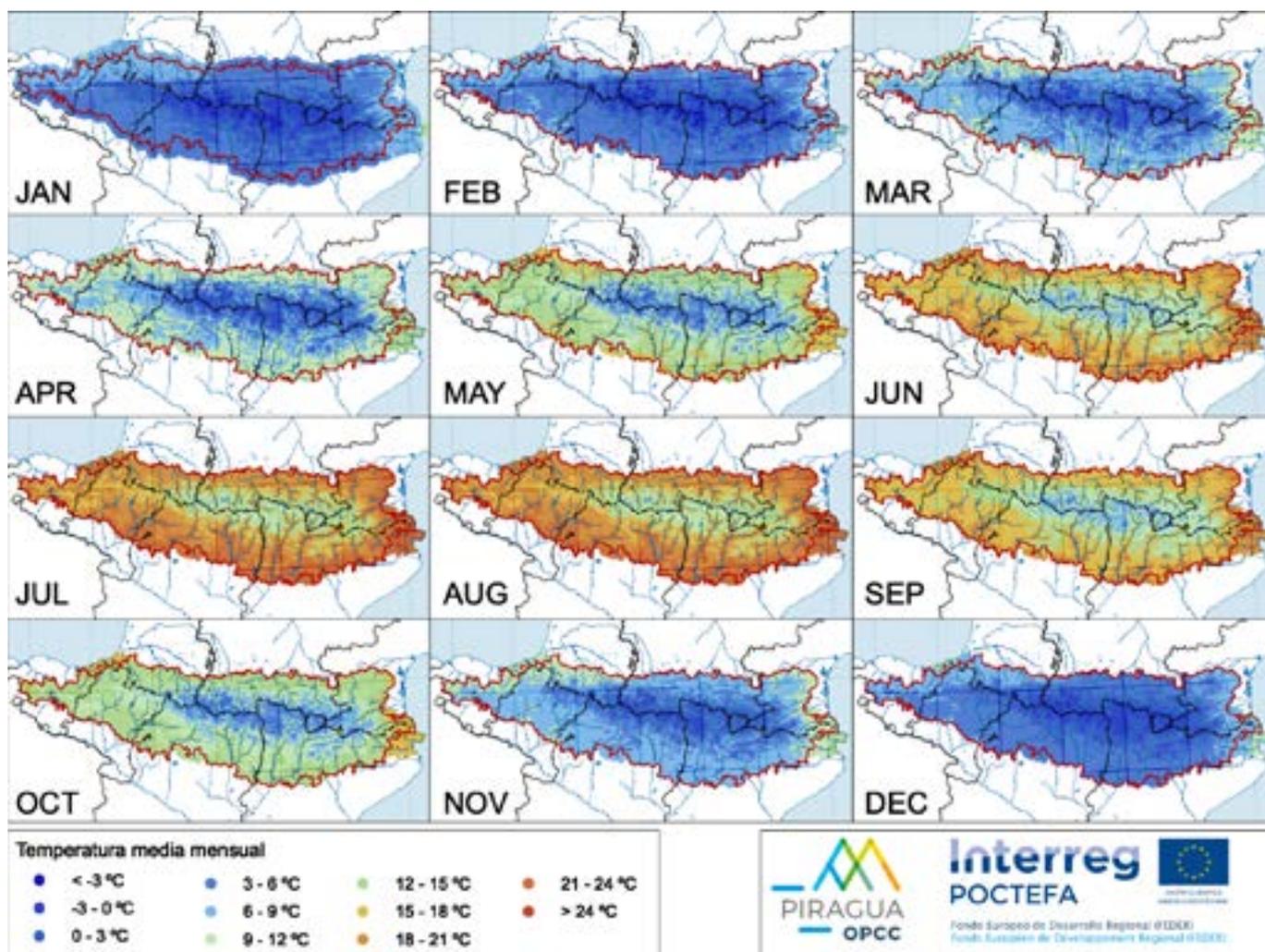


Figure 1.4. Température moyenne mensuelle pour la période 1981-2010.

(Source : CLIMPY, 2019 ; élaboration propre.)

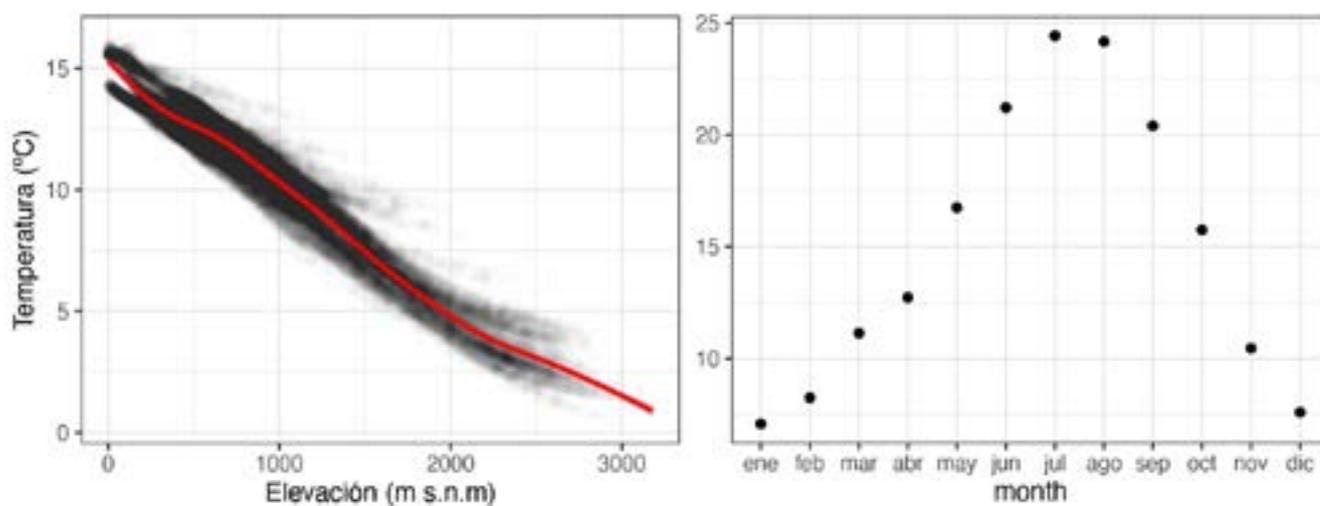


Figure 1.5. Gradient altitudinal de la température moyenne annuelle (gauche) et régime moyen mensuel (droite) dans les Pyrénées.

(Source : CLIMPY, 2019 ; élaboration propre.)

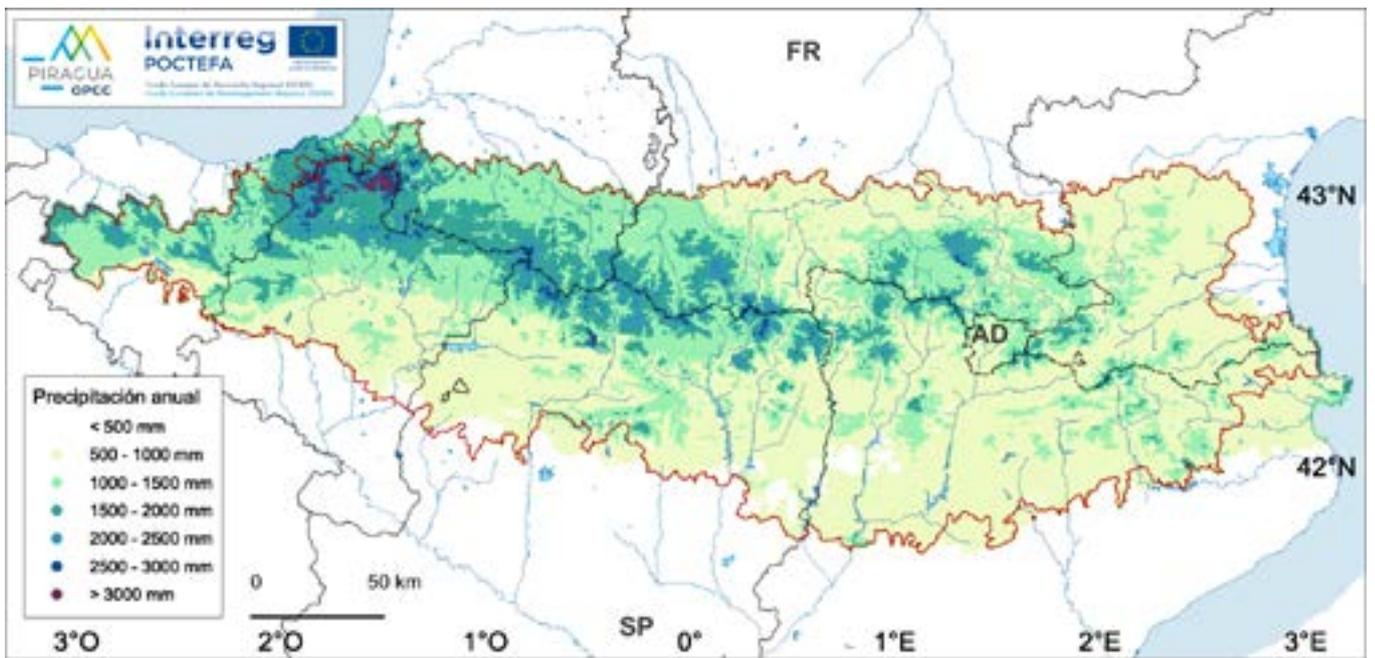


Figure 1.6. Précipitations moyennes annuelles pour la période 1981-2010.

(Source : CLIMPY, 2019 ; élaboration propre.)

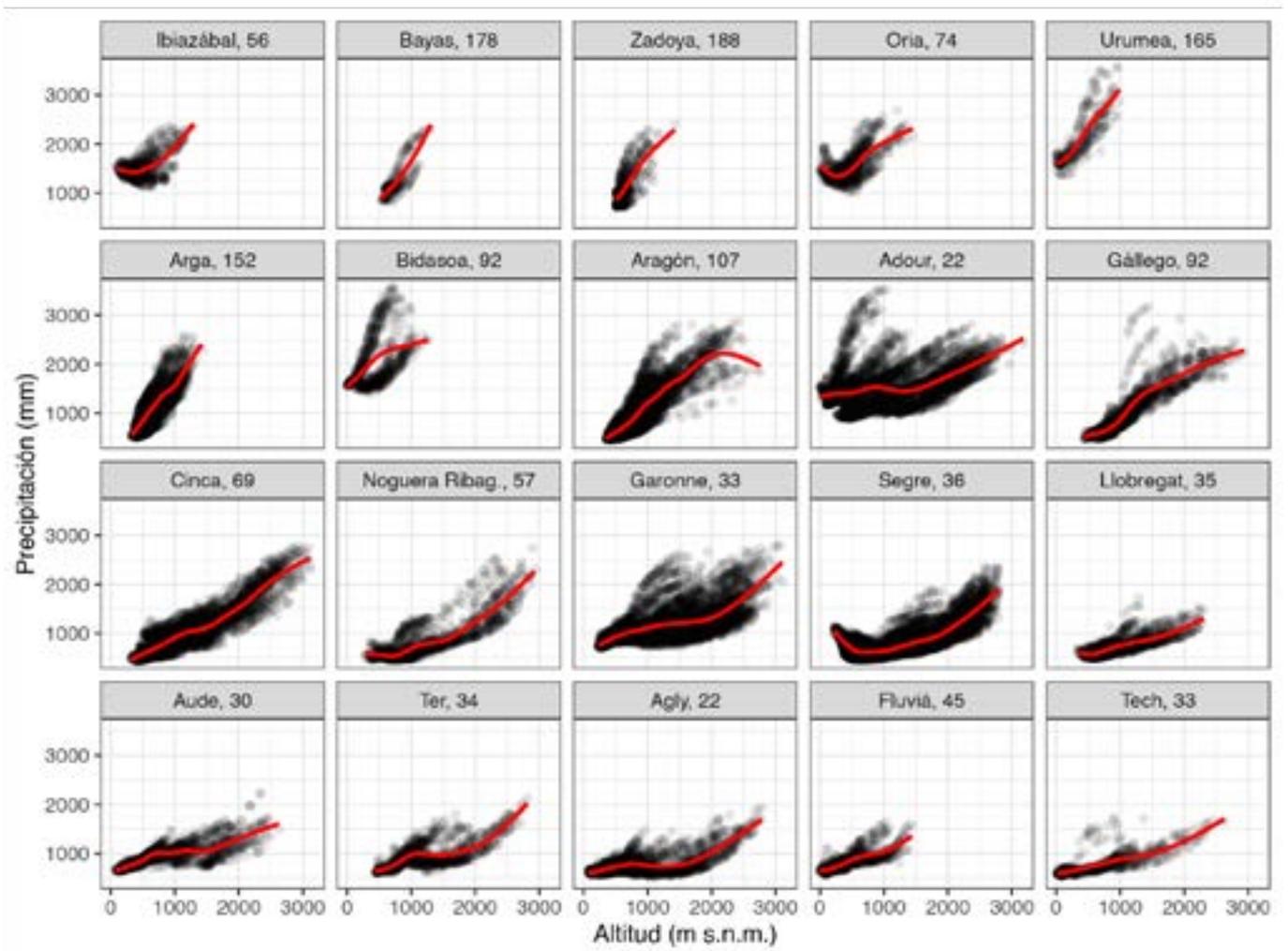


Figure 1.7. Gradients altitudinaux de précipitations annuelles dans les vallées des Pyrénées. Les chiffres à côté du nom de la vallée indiquent l'ampleur du gradient linéaire (mm 100 m<sup>-1</sup>).

(Source : CLIMPY, 2019 ; élaboration propre.)

et comme on peut s’y attendre dans tout massif montagneux, il existe un gradient altitudinal avec des précipitations qui augmentent en fonction de l’altitude. Les valeurs maximales de précipitations annuelles sont ainsi concentrées sur la façade atlantique, dans la vallée de la Bidassoa, tandis que les valeurs les plus faibles se trouvent vers la Méditerranée et dans les dépressions intérieures et les piémonts. En outre, sur le versant nord, l’influence atlantique s’étend sur la zone de piémont jusqu’au secteur central (zone de Lourdes-Tarbes), avec une rapide méditerranéisation des zones de piémont de là vers l’est.

Les deux facteurs mentionnés, longueur et altitude, ne sont pas indépendants entre eux. Il existe ainsi des différences dans les gradients altitudinaux (rapport entre les précipitations et l’altitude) le long des Pyrénées, présentant des

contrastes notables d’ouest en est (Figure 1.7). Les gradients altitudinaux de précipitations des différentes vallées pyrénéennes sont indiqués dans la figure et ordonnés à peu près d’ouest en est. Les gradients les plus prononcés, c’est-à-dire avec la plus grande augmentation des précipitations en fonction de l’altitude (avec plus de 1 000 mm d’augmentation tous les 1 000 m d’altitude) sont dans les vallées les plus occidentales, de l’Ibaizabal à la Bidassoa. Les vallées du secteur central (Aragon, Gállego, Cinca) présentent des gradients un peu moins prononcés, mais encore importants, tandis que les vallées les plus orientales (du Segre au Tech) présentent des gradients de plus en plus faibles (jusqu’à 300 mm 1 000 m<sup>-1</sup>). Les deux grands bassins français (Adour et Garonne) montrent aussi des gradients de moyens à faibles.

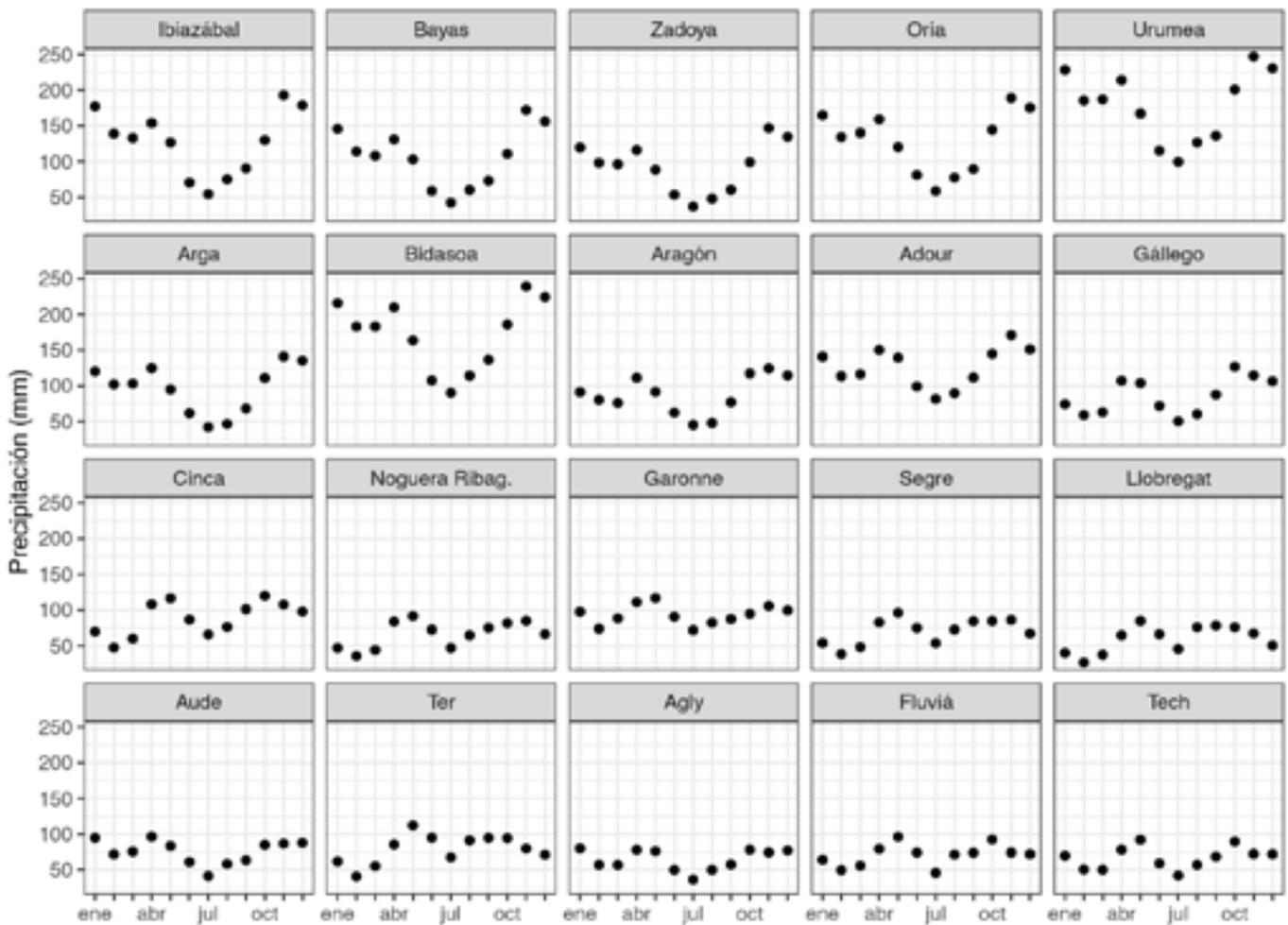


Figure 1.8. Régimes mensuels de précipitations dans les vallées des Pyrénées.

(Source : CLIMPY, 2019 ; élaboration propre.)

Le régime mensuel des précipitations (Figure 1.8) présente un minimum très prononcé en été (juillet) et un minimum secondaire en hiver (janvier-février). Les maxima se produisent à l'automne (octobre-novembre) et au printemps (avril-mai). Il existe, néanmoins, d'importantes différences entre secteurs, apparaissant de nouveau un gradient d'ouest en est. Ainsi, dans les vallées les plus occidentales (par exemple, la Bidassoa), le maximum le plus important est celui de l'automne et a lieu en novembre, alors que le maximum printanier est secondaire et a lieu en avril. Par contre, dans les vallées orientales, le maximum principal est le printanier, qui a lieu en mai, alors que le maximum automnal a lieu en octobre et est moins prononcé. Il existe également des différences dans les minima car, vers l'ouest, le minimum principal a lieu en été, alors que dans les vallées les plus orientales, le minimum hivernal (février) est plus prononcé. La transition entre les deux régimes se produit de manière graduelle, le point de transition entre le maximum automnal et printanier pouvant se situer dans la vallée du Cinca. En France, le bassin de l'Adour présente des caractéristiques atlantiques tandis que la Garonne présente déjà un comportement méditerranéen.

Les conséquences du changement climatique mondial se manifestent, sans aucun doute, également dans les Pyrénées. En utilisant les données du projet CLIMPY du programme Interreg Poctefa, l'augmentation de la température annuelle moyenne sur le territoire pyrénéen a été de 0,8 °C par décennie au cours de la période 1981-2010 (Figure 1.9). L'augmentation de la température a été plus prononcée dans la région centrale des Pyrénées (bassins de Gállego, Ara et Ésera) et dans la région la plus orientale, ainsi que sur le versant nord. C'est dans ces régions que la tendance observée atteint une signification statistique. C'est dans la région la plus occidentale que l'augmentation des températures a été la moins notable, avec des valeurs comprises entre 0,2 et 0,4 °C par décennie. La tendance des températures a été plus accentuée dans le cas des températures minimales que dans celui des températures maximales, et selon les saisons l'augmentation a été plus prononcée au printemps et en été.

Quant aux précipitations, le signal de changement n'est pas aussi clair dans une direction que pour la température, avec des tendances positives (augmentation des précipitations) et négatives (diminution) observées au cours de la période 1981-2010. La tendance moyenne est de -1,45 mm/an, mais cela ne peut pas être considéré comme une valeur représentative pour l'ensemble de la chaîne de montagnes, précisément en raison de la variabilité susmentionnée entre certaines zones et d'autres. Le niveau de signification est également très faible, de sorte que la plupart des changements observés ne peuvent être considérés comme significatifs. Les plus fortes baisses de précipitations, et les seules significatives, se sont produites dans la partie centrale des Pyrénées, ainsi que dans le bassin de la Bidassoa, avec des baisses allant jusqu'à 30 mm par an. Les seules tendances positives significatives ont été observées dans les parties hautes des systèmes du Gave de Pau, également dans les Pyrénées centrales.

---

### 1.1.3. Division administrative et population

---

Pour l'essentiel, la principale séparation des eaux de la chaîne de montagnes forme la frontière entre la France (au nord) et l'Espagne (au sud), et comprend le petit État de l'Andorre. L'exception la plus notable est constituée par la vallée d'Arán qui, appartenant à l'Espagne, se situe sur le versant nord de la chaîne, en amont de la Garonne. Pour sa part, l'Andorre est située sur le versant sud, en amont de la rivière Gran Valira, dans le bassin de la rivière Segre. La partie espagnole des Pyrénées se distribue entre les provinces de Guipuscoa (Pays basque), Navarre (Navarre), Huesca (Aragon) et Lérida, Barcelone et Gérone (Catalogne). La partie française comprend des parties des départements des Pyrénées atlantiques (Nouvelle-Aquitaine) et des Hautes-Pyrénées, de la Haute-Garonne, de l'Ariège, de l'Aude et des Pyrénées orientales (Occitanie).

Avec de nombreux massifs montagneux, la densité de population des Pyrénées est très

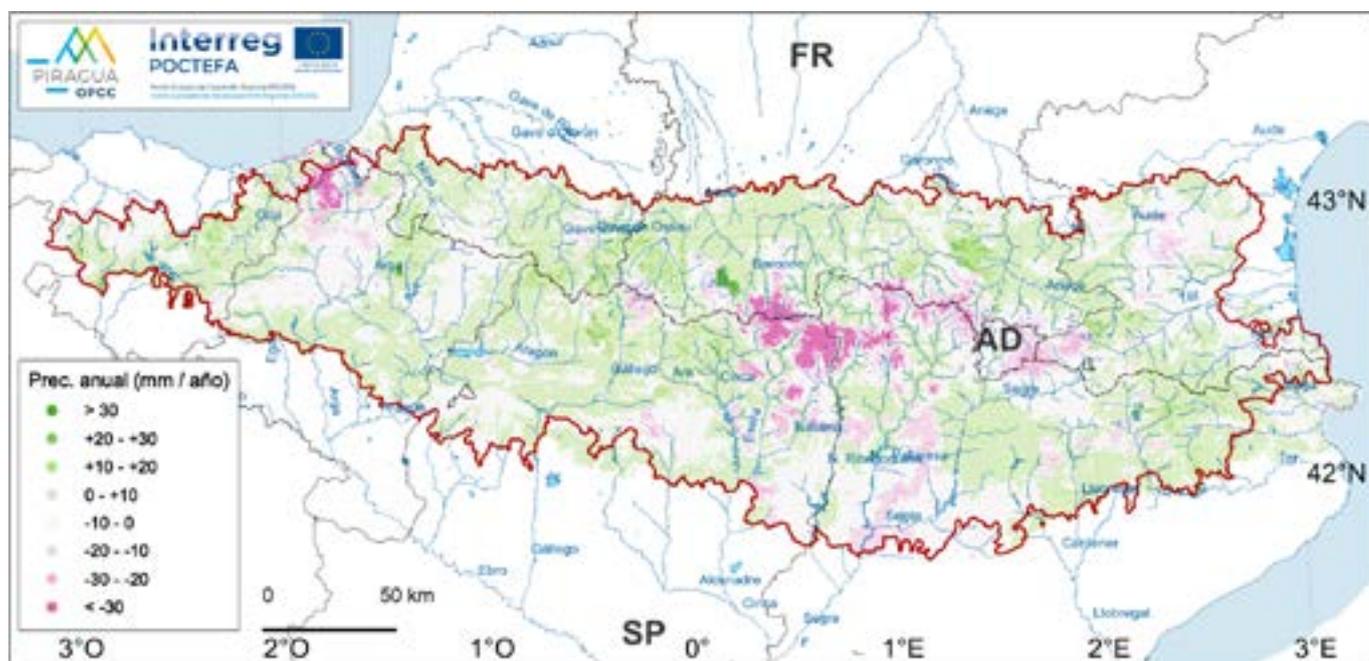
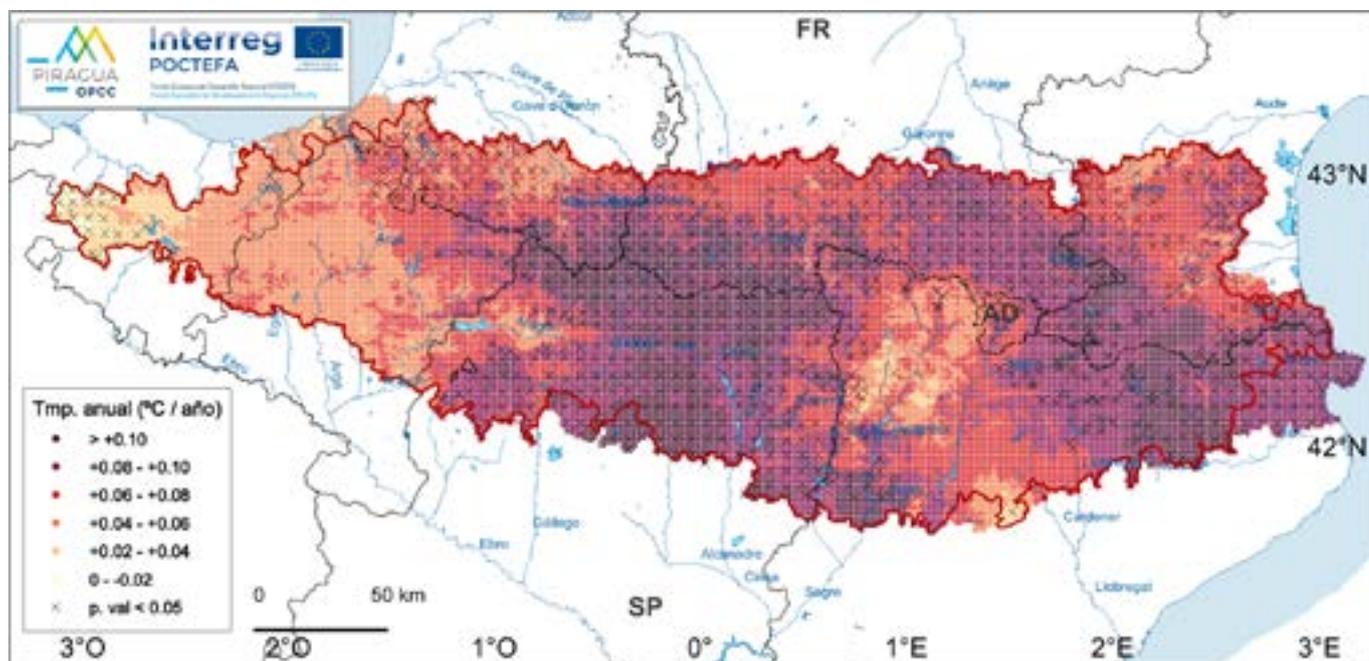


Figure 1.9. Tendances annuelles des températures (en haut) et des précipitations (en bas) sur la période 1981-2010.

(Source : CLIMPY, 2019 ; élaboration propre.)

faible, environ 32 habitants au km<sup>2</sup>, pour une population totale d'environ 1,5 millions (Figure 1.10). La répartition de la population est très irrégulière, et présente des différences entre pays. Le versant français présente une plus grande dispersion de la population, tandis que sur le versant espagnol, la population est plus regroupée autour des centres de population. L'Andorre, avec une population de 77 000 habitants, a une densité de population de près de 100 habitants au km<sup>2</sup>. Il n'existe pas de grandes villes, Pampelune (319 000 habitants) étant le centre urbain le plus peuplé. D'autres centres de population importants sont Andorre-la-Vieille (22 000), Lourdes (14 000), Jaca (13 000) ou Foix (10 000). Toutefois, autour de la chaîne se concentre une population de plus de 14 millions d'habitants, avec de grandes villes telles que Barcelone (1,6 millions), Toulouse (1,3 millions), Saragosse (700 000), Saint-Sébastien (430 000), Lérida (135 000), Perpignan (120 000) ou Pau (77 000).

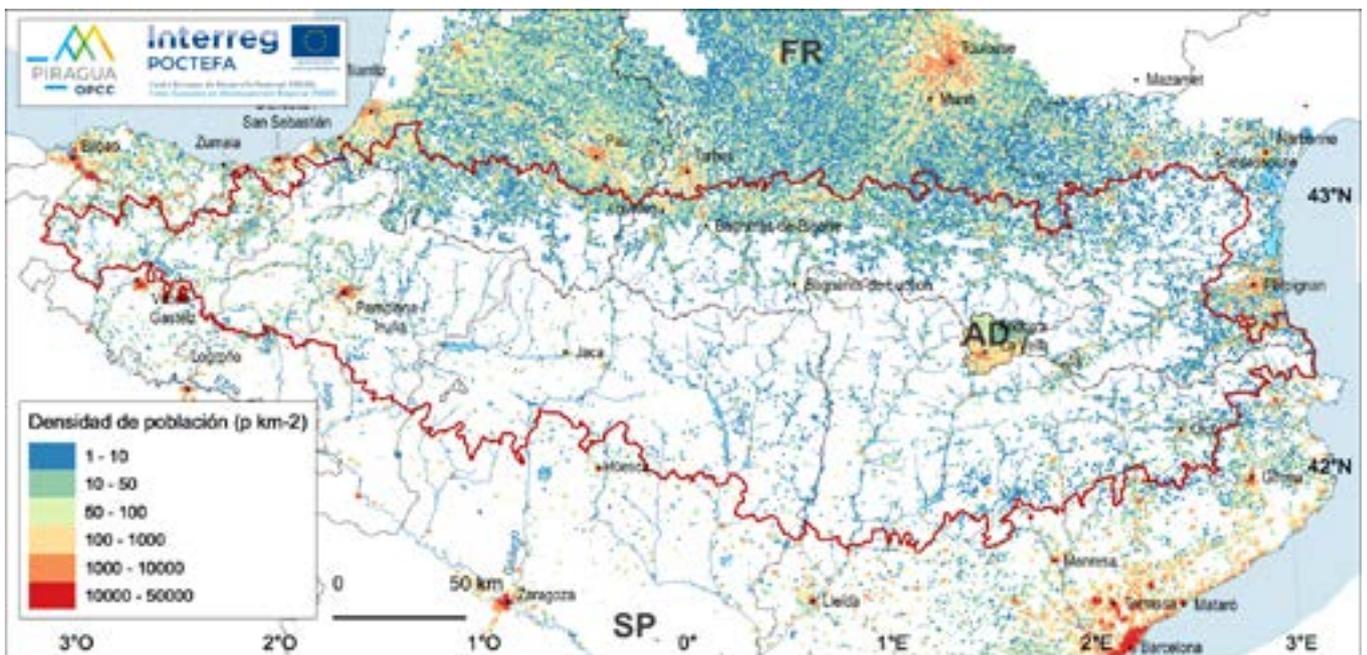


Figure 1.10. Densité de population et principales zones urbaines.

(Source : Eurostat, 2018 ; Govern d'Andorra, 2020. PIRAGUA\_resources.)

## 1.2. Importance régionale des ressources hydriques des Pyrénées

Les Pyrénées ont une importance exceptionnelle quant à la génération de ressources hydriques, étant l'une de ses principales ressources naturelles. Les ressources en eau des Pyrénées sont très importantes et jouent un rôle fondamental non seulement au sein du domaine géographique lui-même de la chaîne, mais aussi dans une vaste zone d'influence comprenant les bassins de l'Èbre et de l'Adour-Garonne, les bassins basques, les bassins internes catalans et les bassins méditerranéens français. Par exemple, dans le bassin de l'Èbre, on estime que les rivières des Pyrénées représentent près de 70 % des ressources hydriques totales de ce bassin.

De nombreux massifs montagneux de la planète jouent un rôle essentiel dans les ressources hydriques à l'échelle régionale. Les raisons de cette importance se trouvent dans les raisons climatiques, géographiques et économiques. D'une part, les systèmes montagneux, du fait de leur relief marqué, agissent comme des barrières contre les flux atmosphériques, donnant lieu à des climats très contrastés par rapport aux plaines qui les entourent. Dans le cas des Pyrénées, la répartition régionale du bilan hydrique climatique annuel moyen reflète très bien cette circonstance (Figure 1.11). Le bilan hydrique climatique s'obtient de la différence entre les précipitations annuelles et la demande atmosphérique d'humidité et permet de connaître le degré d'humidité ou d'aridité du climat. Dans le cas des Pyrénées, le bilan hydrique climatique est extrêmement positif, indiquant l'absence d'aridité et un net excédent hydrique, avec des valeurs qui dépassent les 1 000 et 1 500 mm annuels dans un vaste secteur, notamment près de la ligne de division et sur le versant nord. Par contre, les plaines des alentours présentent des valeurs très inférieures, voire même nettement négatives. C'est le cas du piémont sud en Espagne et des plaines côtières méditerranéennes d'Espagne et de France. Des valeurs négatives sont également atteintes, bien que modérées, dans la plaine de la Garonne à partir de Toulouse. Les valeurs du bilan climatique dans ces régions indiquent une pénurie de ressources en eau. C'est pourquoi les rivières qui descendent des Pyrénées constituent la principale source de cette ressource.

D'autre part, nous avons vu précédemment

que la population se concentre dans les régions entourant la chaîne. Cette concentration s'applique également à la demande de ressources hydriques pour l'approvisionnement, l'agriculture et l'industrie, comme nous le verrons plus en avant.

Du point de vue de la gestion des ressources en eau, la région est divisée entre plusieurs organismes. Ceux-ci sont délimités sur la carte de la Figure 1.1. Il s'agit, d'ouest en est : de la Confédération hydrographique du Cantabrique (CHC), l'Agence basque de l'eau (Ur Agentzia, URA), la Confédération hydrographique de l'Èbre (CHE), l'Agence catalane de l'eau (Agencia Catalana de l'Aigua, ACA), le ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de la Durabilité d'Andorre (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 pour la Transition écologique et le Défi démographique du gouvernement d'Espagne (CHC, CHE), le gouvernement basque (URA), le gouvernement catalan (ACA), le gouvernement d'Andorre (MMAAS) et le ministère français pour la Transition écologique (AEAG, AERMC).

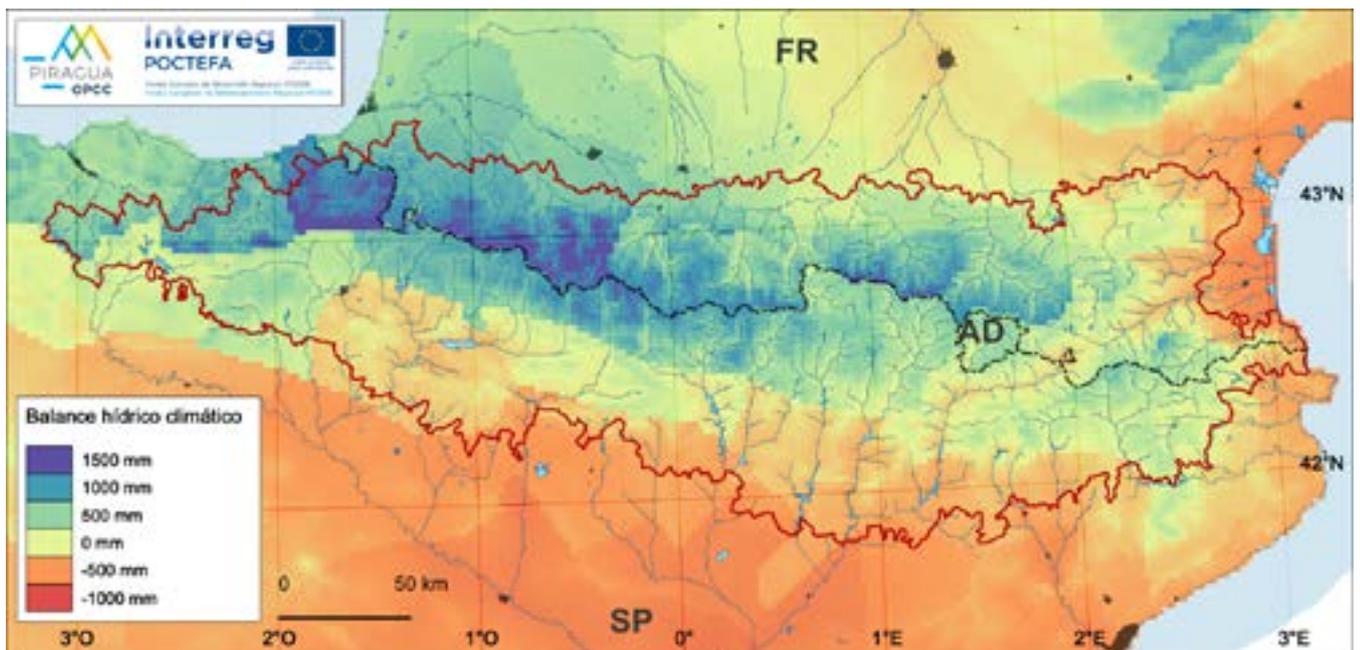


Figure 1.11. Bilan hydrique et climatique (précipitations annuelles moins évapotranspiration potentielle annuelle), moyenne pour la période 1981-2010.

(Source: PIRAGUA\_atmos\_analysis.)

### 1.3. Déroulement historique de l'exploitation des ressources hydriques des Pyrénées

L'exploitation des ressources hydriques des Pyrénées remonte probablement à l'Antiquité, mais c'est à la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle lorsque les infrastructures hydrauliques de grande capacité ont commencé à être planifiées. La construction de barrages a ainsi débuté dans le but d'augmenter la capacité et de réguler certains lacs de haute montagne et cours d'eau courante, ainsi que le développement en parallèle de canaux artificiels pour la dérivation des eaux. L'un des premiers exemples est le canal de la Neste dans le département français des Hautes-Pyrénées, construit entre 1848 et 1862. L'objectif du canal est d'alimenter artificiellement les cours d'eau de la région de Lannemezan, pauvre en ressources de surface du fait de sa configuration géologique, avec des débits provenant de la rivière Neste. Au cours des décennies suivantes, afin de pouvoir réguler le débit de cette rivière, divers barrages ont été construits dans des lacs en amont de la Neste (Orédon, Cap-de-Long, Caillauas, Aubert, Aumar). Dans tous les cas, dès le départ, les objectifs de régulation des débits ont été combinés avec l'exploitation hydroélectrique, selon un modèle qui a ensuite été répété sur toute l'étendue de la chaîne de montagnes, jusqu'à nos jours.

Les barrages de retenue sont les infrastructures fondamentales pour la gestion des ressources hydriques de surface dans les Pyrénées. La capacité actuelle de rétention excède les 6 200 hm<sup>3</sup>, répartis entre près de 400 barrages de retenue de différentes tailles (Figure 1.12). Il existe des différences importantes en ce qui concerne la capacité de rétention et le nombre de bassins de retenue entre les divers secteurs des Pyrénées, ainsi qu'entre les pays (Figure 1.13). Sur le versant sud ou espagnol, la capacité de rétention est beaucoup plus grande que sur le versant nord (5 570 hm<sup>3</sup>), ce qui peut s'expliquer par un stress hydrique plus élevé au sud des Pyrénées.

L'évolution temporelle de la construction de barrages de retenue a suivi une trajectoire parallèle dans les deux pays (Figure 1.14). Bien que les premiers chantiers remontent à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, la construction d'infrastructures hydrauliques s'est accélérée à partir de 1900, et notamment à partir de 1920. Les barrages des premières décennies du XX<sup>e</sup> siècle se situent de préférence dans des lacs de haute montagne ou

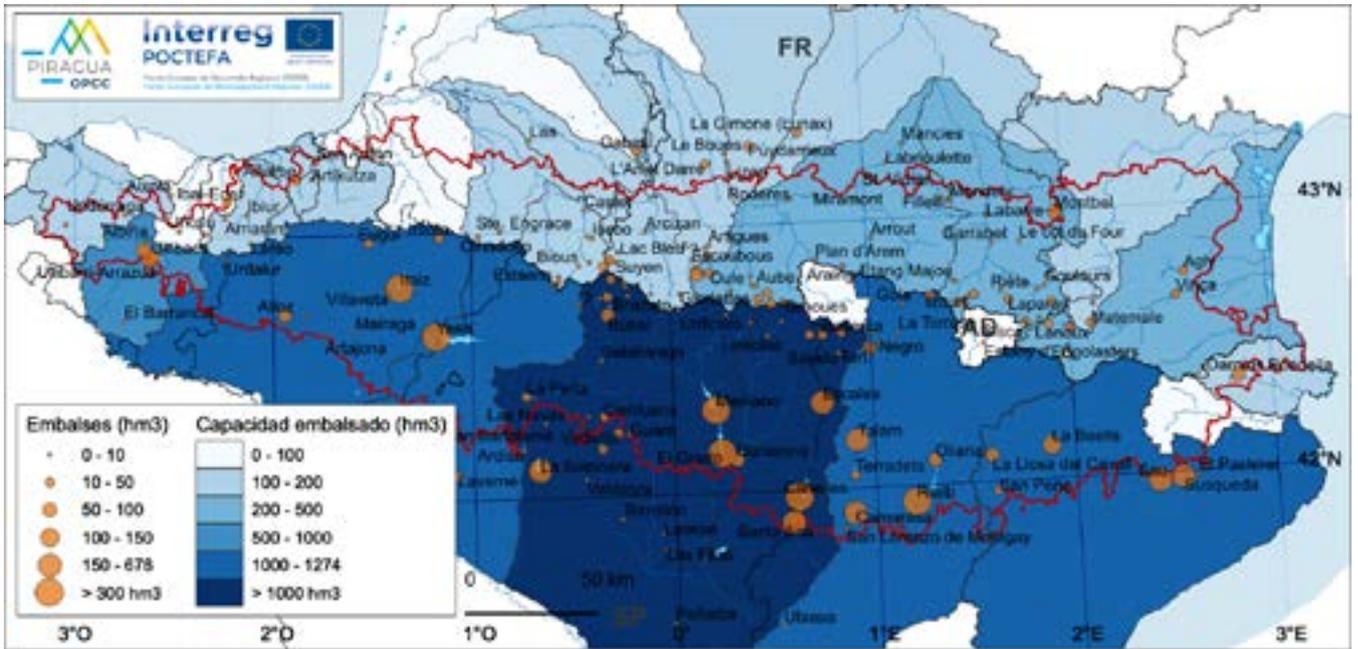


Figure 1.12. Localisation des principaux barrages de retenue classés en fonction de leur capacité (hm<sup>3</sup>) et capacité totale de rétention par les conseils d'exploitation.  
(Source : CHC, CHE, URA, ACA, MMAAS, AEAG, AERMC. PIRAGUA\_resources.)

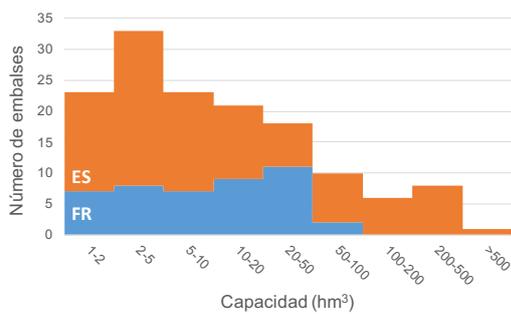


Figure 1.13. Histogramme de capacité de rétention en France (bleu) et en Espagne (orange).  
(Source : CHC, CHE, URA, ACA, AEAG, AERMC. PIRAGUA\_resources.)

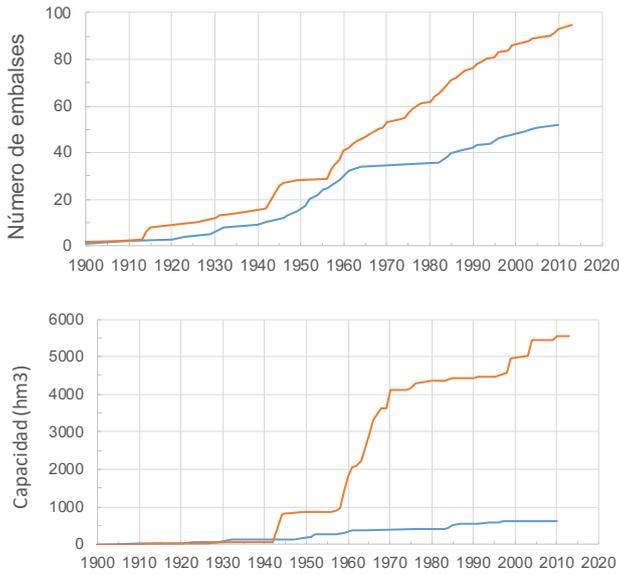


Figure 1.14. Évolution temporelle du nombre de barrages de retenue (a) et de la capacité totale de rétention (b) en France (bleu) et en Espagne (orange).

(Source : CHC, CHE, URA, ACA, AEAG, AERMC. PIRAGUA\_resources.)

des cours d'eau en amont dans certains cas.

Toutefois, les grands barrages situés sur les principaux cours se développeront plus tard, notamment sur le versant sud de la chaîne. Après un premier élan dans les années 1940 (Talarn de 205 hm<sup>3</sup>, La Sotonera de 189 hm<sup>3</sup>, Camarasa de 163 hm<sup>3</sup>, Barasona de 85 hm<sup>3</sup>, Alloz de 67 hm<sup>3</sup>), la plupart des grands barrages sont construits dans les années 50 et 60 (Oliana, Yesa, Escales, Ullibarri, Urrúnaga, Santa Ana, Sau, Canelles, El Grado, Susqueda, Darnius Boadella) et dans les années 70 (Mediano, Búbal, La Baells). Par la suite, peu de grands barrages seront construits (Montbell en 1985, Rialb en 1999 et Itoiz en 2004). Du côté français, il y a peu de barrages d'une capacité supérieure à 50 hm<sup>3</sup> (Cap-de-Long en 1952, Montbel en 1985). En Andorre, il existe huit barrages d'un certain organisme, celui de l'Estany d'Engolasters étant le plus important, d'une capacité de 0,6 hm<sup>3</sup>.

## 1.4. Emplois de l'eau des Pyrénées

L'emploi total de l'eau provenant des Pyrénées s'élève à près de 7 500 hm<sup>3</sup> annuels. Comme nous l'avons indiqué auparavant, la plupart des emplois de l'eau n'ont pas lieu sur le territoire pyrénéen même, mais dans sa zone d'influence, où se trouve la majorité de la population. Par pays, la partie espagnole représente l'utilisation principale, avec 6 500 hm<sup>3</sup> annuels, tandis que la France emploie 960 hm<sup>3</sup> et l'Andorre 17 hm<sup>3</sup> (Figure 1.15).

Les Tableaux 1 et 2 détaillent l'utilisation de l'eau dans les différents systèmes d'exploitation dans lesquels chaque démarcation hydrologique est subdivisée. Dans chaque cas, la provision annuelle consignée dans le plan de bassin est indiquée, exprimée en volume annuel total et en pourcentage de l'utilisation totale. Il existe de grandes différences entre les territoires, tant dans le volume total que dans la répartition par types d'utilisation.

Quant à la répartition par types d'utilisation, l'usage agricole est prédominant (79%), notamment sur le versant sud ou espagnol (92%) contrairement au versant nord ou français (44%) ou Andorre (16%). Dans certains conseils d'exploitation, surtout dans le bassin de l'Èbre, l'usage agricole représente plus de 90% de l'emploi de l'eau. À l'opposé, l'usage industrielle est minoritaire (4 %), bien que dans certaines conseils d'exploitation elle atteigne des valeurs de l'ordre de 40 %. L'approvisionnement urbain représente en moyenne 4 % de l'usage, avec des différences selon les conseils d'exploitation. Ainsi, du côté français ce pourcentage monte à 9% et en Andorre il représente 1%, tandis que du côté espagnol l'approvisionnement représente 3% de la consommation d'eau totale.

En général, la provenance de la ressource utilisée est de l'eau de surface (89 %), bien qu'il existe des différences entre pays. Ainsi, alors qu'en Espagne et en Andorre l'utilisation de l'eau de surface dépasse les 90 % (sauf exceptions telles que le bassin-versant de la Bidassoa), il existe en France un plus grand équilibre entre sources superficielles et sources souterraines, étant l'origine superficielle un peu plus fréquente (70 %). Cet écart entre les origines de la ressource est non seulement associé à des raisons hydrogéologiques (plus grande facilité d'extraction dans le cas des aquifères

français), mais aussi à un modèle d'exploitation différent. Ainsi, en Espagne, l'exploitation des ressources hydriques est basée sur la régulation dans de grands barrages et la distribution dans des canaux, tandis qu'en France, il existe une utilisation beaucoup plus diffuse qui associe des extractions d'eaux de surface et souterraines.

### 1.4.1. Utilisations environnementales et ressources touristiques

Les Pyrénées présentent une grande variété paysagère et naturelle qui est presque toujours liée à l'hydrologie et aux milieux aquatiques. La multitude de lacs de haute montagne, les torrents, les cascades, les défilés, les zones humides de montagne, sont des éléments caractéristiques du paysage pyrénéen, comme l'est aussi, de façon saisonnière, la neige. Le système hydrologique possède donc une importante valeur naturelle et paysagère qui justifie en partie le grand intérêt touristique de la région.

Plusieurs zones des Pyrénées dispose d'une figure de protection environnementale (Figure 1.16). Il convient de souligner les parcs nationaux des

Pyrénées en France (45 707 ha, déclaré en 1967), et Ordesa-mont Perdu (15 608 ha en 1918), Aigüestortes et le lac de San Mauricio (1 419 ha, 1955) en Espagne. En outre, les Pyrénées accueillent 16 parcs naturels et de nombreuses figures de protection.

La neige et le ski renforcent l'intérêt touristique des Pyrénées. Il existe 50 stations de ski alpin (dotées de remontées mécaniques), réparties entre la France (32 stations, avec plus de 1 000 km de domaine skiable), l'Espagne (15 stations et 842 km) et l'Andorre (3 stations et 303 km). La localisation et la taille des stations sont détaillées dans la Figure 1.17. La plupart se situent dans le secteur central des Pyrénées, coïncidant avec les massifs les plus élevés. La majorité de ces stations comptent sur une production de neige artificielle (37 % du domaine skiable), se constituant comme un acteur important quant aux ressources hydriques dans les zones en amont.

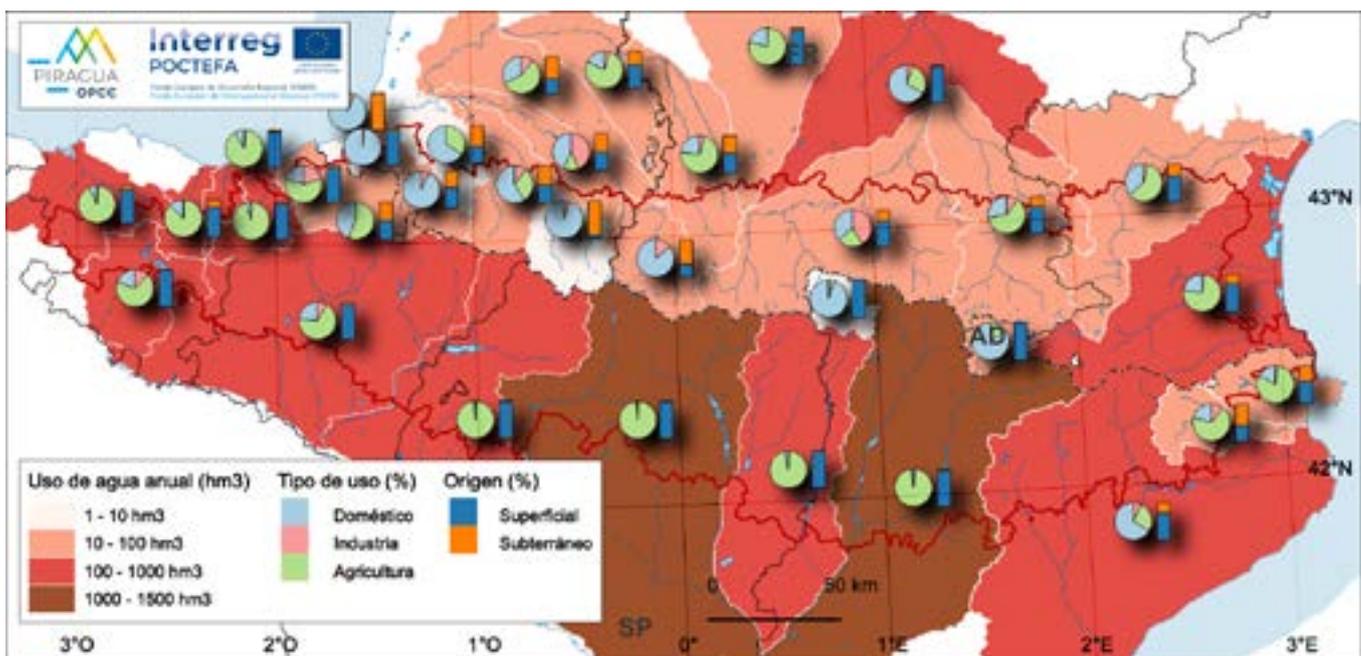


Figure 1.15. Emploi moyen de l'eau par conseil d'exploitation (hm3 annuels), emploi par secteur (%) et par origine de la ressource (%).

(Source : CHC, CHE, URA, ACA, AEAG, AERMC. PIRAGUA\_resources.)

**Tableau 1. Utilisation de l'eau par systèmes d'exploitation, totale et par types d'utilisation : volume annuel moyen (hm<sup>3</sup> an<sup>-1</sup>) et pourcentage de l'utilisation totale. Source : Dotations des Plans Hydrographiques de Bassin (ACA : Agència Catalana de l'Aigua ; AEAG : Agence de l'Eau Adour-Garonne ; AERMC : Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Alpes ; CHC : Confédération Hydrographique Cantabrique ; CHE : Confédération hydrographique de l'Èbre).**

Bassin	Système d'exploitation	U. totale	Approvisio- nnement		Irrigation		Industrie	
ACA	Ter-Llobregat	727	481	66 %	197	27 %	49	7 %
ACA	Fluvià	32	7	21 %	22	68 %	3	11 %
ACA	Muga	84	14	17 %	68	81 %	1	2 %
AEAG	La Garonne de sa source au confluent de l'Ariège	91	33	36 %	21	23 %	38	41 %
AEAG	L'Ariège	66	18	27 %	41	63 %	7	10 %
AEAG	La Garonne du confluent de l'Ariège au confluent du Tarn	121	80	66 %	35	29 %	5	5 %
AEAG	La Garonne du confluent du Tarn au confluent du Lot	65	14	21 %	51	78 %	0	0 %
AEAG	L'Adour de sa source au confluent du Larcis	74	17	23 %	53	72 %	3	4 %
AEAG	L'Adour du confluent du Larcis au confluent de la Midouze	48	9	18 %	37	78 %	2	4 %
AEAG	L'Adour du confl. de la Midouze au confluent des Gaves Réunis	42	13	32 %	24	57 %	4	11 %
AEAG	Le Gave de Pau de sa source au confluent du Béz	13	11	86 %	0	0 %	2	14 %
AEAG	Le Gave de Pau du confluent du Béz au confluent de l'Adour	62	27	44 %	8	13 %	27	43 %
AEAG	Le Gave d'Ossau	6	6	96 %	0	0 %	0	4 %
AEAG	Le Gave d'Oloron	12	7	59 %	4	31 %	1	10 %
AEAG	L'Adour du confluent des Gaves Réunis au confluent de la Nive	4	3	66 %	1	34 %	0	0 %
AEAG	L'Adour du confluent de la Nive à l'océan	19	17	93 %	0	0 %	1	7 %
AEAG	Les côtiers de l'embouchure de l'Adour au confluent de l'Untxin	5	5	98 %	0	0 %	0	2 %
AEAG	La Bidasoa du confluent du Rio Latsa à l'océan	1	1	94 %	0	0 %	0	6 %
AERMC	Côtiers de la frontière espagnole - l'Aude et el Segre (bassin français)	246	55	22 %	186	75 %	5	2 %
AERMC	L'Aude de sa source à la Méditerranée	85	31	36 %	51	61 %	3	3 %
CHC	Andorra	13	11	84 %	2	16 %	0	0 %
CHC	Bidasoa	18	12	67 %	1	6 %	5	28 %
CHC	Urumea	29	16	55 %	1	2 %	13	43 %
CHC	Oria	27	12	44 %	1	4 %	14	52 %
CHC	Urola	11	5	46 %	1	5 %	6	50 %
CHC	Deba	20	11	53 %	1	3 %	9	45 %
CHE	Nervión	129	83	64 %	2	1 %	45	35 %
CHE	Segre-Noguera Pallaresa	1.000	27	3 %	964	96 %	9	1 %
CHE	Noguera Ribagorzana-Ésera	1.075	31	3 %	1.038	97 %	6	1 %
CHE	Gállego-Cinca	1.614	20	1 %	1.585	98 %	9	1 %
CHE	Aragón	771	9	1 %	758	98 %	4	0 %
CHE	Ega-Arga-Irati	93	8	8 %	80	86 %	6	6 %
CHE	Zadorra	125	28	22 %	81	65 %	16	13 %
CHE	Garona	3	1	42 %	2	57 %	0	0 %
<b>TOTAL</b>		<b>6.731</b>	<b>1.123</b>	<b>17 %</b>	<b>5.315</b>	<b>79 %</b>	<b>293</b>	<b>4 %</b>

**Tableau 2. Origine de la ressource (surface ou souterraine), par systèmes d'exploitation : volume annuel moyen (hm<sup>3</sup> an<sup>-1</sup>) et pourcentage d'utilisation totale. Source : Dotations des Plans Hydrographiques de Bassin (ACA : Agència Catalana de l'Aigua ; AEAG : Agence de l'Eau Adour-Garonne ; AERMC : Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Alpes ; CHC : Confédération Hydrographique Cantabrique ; CHE : Confédération hydrographique de l'Èbre).**

<b>Cuenca</b>	<b>Sistema de explotación</b>	<b>Uso total</b>	<b>Superficial</b>		<b>Subterráneo</b>	
ACA	Ter-Llobregat	727	525	72 %	202	28 %
ACA	Fluvià	32	13	41 %	19	59 %
ACA	Muga	84	50	59 %	35	41 %
AEAG	La Garonne de sa source au confluent de l'Ariège	91	62	68 %	29	32 %
AEAG	L'Ariège	66	47	72 %	18	28 %
AEAG	La Garonne du confluent de l'Ariège au confluent du Tarn	121	118	98 %	2	2 %
AEAG	La Garonne du confluent du Tarn au confluent du Lot	65	61	94 %	4	6 %
AEAG	L'Adour de sa source au confluent du Larcis	74	39	53 %	35	47 %
AEAG	L'Adour du confluent du Larcis au confluent de la Midouze	48	30	63 %	18	37 %
AEAG	L'Adour du confl. de la Midouze au confluent des Gaves Réunis	42	17	40 %	25	60 %
AEAG	Le Gave de Pau de sa source au confluent du Béz	13	4	34 %	9	66 %
AEAG	Le Gave de Pau du confluent du Béz au confluent de l'Adour	62	30	49 %	31	51 %
AEAG	Le Gave d'Ossau	6	1	9 %	5	91 %
AEAG	Le Gave d'Oloron	12	6	49 %	6	51 %
AEAG	L'Adour du confluent des Gaves Réunis au confluent de la Nive	4	2	44 %	2	57 %
AEAG	L'Adour du confluent de la Nive à l'océan	19	10	56 %	8	44 %
AEAG	Les côtières de l'embouchure de l'Adour au confluent de l'Untxin	5	5	94 %	0	6 %
AEAG	La Bidasoa du confluent du Rio Latsa à l'océan	1	0	0 %	1	100 %
AERMC	Côtières de la frontière espagnole - l'Aude et el Segre (bassin français)	246	186	75 %	61	25 %
AERMC	L'Aude de sa source à la Méditerranée	85	58	68 %	27	32 %
CHC	Andorra	13	13	100 %	0	0 %
CHC	Bidasoa	18	14	80 %	4	20 %
CHC	Urumea	29	26	90 %	3	10 %
CHC	Oria	27	24	90 %	3	10 %
CHC	Urola	11	11	97 %	0	3 %
CHC	Deba	20	15	77 %	5	23 %
CHE	Nervión	129	117	91 %	12	9 %
CHE	Segre-Noguera Pallaresa	1.000	943	94 %	57	6 %
CHE	Noguera Ribagorzana-Ésera	1.075	1065	99 %	9	1 %
CHE	Gállego-Cinca	1.614	1573	97 %	42	3 %
CHE	Aragón	771	765	99 %	5	1 %
CHE	Ega-Arga-Irati	93	82	82 %	18	18 %
CHE	Zadorra	125	96	96 %	4	4 %
CHE	Garona	3	1	99 %	0	1 %
<b>TOTAL</b>		<b>6.731</b>	<b>6.011</b>	<b>89 %</b>	<b>700</b>	<b>11 %</b>

### 1.4.2. Exploitation hydroélectrique

L'abondance des ressources hydriques et le fort relief des Pyrénées a permis un vaste développement d'installations pour la production hydroélectrique (Figure 1.18). L'exploitation hydroélectrique a débuté très tôt, à la fin du XIXe siècle. Certaines centrales de cette époque sont encore en service aujourd'hui, avec les rénovations et extensions appropriées : Anglès (1887), Calypso (1898), Castelet (1899), Irugurutzeta et Arranbide (1900). Les centrales se distribuent tout le long des Pyrénées, avec une plus grande concentration dans sa zone centrale, au nombre et à la taille similaires des deux côtés de la ligne de séparation (Figure 1.19).

La croissance du nombre de stations et de la puissance totale installée a été progressive au cours du XXe siècle, bien qu'elle semble stagner ou s'être ralentie ces dernières décennies (Figure 1.20). Actuellement, les Pyrénées ont une capacité installée d'environ 6 170 MW, dont 2 513 sont situés en France, 3 608 en Espagne et 47,4 en Andorre. Il est quasiment impossible d'obtenir des données fiables sur la production annuelle d'électricité sur l'ensemble du réseau, mais on peut affirmer qu'actuellement 11 500 GWh sont atteints (France, 5 671 ; Espagne, 5 661 ; Andorre 86,4.).

### 1.4.3. Approvisionnement urbain et usage industriel

L'utilisation pour l'approvisionnement urbain représente environ 1 100 hm<sup>3</sup> par an, l'essentiel de l'utilisation se situant à la périphérie des Pyrénées (Figure 1.21). En France, l'approvisionnement représente 859 hm<sup>3</sup> par an, et représente 47% de l'approvisionnement en eau, tandis qu'en Espagne la provision pour l'approvisionnement est de 262 hm<sup>3</sup>, soit seulement 5% de l'utilisation totale. En Andorre, enfin, c'est 11 hm<sup>3</sup>, étant ainsi l'usage principal (84%).

L'utilisation industrielle s'élève à 293 hm<sup>3</sup> par an, avec un bon équilibre entre les sources française (153 hm<sup>3</sup> par an, 9%) et espagnole (140 hm<sup>3</sup> par an, 3%).

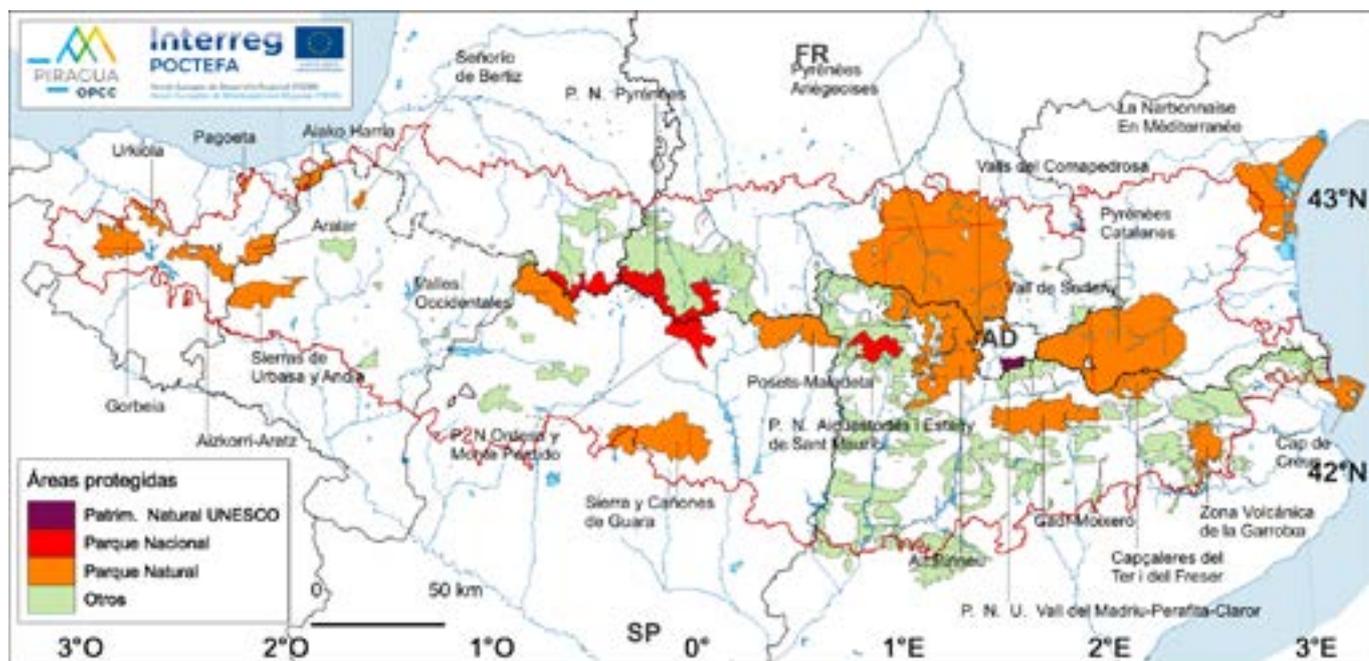


Figure 1.16. Zones de protection environnementale.

(Source : EIONET, 2021 ; Gouvernement d'Andorre, 2020. PIRAGUA\_resources.)

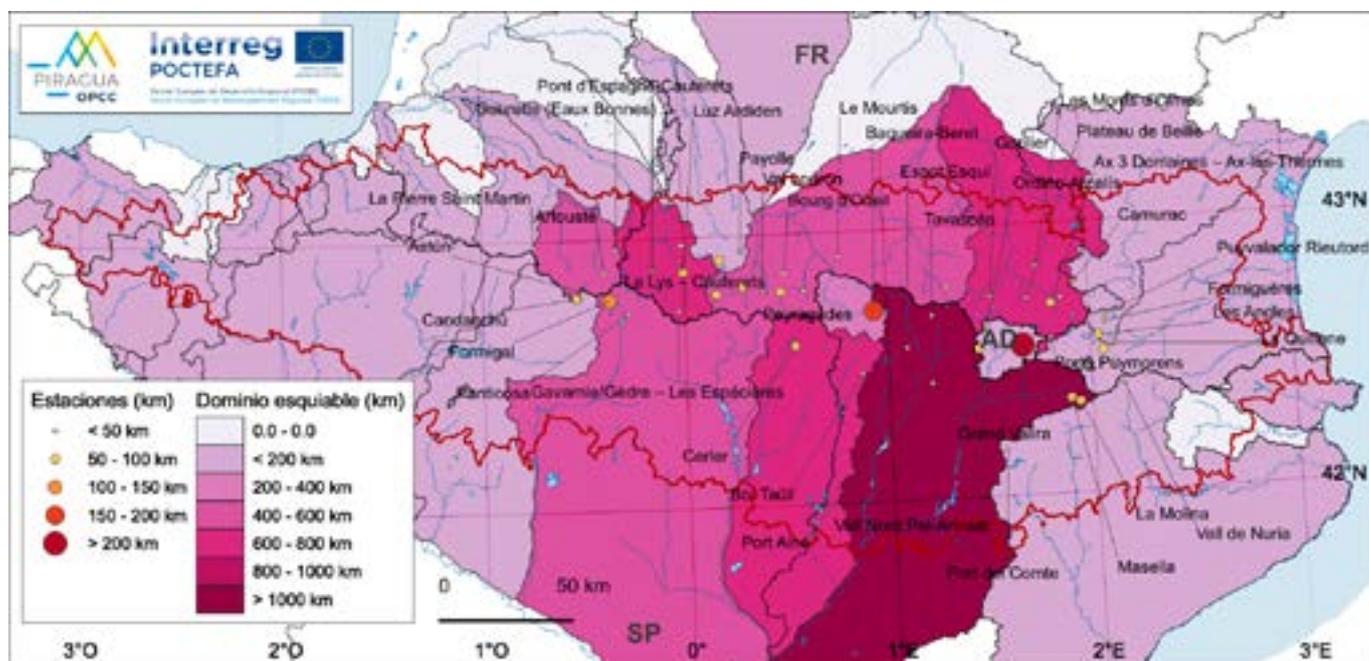


Figure 1.17. Localisation des stations de ski et du domaine skiable total par conseils d'exploitation (km).

(Source : CHC, CHE, ministère de l'Industrie espagnol et élaboration propre. PIRAGUA\_resources.)

### 1.4.4. L'agriculture irriguée

Avec une utilisation moyenne de 5 315 hm<sup>3</sup> par an, l'agriculture irriguée représente 79 % de l'utilisation des ressources en eau des Pyrénées. L'agriculture, cependant, n'a pas un poids très important au sein des Pyrénées, bien qu'elle soit l'une des utilisations des terres prédominantes dans les zones de piémont, qui sont alimentées par les ressources en eau des Pyrénées (Figure 1.22).

Il existe des différences importantes entre les systèmes d'exploitation et entre les versants nord et sud de la chaîne de montagnes (Tableau 1). Ainsi, l'agriculture irriguée 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 côté français. Par pays, le versant français utilise environ 800 hm<sup>3</sup> par an en agriculture, ce qui représente 55% de l'utilisation des ressources en eau générées dans ledit versant. Côté espagnol,

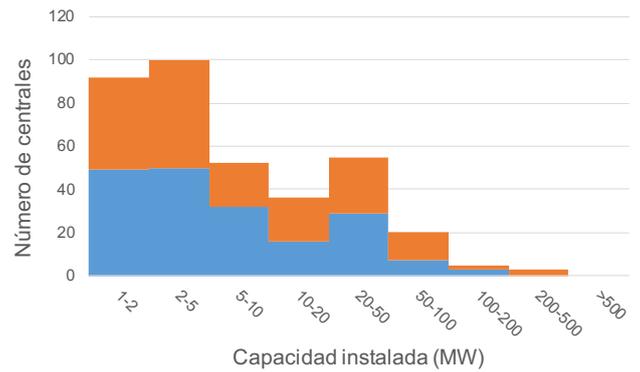


Figure 1.19. Histogramme des stations hydroélectriques de plus de 1 MW en fonction de la capacité installée (MW) en France (bleu) et en Espagne (orange).

(Source : CHC, CHE, ministère de l'Industrie espagnol, gouvernement d'Andorre et élaboration propre. PIRAGUA\_resources.)

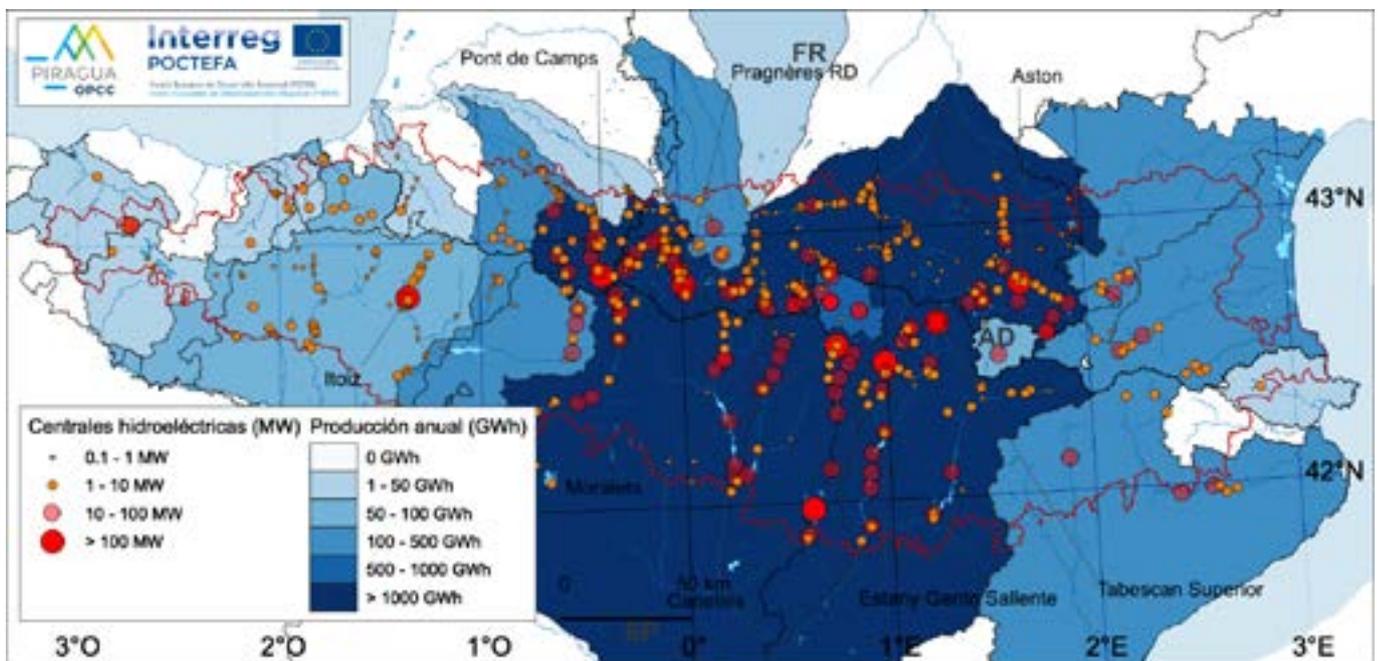


Figure 1.18. Localisation des stations hydroélectriques en fonction de la capacité installée (MW) (a) et production moyenne annuelle par conseils d'exploitation (GWh) (b).

(Source : CHC, CHE, ministère de l'Industrie espagnol, gouvernement d'Andorre et élaboration propre. PIRAGUA\_resources.)

l'agriculture utilise 6 238 hm<sup>3</sup> par an, ce qui représente 86 % de la consommation totale d'eau. Et en Andorre, 2 hm<sup>3</sup> par an sont utilisés en agriculture, soit 16% des usages totaux.

Sur le versant sud ou espagnol se trouvent de grands domaines irrigués, dont Riegos del Alto Aragón (149 311 ha), Canal de Aragón y Cataluña (122 561 ha), Canal de Urgel (92 637 ha) ou Canal de Bardenas (89 647 ha). a). L'ensemble des périmètres irrigués totalise 700 835 ha. Il existe une différence très marquée entre les zones irriguées, dans lesquelles l'irrigation est utilisée de manière systématique ou permanente, et les zones non irriguées, dans lesquelles il n'y a

souterraines ou directement du lit des rivières. et canaux, ou par des bassins de proximité et de petits réservoirs.

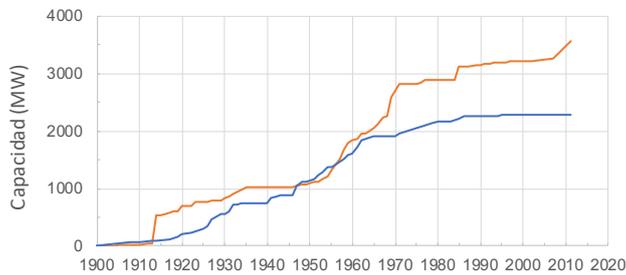
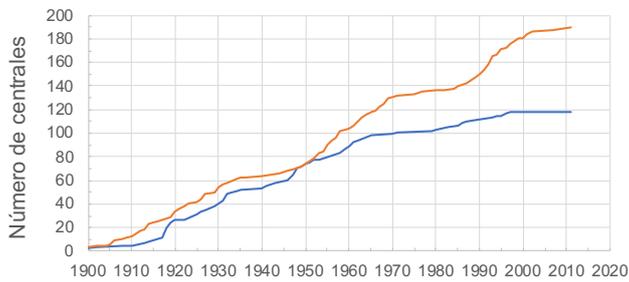


Figure 1.20. Évolution temporelle du nombre de stations hydroélectriques (a) et de la capacité totale installée (b) en France (bleu) et en Espagne (orange).

(Source : CHC, CHE, ministère de l'Industrie espagnol, gouvernement d'Andorre et élaboration propre. PIRAGUA\_resources.)

pas d'autre type d'irrigation que la précipitation elle-même.

Sur le versant nord, cependant, la différence est plus diffuse. Ainsi, bien que dans les statistiques européennes (Corine Land Cover) elles soient considérées pour la plupart comme des zones non irriguées, en réalité l'irrigation est appliquée en saison estivale sur de nombreuses parcelles, normalement à partir de l'extraction des eaux

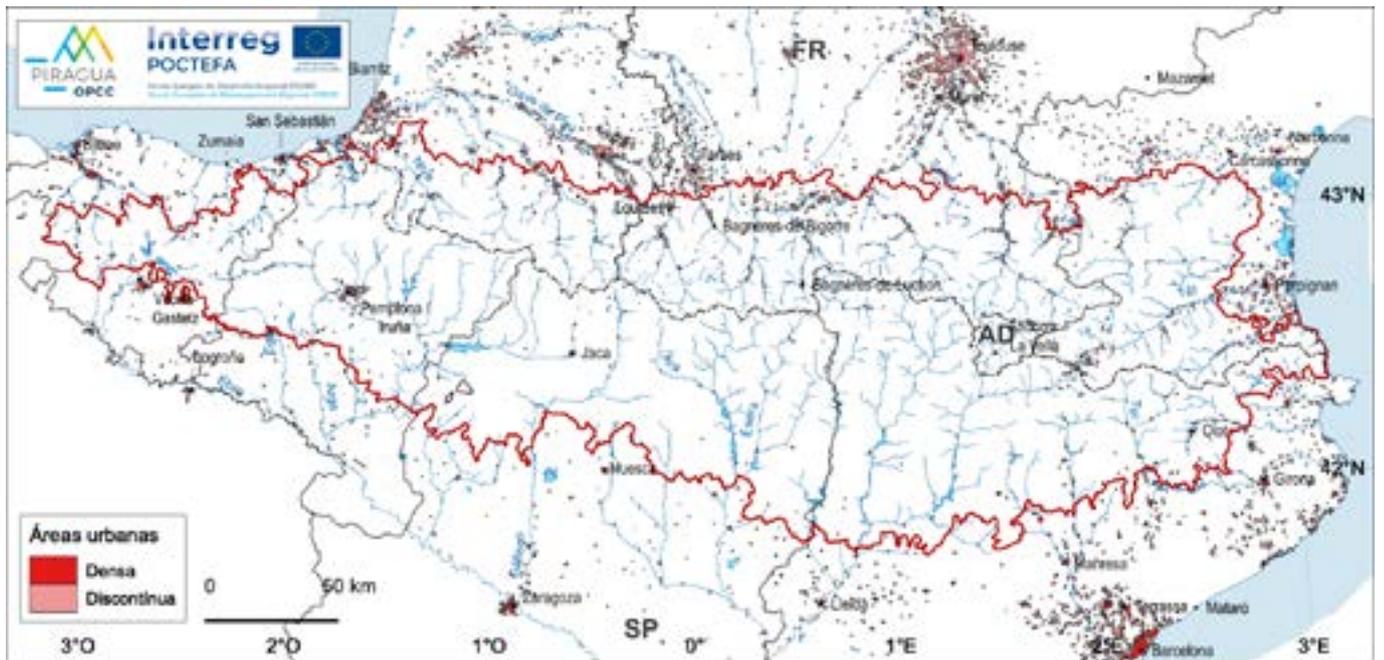


Figure 1.21. Principaux centres urbains et régions.  
(Source : élaboration propre. PIRAGUA\_resources.)

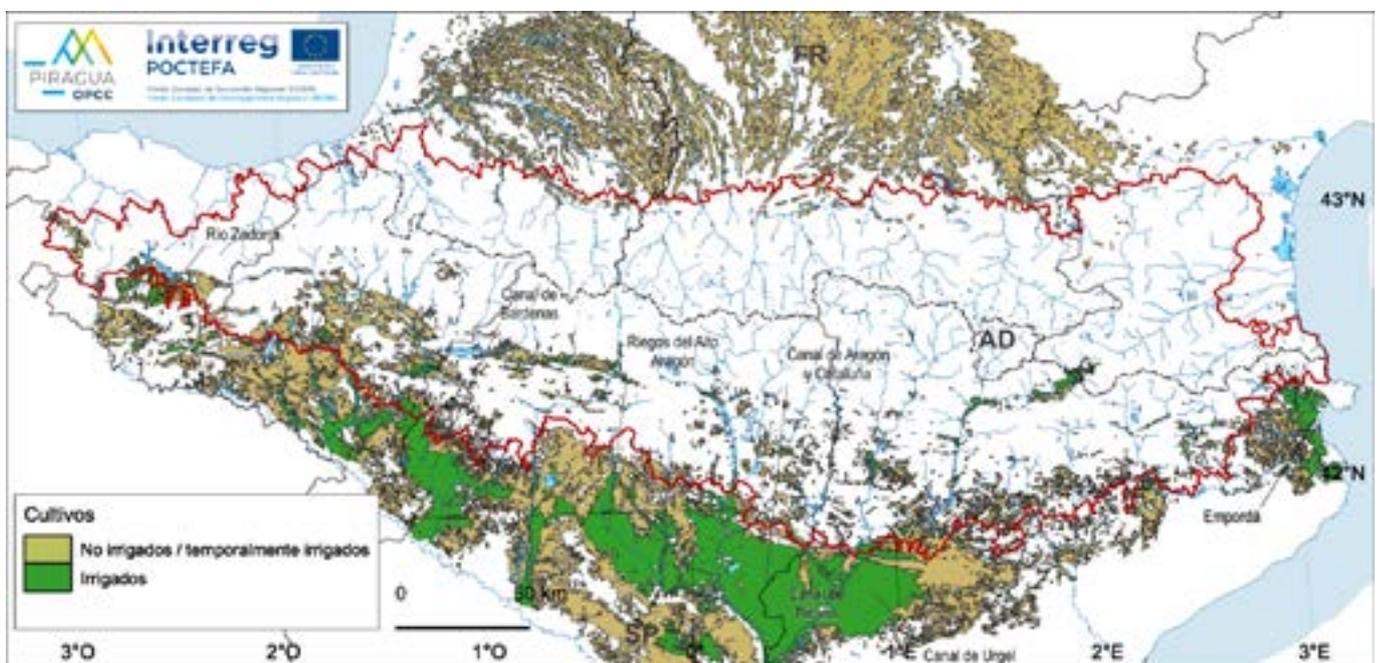


Figure 1.22. Usage de l'eau en agriculture : zones non irriguées ou temporairement irriguées et zones irriguées en permanence.  
(Source : CHE, 2020 ; Corine Land Cover, 2018. PIRAGUA\_resources.)



## **2. Changements récents des débits, niveaux des eaux souterraines et inondations dans les Pyrénées**

---

**Ane Zabaleta (UPV-EHU), María del Carmen Llasat (UB),  
Montserrat Llasat-Botija (UB) y Erika Pardo (UB), Iñaki  
Antigüedad (UPV-EHU), Luis Javier Lambán (IGME), Jorge Jódar  
(IGME), Yvan Caballero (BRGM), Santiago Beguería (CSIC)**

---

L'analyse des séries d'observations de débits circulants montre une baisse généralisée de tous les indicateurs de débit quotidien (débits faibles, moyens et hauts, débits d'étiage et de crue), notamment si l'on prend en compte les périodes les plus longues (70, 60 et 50 ans). Les tendances se sont atténuées ces dernières décennies, bien que les tendances négatives continuent à prédominer, notamment pour les débits faibles. Il existe très peu d'informations sur l'évolution des niveaux piézométriques (eaux souterraines). Malgré l'existence d'un réseau assez étendu de piézomètres, les séries de données sont très fragmentaires et, en général, excessivement courtes pour réaliser une étude de tendances. Finalement, la première base de données de crues et d'inondations a été élaborée, à l'échelle municipale, sur tout le territoire pyrénéen. Aucune tendance significative à la hausse ou à la baisse du nombre de crues n'a été détectée sur la période 1981-2015, bien que des différences entre régions puissent s'observer, avec une incidence plus grande dans le secteur oriental et central des Pyrénées. Dans l'analyse des coûts (économiques et en vies humaines), deux évidences sont à noter : l'énorme poids de quelques événements (régionaux ou locaux) sur le coût total, et l'importance, dans l'analyse des risques, de la valeur en risque ou vulnérabilité, au-dessus même de la dangerosité (fréquence de l'évènement dangereux).

---

*Citer comme suit : 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. Rapports 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/14683>

---

## 2.1. Introduction

Les registres de débit obtenus dans les stations de jaugeage constituent l'outil fondamental pour caractériser le régime hydrologique des cours d'eau des Pyrénées. Lorsque ces registres couvrent une période suffisante, ils peuvent aussi être utilisés pour évaluer d'éventuels changements au fil du temps, qui se traduisent en tendances (évolution positive ou négative à long terme) dans la disponibilité de ressources en eau. Dans un contexte de changement global, il est particulièrement pertinent d'évaluer les éventuelles tendances sur les débits de surface, tant dans leurs valeurs moyennes (apports totaux ou débits moyens) que dans leurs valeurs extrêmes (débits faibles et élevés, et inondations). Il est également important d'étudier les niveaux piézométriques (hauteur du niveau phréatique dans les principaux aquifères). Dans ce chapitre, nous abordons l'analyse des registres de débit de surface et de niveaux piézométriques dans les Pyrénées, ainsi que l'analyse des informations disponibles sur les crues qui ont engendré des inondations.

Il convient d'inscrire les résultats de ce chapitre dans un cadre plus général. À l'échelle globale et si l'on considère les rivières les plus abondantes, peu d'entre elles présentent des tendances significatives à long terme, et lorsqu'elles le font, elles ne sont pas toujours du même signe (Milliman et al., 2008). Dai et al. (2009) ont constaté que sur les 925 plus grandes rivières du monde (représentant 73 % du ruissellement global), seuls 5 % présentaient des tendances à la baisse (diminution progressive du débit) et 2 % à la hausse. Ces résultats coïncident avec ceux trouvés par Milliman et al. (2008), qui n'ont pas trouvé de tendances significatives dans aucune des 137 rivières étudiées (représentant 50 % du débit global). Bien que les tendances à l'échelle mondiale ne semblent pas concluantes, les recherches effectuées à l'échelle régionale ou locale ont donné des résultats cohérents d'un point de vue spatial. Aux États-Unis, les débits moyens ont montré des tendances généralement à la hausse entre 1940 et 2009 (Rice et al., 2015), alors qu'au Canada, ils semblent, dans l'ensemble, avoir diminué, entre 1967 et 1996 (notez la différence de période entre les deux études), bien que certaines tendances à la hausse des débits moyens aient été observées au nord

de la Colombie britannique et du territoire du Yukon (Yue et al., 2003). En Australie, la plupart des stations de jaugeage du sud-est du pays ont montré des baisses significatives des débits annuels, alors que dans les stations du nord, les débits ont augmenté (Zhang et al., 2016). En Chine aussi, une diminution généralisée des débits annuels a été observée, à l'exception de certaines parties concrètes du bassin-versant du Yang-Tsé (Piao et al., 2010). Des résultats similaires ont été apportés sur le bassin-versant de l'Amazone (Espinoza Villar et al., 2009).

En Europe, tandis qu'au nord du continent une augmentation des débits annuels a été observée (Hartmann et al., 2013), dans les Alpes d'Europe centrale, une tendance à la baisse des débits faibles hivernaux a été observée dans les bassins dominés par le dégel. En revanche, les bassins présentant des régimes de dégel-pluie montrent une hausse significative des sécheresses hivernales, ainsi qu'une diminution du volume du flux de base induit par la neige (Bard et al., 2015).

Plus au sud du continent, des études menées dans le sud de la France (Giuntoly, 2013) soulignent une augmentation constante de la sévérité des sécheresses et, dans la péninsule Ibérique, les séries de débits historiques ont montré une diminution marquée des débits annuels, hivernaux et printaniers dans la plupart des rivières ibériques, en particulier dans le sud (Lorenzo-Lacruz et al., 2012). Cette baisse annuelle des débits a également été observée dans les rivières pyrénéennes (García-Ruiz et al., 2001; Beguería et al., 2003; Giuntoli y Renard, 2010).

La distinction entre les débits annuels et les débits saisonniers permet de clarifier ces tendances. La tendance annuelle à la hausse des débits, largement observée dans le nord et l'ouest de l'Europe, reflète la tendance à l'augmentation des mois d'hiver et de printemps (Wilson et al., 2010). Pour sa part, la forte tendance annuelle négative dans l'est et le sud de l'Europe reflète notamment la tendance des mois d'été, qui est aussi négative dans d'autres zones européennes, bien qu'elle ne conditionne pas la tendance annuelle (Stahl et al., 2010).

En ce sens, Lorenzo-Lacruz et al. (2012) ont associé le schéma général de diminution des

débits dans toute la région méditerranéenne à la diminution des précipitations, au moins en partie, car différentes études qui ont mis en évidence le schéma de diminution, notamment en hiver, des précipitations dans cette zone (Xoplaki et al., 2004 ; López-Moreno et al., 2009). De plus, la diminution observée dans l'accumulation de neige en hiver (López-Moreno, 2005) peut aussi influencer la baisse des débits de printemps. Les précipitations hivernales sont particulièrement importantes pour que les eaux souterraines se rechargent (Hisdal et al., 2001; López-Moreno et al., 2007), ce qui détermine, à son tour, le maintien des débits de base durant les saisons suivantes.

Néanmoins, certaines études ont déjà souligné que les changements de température et de précipitations n'expliquent pas à eux seuls les changements observés dans les débits (López-Moreno et al., 2006) et que la diminution dans les débits est également liée à l'augmentation de l'évapotranspiration du fait de l'augmentation de la surface boisée (Beguería et al., 2003) qui réduit la génération du ruissellement dans le bassin. C'est pourquoi, outre les changements du climat, il est nécessaire de considérer les changements de la couverture végétale des bassins pour expliquer les changements observés dans les débits. De fait, Vicente-Serrano et al. (2019) déduisent qu'au sud-ouest de l'Europe les facteurs non climatiques tels que la revégétation naturelle dans des régions montagneuses sont les principales causes de la diminution des débits, davantage que le climat. Pour cela, comprendre le rôle relatif des impacts climatiques et non climatiques dans les tendances historiques des débits est une base nécessaire pour envisager des stratégies d'adaptation et de gestion des ressources en eau (Vicente-Serrano et al. 2019).

Aux changements du régime hydrologique général, il convient d'ajouter les éventuels changements de la fréquence et de l'intensité des événements hydrométéorologiques extrêmes, tant en termes d'inondations que de sécheresses. Il suffit de penser aux épisodes d'octobre 1940, qui ont principalement touché la Catalogne et la France et se sont soldés par des dizaines de morts, ou les inondations de novembre 1982 qui ont dévasté une grande partie de l'Andorre

et provoqué des dommages catastrophiques en Catalogne, avec de forts impacts également en Aragon et dans le Languedoc-Roussillon (Puigdefabregas, 1983). En juin 2013, les dommages ont été très graves dans l'ancienne région Midi-Pyrénées, la Catalogne et l'Aragon (Pineda et al., 2013). Le bassin-versant de la Bidassoa (principalement la rivière Baztán) a été touché par des inondations mortelles en 1913 et, près de cents ans après, en juillet 2014. Ce ne sont que quelques cas, nous pourrions en énumérer d'autres, peut-être moins frappants, mais qui détruisent des infrastructures publiques, des propriétés privées et emportent même des vies humaines chaque année.

En plus du risque que les inondations représentent en soi, tant pour la sécurité des humains que pour l'impact sur les biens tangibles et intangibles, les crues ont de sévères conséquences sur les ressources hydriques et leur gestion (Moreno et al., 2013). Les impacts les plus immédiats sont les coupures dans la distribution d'eau potable et l'interruption du fonctionnement des stations de potabilisation ou d'épuration face à des débits dangereusement élevés, ainsi que la destruction totale ou partielle de canalisations, de systèmes d'arrosage ou de mini-centrales hydroélectriques. Il convient d'ajouter le transport de matières en suspension (sédiments) ou de résidus incontrôlés, avec une baisse considérable de la qualité de l'eau ou la nécessité d'effectuer des vidanges pour écrêter la crue en aval, influant sur la gestion normale des ressources pour la production hydroélectrique, l'approvisionnement ou l'arrosage (Ward et al. 2020).

Dans ce chapitre, nous analysons l'évolution des débits des rivières, les niveaux piézométriques et les crues dans les Pyrénées au cours des dernières décennies. Malgré de nombreuses études antérieures sur l'impact du changement mondial sur le climat et l'hydrologie des Pyrénées, aucune étude n'a jusqu'alors réalisé une analyse de l'ensemble de la région pyrénéenne. De plus, la plupart des analyses se sont limitées à analyser des données à l'échelle mensuelle afin d'obtenir des indicateurs de débits moyens annuels ou mensuels, ou se sont concentrées sur l'une des extrémités de l'hydrogramme. En revanche, dans ce travail, des données quotidiennes sont

analysées afin d'obtenir des indicateurs d'eaux moyennes, hautes et basses à l'échelle mensuelle et annuelle, fournissant une meilleure caractérisation des débits et de leurs changements temporels. En outre, la fréquence et l'intensité des crues, qui ont produit des inondations ont été analysées, à partir de l'analyse d'évènements. Tout cela suppose une grande avancée des connaissances des ressources hydriques des Pyrénées, tant dans la vision régionale de la zone d'étude qu'au niveau du détail.

## 2.2. Méthodologie

Les résultats présentés dans ce chapitre se basent sur l'analyse de deux bases de données élaborées dans le cadre du projet PIRAGUA. La base de données PIRAGUA\_indicators (Zabaleta et al., 2022) contient des séries temporelles mensuelles et annuelles d'indicateurs de débit dans une série de stations de jaugeage de référence, ainsi que des séries annuelles d'indicateurs de niveau piézométrique. Pour sa part, la base de données PIRAGUA\_flood (Llasat et al., 2022) contient des données du nombre et de la sévérité des épisodes de crues et d'inondations, à l'échelle municipale, sur tout le territoire des Pyrénées. Les deux bases de données peuvent être consultées et téléchargées sur le géoportail de l'Observatoire pyrénéen du changement climatique (OPCC, 2022), section Couches/Hydrologie. Il est possible de réaliser des consultations plus détaillées sur les indicateurs de débit dans la section Analyses du géoportail.

Nous avons intégré des informations des réseaux d'observation officiels des différentes administrations ayant des compétences sur les ressources hydriques sur le territoire pyrénéen : Réseau officiel des stations de jaugeage (ROEA) d'Espagne, Agence catalane de l'eau (ACA), Députation forale du Guipuscoa (DFG), Députation forale de Biscaye (DFB), Gouvernement de Navarre (GN), Eaufrance, Gouvernement d'Andorre (GA), Base de données de piézométrie du BRGM (ADES), Confédération hydrographique de l'Èbre (CHE) et Agence basque de l'eau (URA). Les informations relatives à la mesure des débits sont constituées de séries régulières quotidiennes et les informations piézométriques contiennent des observations irrégulières ou des valeurs moyennes mensuelles. À partir des données brutes, une série d'indicateurs descripteurs des régimes de débit et des niveaux d'eau dans les aquifères a été calculée. Nous décrivons ci-après le processus d'élaboration de ces bases de données, ainsi que la méthodologie suivie pour analyser les tendances temporelles des débits, les niveaux piézométriques et les événements de crue.

## 2.2.1. Délimitation des stations de jaugeage et niveau piézométrique en régime naturel

Toutes les séries de débit et de piézométrie ne sont pas valides pour l'analyse de tendances ici envisagée, car les séries doivent remplir certaines conditions de qualité. L'analyse a ainsi été réalisée sur un ensemble de stations de jaugeage (où le débit est mesuré) et un autre ensemble de piézomètres de référence (où le niveau des eaux souterraines est mesuré).

La Figure 2.1 indique la localisation des stations de jaugeage comprises dans l'analyse de tendances. Pour réaliser la sélection, des critères de longueur et d'homogénéité des séries, de disponibilité des données et de degré d'influence anthropique dans le bassin-versant au jaugeage ont été employés. Toutes les séries du territoire pyrénéen ayant les caractéristiques suivantes ont été exclues :

- Présenter moins de 20 ans de données.
- Être inactives à la fin de la période analysée (2019).
- Avoir des lacunes importantes de données (plus de 10 % de données manquantes de façon continue, ou des lacunes au début ou à la fin de la série). Dans ce cas, la partie finale des séries a été conservée du moment que celle-ci n'ait pas de lacunes continues et que la série finale ait au moins 20 ans.
- Avoir des eaux localisées sous des infrastructures de régulation significatives telles que des barrages de retenue, des captations importantes pour la consommation, etc.
- Présenter des anomalies dans la série temporelle, telles que des périodes avec des données mais sans variabilité, des non-homogénéités (sauts dans la moyenne ou dans la variabilité), etc.

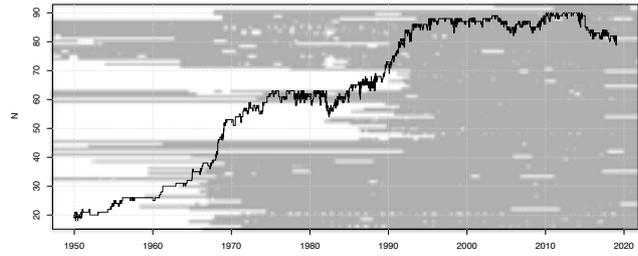


Figure 2.1. Évolution temporelle du nombre de stations de jaugeage disponibles (ligne noire) et représentation graphique de la longueur des séries de données individuelles (lignes grises).

(Source : ROEA, CHE, CHC, URA, ACA, Eaufrance, GA. PIRAGUA indicators.)

Sur un total de 490 stations de jaugeage considérées, l'ensemble de référence sélectionné comprend finalement 88 stations. Le nombre de stations disponibles varie au fil du temps (Figure 2.2), de sorte qu'en 1950 (au début de la période sélectionnée pour l'analyse), le nombre de stations de jaugeage disponibles n'était que de 20. Ce nombre a progressivement augmenté jusqu'à se stabiliser à son maximum au milieu des années 1990.

Dans le cas des séries de piézométrie et du fait de l'irrégularité des données dans la plupart des cas, les conditions de qualité ont dû être assouplies, ce qui a eu des conséquences sur le type d'analyses qui a pu être abordé. Il n'a pas non plus été possible de réaliser une sélection basée sur l'impact anthropique sur les aquifères, car il n'existe pas de données disponibles pour le faire. Les séries présentant les caractéristiques suivantes ont donc été exclues :

- Présenter moins de 25 ans de données (date de début postérieur à 1995).
- Être inactives à la fin de la période analysée (2019).
- Avoir des lacunes de données très importantes (de plusieurs années).
- Avoir des données négatives, comprenant que dans ce cas, il s'agit de piézomètres jaillissants.

D'un total initial de 277 séries de données de niveau piézométrique, 42 ont été finalement sélectionnées pour l'ensemble de référence (Figure 2.3). Comme nous pouvons le constater, certains

piézomètres situés en dehors des Pyrénées ont été inclus dans l'ensemble de référence, lorsque leurs eaux proviennent du massif pyrénéen.

La longueur des séries de données est relativement plus courte que dans le cas des débits (Figure 2.4) : il n'existait aucune donnée de piézométrie jusqu'au milieu des années 1970, et c'est seulement à partir du milieu des années 1990 que nous disposons d'un nombre significatif de séries valides pour l'analyse.

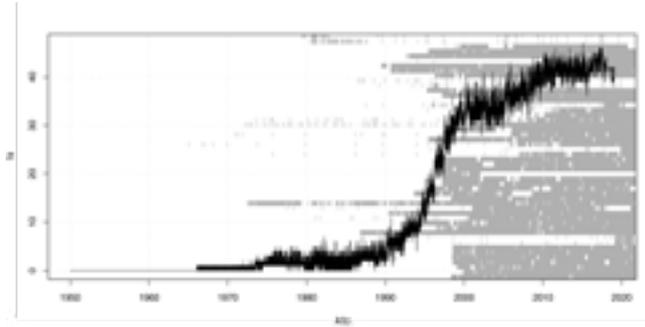


Figure 2.2. Évolution temporelle du nombre de stations piézométriques disponibles (ligne noire) et représentation graphique de la longueur des séries de données individuelles (lignes grises).

(Source : ROEA, CHE, CHC, URA, ACA, Eaufrance, GA, PIRAGUA\_indicators.)



Figure 2.3. Stations de jaugeage sélectionnées pour l'étude des débits et de leurs bassins-versants.

(Source : ROEA, CHE, CHC, URA, ACA, Eaufrance, GA. PIRAGUA\_indicators.)



Figure 2.4. Localisation des stations de niveau piézométrique sélectionnées pour l'étude.

(Source : ROEA, CHE, CHC, URA, ACA, Eaufrance, GA. PIRAGUA\_indicators.)

## 2.2.2. Statistiques représentatives du régime de débit quotidien

Afin d'étudier les régimes de débit quotidiens des rivières des Pyrénées et d'évaluer des changements à long terme, nous avons sélectionné une série d'indicateurs ou de statistiques qui peuvent se calculer à partir des données de débit quotidien (Tableau 2.1). Comme indicateur principal du débit moyen quotidien, le centile 50 (q50), ou moyenne, a été sélectionné. De plus, les centiles 10 et 90 (q10 et q90) ont été calculés pour représenter les débits faibles et hauts, ainsi que les centiles 25 et 75 (q25 et q75). Comme indicateur de variabilité, nous avons employé l'intervalle interdécile (idr), alors que l'ampleur de la queue droite de la distribution, ou poids des débits les plus hauts sur le total a été quantifié grâce au biais interdécile (dsk) et le poids des débits moyens sur le total grâce à la kurtosis interdécile (dku). Comme nous pouvons le constater, il s'agit dans tous les cas de statistiques de position non-paramétriques, plus appropriées que leurs variantes paramétriques (moyenne, écart type, etc.) pour la variable de débit. En outre, deux indicateurs de débits extrêmes ont été employés : l'indice de débit de base (vcn3), informant de l'intensité de l'étiage, et l'indice de débits extrêmes (rl20), informant des débits de crue. Dans ce dernier cas, nous avons utilisé les séries de débits maximaux quotidiens observés à l'échelle annuelle et mensuelle, en employant un modèle d'événements extrêmes basés sur la distribution généralisée de valeurs extrêmes (GEV, dans ses sigles en anglais), de type non-saisonnier pour estimer le débit maximum correspondant à une période de retour de 20 ans. Outre ces dix indicateurs principaux, nous avons calculé 29 indicateurs de débit, mais nous n'allons analyser ici que l'ensemble le plus réduit. Tous les indicateurs de débit ont été calculés à l'échelle annuelle (représentatifs des valeurs moyennes annuelles) et à l'échelle mensuelle (représentatifs des débits de chaque mois). Pour le calcul à l'échelle annuelle, la dénommée année hydrologique a été utilisée, c'est-à-dire la période entre le début le 1er octobre de l'année précédente et le 30 septembre de l'année en cours.

Contrairement à d'autres études, nous avons décidé de ne réaliser aucune saisie de données avant le calcul des indicateurs de débit. Cette décision est due, d'une part, à la difficulté et à l'incertitude liée au comblement de lacunes de données de débit quotidien et, d'autre part, pour éviter de saisir des informations fausses dues au processus statistique de comblement. Nous n'avons donc utilisé que des données réellement observées. Comme il existe des lacunes de données dans les séries observées qui, se prolongent parfois plusieurs jours, en calculant les statistiques à l'échelle annuelle, celles qui présentent plus de 10 données manquantes ou plus de cinq données manquantes consécutives sont automatiquement éliminées. Dans le cas des séries mensuelles, les mois avec plus de cinq données manquantes (sautées) ou plus de trois données manquantes consécutives ont été éliminés.

Du fait de la différence de longueur des séries, six périodes d'analyse ont été sélectionnées (Tableau 2.1). Les périodes sont d'une longueur décroissante (70, 60, 50, 40, 30 et 20 ans) mais, par contre, elles comptent sur un nombre croissant de stations. Nous avons ainsi pu réaliser une étude exhaustive des sept dernières décennies, en utilisant toutes les informations disponibles. Afin de sélectionner les séries à intégrer dans chaque période d'étude, celles présentant une des caractéristiques suivantes ont été supprimées :

- Présenter plus d'une donnée manquante par décennie (une fois les critères précédents appliqués pour éliminer les années ou mois en fonction des données manquantes).
- Présenter des données manquantes au début ou à la fin de la série (étant donné que cela peut affecter considérablement le calcul de tendances).

Tableau 2.1. Principaux indicateurs de débit quotidien analysés, échelles temporelles de calcul et périodes temporelles considérées dans l'analyse de tendances.

(Source : PIRAGUA\_indicators.)

Periodos
1950-2019
1960-2019
1970-2019
1980-2019
1990-2019
2000-2019

Escalas
Anual
Mensual

Estadísticos*
<b>q10; q25; q50; q75; q90:</b> cuartiles 1, 2 y 3, que marcan el límite superior del 25, 50 (mediana) y 75 % de los caudales diarios; y percentiles 10 y 90, que marcan el límite superior del 10 y el 90 % de los caudales diarios.
<b>idr:</b> rango inter-decil range: diferencia entre los deciles superiores e inferior (q90-q10), comprende el 80% de los caudales diarios.
<b>dsk:</b> sesgo interdecil: estimador del sesgo de la distribución, calculado como $((q90-q50)-(q50-q10))/(q90-q10)$ ; >0 indica un sesgo positivo y <0 un sesgo negativo, valores en el rango [-1, 1];
<b>dku:</b> kurtosis interdecil: estimador de la kurtosis de la distribución, calculado como $idr / iqr$
<b>vcn3:</b> caudal de base: caudal mínimo diario promediado durante tres días consecutivos
<b>r120:</b> caudal de crecida: caudal máximo correspondiente a un periodo de retorno de 20 años

\* Se incluyen los diez más relevantes entre los 29 estadísticos utilizados en el análisis.

## 2.2.3. Statistiques représentatives du niveau piézométrique

Dans le cas des registres piézométriques et du fait de la nature des données (il s'agit de hauteurs de la nappe phréatique), de l'irrégularité de celles-ci (dans de nombreux piézomètres, la collecte de données ne se réalise pas de façon régulière dans le temps) et des lacunes existantes dans les séries, seules les tendances dans les niveaux piézométriques moyens annuels ont été considérées. Cet indicateur est calculé pour la période 1995-2019 en utilisant, comme pour le cas des débits, l'année hydrologique entre octobre et septembre.

Pour le calcul du niveau moyen annuel, de nouveaux critères liés à la quantité de données manquantes dans les séries ont été introduits. Nous avons donc éliminé ce qui suit :

- Les années qui contenaient plus de 100 données manquantes en un an ou plus de 20 données manquantes consécutives.
- Les mois qui contenaient plus de 10 données manquantes.
- Les séries qui avaient plus de quatre années manquantes pour les 25 années analysées (conformément aux critères précédents).

De plus, et étant donné que le but ultime de l'étude est de calculer des tendances pour les indicateurs, les séries où des mois ou des années manquaient au début ou à la fin de la série ont également été supprimées.

## 2.2.4. Base de données d'évènements de crue à l'échelle municipale

Le projet PIRAGUA a rassemblé les premières données de crues et d'inondations dans les Pyrénées, à l'échelle municipale. Un total de 1 803 municipalités ont été intégrées, dont 609 sont espagnoles, 1 187 françaises (communes) et 7 andorranes (paroisses).

Une méthodologie spécifique a été suivie dans chaque région afin d'obtenir les informations systématiques et à l'échelle municipale pour les inondations survenues au cours de la période d'étude considérée (1981-2015), bien qu'il y ait une partie commune effectuée à partir du Catalogue d'inondations historiques de protection civile, ainsi que du Consortium d'indemnisation des assurances (en Espagne). Dans le premier cas (protection civile), nous disposons uniquement d'informations sur des événements qui ont provoqué des dommages très graves, et la fiabilité n'est pas la même pour toutes les communautés autonomes. Dans le second cas, le Consortium d'indemnisation des assurances ne dispose que de données désagrégées à l'échelle du code postal, depuis 1996.

Il est important de préciser qu'un épisode d'inondation s'entend comme une situation hydrométéorologique qui peut provoquer des inondations ou des débordements à un ou plusieurs endroits. Par conséquent, des dates initiale et finale le caractérisent, au cours desquelles des inondations sont enregistrées en différents points des Pyrénées à la suite du même épisode de pluie ou de dégel accéléré. De fait, un même épisode peut affecter diverses communes.

Les épisodes d'inondations sont classés en ordinaires, extraordinaires et catastrophiques, conformément à la nomenclature employée dans la base internationale FLOODHYMEX (Llasat et al., 2013) et proposée dans le projet européen SPHERE (Barriendos et al., 2003 ; Llasat et al., 2005). Au cours des épisodes ordinaires, le débit de la rivière ou du torrent augmente de telle façon qu'il peut altérer le rythme de la vie quotidienne, affectant des infrastructures non permanentes

(par exemple, des passerelles) ou envahir des passages pour traverser la rivière. Cependant, il n'y a pas à déplorer de dégâts matériels importants. Nous incluons ici des inondations urbaines sans dégâts, à caractère plutôt local. Un épisode est considéré comme extraordinaire si la rivière, torrent ou ruisseau déborde et, bien qu'il affecte le déroulement de la vie ordinaire et provoque des dégâts, il n'est pas à l'origine d'une destruction complète des infrastructures. Ces mêmes inondations peuvent être locales ou très étendues. Enfin, un épisode est considéré comme catastrophique lorsqu'il provoque des pertes matérielles graves telles que la destruction totale ou partielle de ponts, bâtiments ou d'autres infrastructures, terrain constructible ou de culture, des pertes de bétail et de récoltes, etc.

## 2.2.5. Analyse des tendances

L'un des objectifs de cette section est de déterminer s'il existe des tendances (changements temporels à long terme) dans les débits de surface, les niveaux piézométriques et les crues. L'ampleur de la tendance linéaire s'obtient grâce à l'estimateur de pente de Theil-Sen (Sen, 1968). Le sens statistique de la tendance a été déterminé par le test de Mann-Kendall, en appliquant un préblanchiment de la série afin d'éliminer l'autocorrélation temporelle à partir de la méthode de Yue-Pilon (Yue et al., 2002). Ce pré-processus a la finalité d'éliminer l'inflation des valeurs de signification statistique résultant de l'existence d'une autocorrélation des données et qui implique un nombre plus élevé que prévu de faux positifs dans le test de tendance. Pour exprimer l'ampleur de la tendance, nous avons employé l'indicateur de tendance relative par décennie, exprimé en termes de pourcentage de changement par rapport à la moyenne de la période.

## 2.3. Résultats

### 2.3.1. Analyse détaillée des stations de jaugeage et de piézométrie

Chaque station de jaugeage et de piézométrie comprise dans les ensembles de référence a fait l'objet de l'analyse décrite dans le paragraphe précédent et les résultats ont été compilés dans des rapports individuels pour chacune des stations. Il est possible de consulter et de télécharger ces rapports pour chacune des stations sur le géoportail de l'Observatoire pyrénéen du changement climatique (OPCC, 2022), dans la couche de Jaugeages de référence, en cliquant sur la station de jaugeage souhaitée (fiches d'indicateurs de débit, en format PDF).

La localisation de la station se trouve en tête des rapports, ainsi que la série complète de données. Nous présentons ci-après les courbes de fréquence-ampleur des débits, pour différentes périodes temporelles. Par exemple, les résultats pour les jaugeages de Sigüés et d'Oloron y sont détaillés (Figure 2.5).

Ces deux jaugeages se trouvent à la moitié occidentale de la chaîne, chacune d'un côté (nord-sud) des Pyrénées. Bien qu'en général les tendances à long terme des deux stations se ressemblent, il existe certaines différences qui peuvent s'observer dans l'évolution des courbes de fréquence-ampleur. Dans les deux cas, nous pouvons observer des tendances décroissantes des débits moyens, faibles et hauts à l'échelle annuelle entre 1960 et 2019. Toutefois, la courbe de distribution indique une baisse plus marquée pour la station espagnole, semblable à ce qui se passe durant les mois d'été et au début de l'automne. Durant les mois d'hiver, la station française n'indique pas de changements significatifs de la distribution des débits entre les différentes périodes, à l'exception des débits les plus faibles. Cependant, la station de Sigüés indique des tendances différentes pour les débits faibles et moyens d'une part, et pour les débits élevés d'autre part. De fait, les conditions locales sont un facteur très important dans la réponse des débits à forçages externes.

Les informations pour chaque station de

jaugeage sont complétées par l'analyse des séries temporelles des différents indicateurs de débit. Par exemple, le cas du jaugeage de la rivière Aragon à Jaca est présenté pour la période 1950-2019 (Figure 2.6). Dans les séries temporelles de chaque indicateur, les lignes rouges indiquent les séries qui présentent une tendance significative à long terme. À l'échelle annuelle, on observe des tendances décroissantes et significatives dans les débits hauts et très hauts (q75 et q90), ainsi que dans la variabilité des débits (iqqr, idr). À

l'échelle mensuelle, le plus important est la baisse significative des débits faibles et moyens (q10, q25, q50) en mars, avril, mai et en juin (les mois de dégel), et des débits élevés aux mêmes mois sauf en avril.

### 2.3.2. Tendances des débits superficiels

Bien que l'analyse individuelle de chaque station



Figure 2.5. Hydrogramme complet (évolution temporelle des débits quotidiens) et changements décennaux de la fonction de distribution cumulée (ECDF) des débits observés dans les jaugeages 9063 (rivière Esca à Sigüés) et Q7002910 (Gave d'Oloron à Oloron-Sainte-Marie).

(Source: PIRAGUA\_indicators.)

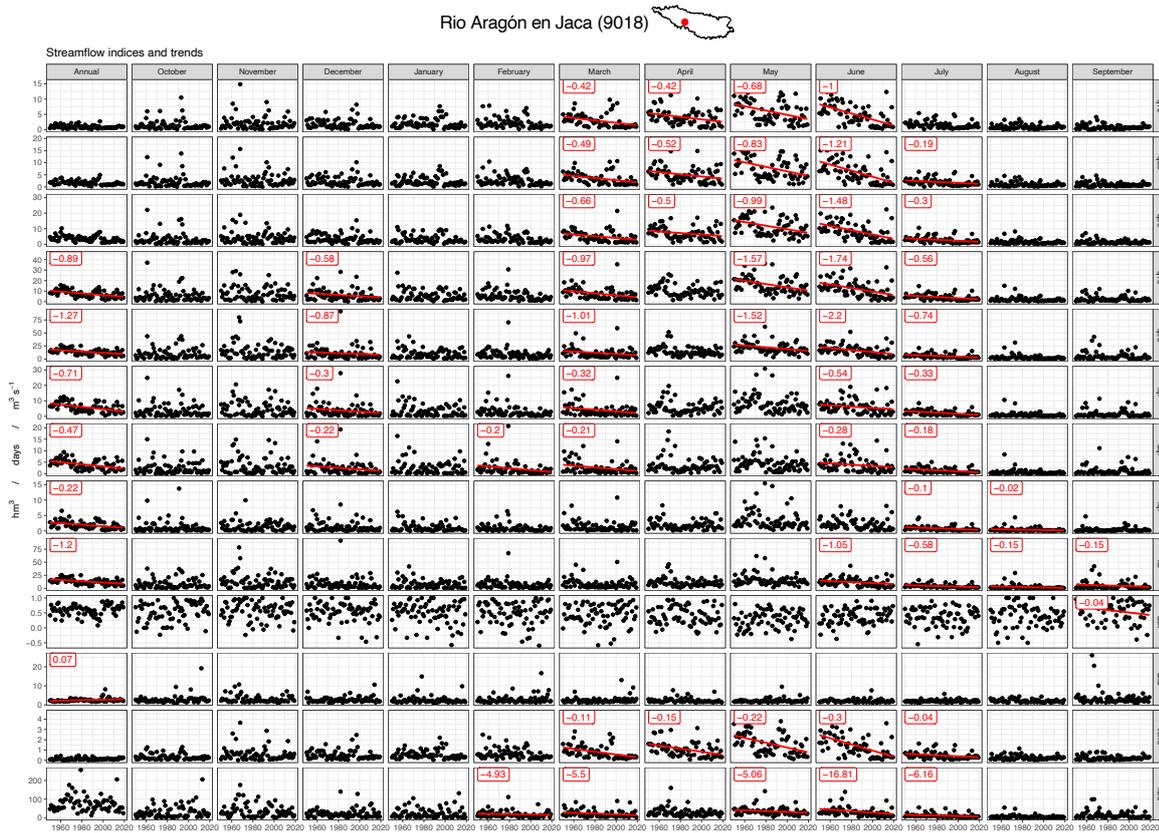


Figure 2.6. Séries temporelles annuelles et mensuelles d'indicateurs de débit dans le jaugeage 9018 (rivière Aragon à Jaca), période 1950-2019. Les lignes rouges indiquent les tendances significatives, ainsi que l'ampleur de la tendance (chiffres rouges).

(Source: PIRAGUA\_indicators.)

de jaugeage ou de piézométrie permette d'étudier dans le détail les statistiques et les tendances de chacun des indicateurs dans les différentes périodes, il est plus intéressant de réaliser une analyse de l'ensemble des Pyrénées.

Pour cela, les résultats des analyses de tendances sont reflétés dans des cartes qui résument les résultats de toutes les séries disponibles pour chaque période d'analyse. Les résultats pour la période 1960-2019 (Figure 2.7) sont indiqués à titre d'exemple. Il est possible de consulter les résultats pour les différentes périodes (OPCC, 2022) sur le géoportail de l'OPCC.

Chacun des jaugeages est représenté sur les cartes par un triangle dont le sommet indique la direction de la tendance observée : le sommet vers le haut indique une tendance ascendante (augmentation progressive de la valeur de l'indicateur de débit), alors que le sommet vers le bas indique une tendance descendante. La couleur du triangle indique, à son tour, la direction et la signification de la tendance : bleu

pour les tendances ascendantes et rouge pour les tendances descendantes. Les tons forts signalent les tendances statistiquement significatives, tandis que les tons doux indiquent les tendances non significatives. De plus, la taille du triangle indique l'ampleur de la tendance : plus l'ampleur des tendances est grande, plus le triangle est grand. Enfin, les chiffres dans la marge inférieure gauche de chacune des cartes indiquent le nombre de tendances dans chaque direction et leur signification. Ainsi, le premier numéro indique le nombre de tendances négatives significatives, le second, le nombre de tendances négatives non significatives, le troisième, le nombre de tendances positives non significatives, et le quatrième, le nombre de tendances positives significatives.

Dans le cas de la période 1960-2019 de la figure, il convient de souligner la prédominance absolue des tendances négatives ou descendantes pour tous les indicateurs de quantité de débit quotidien (q10, q25, q50, q75 et q90), tant à l'échelle annuelle qu'au cours des différents mois. Les débits moyens annuels (q50) ont

diminué de 4 à 15 % par décennie, alors que les faibles (q10) ont diminué de 4 et 17 %, et les élevés (q90) de 2 à 14 %. Pour les débits faibles, cette baisse a été plus marquée au cours des moins d'été et au début de l'automne (entre juin et octobre), avec une diminution des débits de 20 % par décennie dans certains cas et un nombre élevé de séries aux tendances négatives significatives. Cette diminution des débits faibles est également marquée dans le débit de base (vcn3), qui diminue, indiquant une hausse de la sévérité des périodes de basses eaux. Les hauts débits se sont également réduits au cours de l'ensemble des mois, bien que la diminution ait été plus prononcée pendant l'hiver (entre décembre et février), jusqu'à 20 % par décennie. Cette diminution des débits élevés est également perceptible sur l'indicateur des débits extrêmes (rl20), qui présente également des diminutions, bien qu'un peu moins clairement. Les baisses les plus généralisées de cet indicateur ont été observées au cours des mois d'été (juin et juillet), pour lesquels plus de la moitié des séries ont

montré des tendances descendantes significatives, avec des diminutions de 6 à 16 % par décennie. Toutes ces tendances ont influencé la distribution des débits annuels et mensuels et, de fait, les indicateurs de biais (dsk) et kurtosis (dku) des séries, avec une prédominance à la baisse, bien que les tendances observées pour ces deux statistiques ne soient pas si importantes à l'échelle régionale.

La tendance négative généralisée des indicateurs de débit quotidien observée pour la période 1960-2019 se maintient, en grande mesure, au cours de la période 1970-2019. Cependant, certains changements commencent à être observés au cours des mois d'hiver et de printemps, pour lesquels le nombre de séries présentant des tendances significatives diminue ; et l'on commence même à observer des tendances positives, notamment pour les indicateurs de débits élevés. Ces changements se généralisent au cours de la période 1990-2019, marquant un tournant, de sorte qu'à partir de cette période, les tendances à l'échelle annuelle ne sont pas

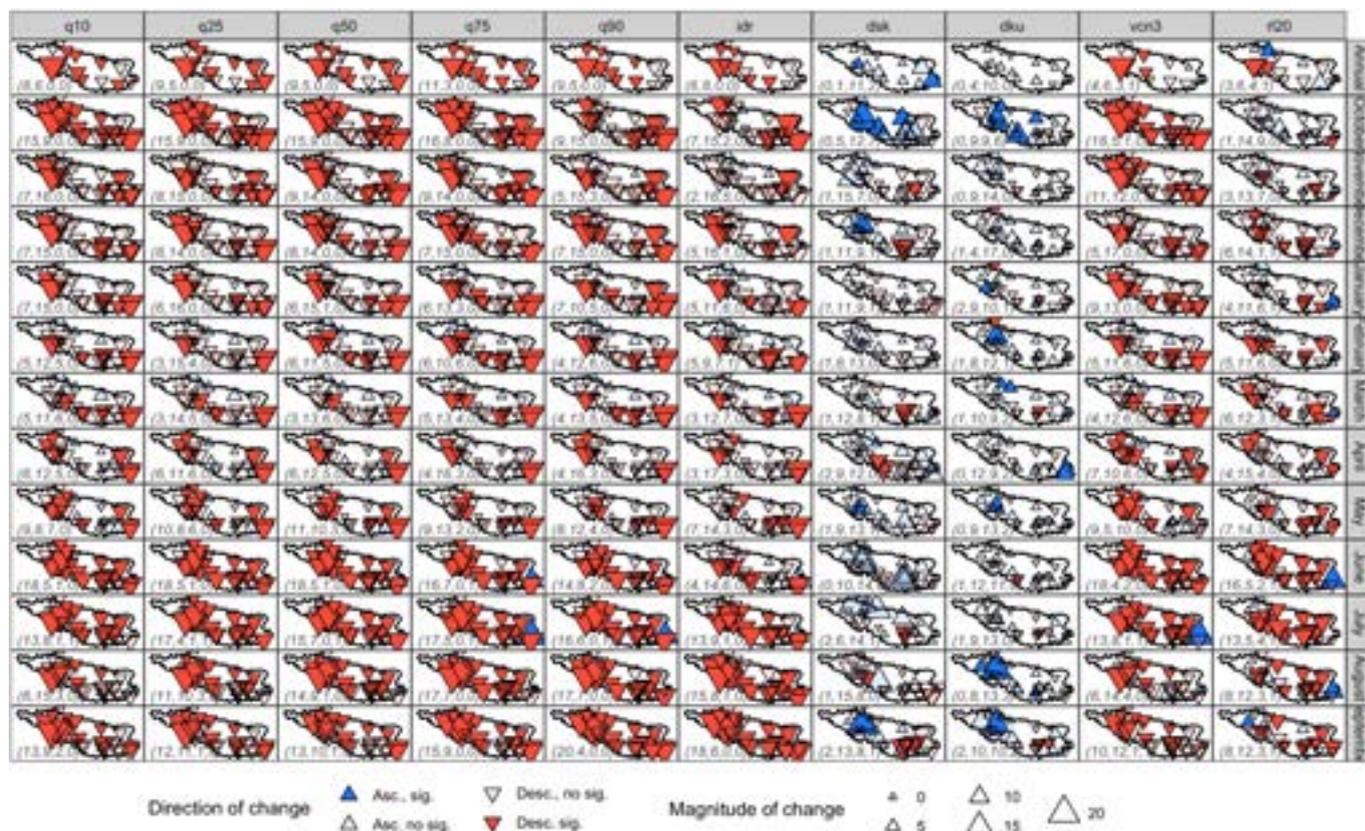


Figure 2.7. Résultats des analyses de tendances dans les débits historiques observés des Pyrénées pour la période 1960-2019.

(Source: PIRAGUA\_indicators.)

très claires, car le pourcentage de tendances significatives diminue sensiblement et ces dernières montrent des directions opposées pour la même statistique, sans une répartition spatiale nette. À titre d'exemple, des 61 séries analysées à l'échelle annuelle sur cette période, seules deux montrent des tendances significatives (de signe négatif ou décroissant) pour les débits moyens annuels (q50). Il s'agit d'un résultat qui, compte tenu de la taille de l'échantillon analysé, pourrait s'obtenir par hasard et, par conséquent, il ne peut être considéré comme significatif à l'échelle régionale.

Les débits faibles (q10 et q25) sont ceux qui montrent une tendance annuelle plus claire sur les périodes les plus récentes : 14 des 15 tendances significatives montrent un signe descendant (des

61 tendances prises en compte au total), avec une baisse moyenne des débits faibles de 15 % par décennie. À l'échelle mensuelle, les tendances sur cette période sont, en général, peu claires (le pourcentage de tendances significatives est faible et les tendances significatives montrent des directions opposées), notamment entre janvier et juillet.

C'est-à-dire que les tendances observées précédemment se relâchent ou disparaissent lorsque les périodes les plus récentes sont considérées. Un exemple est le mois de mai (Figure 2.8). Les résultats de l'analyse de tendances pour les différents indicateurs de débit, pour les six périodes d'analyse, sont indiqués. Par exemple, si l'on considère le débit moyen (q50), nous observons comment les tendances négatives

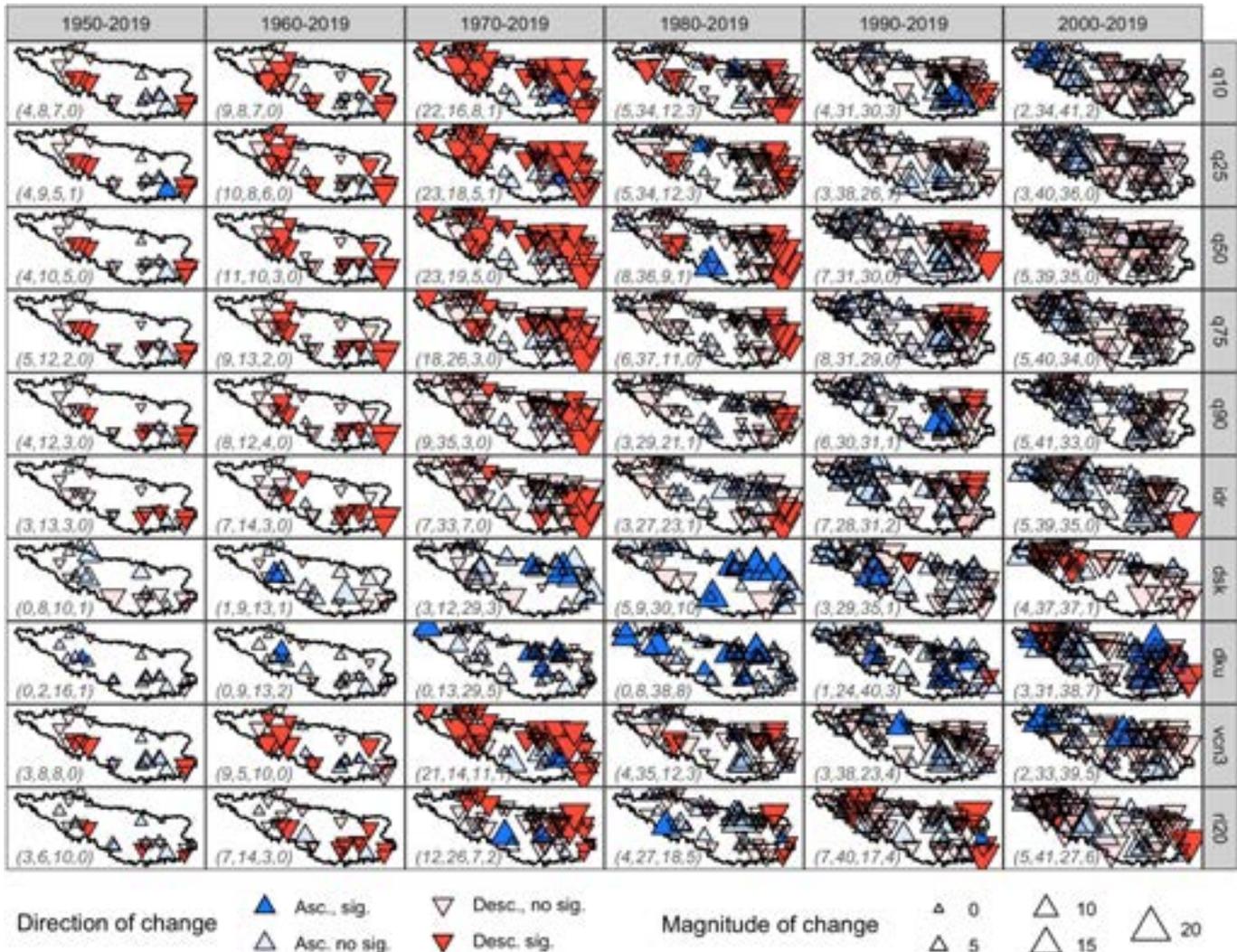


Figure 2.8. Résultats des analyses de tendances des débits des Pyrénées pour le mois de mai pour différentes périodes temporelles.

(Source: PIRAGUA\_indicators.)

prédominant si nous tenons compte des périodes les plus longues (14 sur 19 en 1950-2019, 21 sur 24 en 1960-2019, 42 sur 47 en 1970-2019), mais diminuent progressivement par la suite (44 sur 54 en 1980-2019, 38 sur 68 en 1990-2019 et 44 sur 79 en 2000-2019). Nous pouvons également observer comment le pourcentage des tendances significatives de tout signe augmente, puis diminue au cours de la période d'analyse (21 %, 46 %, 49 %, 83 %, 17 %, 10 % et 6 %). Ce dernier ne doit pas surprendre, car il existe une relation entre la longueur des séries de données et la puissance du test de Mann-Kendall, de sorte que pour des périodes plus courtes, il est plus difficile d'obtenir une signification statistique, pour une ampleur de la tendance et une variance égale des données. Néanmoins, la baisse de la proportion de tendances négatives sur le total

semble indiquer, en revanche, un changement ou une atténuation de la tendance négative généralisée des indicateurs de débit quotidien.

Les tendances observées pour la période 1990-2019 sont un peu plus nettes pour les mois d'été (entre août et octobre). Ainsi, en octobre (Figure 2.9), nous observons encore une diminution significative des débits moyens, faibles et hauts, avec plus de 30 % de tendances statistiquement significatives, toutes descendantes. Nous estimons donc une baisse des débits moyens (q50), faibles (q10, q25) et hauts (q75, q90) d'environ 20 % par décennie. Cette diminution généralisée des débits d'octobre se traduit par une baisse de l'ampleur et de la variabilité de l'hydrogramme, reflétée dans la diminution de la plage interdécile (idr). Le débit de base (vcn3)

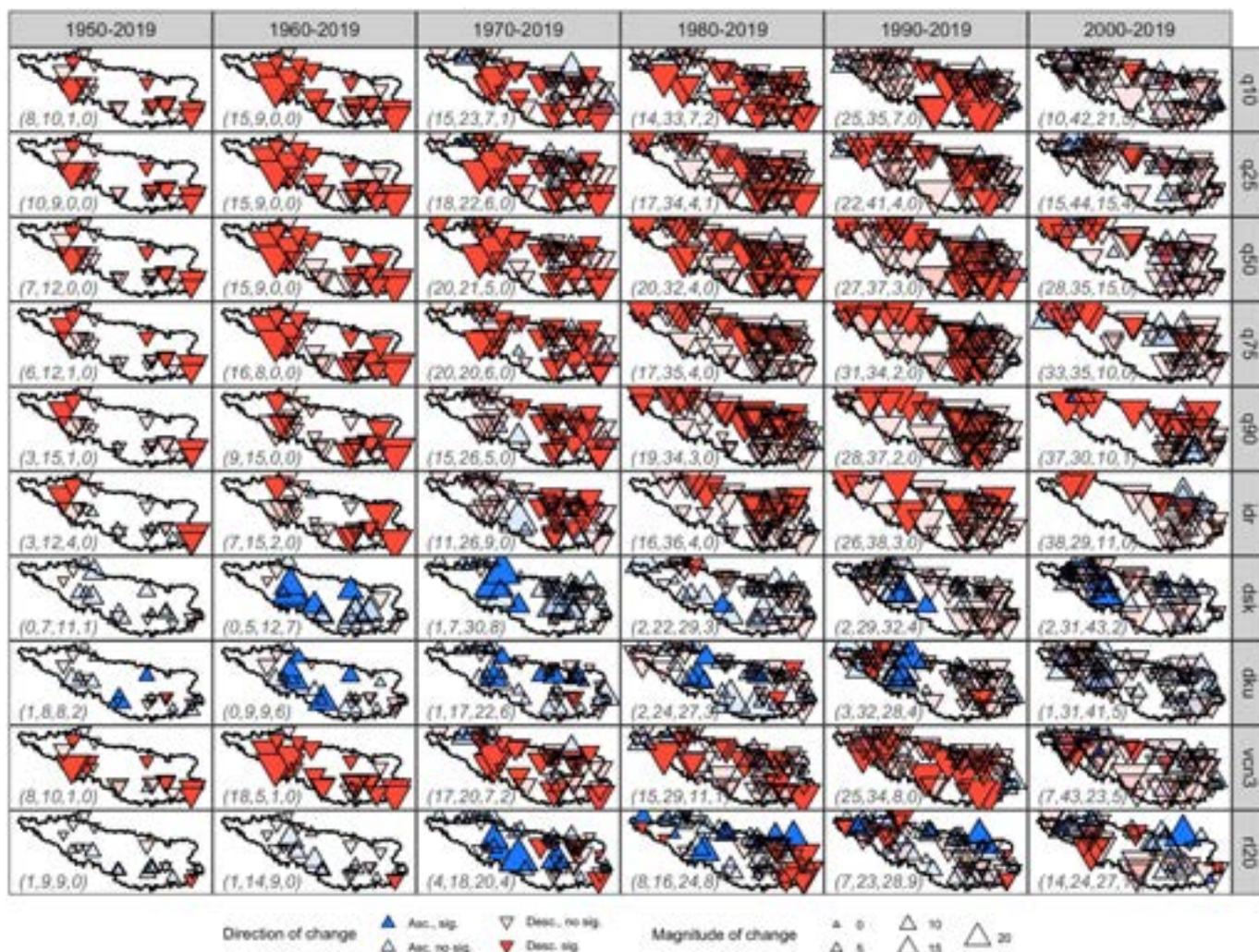


Figure 2.9. Résultats des analyses de tendances des débits des Pyrénées pour le mois d'octobre sur différentes périodes temporelles.

(Source: PIRAGUA\_indicators.)

diminue également et, par conséquent, il faut s'attendre à une augmentation de la sévérité de la période des basses eaux, tout comme observé au cours de la période la plus longue 1960-2019. Toutefois, la diminution des débits élevés ne se traduit pas par une baisse des débits extrêmes (rl20), car 40 % des 23 % de tendances significatives indiquent une baisse des débits extrêmes, alors que 60 % montrent une hausse de ceux-ci, avec une répartition spatiale peu concluante.

### 2.3.3. Tendances dans les niveaux piézométriques (eau souterraine)

La Figure 2.10 montre les résultats de l'analyse de tendances des niveaux piézométriques moyens annuels pour la période 1995-2019 dans les masses d'eau souterraine pyrénéenne. Au-delà des possibles interprétations des résultats, il ressort clairement de la figure les quelques stations de mesure pour lesquelles l'analyse a pu être réalisée selon les critères établis. De fait, les stations où l'on observe un nombre élevé de lacunes de données sont nombreuses, certaines d'entre elles d'une durée temporelle longue. Cette situation démontre clairement la nécessité d'étendre et d'améliorer le suivi des réseaux de surveillance des eaux souterraines existantes, des deux côtés de la ligne de séparation.

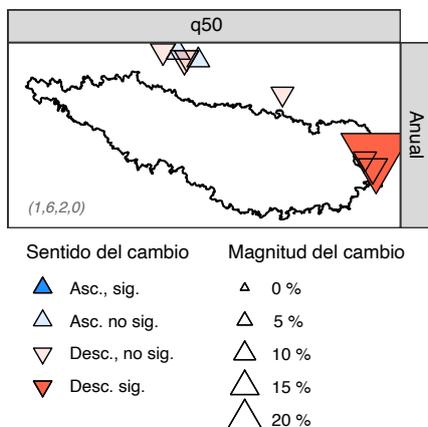


Figure 2.10. Résultats des analyses de tendances des niveaux piézométriques moyens annuels des Pyrénées pour la période 1995-2019.

(Source: PIRAGUA\_indicators.)

### 2.3.4. Répartition spatiale des évènements d'inondation

Sur la période 1981-2015, 181 évènements d'inondation ont été enregistrés dans les Pyrénées (Figure 2.11). De ces évènements, 128 ont touché la partie espagnole, 43 la française et 46 l'andorrane. Certains de ces épisodes ont été communs à deux ou trois pays, comme l'évènement de 1982 (qui a touché les trois pays) et celui de 2013 (qui a touché la France et l'Espagne). De là, la somme totale par pays ne correspond pas à 181. Il se passe la même chose lorsque l'unité de travail est la région, 41 épisodes étant « transrégionaux ».

Il est nécessaire de préciser que pour certaines régions, il n'a pas été possible d'obtenir tous les épisodes ordinaires car, en raison de leur caractère mineur, ils ne sont parfois pas enregistrés. Pour cette raison, la base de données peut présenter une certaine hétérogénéité pour les épisodes mineurs, comme c'est le cas de l'Andorre, qui se distingue par un nombre très élevé d'épisodes.

Dans la Figure 2.12, nous pouvons observer le nombre d'épisodes aux dégâts importants (extraordinaires et catastrophiques). Dans ce cas, l'Andorre ne se distingue plus comme dans la figure précédente. De fait, la fréquence élevée observée dans la Figure 2.11 est la conséquence de la base d'inondations détaillée dont dispose ce pays.

Dans la plupart des communes de Catalogne, 1 à 3 évènements d'inondation ont été enregistrés. Les communes comptabilisant un plus grand nombre d'épisodes se trouvent dans le nord-est, près de la Méditerranée. Le maximum a été enregistré à Llançà, avec 16 évènements d'inondation, suivi d'Olot avec 15 évènements. Si les évènements sont analysés par région, l'Alt Empordà et la Garrotxa atteignent 25 épisodes d'inondation. Les régions où le plus d'évènements catastrophiques ont été enregistrés sont la Vallée d'Arán, l'Alta Ribagorça, le Pallars Jussà et le Pallars Sobirà. En Aragon, Bielsa est la commune où un plus grand nombre d'épisodes d'inondation a été comptabilisé, avec 15 épisodes dont 9 extraordinaires (Figure 2.13) et 4 catastrophiques,

la valeur maximale de toute la base de données (Figure 2.14). Ensuite, les communes de Benasque et de Graus, dans le bassin de la rivière Ésera, avec 9 cas extraordinaires chacun. Vous pouvez observer que Bielsa présente le plus grand nombre d'épisodes importants (Figure 2.12). La frange formée par les communes de Jaca, Sabiñánigo,

Boltaña et d'Aínsa-Sobrarbe est également à signaler. Ce sont des communes où les épisodes d'inondations enregistrés oscillent entre 6 et 8. Dans le cas de la Navarre, la commune où un plus grand nombre d'épisodes s'est produit est Pampelune, avec 17 épisodes, suivi de la Vallée d'Egüés, Uharte-Huarte et Belascoáin

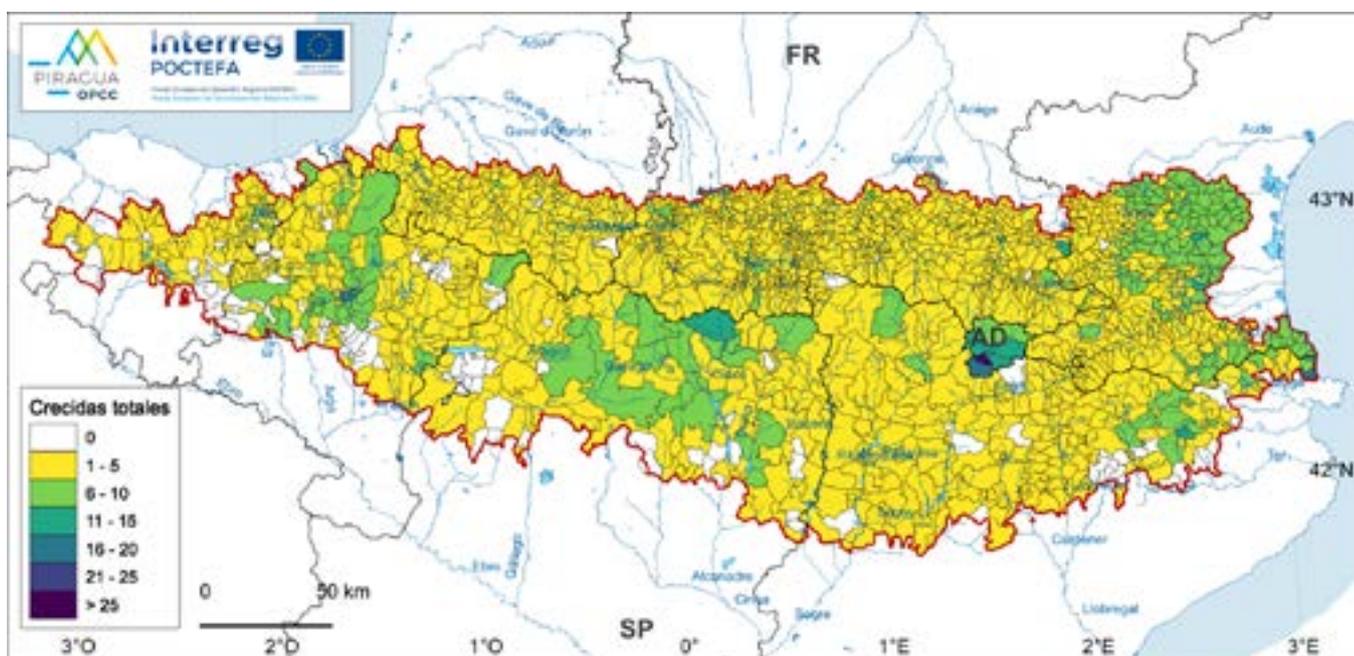


Figure 2.11. Répartition municipale du nombre total d'évènements d'inondation qui ont touché la région des Pyrénées sur la période 1981-2015.

(Source: PIRAGUA\_flood.)

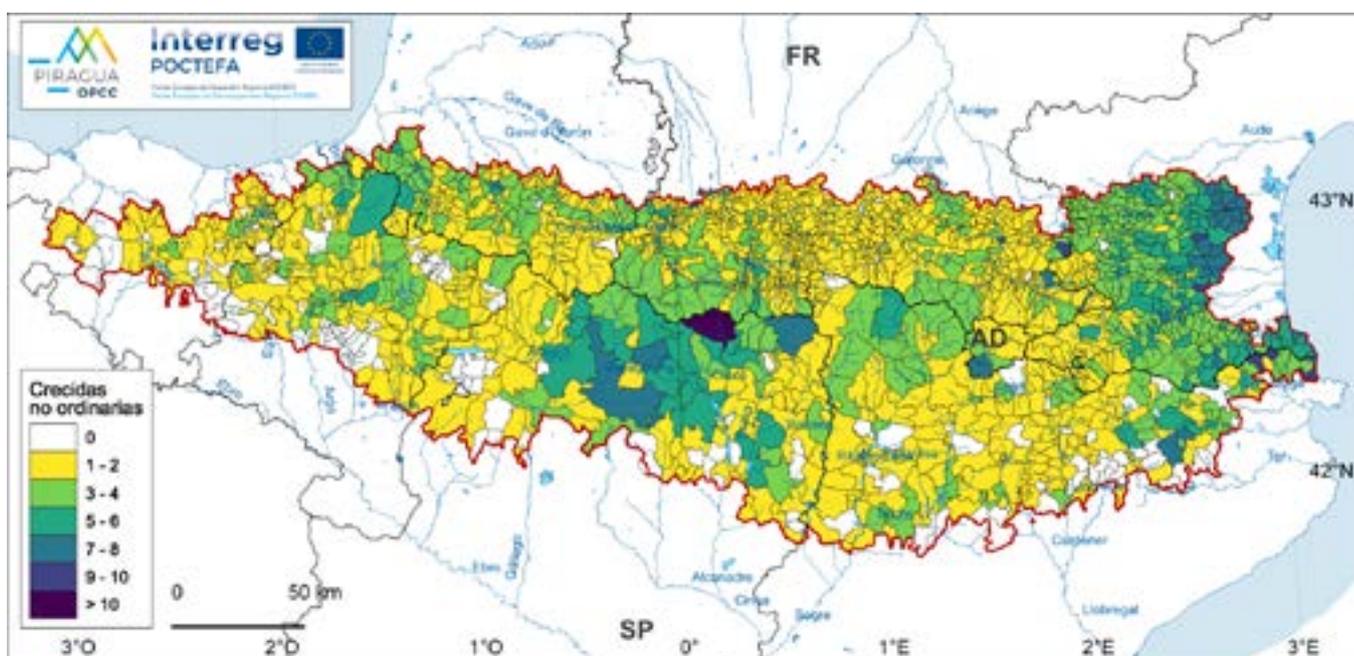


Figure 2.12. Répartition du nombre d'évènements d'inondation aux dégâts importants (extraordinaires et catastrophiques) qui ont touché la région des Pyrénées sur la période 1981-2015.

(Source: PIRAGUA\_flood.)

avec 10 épisodes, et Baztán, Etxauri et Cendea de Olza avec 8 épisodes chacun. La fréquence des évènements diminue au Pays basque, avec un maximum de 8 à Oiartzun, suivi de Tolosa, avec 7 évènements. La plupart des évènements d'inondation se concentrent dans la partie est des Pyrénées basques, où l'altitude du massif est supérieure. Il s'agit de la situation inverse à celle de l'extrémité orientale, où la proximité de la mer de la chaîne pyrénéenne est fondamentale dans la génération d'épisodes de crue.

En ce qui concerne la partie française, en Nouvelle-Aquitaine, le maximum s'est produit à Mauléon-Licharre, avec 7 évènements d'inondation, suivi de Cambo-les-Bains, avec 6 évènements. La plus grande fréquence dans la partie de l'Occitanie se trouve dans les communes de Mongaillard avec 13 épisodes d'inondation et Bélesta avec 12. La plupart des communes affectées se trouvent dans le secteur nord-est de la région d'étude, où 10 évènements d'inondation ont été enregistrés. Il existe une grande région au centre de l'Occitanie où le nombre d'évènements est inférieur à 5 et, enfin, il y a une zone dans la partie ouest où le nombre d'évènements oscille entre 6 et 8.

L'analyse de la répartition mensuelle du nombre d'évènements d'inondation aux dégâts importants (extraordinaires et catastrophiques) dans les Pyrénées (Figure 2.15) montre que la plupart des évènements sont concentrés au cours des mois de juin et de novembre. Le nombre d'évènements est plus faible de février à avril. Le maximum absolu se produit en octobre, avec 15 évènements, et si nous prenons également en compte les épisodes ordinaires, ce chiffre s'élève à 19. Dans les Pyrénées catalans, les évènements se concentrent sur les mois d'octobre et de novembre, puis de juin. En Aragon, ils se concentrent d'août à novembre. Dans le cas de la Navarre, la répartition mensuelle du nombre d'évènements importants est différente de celles observées dans les régions les plus orientales, car la plupart sont concentrés de mai à octobre, sans exister un unique maximum, et à l'exception de septembre, mois où aucun évènement n'a été enregistré. Dans le cas du Pays basque, les évènements sont essentiellement concentrés au cours des mois d'été, de juin à août, avec deux évènements non ordinaires au cours de chacun de ces mois. En Nouvelle-Aquitaine, de façon similaire au Pays basque et à la Navarre, la plupart des évènements se produisent durant les mois de mai et de juin, avec trois ou quatre évènements enregistrés respectivement. Ensuite, le

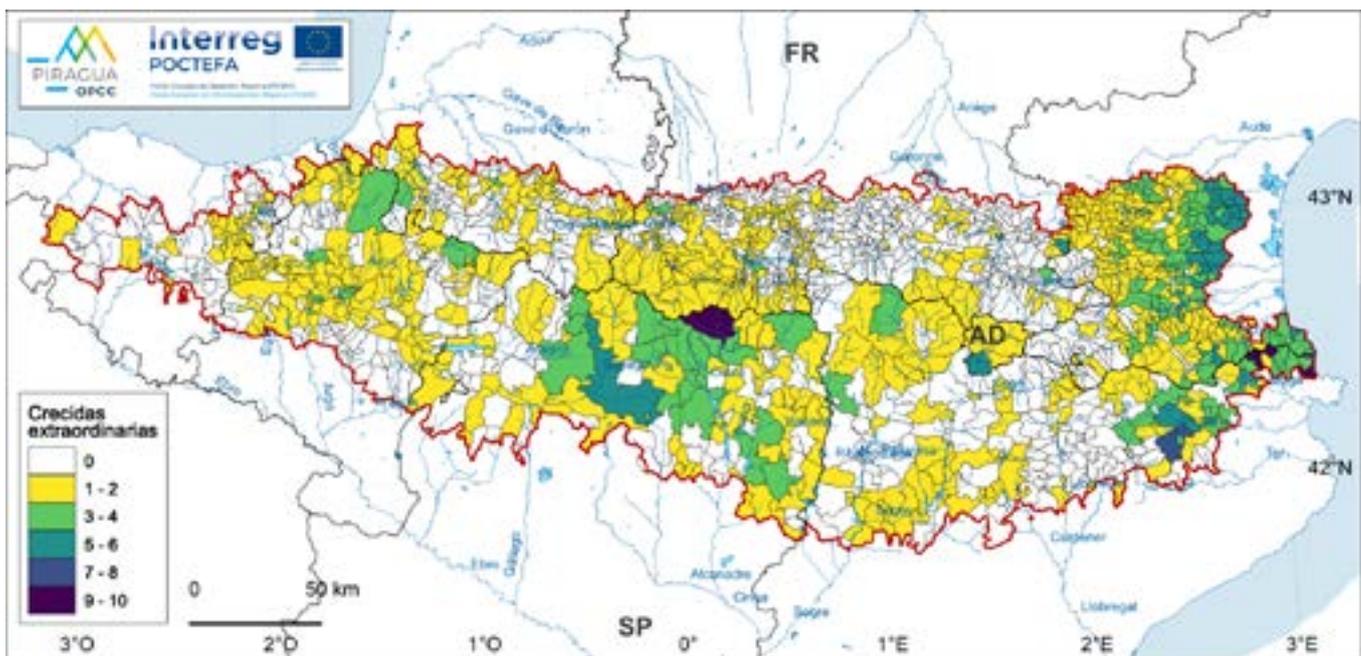


Figure 2.13. Répartition du nombre d'évènements extraordinaires d'inondation qui ont touché la région des Pyrénées sur la période 1981-2015.

(Source: PIRAGUA\_flood.)

mois ayant un plus grand nombre d'évènements non ordinaires est le mois de janvier, avec deux évènements. La répartition mensuelle des évènements d'inondation aux dégâts importants en Occitanie est plus similaire à celle de la Catalogne que celle de la Nouvelle-Aquitaine, car le plus grand nombre d'évènements se concentre durant les mois d'automne, le maximum se situant en novembre (6), suivi d'octobre (4). Il

convient de souligner aussi les mois de mai à juillet, et les mois de décembre et de janvier. En Andorre, la plupart des évènements se produisent de mai à novembre, le maximum absolu étant enregistré au mois de juillet (4), suivi d'août (3). Cette répartition ressemble davantage à celle de la Navarre, du Pays basque et de la Nouvelle-Aquitaine.

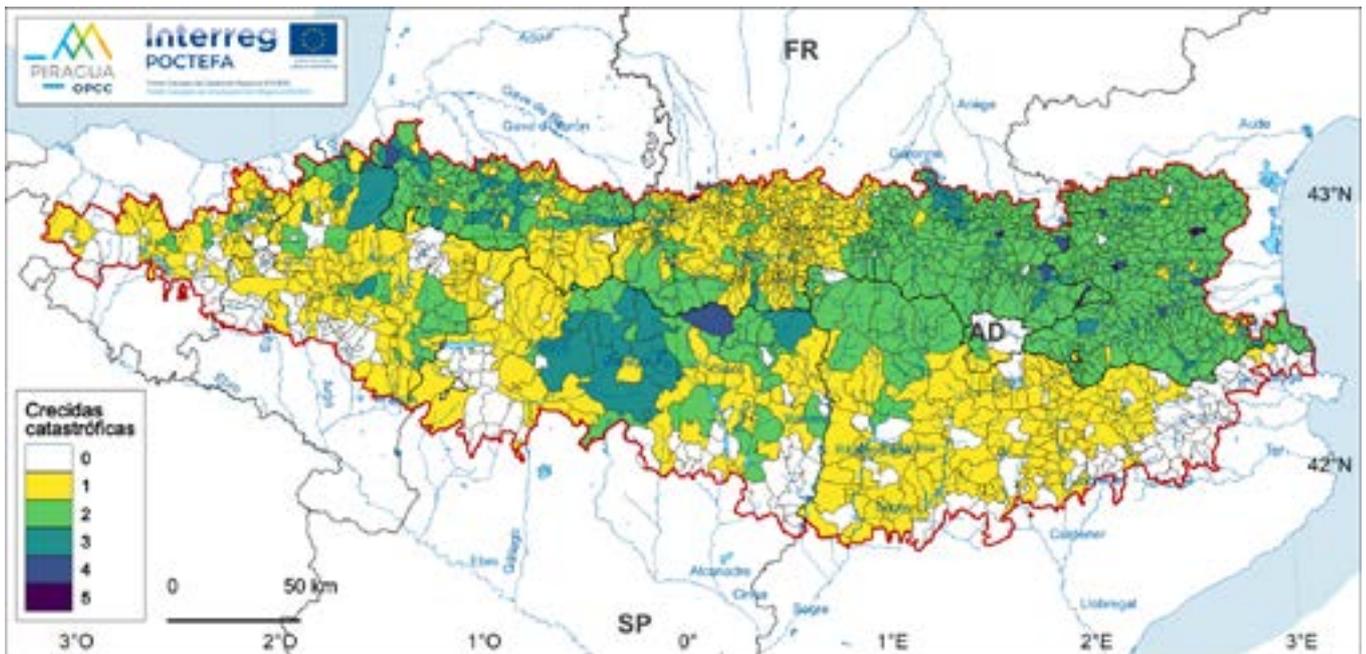


Figure 2.14. Répartition du nombre d'évènements catastrophiques d'inondation qui ont touché la région des Pyrénées sur la période 1981-2015.

(Source: PIRAGUA\_flood.)

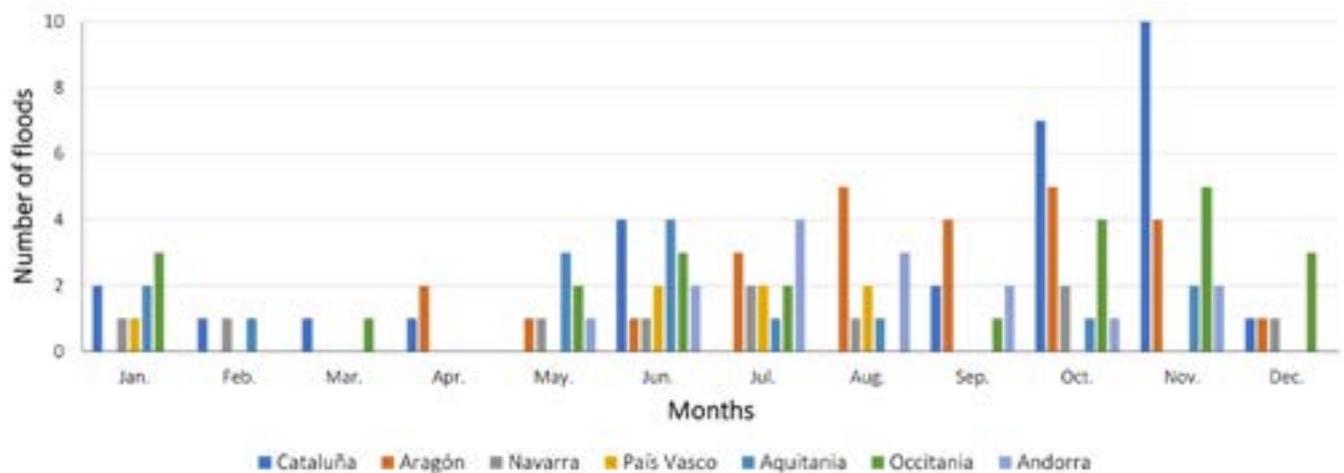


Figure 2.15. Répartition mensuelle du nombre d'épisodes d'inondation importants qui ont touché la région des Pyrénées sur la période 1981-2015.

(Source: PIRAGUA\_flood.)

### 2.3.5. Tendance temporelle des évènements d'inondation

À l'exception des années 1985 et 1990, des inondations importantes se sont produites tous les ans. L'étude de tendances pour la période 1981-2015 montre une pente positive, égale à 0,74 évènements/décennie, bien que la tendance ne soit pas statistiquement significative à un niveau de signification de 90 %.

En analysant l'évolution du nombre d'évènements non ordinaires dans les Pyrénées, nous observons de nouveau une tendance positive, avec une pente de 0,3 évènements/décennie. Cependant, en réalisant le test de Mann-Kendall, le résultat de cette tendance n'est pas significatif. Tout comme en Nouvelle-Aquitaine, l'année où le plus grand nombre d'évènements non ordinaires s'est produit a été 2014, avec quatre évènements de ce type.

En Catalogne, il y a une tendance positive de 0,15 évènements/décennie, bien qu'elle ne soit pas significative. En Aragon et au Pays basque, la tendance est légèrement négative (-0,006 et -0,084 évènements/décennie, respectivement), et non significative. En Navarre, la tendance est positive (0,028 évènements/décennie), mais non significative. Le fait qu'une tendance positive de 0,34 évènements/décennie, significative à un niveau de signification de 90 %, est observée en Nouvelle-Aquitaine, est important. Nous retrouvons la même tendance en Occitanie (0,31), bien qu'elle ne soit pas significative dans cette région. Dans le cas de l'Andorre, en étudiant l'évolution temporelle du nombre d'évènements non ordinaires, nous observons à nouveau une légère tendance positive non significative, avec une pente de 0,04 évènements/décennie.

Si nous prenons en compte tous les types d'inondations qui ont affecté les Pyrénées, y compris ceux qui ont produit des dégâts mineurs, nous constatons une tendance positive significative pour l'ensemble de la région, ainsi qu'en Nouvelle-Aquitaine et en Occitanie. Les inondations extraordinaires augmentent également de façon significative à l'échelle du massif, ainsi qu'en Aquitaine, tandis que les inondations ordinaires ou aux dégâts mineurs

augmentent en Occitanie.

### 2.3.6. Conséquences des évènements d'inondation

Dans la partie espagnole des Pyrénées, les crues analysées ont provoqué 121 morts. Les mois où les inondations ont provoqué le plus de morts sont les mois d'août (97 victimes) et de novembre (39 victimes). Il convient de souligner la tragédie du camping Las Nieves de Biescas en août 1996, lorsque le torrent d'Arás a débordé de façon soudaine et provoqué la mort à 87 personnes, déformant le fait que normalement, en été, il s'agit d'épisodes brefs, sans victimes, et que s'il y a des victimes, elles sont généralement peu nombreuses et associées aux sports d'aventure.

Si nous considérons uniquement les évènements survenus entre 1996 et 2015, le montant total d'indemnités payées par le Consortium d'indemnisation des assurances (CCS, dans ses sigles en espagnol) pour le concept d'inondations, et les paiements dans les communes des Pyrénées, est de 142,5 millions d'euros de 2015 (€2015). De ce montant, 109,6 millions €2015 sont dus aux 81 évènements les plus coûteux.

Une synthèse par régions montre que sur la période d'étude, un total de 66 épisodes se sont produits en Catalogne, où le nombre de victimes s'élève à 21. Le CCS a payé un total de 33,4 millions €2015 d'indemnités pour cause d'inondations sur la période 1996-2015, la Vallée d'Arán étant la région la plus indemnisée, notamment du fait de l'évènement de juin 2013 où les 5 millions €2015 ont été dépassés. En Aragon, un total de 35 épisodes et de 97 victimes a été enregistré, principalement du fait de l'épisode de Biescas auparavant mentionné. Le CCS a payé un total de 15,2 millions €2015 d'euros d'indemnités pour cause d'inondations dans les Pyrénées aragonaises sur la période 1996-2015. Les communes de Biescas, de Benasque et de Jaca dépassent le million d'euros en indemnités, notamment du fait des évènements de Biescas (août 1996), de la Vallée de l'Ésera (juin 2013), de Jaca et de la Vallée de l'Aragon (octobre 2012). 24 épisodes d'inondation se sont

produits dans les Pyrénées navarraises. Une seule victime est à déplorer sur la période étudiée bien que, précédemment, des inondations très graves ont été enregistrées à Baztán. Le CCS a payé un total de 65,8 millions €2015 d'indemnités pour cause d'inondations dans cette région, mais il convient de tenir compte que Pampelune, la capitale, est comprise dans la zone d'étude, ce qui élève de façon significative le coût des dégâts. De fait, il s'agirait d'un cas exemplaire dans l'analyse de risques, où le risque par inondation est très élevé du fait de la haute vulnérabilité, malgré une dangerosité modérée en comparaison à d'autres régions des Pyrénées. Au Pays basque, 16 épisodes d'inondation, avec deux victimes, se sont produits. Le CCS a payé un total de 28,1 millions €2015. Les trois communes au montant d'indemnités le plus élevé ont été Tolosa, Oiartzun et Ibarra, avec 3,1, 3 et 2,9 millions €2015, respectivement.

La région des Pyrénées de Nouvelle-Aquitaine a enregistré 16 événements sur la période d'étude qui ont touché 159 communes. Les Pyrénées d'Occitanie représentent 28,60 % de la zone d'étude, et 1 017 communes ont été affectées avec au moins un événement d'inondation, à la suite de 36 épisodes. En Andorre, le maximum s'est produit dans la commune d'Andorre-la-Vieille avec 27 épisodes d'inondations, suivi de Sant Julià de Lòria avec 18 inondations (rappel : les inondations ordinaires sont également comprises). Les paroisses où le minimum s'est produit sont celles de la partie nord du pays, Ordino, Canillo et Encamp, avec 7, 9 et 12 événements respectivement (Figure 2.11).

## 2.4. Conclusions

Ces 60 dernières années (période 1960-2019) les rivières des Pyrénées ont enregistré une tendance descendante marquée pour les débits moyens, faibles et élevés, tant à l'échelle annuelle que pour la plupart des mois de l'année. La tendance descendante annuelle est notamment conditionnée par les mois d'été et d'automne et, dans une moindre mesure, par les mois de printemps et d'hiver. La variabilité des débits quotidiens, ainsi que le poids des débits hauts sur l'ensemble, montrent aussi une tendance négative. Du point de vue des ressources hydriques, il convient de noter la baisse des débits d'étiage, notamment en été et au début de l'automne. Dans l'ensemble, on observe une grande homogénéité spatio-temporelle des tendances des indicateurs de débit, qui affectent de la même façon toutes les régions des Pyrénées.

À mesure que la période analysée est plus courte et plus proche de l'actualité, les tendances se relâchent ou s'annulent. Pour la période 1990-2019 les tendances à la baisse des débits à la fin de l'été et au début de l'automne se maintiennent dans la plupart des stations de jaugeage, bien qu'à l'échelle annuelle et pour le reste des mois, elles ne soient pas très significatives et qu'aucun schéma spatial clair ne puisse être observé pour la plupart des indicateurs de débit analysés. Les indicateurs de débits faibles sont ceux qui montrent une plus grande persistance des tendances négatives. Ce résultat pourrait être interprété comme un changement de la tendance à long terme, indiquant une certaine stabilisation des régimes de débit. Néanmoins, il convient de prendre en compte l'influence dudit « effet taille » de l'analyse statistique, qui explique qu'à mesure que les séries de données deviennent plus courtes, la probabilité de détecter une tendance s'affaiblit. Il est donc recommandé de rester prudent dans l'interprétation de ce résultat.

L'analyse des niveaux piézométriques a mis en évidence la faible considération des eaux souterraines, ce qui se traduit par des séries de données peu régulières et aux vastes lacunes. Il est certain que, bien que ces dernières années, il semble y avoir un contrôle des niveaux piézométriques dans les Pyrénées plus exhaustif et meilleur, les séries de données ne sont pas suffisamment complètes pour pouvoir réaliser

une analyse de tendances à l'échelle régionale. Toutefois, les eaux souterraines étant le principal facteur de maintien des débits des rivières des Pyrénées à l'époque de l'étiage, il est important de contrôler leur évolution, en tenant également compte du fait qu'une tendance significative à la baisse des débits de surface a été identifiée. C'est pourquoi, il est urgent qu'un plus grand effort soit réalisé dans le contrôle et la maintenance des réseaux de mesure des eaux souterraines, notamment dans des lieux peu influencés par l'extraction (pompage). De même, il serait nécessaire d'ajouter aux réseaux de monitoring existant le contrôle des sources les plus importantes.

Des informations de 181 évènements d'inondation ont été relevées sur la période 1981-2015, dont plusieurs ont affecté plus d'une région, voire même l'ensemble des Pyrénées. La zone orientale a enregistré davantage d'évènements que la zone occidentale, la Catalogne étant la région qui en comptabilise le plus (66), suivie de l'Andorre (46) et de l'Occitanie (36). La région de Nouvelle-Aquitaine est celle qui a enregistré un plus grand nombre d'épisodes catastrophiques, avec six cas sur les 17 au total (soit 35 %), et la commune au plus grand nombre d'épisodes est Bielsa (trois cas catastrophiques). Dans la partie espagnole des Pyrénées, les inondations ont fait 121 morts, et un montant total de 142,5 M €2015 d'indemnités a été payé par le Consortium d'indemnisation d'assurances. De cette somme, 109,6 M €2015 sont dus à 81 évènements qui ont affecté le versant espagnol entre 1996 et 2015, tandis que la différence correspond aux inondations non identifiées. La Navarre est la région qui a le plus reçu en concept de dommages provoqués par des inondations, en raison de l'importance des dégâts causés dans la ville de Pampelune. Les tendances observées dans le nombre d'inondations au cours de la période d'analyse, bien qu'elles indiquent des valeurs positives (augmentation d'évènements), ne sont pas statistiquement significatives.



### ***3. Modélisation du bilan hydrique actuel des Pyrénées (1981-2010)***

---

**Pere Quintana (OE), Santiago Beguería (EEAD-CSIC), Anaïs Barella (OE), Yvan Caballero (BRGM), Roxelanne Cakir (CNRS), Omar Cenobio (OE), Roger Clavera-Gispert (OE), Benoît Dewandel (BRGM), Youen Grusson (CNRS), Guillaume Hevin (BRGM), Jorge Jódar (IGME-CSIC), Luis Javier Lambán (IGME-CSIC), Sandra Lanini (BRGM), Pierre Le Cointe (BRGM), Leticia Palazón (EEAD-CSIC), José Miguel Sánchez Pérez (CNRS), Sabine Sauvage (CNRS)**

---

Afin de connaître le bilan hydrique des Pyrénées, il est nécessaire de recourir à des outils de modélisation, car de nombreuses variables pertinentes ne sont surveillées dans aucun réseau d'observation. Grâce à l'utilisation de modèles, il a été possible d'étudier les différentes composantes du bilan hydrique (flux d'eau et variables d'état), leur répartition géographique, leur saisonnalité et leur évolution temporelle. L'utilisation de divers modèles, aux principes de fonctionnement différents, a également permis d'évaluer l'incertitude associée à la modélisation en soi, montrant qu'il existe d'importantes lacunes qui doivent être améliorées à l'avenir en recourant à de nouvelles sources d'information concernant divers aspects du bilan hydrique (évapotranspiration, couverture neigeuse).

Malgré tout, les modèles ont démontré de bonnes performances dans l'estimation des débits circulants et l'apport total des rivières, celle-ci étant la variable la plus importante pour évaluer les ressources hydriques. La mise en œuvre de ces outils de simulation ouvre la voie à leur utilisation afin d'évaluer les ressources hydriques des Pyrénées dans des scénarios de changement climatique.

---

*Citer comme suit : 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., 2023. Modélisation du bilan hydrique actuel des Pyrénées (1981-2010). Dans (Beguería S., ed.) *Caractérisation des ressources hydriques des Pyrénées : présent et scénarios à venir. Rapports scientifiques du projet PIRAGUA*, vol. 1. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Saragosse, Espagne, 5379.*

<https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14683>

---

## 3.1. Introduction

La superficie continentale est un système complexe qui interagit, à différentes échelles temporelles et spatiales, avec l'atmosphère et le cycle hydrologique mondial. Cette série d'interactions complexes forme le cycle hydrologique continental qui, à son tour, est modifié par l'action de l'homme, également très complexe, par les modifications des couvertures végétales, les utilisations des sols ou la construction d'infrastructures hydrauliques. Le système dispose de divers réservoirs d'eau, qui interagissent les uns avec les autres par des flux. Les principaux réservoirs sont les eaux souterraines, l'humidité du sol, les lacs (naturels ou artificiels), l'eau contenue dans la végétation, l'eau déposée sur les feuilles des arbres (interception foliaire), la neige et le gel (glaciers). Tous ces réservoirs interagissent par des flux d'entrée et de sortie, tels que les précipitations, le ruissellement superficiel et sous-superficiel, l'infiltration, le drainage, la recharge et l'évaporation continentale (évaporation de l'eau du sol, transpiration de la végétation, sublimation de la neige, etc.).

L'observation de ce système complexe est limitée et difficile pour certaines variables. Par exemple, nous pouvons mesurer relativement bien les précipitations, bien qu'uniquement de manière locale et avec une répartition très hétérogène des pluviomètres, notamment dans les zones de montagne. Nous pouvons également observer assez bien le débit des rivières à des points permanents de mesure, bien que toujours insuffisants, mais il n'y a presque pas d'observations de l'humidité du sol, de l'évapotranspiration ou de l'épaisseur de la neige, pour ne donner que quelques exemples. Avoir une vision générale de l'état de l'hydrosystème par des observations est ainsi difficile. L'observation de la Terre depuis l'espace améliore vraiment notre capacité d'observation, permettant des observations relativement fréquentes de grandes zones (mesures spatialisées régulières dans le temps). Cependant, les satellites mesurent la radiation sur différentes bandes et la conversion de ces informations en informations sur des variables physiques, telles que les précipitations, l'humidité du sol ou l'évaporation est difficile et est soumise à de grandes incertitudes, notamment dans certaines variables très importantes telles

que l'évaporation continentale. Il en résulte qu'il est aujourd'hui très complexe de dresser un bilan hydrique sur la base d'observations.

La modélisation est une alternative complémentaire à l'observation. Les modèles sont des programmes informatiques dans lesquels les processus physiques ont été mathématiquement codifiés. Ceci peut se faire de façon simple ou complexe, physique ou conceptuelle, avec différents degrés de discrétisation spatiale. Les modèles reproduisent la nature telle que nous la comprenons ou sommes capables de la codifier mathématiquement. Ils sont limités par notre capacité de description des conditions initiales (état des différents réservoirs du système) et de contour (terrain, couverture végétale, emplois des sols, etc.). Malgré toutes ces limitations, les modèles produisent un bilan hydrique fermé, cohérent entre variables. En outre, ils permettent de faire des expériences que nous ne pourrions pas faire dans la réalité (« Que se passerait-il si... ? »). Les modèles nous servent ainsi à dessiner l'état du système, toujours de façon approximative, contrôler leur évolution et mieux comprendre les processus. Ces modèles sont, bien entendu, vérifiés par rapport aux observations lors des cycles de calibrage et de validation, garantissant qu'ils soient les plus proches possible de la réalité. Malgré cela, les incertitudes continuent à être élevées. Les différents types de modèles ont diverses exigences quant au calibrage. Les modèles conceptuels, tels que SWAT, ont besoin d'être calibrés avec précision. Les modèles plus physiques, tels que SASER, n'ont presque pas besoin d'être calibrés, car les paramètres du modèle ont été liés, pour la plupart, aux propriétés physiographiques des bassins.

## 3.2. Méthodologie

Dans le projet PIRAGUA, nous avons employé différents modèles pour décrire le cycle hydrologique continental des Pyrénées : i) SWAT, un modèle hydrologique conceptuel semi-distribué, ii) SASER, un modèle hydrométéorologique de type physique distribué, RECHARGE, une méthode de calcul simple et distribuée de la recharge potentielle des eaux souterraines, et iii) GIS-Balan, un modèle physique des eaux souterraines, basé sur un système d'informations géographiques. Les trois premiers ont été appliqués sur tout le domaine des Pyrénées (avec quelques petites différences) et le dernier dans des zones où les processus des eaux souterraines sont spécialement importants du fait de leur contexte karstique. L'utilisation de plusieurs modèles, aux différents niveaux de complexité et principes de fonctionnement, nous permet de quantifier l'incertitude des résultats découlant des hypothèses et des erreurs des modèles eux-mêmes. Si des modèles très différents concordent, les résultats seront plus fiables. Comme nous le verrons par la suite, la comparaison entre les sorties des modèles pour différentes composantes du bilan hydrique offre certains éléments de discussion.

SWAT (Gassman et al., 2007) est un modèle semi-distribué, c'est-à-dire qu'il discrétise le domaine spatial de la simulation en zones considérées homogènes quant à leur fonctionnement hydrologique, tenant compte aussi des relations topologiques entre ces unités pour acheminer les flux de surface (débits). Ces unités minimales sont regroupées en sous-bassins qui, dans le cas des Pyrénées, coïncident avec les bassins de drainage des masses d'eau définies par les autorités de gestion. En revanche, SASER est un modèle distribué, c'est-à-dire qu'il simule les processus dans une maille régulière, dans le cas qui nous intéresse ici, de 2,5 x 2,5 km de résolution spatiale. Pour rendre comparables les résultats des deux modèles, nous avons décidé de transférer les résultats de SASER de la maille régulière aux sous-bassins, en faisant la moyenne des valeurs de chacun des points de la maille, qui se trouvent dans chacun de ces sous-bassins. Ce modèle représente une perte d'informations spatiales, mais a l'avantage de permettre la comparaison entre les modèles. RECHARGE travaille aussi sur une maille spatiale régulière, bien que les résultats

ont été ultérieurement agrégés à l'échelle des unités principales hydrogéologiques.

Pour fonctionner, les modèles requièrent des informations sur le forçage météorologique (c'est-à-dire de l'état de l'atmosphère à chaque moment) et des informations physiographiques (couverture végétale, utilisations, texture du sol, topographie, etc.). Chaque modèle a utilisé ses propres sources d'informations physiographiques, mais un même forçage météorologique.

Le modèle SAFRAN (Quintana-Seguí et al., 2008, 2016, 2017; Vidal et al., 2010) a été choisi pour créer une grille régulière de variables météorologiques (température, vent, précipitations et humidité relative), de 2,5 km de résolution sur tout le territoire pyrénéen, couvrant complètement les bassins de l'Èbre, de l'Adour et de la Garonne, et tous les autres bassins qui drainent les Pyrénées. SAFRAN intègre les observations des réseaux d'AEMET et de Météo-France, les associe à une ébauche initiale provenant d'un modèle (ERA-Interim ou ARPEGE) et génère, par un processus d'interpolation optimale prenant en compte les gradients verticaux, une grille régulière qui peut être employée par les modèles. SASER nécessite également des informations des flux de radiation descendante infrarouge et visible, qui ont été prises de la ré-analyse européenne ERA-5. La période temporelle de la base de données SAFRAN couvre la période 1979/80-2013/14 (années hydrologiques) qui est commune aux produits SAFRAN espagnol et français. Cependant, la période de référence choisie pour la réalisation de comparaisons est la période de 30 ans, allant de 1981 à 2010 (années calendaires). Le résultat est la base de données PIRAGUA\_atmos\_analysis (Quintana-Seguí y Le Cointe, 2022).

Ces données ont permis de forcer les modèles hydrologiques précédemment mentionnés. SASER a simulé le domaine complet (y compris l'Adour, la Garonne, etc.). SWAT a simulé un domaine comprenant tous les sous-bassins des masses d'eau, qui traversent le domaine pyrénéen.

RECHARGE a calculé les précipitations effectives sur le domaine complet employé par SASER et la recharge potentielle à l'échelle de masses d'eau souterraines (Figure 3.1). Ces dernières sont définies comme des zones homogènes du point de vue hydrogéologique (Figure 3.2), à l'échelle spatiale définie pour les pays de l'Union européenne (EIONET). GIS-Balan a été appliqué à certains systèmes hydrogéologiques concrets au comportement spécifique dû à la présence de systèmes karstiques.

Les résultats des simulations du bilan hydrique des Pyrénées à l'aide de ces modèles ont été collectés dans la base de données PIRAGUA\_hydro\_analysis (Beguería et al., 2022a). Tous les résultats présentés dans ce chapitre peuvent être consultés et téléchargés sur le géoportail de l'Observatoire pyrénéen du changement climatique (OPCC, 2022), dans la section Couches/Bilan hydrique/Actuel. Il est également possible de réaliser des consultations plus détaillées dans la section Analyses.

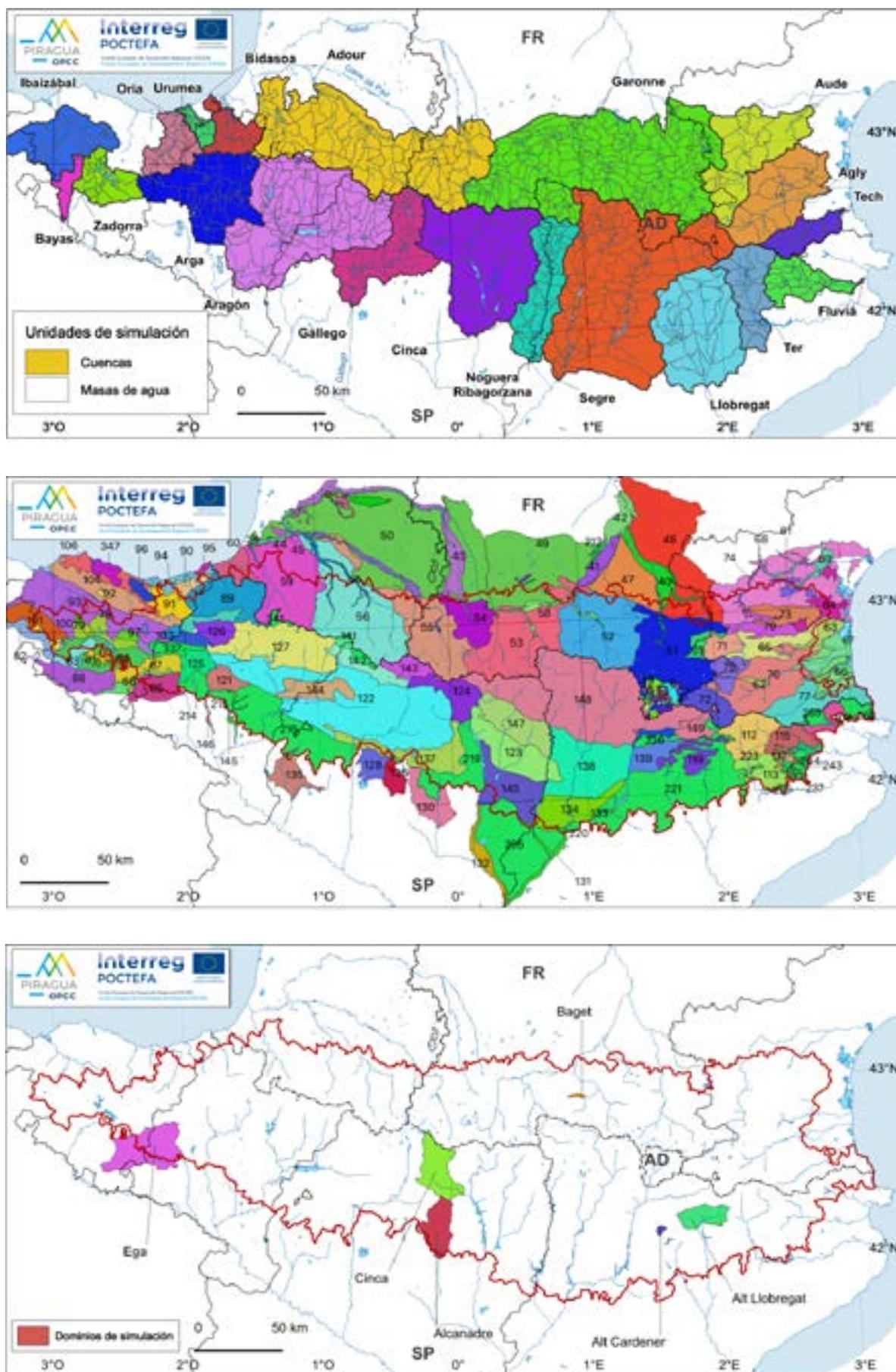


Figure 3.1. Unités spatiales pour l'extraction de résultats de la modélisation : bassins hydrographiques et superficies versantes à des masses d'eau employées dans SWAT et SASER (carte supérieure) et masses d'eau souterraine employées dans RECHARGE (carte inférieure).

(Source: PIRAGUA\_hydro\_analysis.)

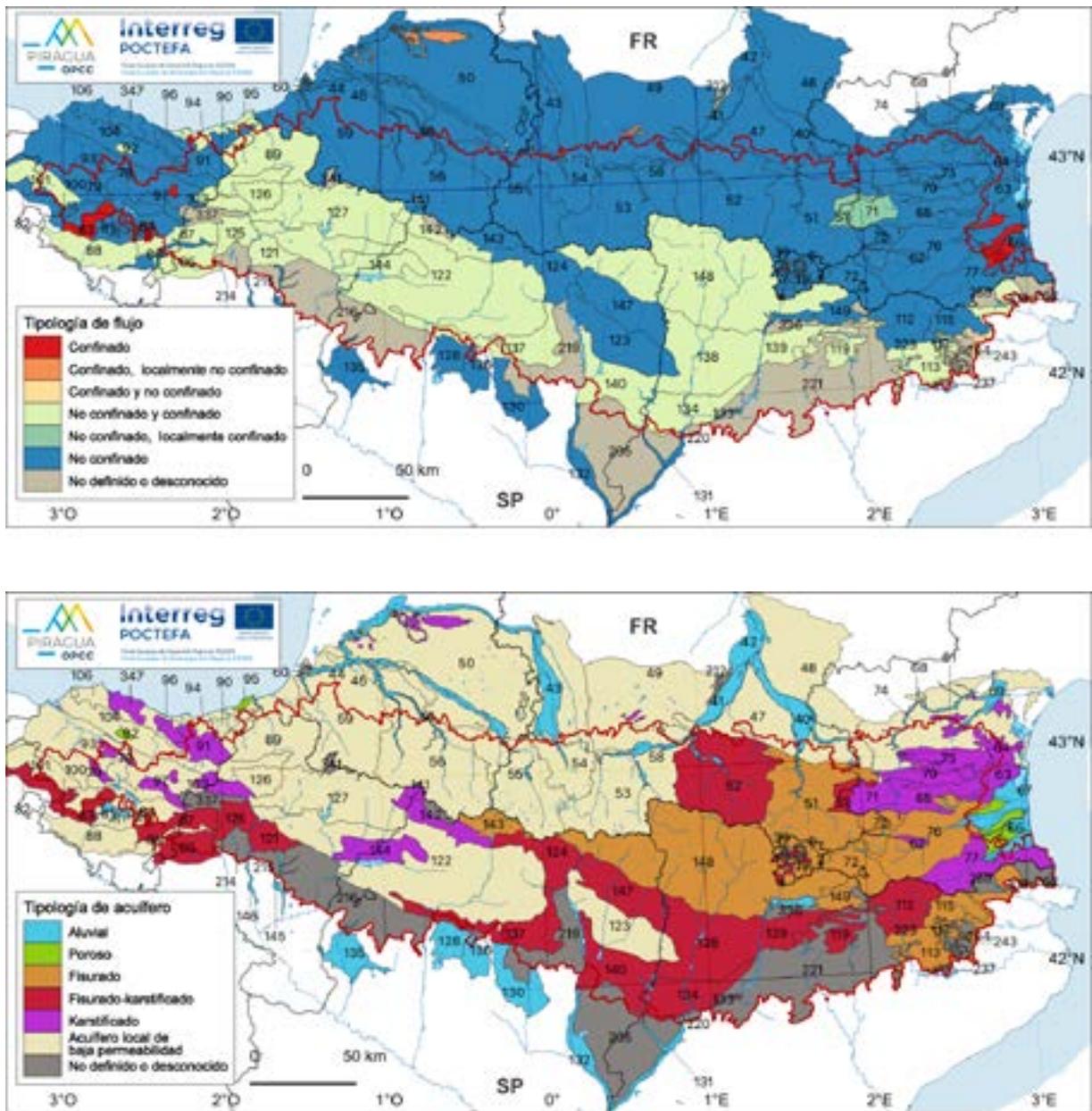


Figure 3.2. Typologie de masses d'eau souterraines des Pyrénées en fonction de leurs conditions de flux et de leurs caractéristiques lithologiques dominantes.

(Source: PIRAGUA\_resources.)

## 3.3. Résultats

Nous décrivons dans cette section les principaux éléments du bilan hydrique au cours de la période de référence.

### 3.3.1. Principales variables climatiques : précipitations et température

Les précipitations et la température sont les deux principales variables climatiques pour le forçage des modèles de simulation du bilan hydrologique. Bien que les données de départ SAFRAN soient les mêmes, chaque modèle les intègre d'une façon différente. SASER travaille sur une maille régulière de 2,5 km de résolution spatiale, SWAT travaille sur des sous-bassins et prend la valeur du point de maille le plus proche du centre de celle-ci. Nous représentons ici, dans le cas de SWAT, exactement ce que le modèle intègre et, dans le cas de SASER, la moyenne de tous les points de maille qui tombent dans chaque sous-bassin, afin de comparer plus aisément les cartes. De cette façon, nous voyons que le fait qu'un modèle fonctionne sur une maille (modèle distribué) et l'autre sur des bassins (modèle semi-distribué) signifie que la manière d'utiliser les champs météorologiques est différente, ce qui conduit à certaines différences dans les données de forçage qui peuvent ensuite être propagées au reste des composantes simulées du bilan. Dans le cas de RECHARGE, les calculs de bilan hydrique se font à la même échelle que celle pour SASER, les résultats étant présentés à l'échelle des masses d'eaux souterraines.

La Figure 3.3 présente la carte de la température moyenne pour la période de référence, générée par SAFRAN, telle qu'intégrée par SWAT, c'est-à-dire discrétisée en sous-bassins correspondant aux principales masses d'eau. La répartition spatiale des températures moyennes est, comme il ne pourrait en être autrement, très similaire à celle présentée dans la section du contexte climatique (Figure 1.3), bien que les sources de données originales soient différentes (maille observationnelle du projet CLIMPY, d'une part, et résultat de l'assimilation des observations avec le modèle SAFRAN, d'autre part). La

figure permet également d'observer l'effet de la discrétisation spatiale réalisée par le modèle SWAT.

Les cartes de précipitations employées par SWAT, SASER et RECHARGE sont présentées dans la Figure 3.4. De nouveau, nous observons des similitudes par rapport à la maille de précipitations calculée par le projet CLIMPY (Figure 1.6). Il existe de légères différences entre les deux cartes, dues à la façon des différents modèles d'intégrer les données, qui peuvent avoir un certain impact sur la modélisation.

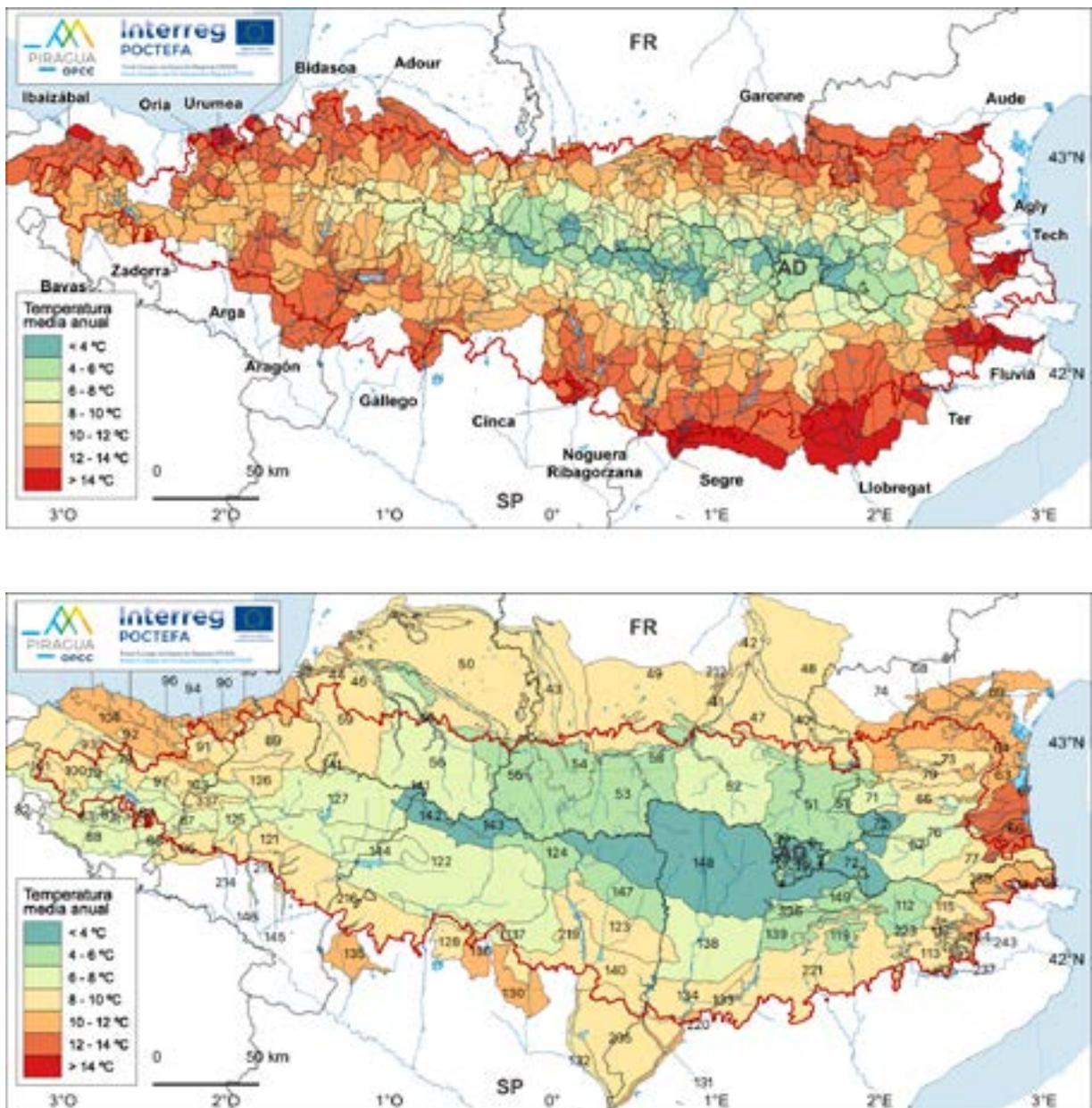


Figure 3.3. Température moyenne annuelle sur la période 1981-2010 : modélisation SWAT (carte supérieure) et RECHARGE (carte inférieure).

(Source: PIRAGUA\_hydro\_analysis.)



### 3.3.2. Flux hydriques

Les modèles hydrologiques permettent de simuler, à partir des précipitations, les principaux flux hydriques qui se produisent dans chaque unité d'étude (cellule ou sous-bassin), ainsi que les variations dans les diverses réserves d'eau qui peuvent être présentes. L'un des flux les plus importants du bilan hydrique est l'évapotranspiration, qui fait référence au transfert d'eau du sol à l'atmosphère, que ce soit par évaporation directe ou par l'effet de la transpiration végétale. La Figure 3.5 présente les cartes d'évapotranspiration moyenne annuelle calculées pour les trois modèles. Ce qui saute tout d'abord aux yeux est que les différences entre modèles sont importantes, l'évapotranspiration simulée par SWAT étant beaucoup plus faible que celle simulée par SASER, RECHARGE étant plus proche du premier que du second. En outre, le schéma spatial est différent. En tout cas, l'évapotranspiration est plus grande au nord-est du domaine et plus faible au sud-est, ce qui est cohérent par rapport aux cartes de précipitations (plus élevées au nord-est), mais il existe une grande incertitude dans la zone centrale et la plus élevée du domaine.

Les lecteurs peuvent se surprendre que les modèles ayant une si longue tradition présentent des différences aussi notables. Ces différences sont principalement dues au fait que le flux d'évapotranspiration est très difficile à valider, en général, et encore plus dans les zones de montagne, où les observations sont pratiquement absentes. Ainsi, il s'agit probablement de l'un des processus les moins validés dans les simulations et, par conséquent, le plus incertain, malgré sa grande importance dans le bilan hydrique.

Bien qu'il ne s'agisse pas d'un flux hydrique, il est intéressant de présenter ici des résultats relatifs au stress hydrique ou indice d'aridité, qui est défini comme le quotient entre l'évapotranspiration réelle et l'évapotranspiration potentielle (Figure 3.6). Dans des climats humides où l'eau est abondante, il est fréquent que l'indice d'aridité atteigne des valeurs proches de l'unité, alors que dans des climats plus secs, il existe un désajustement entre l'évapotranspiration

potentielle et la réelle (car il y a pénurie d'eau), donnant lieu à des valeurs bien plus faibles.

Comme nous l'avons vu, l'évapotranspiration simulée par SASER est bien supérieure à celle simulée par SWAT et RECHARGE, et ces différences se propagent sur la carte d'aridité. Outre les différences dans l'évapotranspiration réelle, l'évapotranspiration potentielle est calculée par différentes méthodes : tandis que pour la simulation SWAT a été employée l'approximation de Hargreaves, qui n'a besoin que de la température pour estimer l'évapotranspiration potentielle, pour SASER et RECHARGE, a été employée la méthode de Penman-Monteith qui utilise la radiation, l'humidité relative, la température et la vitesse du vent. L'aridité résultante est donc différente dans les trois cas, bien que RECHARGE et SASER aient des schémas spatiaux semblables, qui diffèrent de celui de SWAT. Les trois modèles présentent un schéma spatial d'aridité où le sud et l'est sont plus arides que l'ouest et le nord. Néanmoins, SWAT, qui est le plus aride des trois, présente une structure spatiale différente, les zones les plus élevées étant plus arides que l'arc environnant. Il présente également des différences importantes dans les bassins plus à l'ouest.

La Figure 3.7 présente le flux de dégel ou de fusion nivale. Logiquement, les trois modèles produisent un plus grand dégel dans les zones plus élevées du domaine, bien que SWAT semble produire plus de dégel que SASER. Bien que SASER intègre les précipitations solides (neige précipitante) directement de SAFRAN, SWAT réalise sa propre estimation de l'enneigement en fonction des précipitations, de la température et de la répartition altitudinale dans chaque sous-bassin, ce qui justifie les différences entre les deux modèles. Il semble également que SASER perde plus de neige par évaporation que SWAT, qui la perd plus par dégel. Comme dans le cas de l'évapotranspiration, il est très difficile de valider cette composante du bilan hydrologique. C'est pourquoi la différence entre les deux modèles peut nous servir à mesurer l'incertitude associée à ce type de simulations.

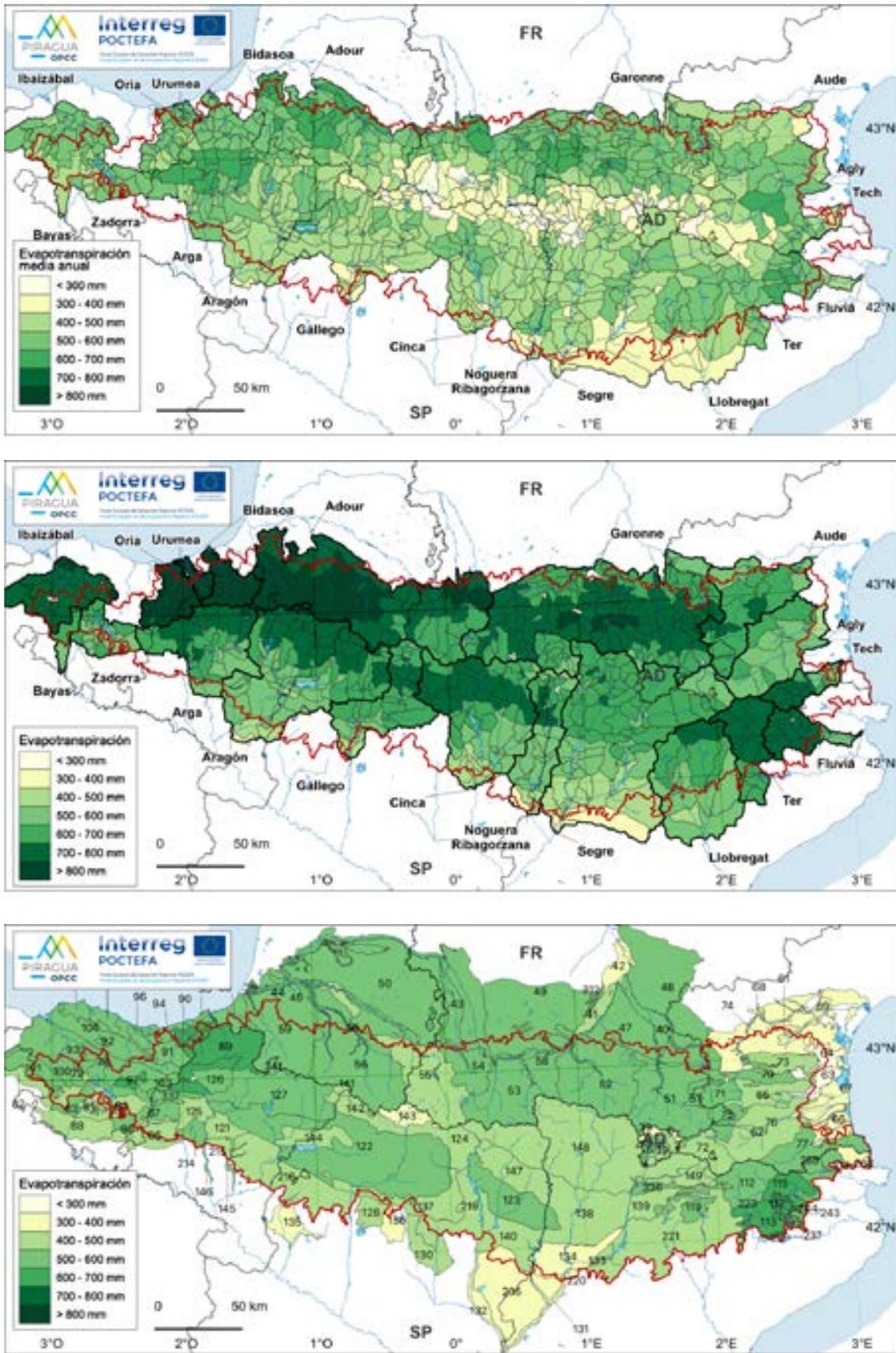


Figure 3.5. Évapotranspiration moyenne annuelle sur la période 1981-2010 : modélisation SWAT (carte supérieure) et SASER (carte inférieure).

(Source: PIRAGUA\_hydro\_analysis.)

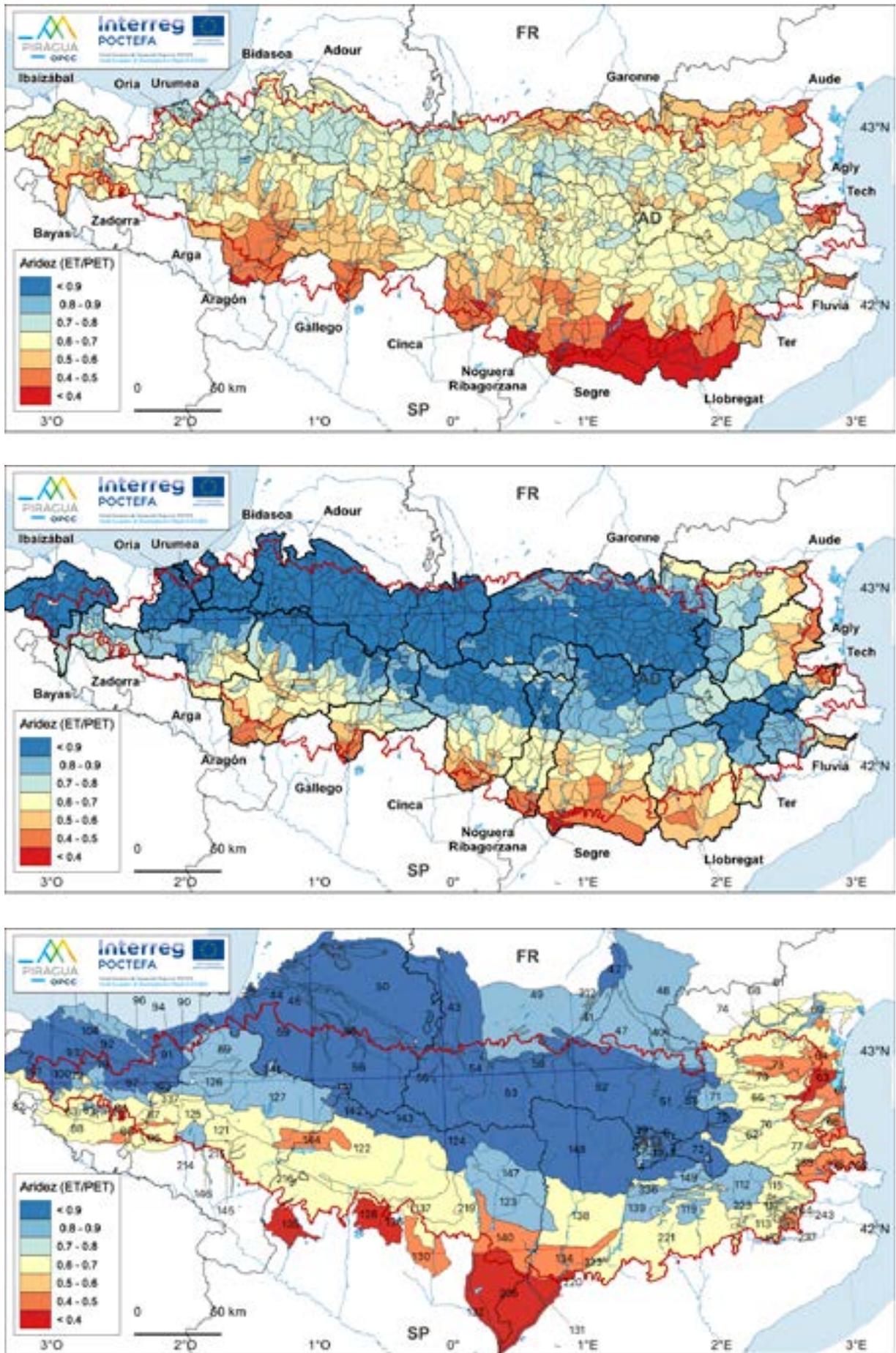


Figure 3.6. Indice d'aridité (ratio entre évapotranspiration réelle et potentielle) sur la période 1981-2010 : modélisation SWAT (carte supérieure) et SASER (carte inférieure).

(Source: PIRAGUA\_hydro\_analysis.)

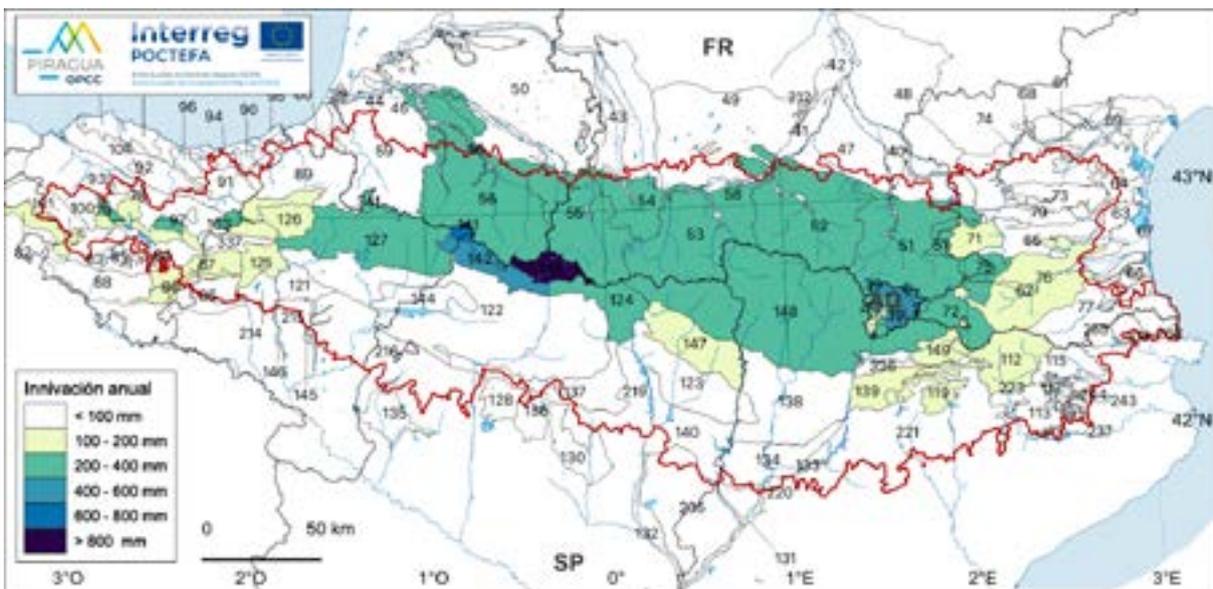
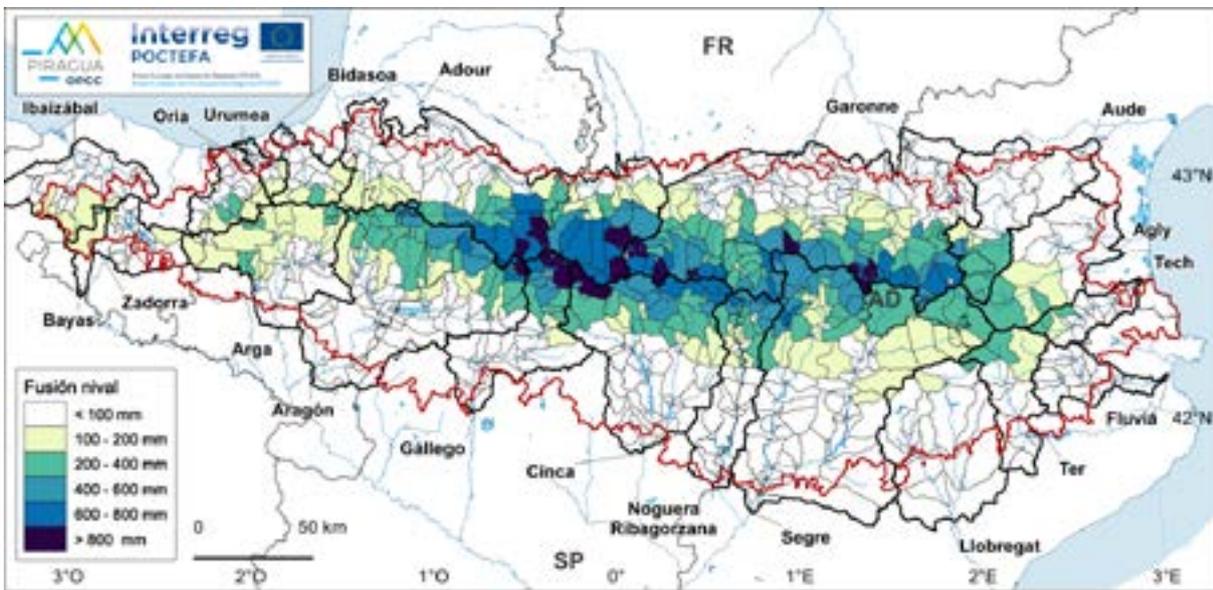
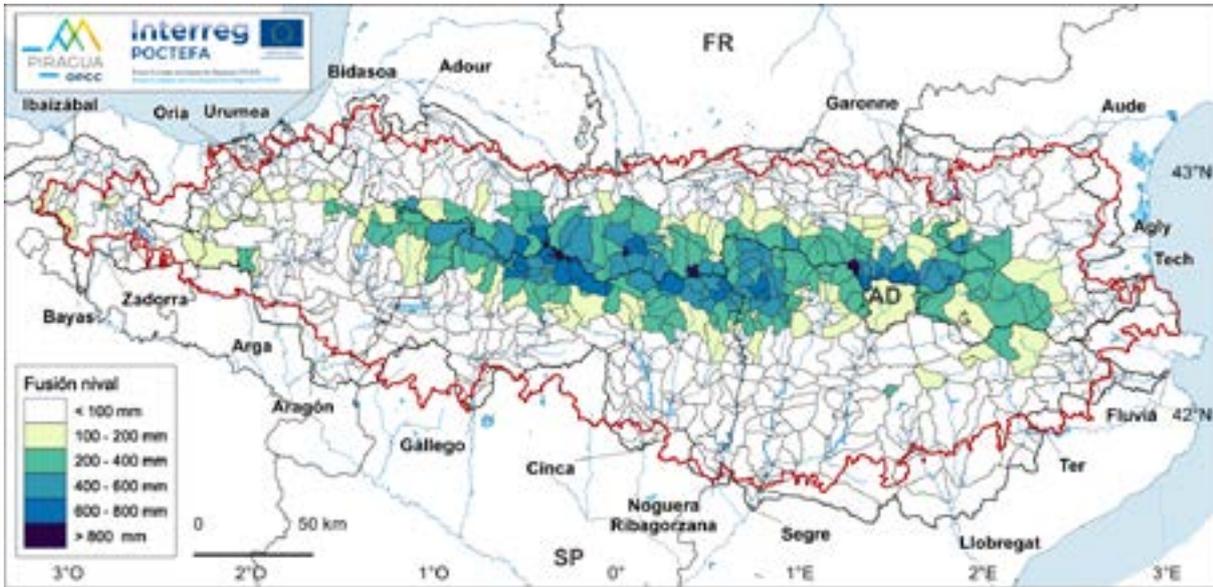


Figure 3.7. Fusión nivale moyenne annuelle sur la période 1981-2010 : modélisation SWAT (carte supérieure) et SASER (carte inférieure).

(Source: PIRAGUA\_hydro\_analysis.)

La recharge de l'aquifère profond est un autre des principaux flux du bilan hydrique. Ce flux n'est pas pris en compte dans le modèle SASER, mais il l'est dans le modèle SWAT, une fois résolus les flux de l'aquifère connecté (capable de réalimenter tant le sol par le processus de « évaporation » que le cours d'eau) et en fonction de certaines valeurs de seuil fixées par calibrage. La Figure 3.8 présente la recharge moyenne annuelle, qui oscille entre les valeurs très basses (5-10 mm) dans le secteur oriental et méridional de la chaîne et des valeurs moyennes (50 mm).

Dans la Figure 3.9 sont présentés les flux annuels de recharge potentielle à l'échelle des masses d'eau souterraine calculés par RECHARGE. La recharge potentielle est calculée à partir du flux de précipitations efficaces calculé sur la grille de SASER. Les précipitations efficaces correspondent à la part des précipitations qui ne sont pas retenues par le sol et sont utilisées par la végétation, et qui se répartissent entre le flux superficiel et la recharge potentielle. La répartition entre les deux flux dépend des caractéristiques hydrogéologiques des masses d'eau souterraine. C'est pourquoi la recharge potentielle est calculée à son échelle spatiale.

Enfin, la dernière figure liée aux flux est celle du flux de ruissellement total (Figure 3.10), c'est-à-dire l'eau qui est finalement apportée dans chaque sous-bassin au lit de la rivière. Le ruissellement total est le résultat de tous les autres processus de partition des précipitations et présente, logiquement, des différences entre les modèles, car les différences que nous observons se propagent dans les autres processus (notamment l'évapotranspiration). Dans ce cas, SWAT, qui évapotranspire moins, produit un plus grand ruissellement total. La structure spatiale de cette variable est, néanmoins, très similaire entre les modèles. De fait, elle est plus analogue que dans le cas de l'évapotranspiration. Comme prévu, plus un bassin est élevé, septentrional et oriental, plus la production totale de ruissellement est élevée.

Étant donnée l'importance du flux de fusion nivale dans la génération de ruissellement dans les Pyrénées, il convient de terminer cette section par des cartes qui reflètent la contribution moyenne de la fusion au ruissellement total (Figure 3.11). Comme nous pouvons le constater, la simulation

avec SASER assigne une bien plus grande importance à la fusion nivale que SWAT, ce qui peut avoir d'importantes répercussions tant dans la simulation du régime saisonnier que dans les simulations de scénarios futurs.

### 3.3.3. Variables d'état

Dans cette section sont représentées les principales variables d'état, qui correspondent aux réservoirs d'eau du système. Nous nous concentrons ici sur les deux réservoirs principaux, l'humidité du sol et la couverture neigeuse.

La Figure 3.12 présente l'humidité moyenne du sol selon les modèles. Les figures ne sont pas directement comparables, car les cartes de SWAT et de RECHARGE sont en millimètres (contenu volumétrique d'eau dans le sol, très dépendant de la profondeur du sol), tandis que SASER présente la variable en termes relatifs ( $m^3$  d'eau par  $m^3$  de sol) et, part conséquent, indépendants de la profondeur du sol. Toutefois, nous voyons que le schéma spatial diffère entre les trois modèles. Avec SWAT, les humidités du sol les plus élevées se concentrent dans les sous-bassins les plus élevés et les plus au nord. Avec SASER, les bassins présentant la plus grande humidité du sol sont ceux situés à l'ouest du domaine. Avec RECHARGE, les bassins les plus humides sont ceux situés plus au nord. Avec RECHARGE, les bassins du sud-est (nord-est de la Catalogne) semblent très secs, un schéma avec certaines similitudes avec celui de SASER, mais pas autant avec celui de SWAT. Au contraire, SWAT et RECHARGE simulent des valeurs d'humidité des sols faibles et similaires dans la zone sud-ouest, alors que dans SASER elles apparaissent plus humides.

En résumé, la simulation de la variable humidité du sol est celle qui présente le plus de différences entre les trois modèles, ce qui indique qu'il s'agit d'un facteur important d'incertitude dans la simulation.

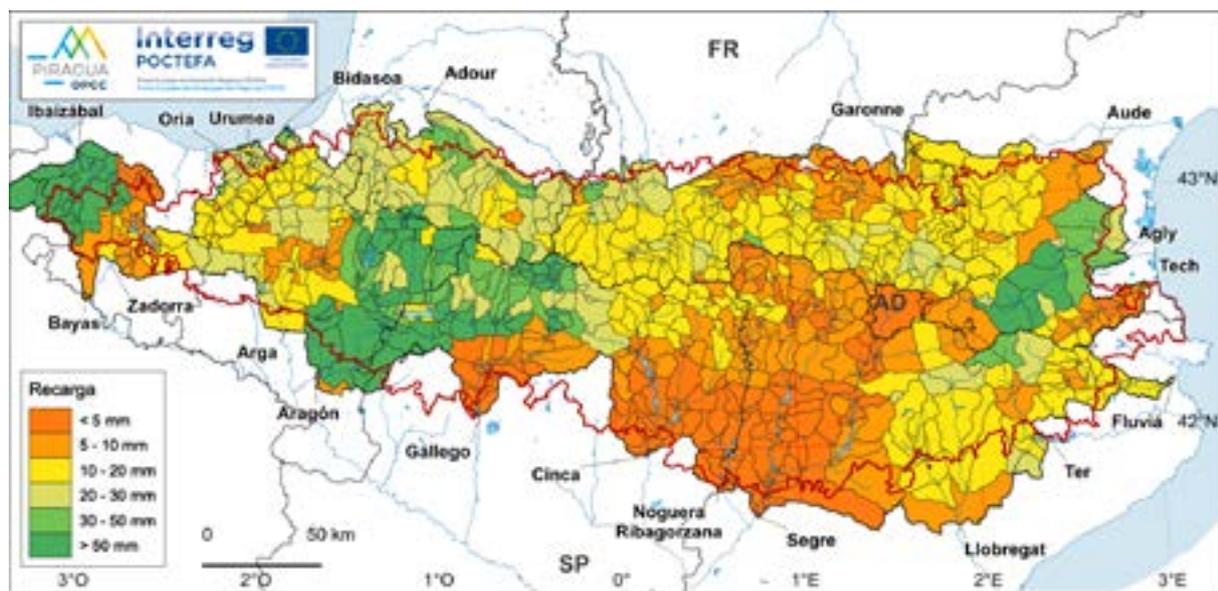


Figure 3.8. Recharge moyenne annuelle sur la période 1981-2010 : modélisation SWAT.

(Source: PIRAGUA\_hydro\_analysis.)

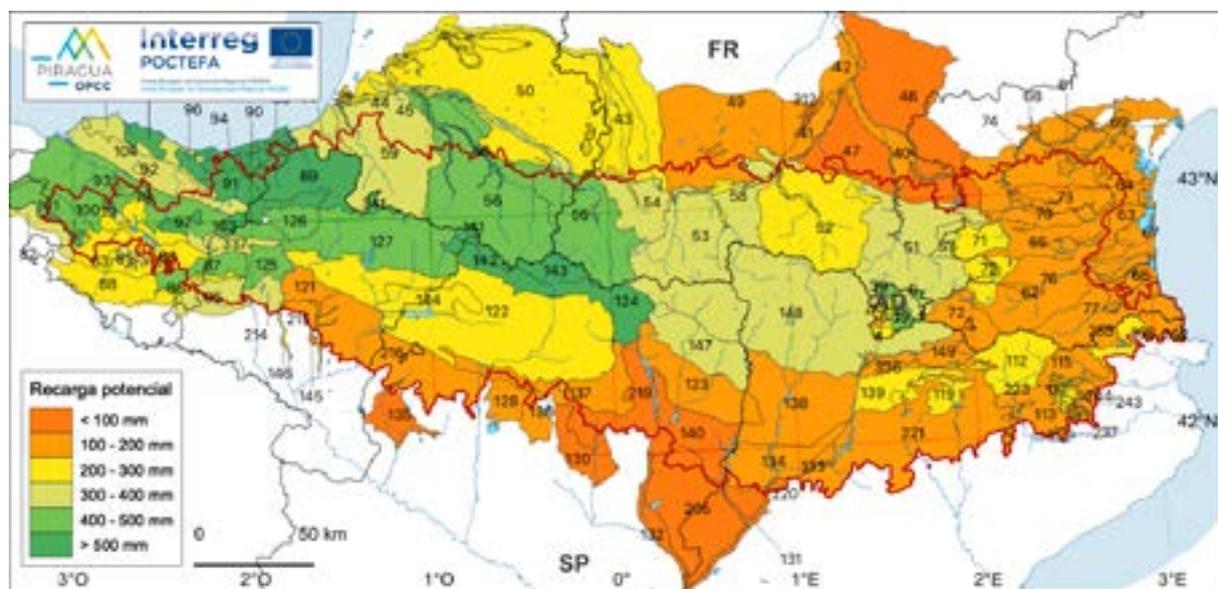


Figure 3.9. Recharge annuelle potentielle sur la période 1981-2010 : modélisation RECHARGE.

(Source: PIRAGUA\_hydro\_analysis.)

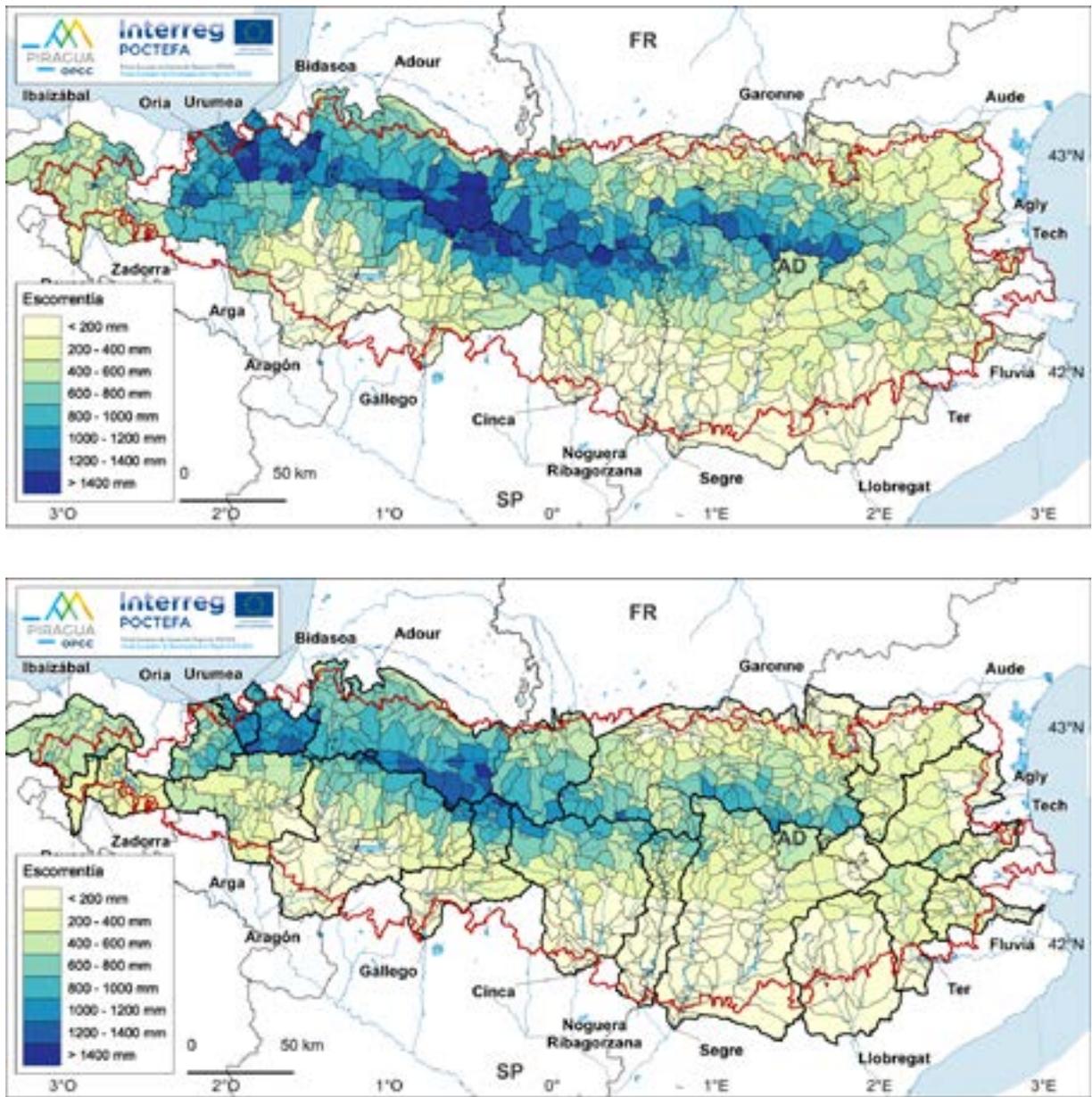


Figure 3.10. Génération de ruissellement annuel sur la période 1981-2010 : modélisation SWAT (carte supérieure) et SASER (carte inférieure).

(Source: PIRAGUA\_hydro\_analysis.)

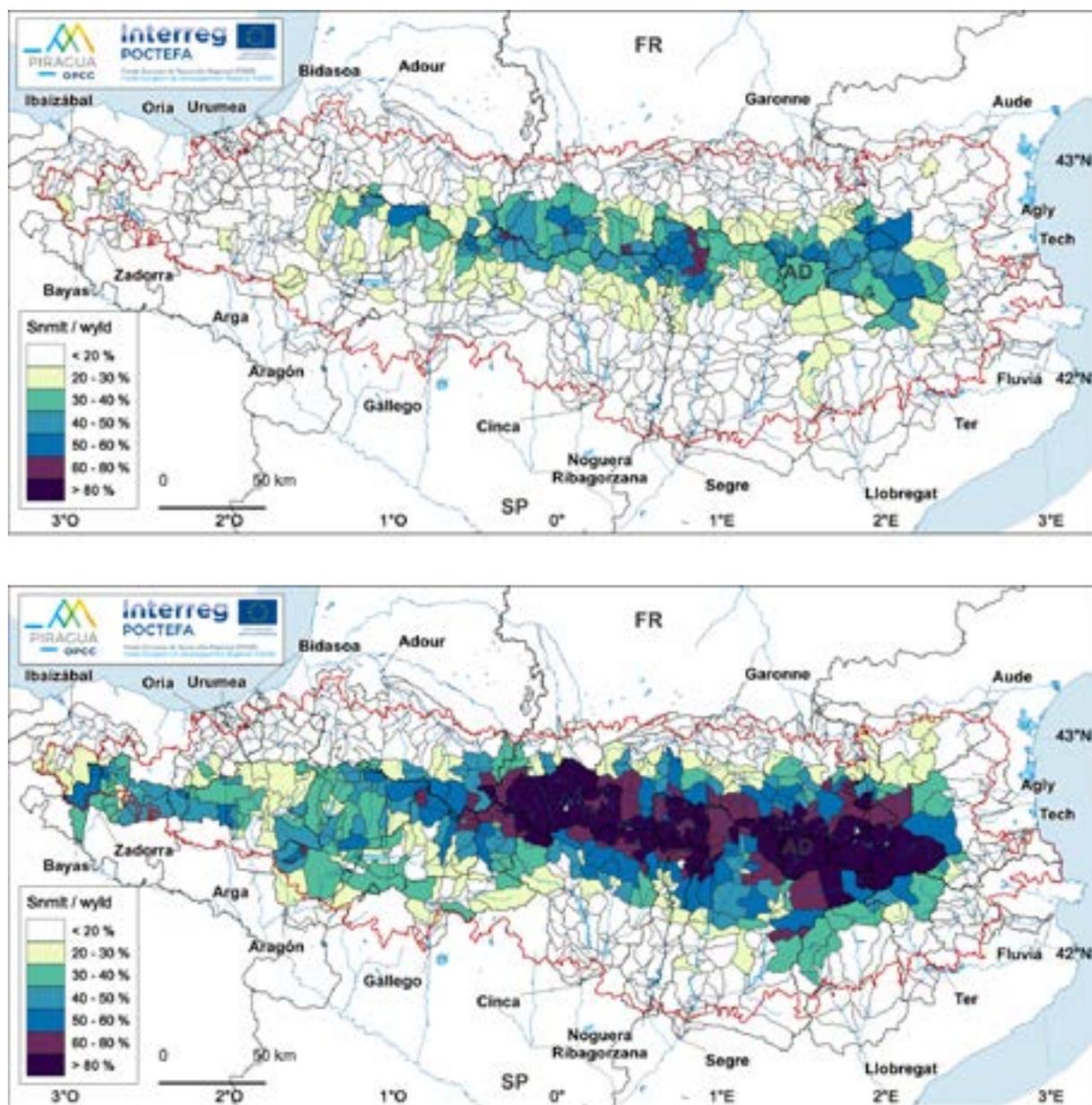


Figure 3.11. Génération de ruissellement annuel sur la période 1981-2010 : modélisation SWAT (carte supérieure) et SASER (carte inférieure).

(Source: PIRAGUA\_hydro\_analysis.)

Le second réservoir d'eau que nous présentons est la couverture de neige moyenne, exprimée en millimètres d'eau (Figure 3.13). Nous avons vu auparavant que SASER évapotranspire plus que SWAT et que, par contre, SWAT génère plus de dégel. La couverture neigeuse moyenne est aussi plus importante dans SWAT, car la neige s'évapore moins et reste plus longtemps au sol. La structure spatiale des deux modèles est semblable, concentrée sur les bassins les plus élevés, bien qu'il existe des différences importantes au niveau du sous-bassin. Par exemple, les différences dans la Vallée d'Arán sont très notables.

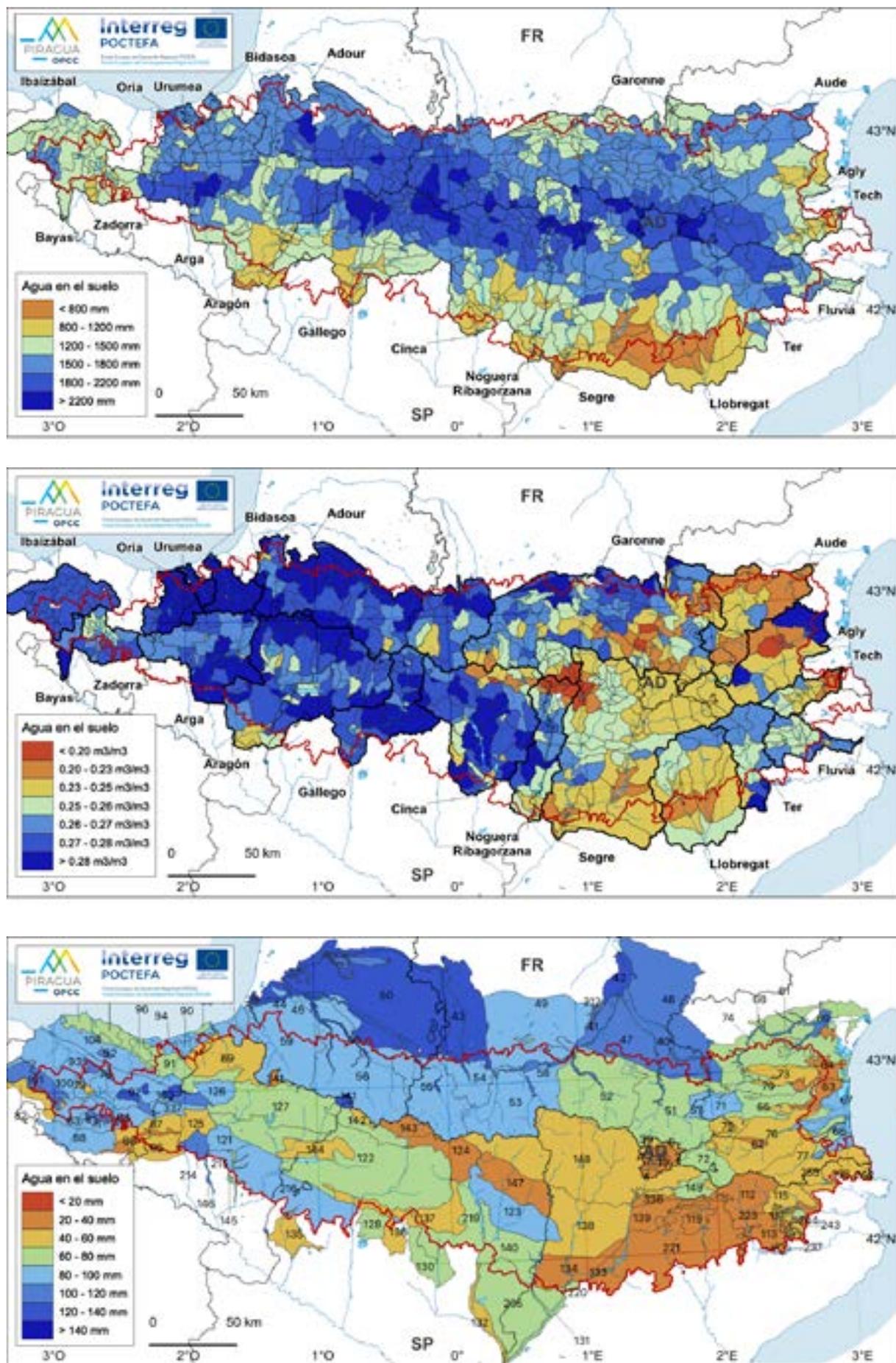


Figure 3.12. Eau dans le sol (moyenne annuelle) sur la période 1981-2010 : modélisation SWAT (carte supérieure) et SASER (carte inférieure). Observez la différence dans les unités.

(Source: PIRAGUA\_hydro\_analysis.)

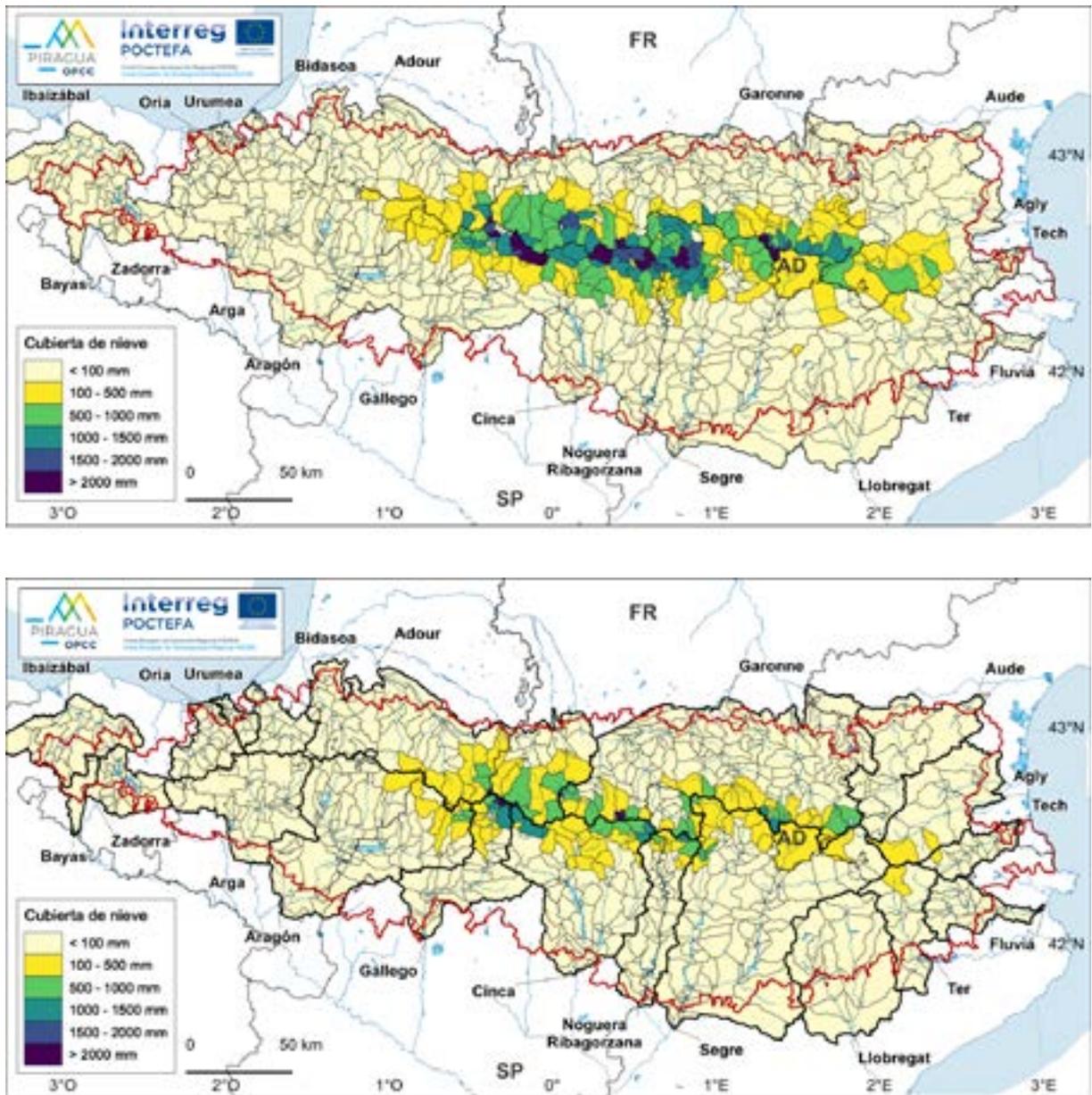


Figure 3.13. Couverture neigeuse (équivalent moyen en eau) sur la période 1981-2010 : modélisation SWAT (carte supérieure) et SASER (carte inférieure).

(Source: PIRAGUA\_hydro\_analysis.)

### 3.3.4. Contribution hydrique

La carte de contribution annuelle présente le débit simulé dans chacune des masses d'eau (tronçons de rivières) correspondant aux sous-bassins (Figure 3.14). De fait, il ne s'agit pas du ruissellement total généré dans ce sous-bassin, mais du cumul du ruissellement au fur et à mesure qu'il passe dans le réseau hydrologique. Par conséquent, les bassins qui se trouvent en aval présentent de plus grandes contributions que ceux qui se trouvent en amont. Il convient de préciser

que les débits simulés correspondent aux débits naturalisés, c'est-à-dire que nous ne considérons ni l'action de régulation ni l'extraction d'eau du débit réalisée par l'homme, car la gestion hydraulique n'a pas été considérée dans la simulation.

Il convient de noter la similitude des cartes de contribution de débit annuel produits par les deux modèles, bien que SWAT tende à présenter des valeurs plus hautes que SASER, ce qui est cohérent avec la plus grande génération de ruissellement que présente SWAT.

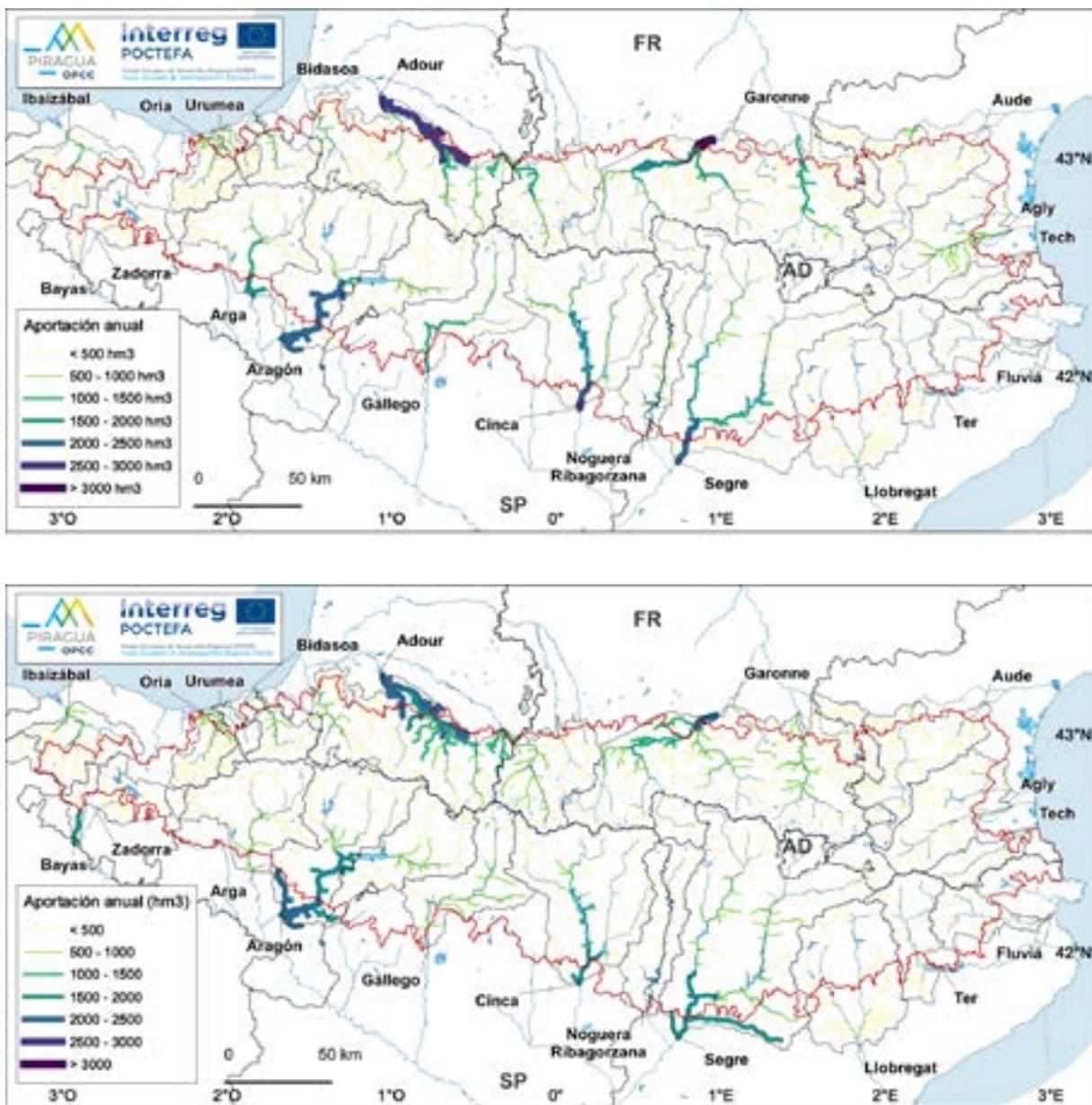


Figure 3.14. Contribution annuelle de débit superficiel sur la période 1981-2010 : modélisation SWAT.

(Source: PIRAGUA\_hydro\_analysis.)

### 3.3.5. Comparaison entre modèles

Nous avons vérifié dans les sections précédentes qu'il existe d'importantes différences entre les flux simulés par les différents modèles. C'est pourquoi nous avons réalisé une comparaison plus en profondeur entre eux.

Les principaux flux de SWAT et de SASER sont comparés dans la Figure 3.15. Dans les figures, chaque point représente un sous-bassin et sa position indique la valeur du flux tel que le simule SWAT (axe vertical) et SASER (axe horizontal). S'il n'existe pas de biais (tendance systématique à sous-estimer ou à surestimer), les points tendent à se situer autour de l'axe diagonal. S'il existe un biais, les points tendent à se situer au-dessus ou au-dessous de la ligne (en fonction du signe du biais). Plus large est la zone occupée par les points, plus grande est la différence entre les deux modèles. Et plus étroite est la bande, plus grande est la similitude.

Regardons tout d'abord le premier panneau de la Figure 3.15, où sont comparés les résultats des précipitations (PRECIP). Comme nous l'avons déjà commenté auparavant, les précipitations représentent une variable de contour ou d'entrée des modèles, et nous avons utilisé celles de SAFRAN dans les deux cas, bien que les deux modèles intègrent les données de façon différente, car l'un est distribué (SASER) et l'autre semi-distribué (SWAT). Par conséquent, il existe certaines différences. Dans SWAT, il y a 1,9 % plus de précipitations en moyenne que dans SASER, bien que la corrélation entre les deux modèles soit très élevée ( $r = 0,97$ ). La différence quadratique moyenne (qui donne plus d'importance aux divergences élevées) est de 97,3 mm annuels, une valeur relativement haute si nous prenons en compte que les précipitations annuelles oscillent entre 500 et 2 000 mm annuels. Ces différences d'entrée significatives seront amplifiées par les modèles dans les flux de sortie comme nous le verrons par la suite.

Nous allons tout d'abord aborder l'évapotranspiration (ET) qui, comme nous l'avons déjà vu auparavant, présente de plus grandes différences. Nous observons que SWAT évapotranspire beaucoup moins que SASER (27 % de moins en moyenne) et que le schéma spatial n'est pas très similaire ( $r = 0,51$ ). La différence quadratique moyenne est de 206 mm annuels, ce qui est une valeur élevée. Ce résultat nous indique qu'à l'avenir, il faudra travailler sur l'amélioration des flux d'évaporation des modèles.

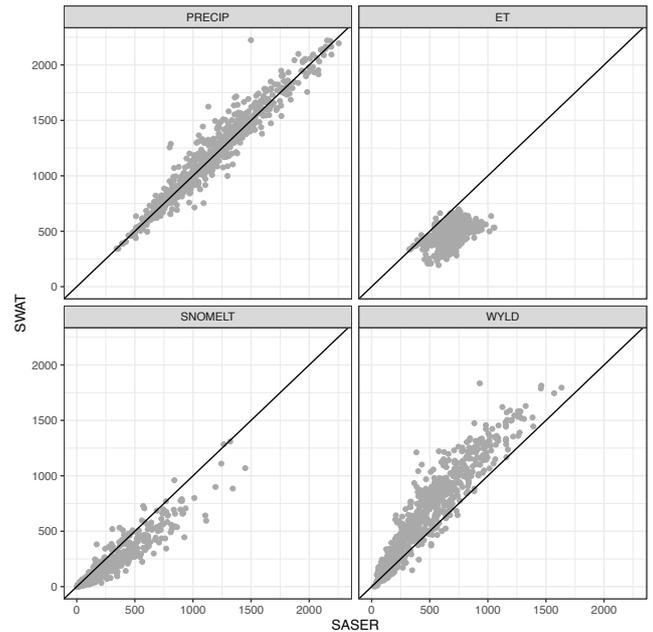


Figure 3.15. Comparaison du schéma saisonnier des principaux flux simulés par SWAT et SASER : précipitations (PRECIP, mm), évapotranspiration (ET, mm), fusion nivale (SNOMELT, mm) et génération de débit (WYLD, mm).

(Source: PIRAGUA\_hydro\_analysis.)

La génération de ruissellement total annuel (WYLD) présente moins de différences que l'évapotranspiration, au moins en ce qui concerne le schéma spatial ( $r = 0,95$ ), bien que le biais soit élevé (SWAT produit 34,9 % plus de ruissellement en moyenne) et la différence quadratique est de près de 200 mm annuels. Comme il ne pouvait en être autrement, le biais et l'erreur quadratique sont conformes aux valeurs de l'évapotranspiration, car les deux modèles sont conservateurs. C'est pourquoi les différences dans une composante du bilan hydrique doivent être compensées par les autres flux.

Enfin, comparons le flux de fusion nivale

(SNOMELT). SASER fond 32,9 % plus de neige que SWAT en moyenne. Les schémas spatiaux sont très similaires. Ce dernier n'est pas surprenant, car la répartition spatiale de cette variable dépend beaucoup du relief et des précipitations totales ; et les deux variables sont très similaires dans les deux modèles.

Si nous observons le régime mensuel des flux (aspect important mais que nous n'avons pas considéré jusqu'alors en raison de la nécessité de maintenir la taille du chapitre à une valeur raisonnable), nous pouvons vérifier comment les différences observées ont aussi un impact sur la saisonnalité des flux (Figure 3.16).

nivale, le rythme saisonnier est similaire entre les deux modèles, sauf que les valeurs sont plus élevées dans SASER, comme nous l'avons vu auparavant. Pour sa part, la génération de débit indique un schéma notamment aux mois d'avril et de mai, où SWAT présente un pic de débit qui ne se reflète pas de façon si marquée dans SASER.

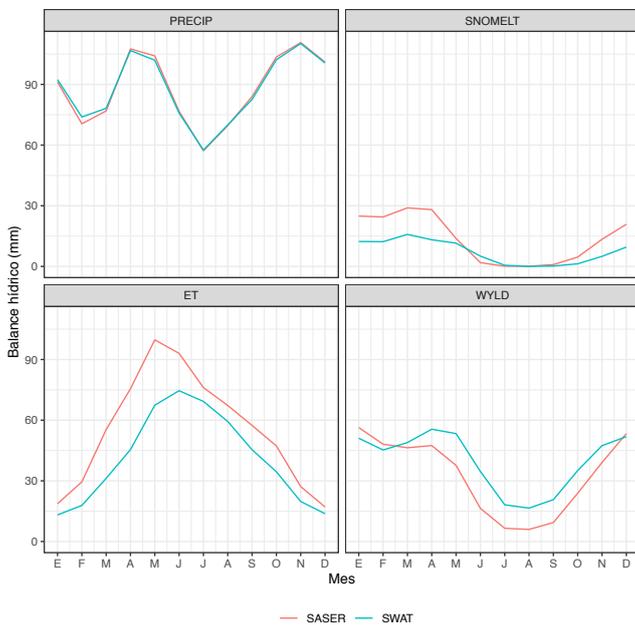


Figure 3.16. Comparaison du schéma saisonnier des principaux flux simulés par SWAT et SASER) : précipitations (PRECIP, mm), évapotranspiration (ET, mm), fusion nivale (SNOMELT, mm) et génération de débit (WYLD, mm).

(Source: PIRAGUA\_hydro\_analysis.)

La figure présente des valeurs moyennes sur tout le domaine de la simulation, mais permet de tirer certaines conclusions. Ainsi, tandis que le schéma saisonnier des précipitations n'est pas affecté, les autres flux présentent certaines différences importantes. Dans le cas de l'évapotranspiration, nous pouvons observer non seulement que SASER simule un plus grand flux, mais qu'il existe aussi une avance saisonnière avec un pic au mois de mai, alors que dans SWAT, la saison de croissance débute plus lentement et le pic est atteint au mois de juin. Dans le cas de la fusion

Enfin, dans la Figure 3.17, deux indicateurs de rendement des deux modèles sont comparés afin de simuler le débit, par la comparaison des débits mensuels simulés et observés dans un ensemble de saisons de jaugeage de référence. La statistique KGE fournit une mesure globale de rendement, qui associe des informations sur la corrélation, le biais et la variabilité entre les valeurs prédites et observées. La statistique PBIAS est un indicateur de biais relatif ou de déviation systématique entre les valeurs prédites et observées, et est exprimée en pourcentage. Chaque point de la figure représente une saison de jaugeage différente. La période comparée est 2006-2013, qui est la période de validation utilisée dans le modèle SWAT (étant donné que SWAT utilise comme période de calibrage les débits observés sur la période 1981-2006, il ne serait pas approprié d'intégrer ces données dans la comparaison ; SASER ne se calibre pas en utilisant des observations de débit).

observés, puisque nous avons vu que SWAT produit plus de ruissellement que SASER. Un fait curieux est que SWAT a tendance à être trop humide au cours des saisons où SASER est trop sec, et trop sec au cours des saisons où SASER a tendance à être trop humide.

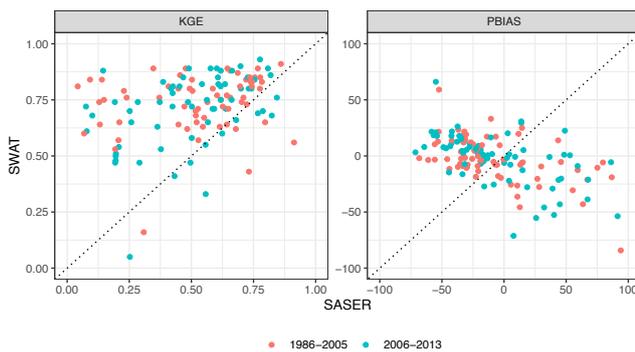


Figure 3.17. Comparaison des indicateurs de performance des simulations réalisées avec SASER et SWAT pour l'ensemble des stations de jaugeage de référence. Un indicateur général de concordance entre les débits prévus et observés (KGE) et le biais relatif (PBIAS) est présenté.

(Source: PIRAGUA\_hydro\_analysis.)

La statistique KGE indique une meilleure compétence de SWAT sur SASER, bien que les deux présentent des valeurs qui sont considérées acceptables dans un nombre élevé de saisons. Ce résultat ne doit pas nous surprendre si l'on considère que la simulation de SWAT a été calibrée pour bien reproduire le débit. De même, nous observons que lorsqu'un modèle simule bien une saison, l'autre tend aussi à bien le simuler. Dans le cas de PBIAS, nous observons que SASER a un biais légèrement plus négatif que SWAT, ce qui est cohérent avec les résultats

## 3.4. Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons vu que les Pyrénées sont plus pluvieuses vers le nord et l'ouest (plus proches et plus ouvertes aux flux humides de l'Atlantique) et plus sèches vers le sud et l'est (plus méditerranéennes). On constate également que la neige joue, comme prévu, un rôle plus important en altitude, mais que son influence dépend fortement de la température (qui aura un impact majeur à l'avenir, à mesure que le climat change). Enfin, nous observons que le ruissellement est plus important sur le versant nord que sur le versant sud. Rien de tout cela ne devrait nous surprendre.

Ce qui a pu surprendre les lecteurs est la difficulté de simuler le cycle de l'eau dans les Pyrénées. Trois modèles différents ont été employés et nous avons obtenu des résultats dissemblables. Par conséquent, nous déduisons que l'incertitude est grande et nous confirmons qu'avoir employé différentes méthodologies pour estimer le cycle de l'eau continentale pyrénéenne a été un bon choix. Les études basées sur un seul modèle omettent cette importante source d'incertitude et peuvent donner une fausse impression de sécurité, nous poussant à penser que nous connaissons mieux le cycle de l'eau que ce que réellement nous le faisons. Les trois modèles sont très différents : SWAT est un modèle hydrologique semi-distribué et calibré en utilisant des observations de débit. SASER est un modèle physique distribué qui ne se calibre pas. RECHARGE, qui ne se calibre pas non plus, est basé sur un modèle simple de bilan hydrique pour estimer la recharge potentielle des eaux souterraines. Très différentes entre elles, ces trois approximations sont fiables, amplement utilisées par la communauté scientifique. Grâce aux données disponibles, nous ne pouvons pas dire quel modèle reproduit mieux le cycle de l'eau dans sa globalité. SWAT a certes démontré une plus grande compétence dans la simulation des débits observés, mais a été calibré à cet effet. Concernant d'autres variables telles que l'évapotranspiration, la fusion nivale ou la recharge des aquifères profonds, nous pouvons difficilement faire la différence avec les données disponibles. Cela ouvre un domaine de travail important pour de futurs projets, où la simulation de l'évapotranspiration et du manteau neigeux devrait être validée en détail, en tirant parti de nouvelles sources de données telles que les satellites. Cependant, les résultats des différents

modèles fournissent des informations sur les grands chiffres du bilan hydrique des Pyrénées et permettent d'explorer leur évolution future.



## *4. Prospection des ressources hydriques des Pyrénées dans un contexte de changement climatique*

**Pere Quintana (OE), Santiago Beguería (EEAD-CSIC),  
Anaïs Barella (OE), Yvan Caballero (BRGM), Roxelanne  
Cakir (CNRS), Omar Cenobio (OE), Roger Clavera-Gispert  
(OE), Benoit Dewandel (BRGM), Youen Grusson (CNRS),  
Guillaume Hevin (BRGM), Jorge Jódar (IGME-CSIC), Luis  
Javier Lambán (IGME-CSIC), Sandra Lanini (BRGM), Pierre  
Le Cointe (BRGM), Leticia Palazón (EEAD-CSIC), José  
Miguel Sánchez Pérez (CNRS), Sabine Sauvage (CNRS),  
Jean-Philippe Vidal (INRAE)**

En partant des modèles hydrologiques employés dans le chapitre précédent pour évaluer le bilan hydrologique des Pyrénées, une méthodologie a été mise en œuvre pour étudier l'impact du changement climatique sur les ressources hydriques. Une grande importance a été donnée à l'incorporation de l'incertitude par la combinaison de différents scénarios d'émissions, projections de modèles globaux du climat, méthodes de régionalisation et correction du biais et modèles d'impact. Nous avons ainsi pu évaluer non seulement les changements attendus dans les différentes composantes du bilan hydrique, mais aussi le degré de fiabilité dans ces résultats grâce à l'utilisation d'intervalles de crédibilité. Les résultats indiquent 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 effectuées 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 plus nivaux vers des régimes de type 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 pourront être en moyenne de l'ordre de 20 % à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle, alors que sur le versant sud, ils seront plus modérés, avec un gradient depuis la zone la plus occidentale (avec des baisses de 15 %) à la plus orientale (10 %).

## 4.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous analysons les projections du climat futur dans les Pyrénées selon différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre et leur répercussion sur les composantes du bilan hydrique et les ressources en eau. En suivant une structure très similaire à celle du Chapitre 3, nous présentons les changements attendus sur les flux et les variables d'état les plus importantes du bilan hydrique. Nous insistons notamment sur l'analyse de l'incertitude, ce qui nous donne une idée des résultats les plus fiables et les plus incertains. Il est difficile de connaître l'avenir de façon précise, mais nous pouvons délimiter les futures trajectoires du climat en utilisant différents outils physiques et statistiques.

Pour connaître le climat futur des Pyrénées, nous avons besoin de connaître tout d'abord le futur état du climat de la Terre dans son ensemble ; celui-ci dépendra en grande partie des émissions de gaz à effet de serre. Nous ne savons pas comment évoluera le rythme des émissions à l'avenir, mais nous pouvons estimer des trajectoires plausibles. Celles-ci sont les Trajectoires de concentration représentatives (RCP, dans leurs sigles en anglais), que nous présentons dans la section suivante. Puis, ces informations sont employées pour forcer les simulations des Modèles climatiques globaux (GCM, dans leurs sigles en anglais) qui simulent l'évolution du climat de la Terre en réponse aux forçages anthropiques (notamment, les émissions) et les forçages naturels (cycles orbitaux, etc.). Malheureusement, ces modèles ont une résolution spatiale (le degré de détail dans lequel ils décrivent l'espace) limitée qui ne permet pas d'évaluer l'impact du changement climatique dans une zone aussi hétérogène que les Pyrénées. C'est pour cette raison que des méthodes de régionalisation sont employées, afin d'améliorer la résolution spatiale des projections. Nous utilisons tant des méthodes statistiques que dynamiques (modélisation physique), mais nous devons ajouter dans les deux cas une source d'incertitude supplémentaire. Dans ce cas, nous avons utilisé six des scénarios régionalisés générés dans le projet CLIMPY, obtenus par des méthodes statistiques. Enfin, nous avons employé deux modèles hydrologiques différents afin d'étudier l'effet des projections climatiques sur le bilan hydriques des Pyrénées. Comme nous l'avons vu

dans le Chapitre 3, aucun modèle hydrologique n'est capable de simuler parfaitement le système hydrologique. C'est pourquoi utiliser divers modèles nous permet d'évaluer, dans une certaine mesure, l'incertitude associée à cette modélisation. Grâce au recours à différentes projections climatiques forcées avec différents scénarios d'émission, en combinant différents modèles hydrologiques, nous couvrons différents niveaux d'incertitude d'une manière plus rigoureuse que dans la plupart des études d'impact du changement climatique.

## 4.2. Méthodologie

Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction, il est impossible de savoir avec certitude quel sera le climat exact, notamment parce que nous ne savons pas quelles seront les émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique au cours des prochaines décennies. Ces émissions dépendent de multiples facteurs économiques, géopolitiques, industriels, technologiques, etc. Ne pouvant prévoir les futures émissions et étant très difficile de transformer les émissions en concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère du fait des incertitudes inhérentes au cycle global du carbone, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat des Nations Unies (IPCC, dans ses sigles en anglais) a élaboré différentes Trajectoires représentatives de concentration (RCP), qui sont de possibles trajectoires de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les trajectoires déterminent différents avènements climatiques, tous possibles, en fonction du volume de gaz à effet de serre dans l'atmosphère au cours des prochaines décennies. Les RCP (initialement RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 et RCP 8.5) sont étiquetées à partir d'un possible rang de valeurs de forçage radiatif pour l'année 2100 (2,6, 4,5, 6 et 8,5 W/m<sup>2</sup>, respectivement), c'est-à-dire qu'elles sont étiquetées en fonction de leur impact dans le bilan énergétique de la Terre.

Les scénarios RCP sont amplement utilisés par la communauté scientifique afin de générer des simulations (appelées projections) du climat futur au moyen de Modèles de simulation du climat global (GCM). Ces modèles simulent l'ensemble du système climatique de façon couplée (atmosphère, océan et surfaces continentales). Cet exercice est coordonné par le Projet d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP). Cependant, les modèles globaux ont encore une résolution spatiale insuffisante pour étudier les impacts du changement climatique à l'échelle d'une chaîne de montagnes telle que les Pyrénées.

C'est pour cette raison que la communauté scientifique a recherché des moyens pour augmenter la résolution spatiale des projections climatiques. Pour cela, il existe deux stratégies possibles, l'une est la réalisation de simulations régionales du climat (simulations à haute

résolution d'une zone concrète de la Terre, imbriquées dans une simulation globale servant de forçage), et l'autre est l'application de méthodes statistiques de régionalisation. Le projet CLIMPY, prédécesseur de PIRAGUA dans le cadre des projets POCTEFA de l'OPCC, a généré des projections climatiques pour les Pyrénées basées sur une méthode de régionalisation statistique (la méthode dite des analogues). Amblar-Francés et al. (2020) ont généré des scénarios climatiques de température maximale et minimale, ainsi que de précipitations quotidiennes en utilisant 24 simulations globales provenant du projet CMIP6. Il en résulte 24 trajectoires futures possibles de ces variables sur le domaine des Pyrénées, dans une maille régulière de 5 x 5 km de résolution spatiale.

Les projections générées par CLIMPY nous apportent des informations sur la possible évolution de l'atmosphère, mais ne nous apportent pas d'informations détaillées sur le comportement du système hydrologique. Par exemple, elles ne nous fournissent pas d'informations sur l'humidité du sol, l'évolution du manteau neigeux ou l'évapotranspiration. Pour cela, nous avons besoin d'utiliser des modèles d'impact, c'est-à-dire des modèles qui simulent de manière réaliste le bilan hydrologique des bassins des Pyrénées, à partir de l'intégration des projections futures du climat comme données d'entrée (forçage). Nous avons utilisé dans ce projet deux modèles hydrologiques, décrits dans le Chapitre 3 : SWAT, qui est un modèle hydrologique conceptuel semi-distribué et SASER, qui est un modèle hydrométéorologique à la base physique et de type distribué.

Dans les simulations SWAT, les projections de température et de précipitations quotidiennes générées par le projet CLIMPY ont été employées comme forçage atmosphérique. En raison des biais des différents modèles climatiques mondiaux, il n'est pas possible de comparer directement les résultats de la simulation forcée à l'aide de projections climatiques futures avec les résultats obtenus de l'observation du climat. Pour cela, une correction de biais basée sur la méthode dite de delta change a été appliquée. Cette méthode consiste à calculer les changements relatifs simulés pour différentes périodes futures

par rapport aux valeurs simulées pour une période de référence qui représente le climat de l'actualité. C'est-à-dire que nous ne faisons pas de comparaison directe entre les résultats forcés à l'aide de simulations du climat futur et le climat observé, mais entre les simulations du climat futur et le climat présent à partir d'un même modèle RCM. Comme les biais du modèle RCM sont maintenus dans les simulations climatiques présente et future, cette méthode permet de se concentrer sur les changements, dans une certaine mesure, sans tenir compte des biais du modèle.

Dans le cas de SASER, les projections générées par CLIMPY sont insuffisantes, car le modèle nécessite beaucoup plus de variables pour son fonctionnement que celles obtenues dans CLIMPY. Outre les précipitations et la température, SASER requiert des valeurs d'humidité relative et de vent, le tout au rythme horaire. Il a ainsi été décidé de compléter la base de données avec davantage de variables, en utilisant une adaptation de la méthode développée par Clemins et al. (2019). Il s'agit d'une méthode des analogues qui, en plus de permettre de calculer le reste de variables climatiques nécessaires, réalise une correction de biais sur les données des RCM. Nous avons employé la base de données `datos PIRAGUA_atmos_analysis` (Quintana-Seguí y Le Cointe, 2022), décrite au Chapitre 4 dans le contexte de la simulation du bilan hydrique des Pyrénées sur la période de référence. Pour chaque projection de CLIMPY et pour chaque jour de la période 1981-2100, nous avons recherché des dates dans la base de données `PIRAGUA_atmos_analysis`, qui suivaient les mêmes schémas spatiaux de température et de précipitations. Tenant compte qu'en nous éloignant de la période présente vers l'avenir, il est de moins en moins probable de trouver des dates du passé qui suivent les mêmes schémas spatiaux de température et de précipitations du fait de la tendance vers une température de plus en plus élevée, l'exercice a été effectué à l'aide de séries auxquelles nous avons enlevé au préalable la tendance. Nous avons ultérieurement récupéré cette tendance après avoir trouvé les analogues. Nous avons ainsi reconstruit une nouvelle base de données climatique, au rythme horaire et avec toutes les variables nécessaires au fonctionnement du

modèle SASER, pour les périodes 1961-2005 et 2006-2100, sous les trajectoires de concentration RCP 4.5 et 8.5, et en utilisant les modèles MRI-CGCM3, MIROC-ESM, CNRM-CM5, dans une première phase, puis MPI-ESM-MR, INMCM4 et BCC-CSM1-1 dans une seconde phase encore inachevée. Cette nouvelle base de données pour le forçage de modèles hydrologiques s'appelle PIRAGUA\_atmos\_climate (Quintana-Seguí et al., 2022).

Le fait d'utiliser deux modèles (SWAT et SURFEX) ainsi que deux techniques différentes de correction de biais (analogues et delta change) des scénarios, outre deux trajectoires de concentration (RCP) et six modèles GCM, garantit une bonne représentation de la cascade d'incertitude, c'est-à-dire de l'effet cumulé des incertitudes dans chacune des étapes du processus. Il n'est pas courant de disposer d'études qui emploient plusieurs trajectoires RCP et plusieurs GCM, mais il est encore plus rare de disposer d'études qui utilisent plusieurs modèles hydrologiques et d'une nature si différente comme dans cette étude. C'est l'un des points forts de cette étude. La présentation des résultats doit synthétiser toute cette cascade d'incertitudes et c'est ce que nous avons essayé de faire dans les figures décrites ci-après. Toutes les simulations réalisées à l'aide des modèles SWAT et SASER ont été combinées. Six scénarios CLIMPY représentatifs de toutes les projections effectuées dans ce projet ont été sélectionnés. Six simulations SWAT ont été réalisées avec ces six scénarios (une simulation par scénario) et trois simulations SASER avec trois des six scénarios CLIMPY (le reste est encore en cours de calcul, puisque SASER est un modèle beaucoup plus coûteux que SWAT sur le plan informatique). Aujourd'hui, trois simulations SASER des six possibles sont terminées, une projection CLIMPY chaude et sèche ayant été sélectionnée, une autre aux caractéristiques intermédiaires et une dernière projection plus froide et plus humide (toujours dans la variabilité de l'ensemble des projections de CLIMPY). Toutes les figures indiquées ci-après sont faites grâce à ces neuf simulations (6 avec SWAT et 3 avec SASER).

L'ensemble de ces simulations a été rassemblé dans une base de données appelée PIRAGUA\_

hydro\_climate (Beguiría et al., 2022b). Tous les résultats présentés dans ce chapitre peuvent être consultés et téléchargés sur le géoportail de l'Observatoire pyrénéen du changement climatique, dans la section Couches/Bilan hydrique/Futur. Il est également possible de réaliser des consultations plus détaillées dans la section Analyses.

## 4.3. Résultats

### 4.3.1. Forçages climatiques

Il convient de présenter une brève analyse de la variabilité présente dans l'ensemble des projections climatiques employées pour forcer les modèles hydrologiques.

Dans la Figure 4.1 ont été représentés les cycles annuels moyens de température dans les différentes projections, pour trois horizons temporels tout au long du XXI<sup>e</sup> siècle (2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100) ainsi que deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et RCP 8.5). Certaines projections sont indiquées deux fois : les projections originales de CLIMPY intégrées par SWAT (sans correction de biais) en ligne continue et les projections intégrées par SASER (avec correction de biais grâce à une méthode des analogues) en ligne discontinue. Nous pouvons observer que la température augmente à mesure que nous avançons dans le XXI<sup>e</sup> siècle, et que plus les émissions (scénario RCP 8.5) sont élevées, plus la température augmente. De même, nous observons qu'il existe une assez bonne cohérence entre les différents modèles GCM, bien que certains d'entre eux (par exemple, MIROC-ESM) ont tendance à être plus chauds alors que d'autres (MRI-GCM3) sont bien plus froids. Les plus grands écarts entre les modèles se concentrent à l'automne. La Figure 4.2 est similaire à la précédente, mais pour les précipitations cumulées mensuelles. Nous voyons que dans ce cas, la divergence est bien plus grande, existant de grandes différences entre modèles GCM, aboutissant à une incertitude élevée sur les futures précipitations. Les précipitations sont toujours des variables beaucoup plus difficiles à simuler. Il faut garder à l'esprit que les modèles d'impact (SWAT et SASER) possèdent des composantes non linéaires qui peuvent accroître davantage ces incertitudes. C'est pourquoi il est si utile d'utiliser deux modèles différents.

Pour nous faire une meilleure idée des incertitudes, la Figure 4.3 présente le changement relatif des précipitations de la période 2011-2040 par rapport à 1981-2010, selon six modèles GCM, régionalisés par le projet CLIMPY, sous le scénario RCP 4.5. Dans ce cas, nous avons comparé chaque modèle RCM avec lui-même pour deux périodes temporelles différentes.

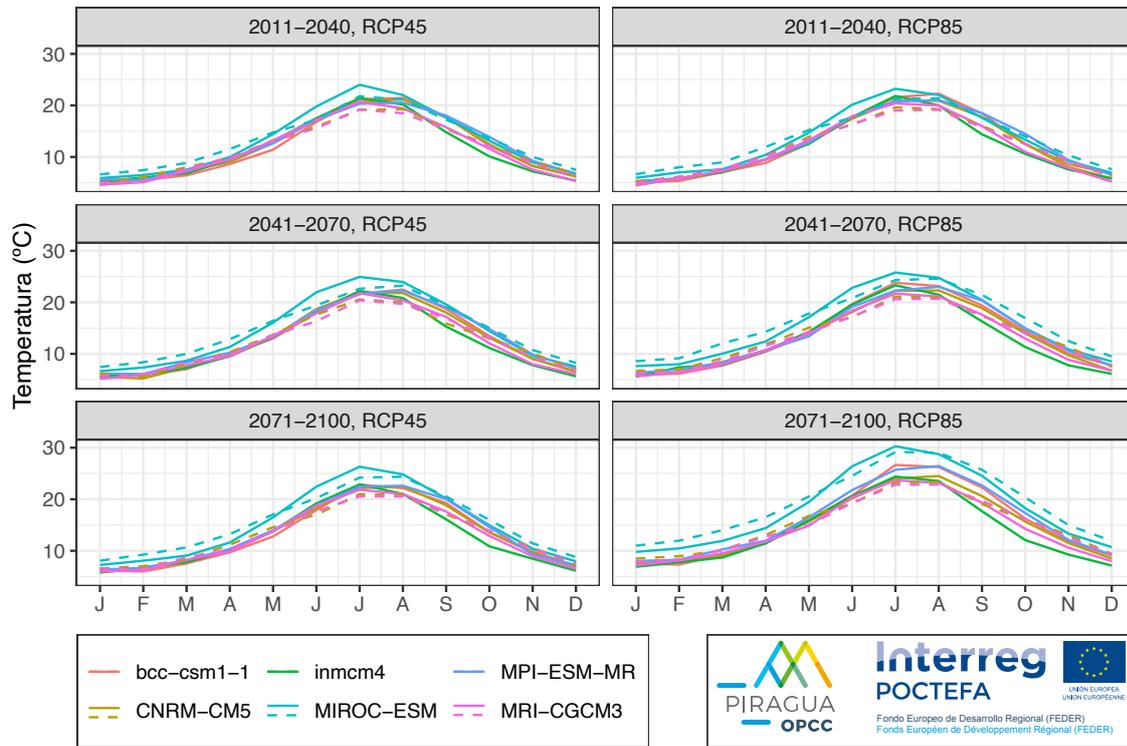


Figure 4.1. Différences dans les forçages climatiques : température moyenne mensuelle dans l'ensemble des Pyrénées pour trois horizons temporels et deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5), à partir de six modèles globaux (GCM). Lignes continues : downscaling statistique sans correction de biais - Lignes discontinues : avec correction de biais.

(Source: PIRAGUA\_atmos\_climate.)

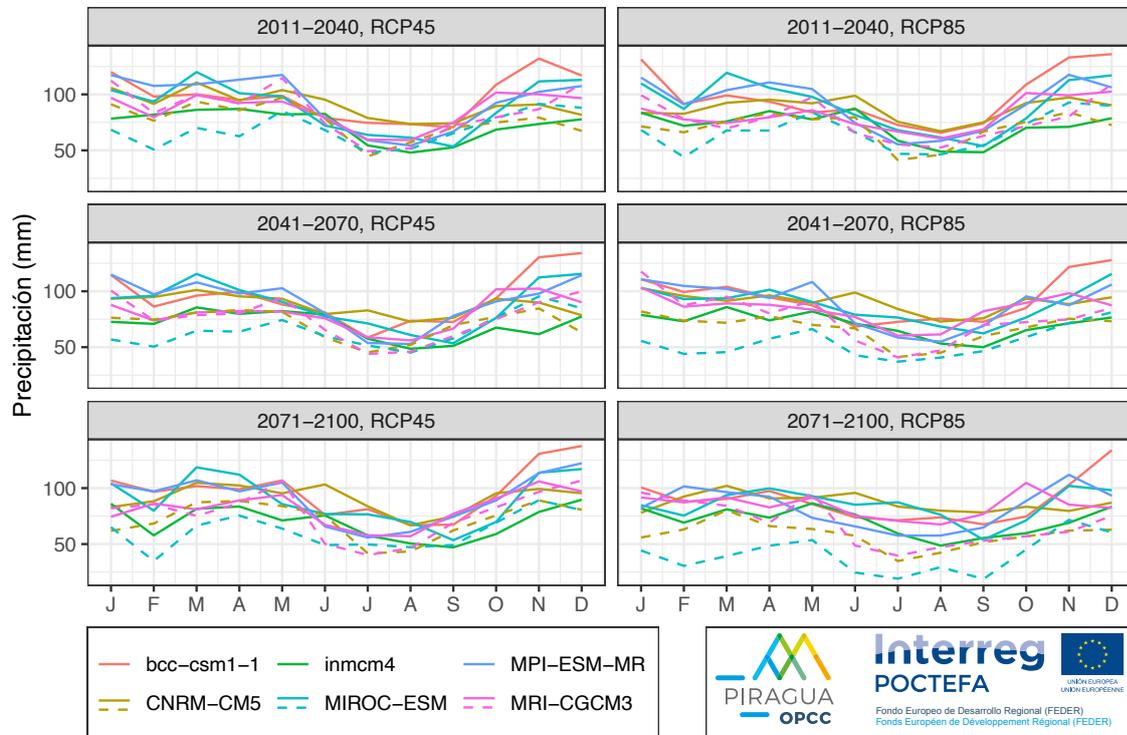


Figure 4.2. Différences dans les forçages climatiques : précipitations moyennes mensuelles dans l'ensemble des Pyrénées pour trois horizons temporels et deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5), à partir de six modèles globaux (GCM). Lignes continues : downscaling statistique sans correction de biais - Lignes discontinues : avec correction de biais.

(Source: PIRAGUA\_atmos\_climate.)

L'impact de l'éventuel biais que présente chaque GCM par rapport au climat réel observé est donc réduit. La diversité des résultats est très grande, avec deux cas extrêmes : MRI-CGCM3 présente un futur clairement plus humide que l'actuel, alors que MIROC-ESM présente un futur nettement plus sec. Les autres modèles se trouvent à mi-chemin.

En second lieu, la Figure 4.4 présente le même résultat pour les trois modèles GCM qui font l'objet de la correction de biais utilisée pour forcer SASER. Nous observons que les corrections de

biais ont également un impact dans les anomalies, ce qui reflète l'incertitude présente dans toutes ces opérations. Utiliser deux modèles d'impact et deux méthodes de régionalisation, l'un avec correction de biais et l'autre sans, nous permet de nous faire une meilleure idée des incertitudes totales.

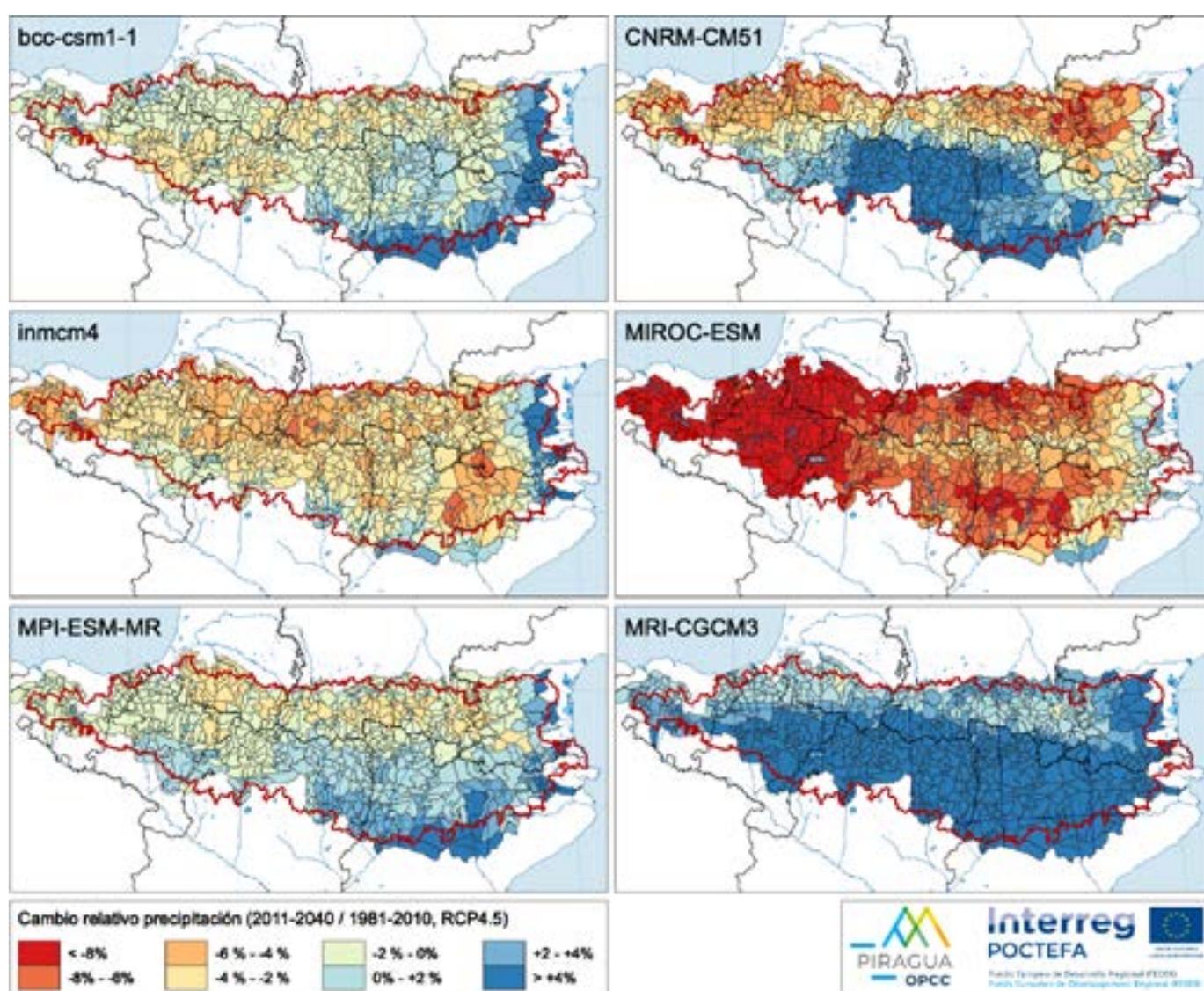


Figure 4.3. Différences de forçage climatique : évolution des précipitations annuelles moyennes pour l'horizon 2011-2040 par rapport à 1981-2010 sous le scénario RCP 4.5. Valeurs obtenues à partir de la réduction d'échelle statistique de six modèles GCM sans correction de biais.

(Source: PIRAGUA\_atmos\_climate.)

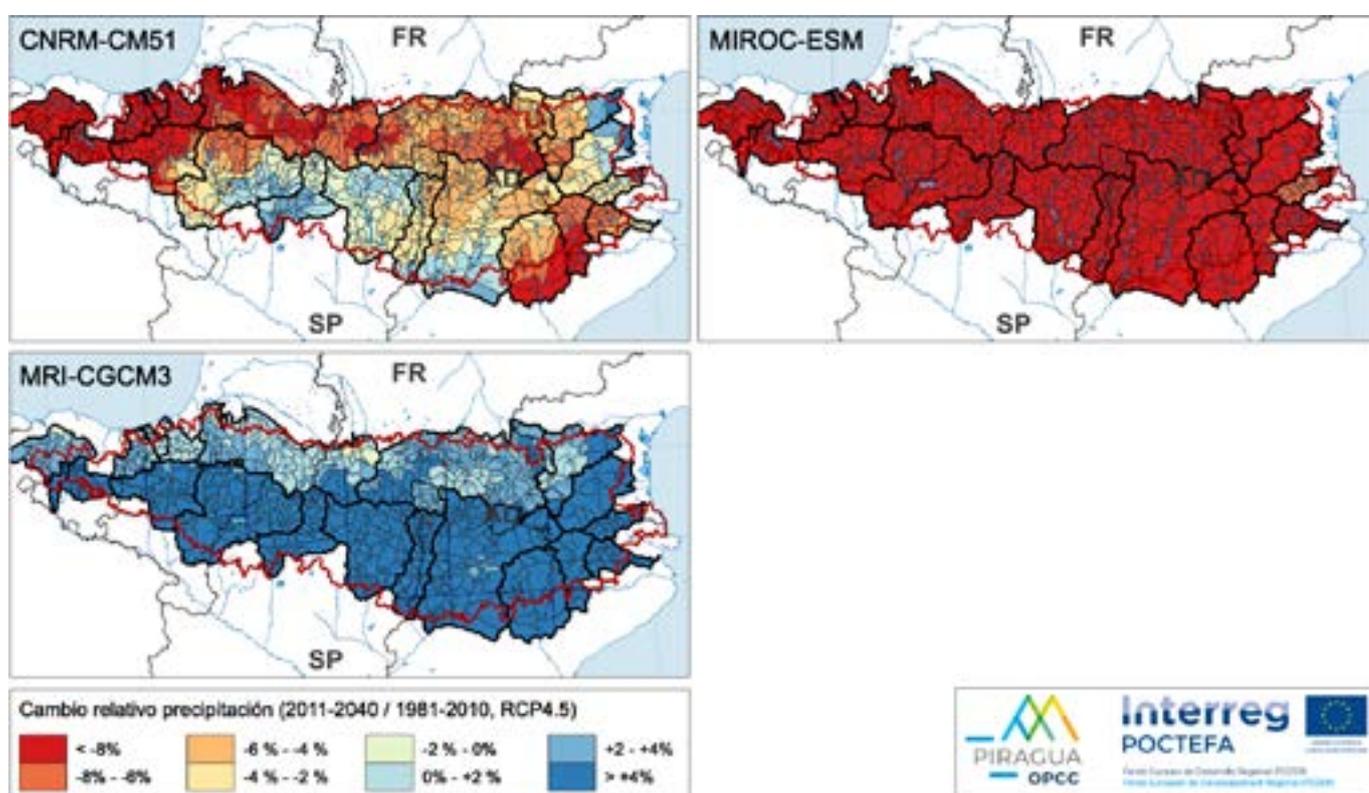


Figure 4.4. Différences de forçage climatique : évolution des précipitations annuelles moyennes pour l'horizon 2011-2040 par rapport à 1981-2010 sous le scénario RCP 4.5. Valeurs obtenues à partir de trois modèles GCM avec correction de biais.

(Source: PIRAGUA\_atmos\_climate.)

### 4.3.2. Changements de la température

Nous présentons ensuite les changements attendus pour trois horizons temporels (2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100) par rapport à la période de référence 1981-2010, pour deux scénarios d'émissions, RCP 4.5 et 8.5. La moyenne des neuf simulations réalisées (6 avec SWAT sans correction de biais des variables climatiques et 3 avec SASER avec correction de biais) est présentée dans les figures. L'unité

spatiale d'analyse est le sous-bassin comme nous l'avons expliqué au Chapitre 3. La rayure en diagonale qui apparaît dans certains sous-bassins de certaines figures indique qu'il n'existe pas de consensus suffisant entre les simulations sur le signe du changement. Dans cet exercice, nous avons considéré qu'il y a consensus lorsque plus de 80 % des simulations coïncident dans le signe du changement (positif ou négatif par rapport à la période de référence).

La Figure 4.5 présente les changements attendus dans la température moyenne de l'air. Dans ce cas, il y a un consensus total entre les simulations :

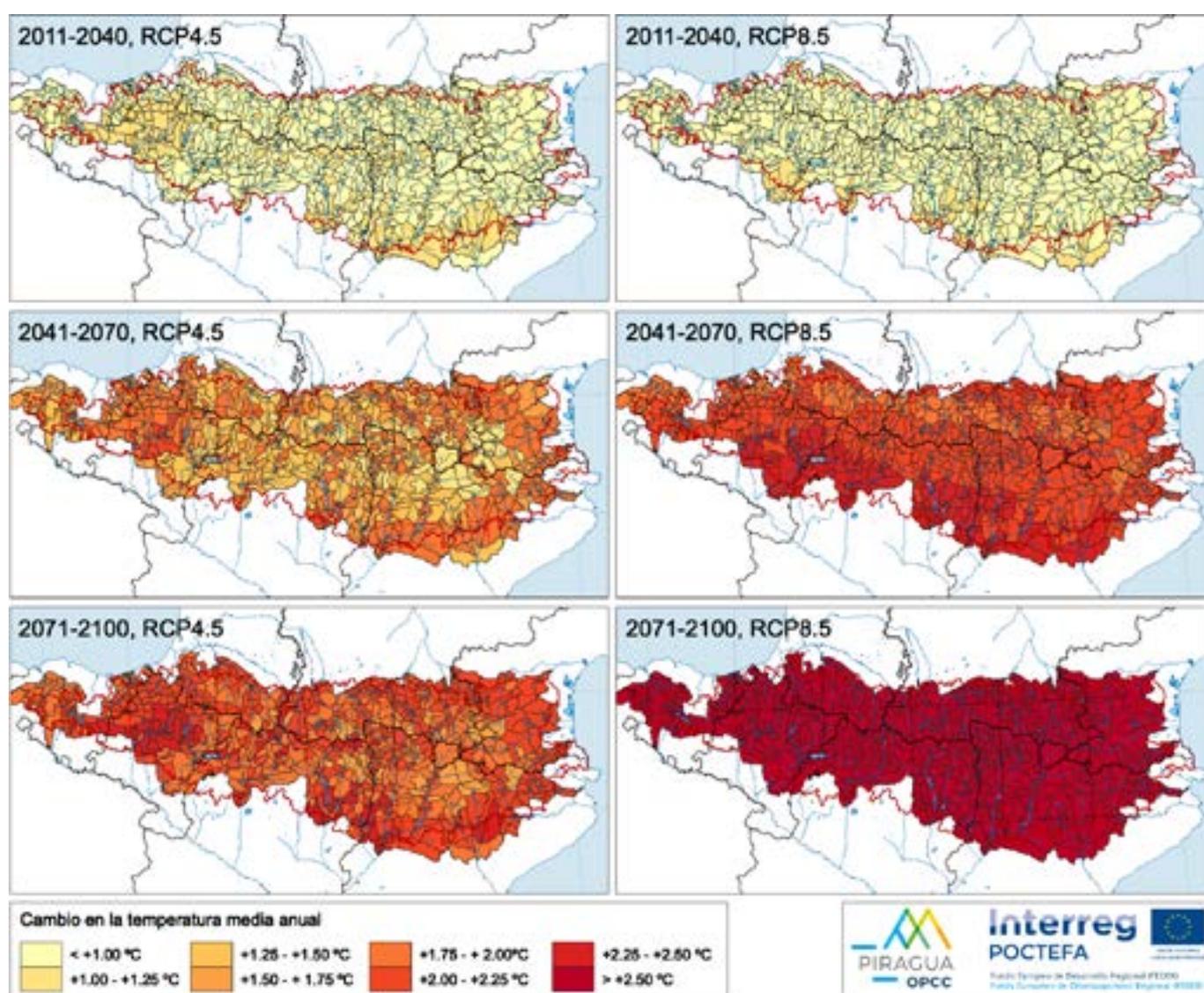


Figure 4.5. Changement de la température moyenne annuelle par rapport à 1981-2010 pour trois horizons temporels et deux scénarios d'émissions : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER).

(Source: PIRAGUA\_hydro\_climate.)

la température va augmenter, indépendamment de la combinaison de GCM, scénario RCP, modèle hydrologique et période temporelle considérée. À mesure que nous entrons dans le XXI<sup>e</sup> siècle, l'augmentation de température devient plus marquée, avec des valeurs pratiquement homogènes sur tout le territoire. En outre, plus les émissions augmentent, plus les températures augmentent. Les Pyrénées de l'avenir seront, sans aucun doute, un lieu plus chaud ; et le degré d'augmentation de la température dépendra des émissions futures de gaz à effet de serre.

La Figure 4.6 présente le cycle annuel de la température moyenne, selon les simulations futures. La ligne bleue présente le climat de référence (1981-2010) et la ligne rouge la moyenne de toutes les simulations. Les lignes en pointillés marquent l'intervalle de crédibilité, c'est-à-dire la frange des futurs possibles selon les différents scénarios. La figure confirme qu'il existe un accord notable entre les simulations quant à l'augmentation des températures. La figure présente également que l'augmentation des températures devrait être plus marquée en été et à l'automne qu'en hiver et au printemps.

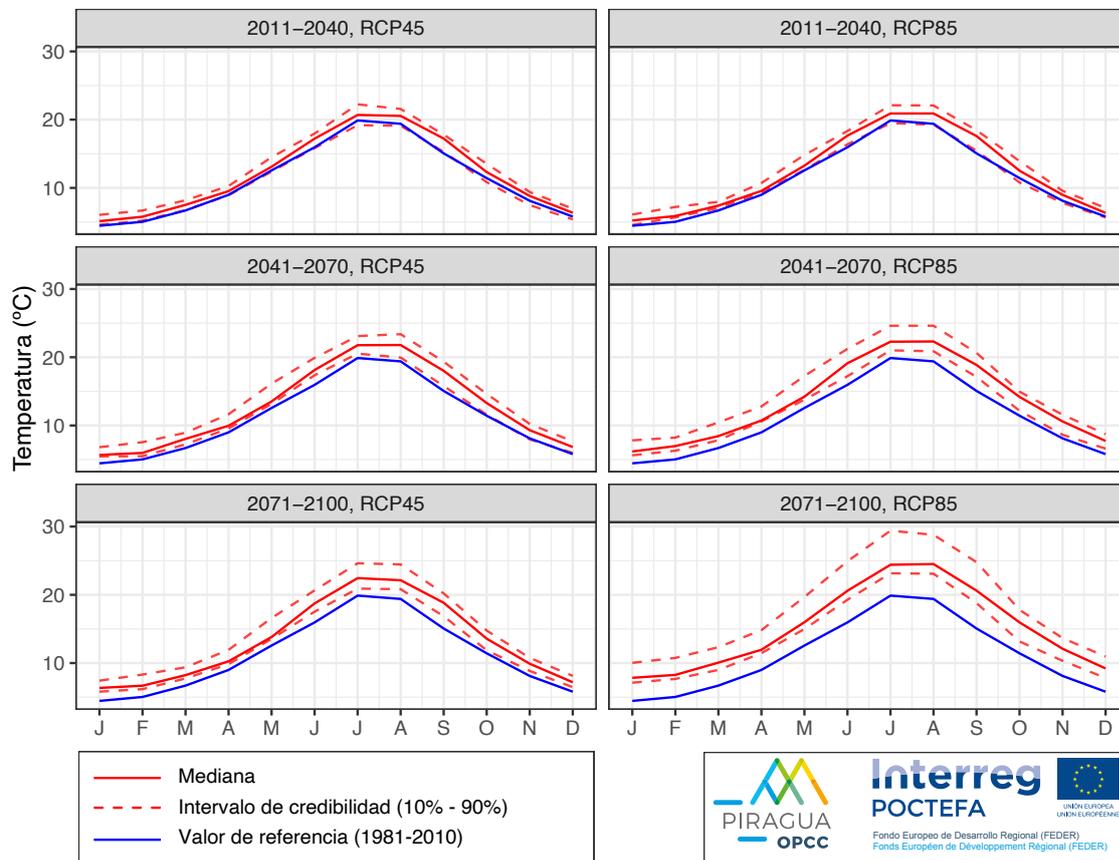


Figure 4.6. Température moyenne mensuelle de l'ensemble des Pyrénées pour deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5) et trois horizons temporels : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER), ligne rouge continue, intervalle de crédibilité (10 %-90 %), lignes rouges discontinues, et valeur moyenne de référence (1981-2010), ligne bleue.

(Source: PIRAGUA\_hydro\_climate.)

### 4.3.3. Changements dans les flux hydriques

La Figure 4.7 présente le changement prévu des précipitations. Contrairement à la température, il n'existe pas d'accord total entre les modèles. Dans toutes les figures apparaissent des zones rayées, c'est-à-dire, des zones où il n'y a pas de consensus suffisant sur le signe du changement. Le schéma général est d'une diminution des précipitations sur tout le versant nord des Pyrénées et une augmentation (sans consensus entre modèles) dans les bassins plus au sud et plus à l'est. En général, il y a consensus là où une

diminution des précipitations est observée, et il n'y a pas de consensus là où une augmentation des précipitations est observée. Les augmentations des précipitations peuvent dépasser les 2 %, tandis que les diminutions peuvent aller au-delà des 8 % dans certains bassins. Nous observons également que les changements ne sont pas linéaires, c'est-à-dire qu'il y a des zones où les précipitations diminuent davantage à la moitié du siècle qu'à la fin du siècle. Tout cela met en évidence une grande complexité. Nous n'avons pas analysé d'indices d'extrêmes pour ce rapport. Il est possible que les éventuelles augmentations des précipitations moyennes soient dues à des augmentations des extrêmes de précipitations

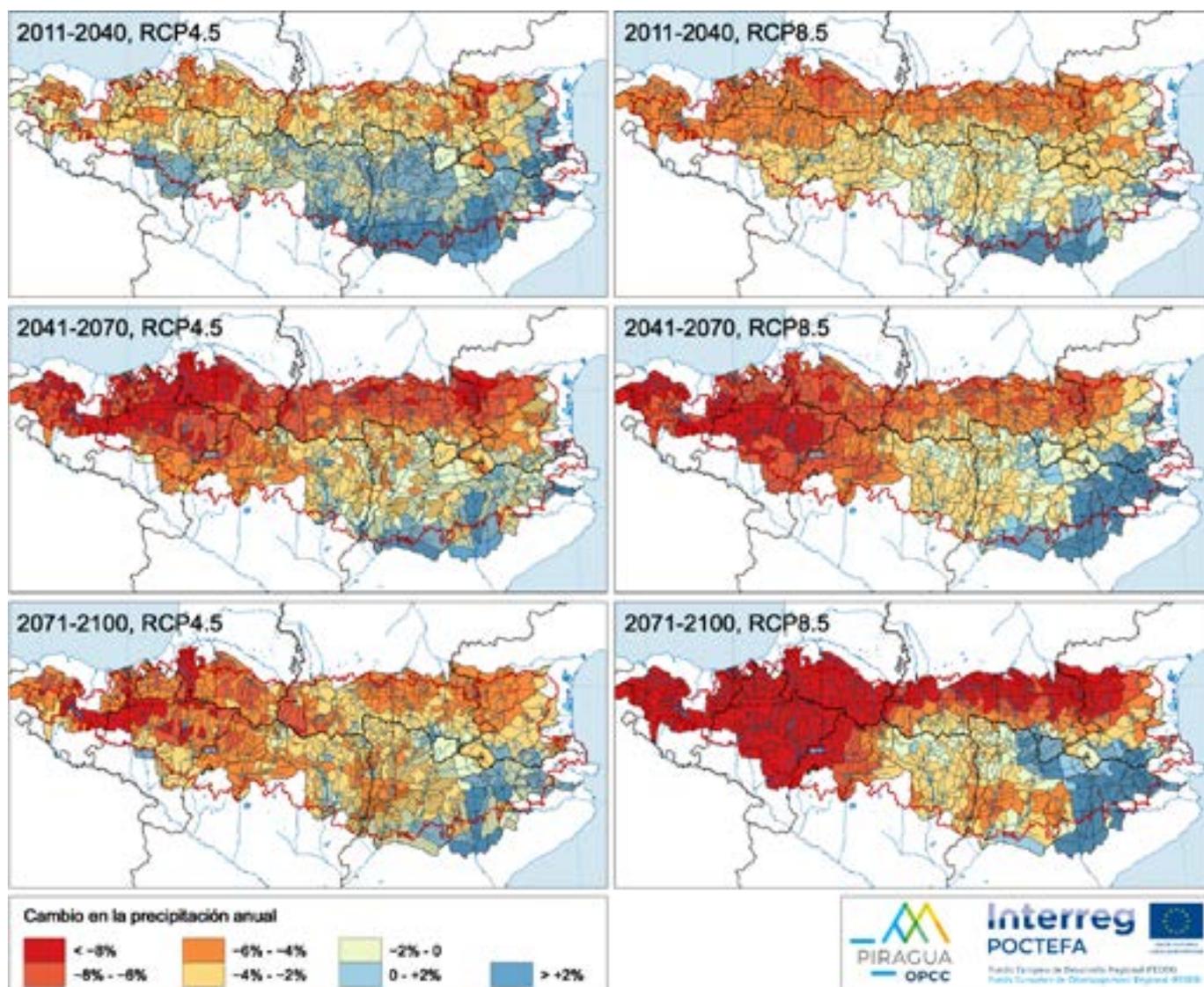


Figure 4.7. Changement des précipitations moyennes annuelles par rapport à 1981-2010 pour trois horizons temporels et deux scénarios d'émissions : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER). Les rayures indiquent un faible niveau d'accord entre les simulations (moins de 80 % des simulations s'accordent sur le signe du changement).

(Source: PIRAGUA\_hydro\_climate.)

(concentration des précipitations en moins de jours). Il faudra analyser ces détails dans de futurs travaux.

La Figure 4.8 montre le cycle moyen annuel des précipitations de l'ensemble des simulations. La figure indique que l'intervalle de crédibilité est très large, ce qui doit s'interpréter comme une indication d'une incertitude élevée. D'autre part, nous observons que la ligne bleue représentative du climat de référence est située entre les deux extrêmes de l'intervalle de crédibilité, ce qui nous indique qu'il existe une incertitude sur le signe du changement (prévision de précipitations plus fortes ou plus faibles par rapport au présent).

En tout cas, nous voyons qu'à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle, dans le scénario RCP 8.5, la diminution des précipitations est nette pour les deux périodes de précipitations plus fortes (printemps et automne), ce qui devrait être un sujet de préoccupation pour la gestion des ressources en eau.

Si les précipitations sont le principal flux d'entrée du bilan hydrique, l'évapotranspiration est le principal flux de sortie (perte). On peut s'attendre à ce que l'évapotranspiration réelle ait tendance à augmenter à mesure que les températures augmentent, à condition qu'il y ait suffisamment d'eau dans le sol. Dans le cas d'une transition vers un climat beaucoup plus sec (moins

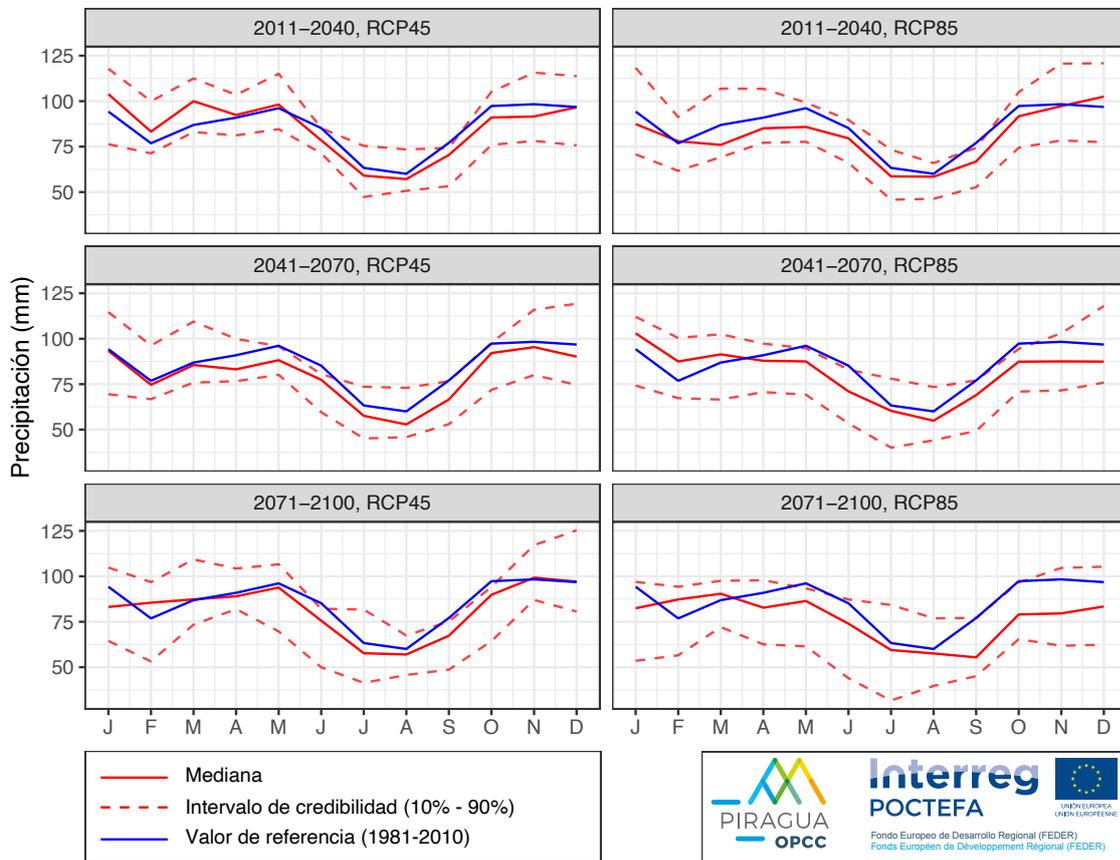


Figure 4.8. Précipitations moyennes annuelles sur l'ensemble des Pyrénées pour deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5) et trois horizons temporels : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER), ligne rouge continue, intervalle de crédibilité (10 %-90 %), lignes rouges discontinues, et valeur moyenne de référence (1981-2010), ligne bleue.

(Source: PIRAGUA\_hydro\_climate.)

réserve d'eau dans le sol), l'évapotranspiration diminuera malgré la hausse des températures, précisément du fait du manque d'eau. Cette dernière situation est précisément celle qui est reflétée dans les résultats des simulations (Figure 4.9). Dans le scénario RCP 4.5, nous voyons des augmentations de l'évapotranspiration totale (sans consensus) dans de larges zones du domaine dans l'horizon temporel le plus proche (2011-2040). Les augmentations peuvent dépasser les 15 %. Ce sont les zones où il y a suffisamment d'eau dans le sol pour alimenter le flux d'évapotranspiration, découlant de l'augmentation de la température. Toutefois, à mesure que nous avançons dans le

siècle, l'évapotranspiration diminue fortement (jusqu'à plus de 60 % dans le scénario le plus pessimiste et à l'horizon le plus lointain), précisément en raison de l'augmentation de l'aridité. En d'autres termes, les simulations indiquent qu'il existe une transition claire vers des scénarios plus arides et plus pauvres en eau. Dans le cas des scénarios RCP 8.5, la diminution du flux d'évapotranspiration est généralisée dès le départ.

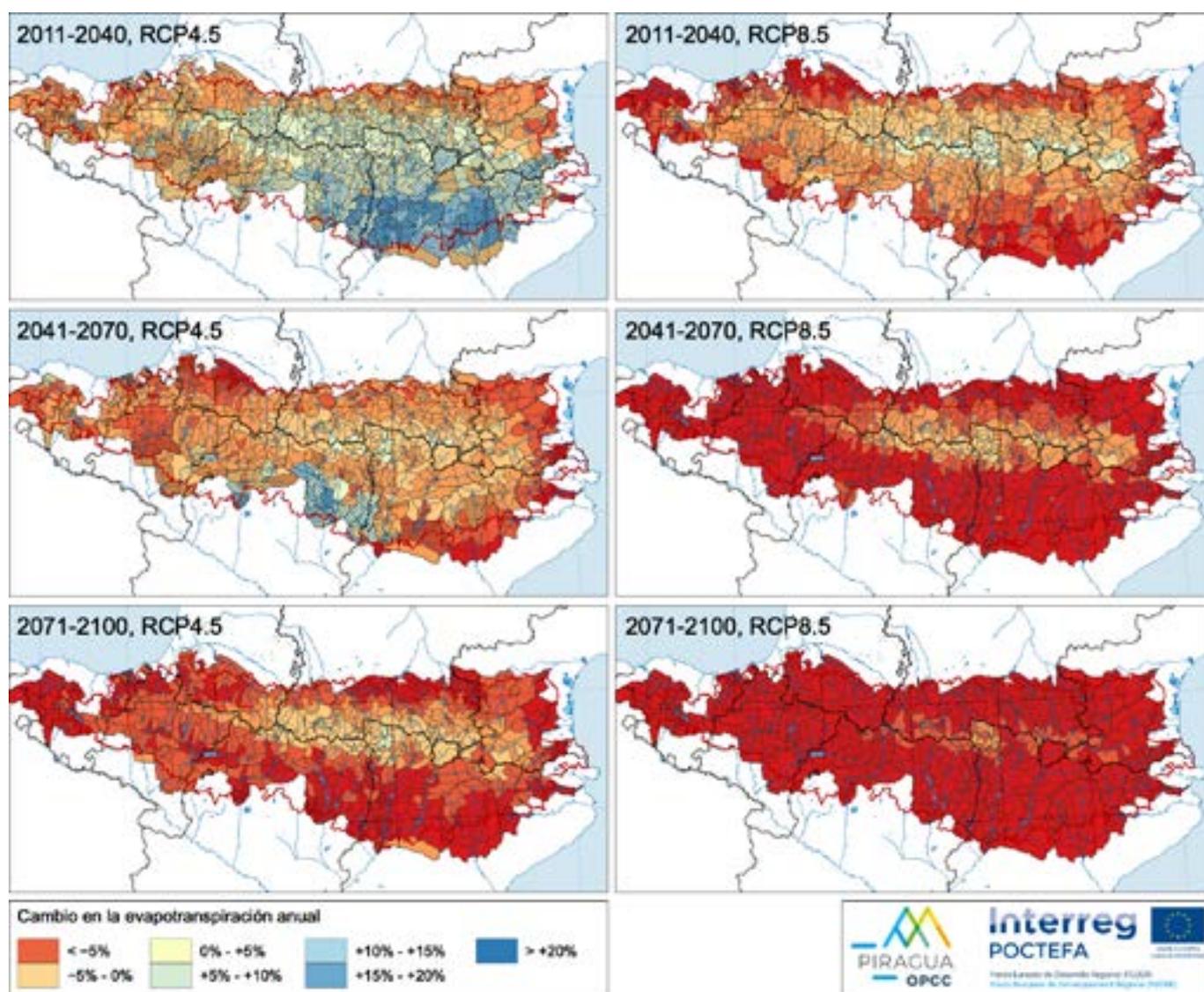


Figure 4.9. Changement de l'évapotranspiration moyenne annuelle par rapport à 1981-2010 pour trois horizons temporels et deux scénarios d'émissions : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER). Les rayures indiquent un faible niveau d'accord entre les simulations (moins de 80 % des simulations s'accordent sur le signe du changement).

(Source: PIRACUA\_hydro\_climate.)

La Figure 4.10 indique le cycle annuel de l'évapotranspiration. De nouveau, l'intervalle de confiance est très large, ce qui signifie qu'il y a de grandes disparités entre les simulations et, par conséquent, il existe une incertitude élevée quant à l'ampleur totale du changement, voire au signe du changement. En général, l'incertitude est bien plus grande en été et à l'automne qu'en hiver et au printemps. Notre climat se caractérise généralement par une transition de climat humide (gouverné par la radiation) à climat semi-aride (dominé par la disponibilité de l'eau) à l'automne ; et vice-versa au printemps. L'incertitude si élevée indique qu'il n'y a pas de consensus pour cette transition. Nous voyons aussi que la plage d'incertitude augmente à mesure que nous avançons dans le siècle et qu'elle augmente davantage dans le scénario RCP 8.5. Cela dénote que les non-linéarités impliquées dans le calcul de l'évapotranspiration réelle tendent aussi à accroître l'incertitude de cette variable.

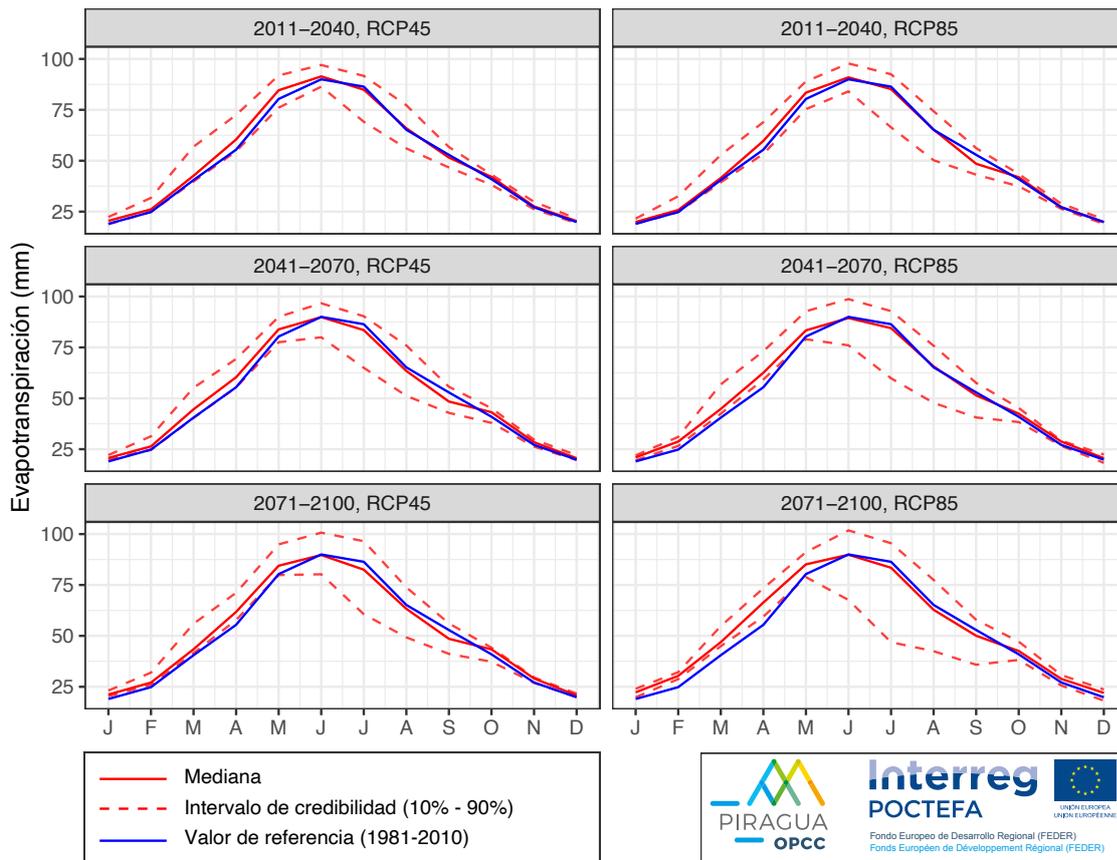


Figure 4.10. Évapotranspiration moyenne mensuelle de l'ensemble des Pyrénées pour deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5) et trois horizons temporels : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER), ligne rouge continue, intervalle de crédibilité (10 %-90 %), lignes rouges discontinues, et valeur moyenne de référence (1981-2010), ligne bleue

(Source: PIRAGUA\_hydro\_climate.)

Le troisième grand flux dans le bilan hydrique est le ruissellement total signalé dans la Figure 4.11. Le schéma spatial est semblable à celui des précipitations, modulé par les changements de l'évapotranspiration. La figure montre des diminutions de ce flux au nord du domaine et des augmentations dans certains bassins du sud et de l'est du domaine (sans accord entre simulations dans certains sous-bassins). À la fin du siècle, la diminution prévue est de 10 à 30 % dans la plupart du domaine dans le scénario RCP 4.5, bien qu'il y ait des zones où la diminution atteint 30 %. Dans le scénario RCP 8.5, la diminution est plus grande, atteignant plus de 50 % dans une

large frange au nord du domaine et une autre zone en Navarre et au Pays basque.

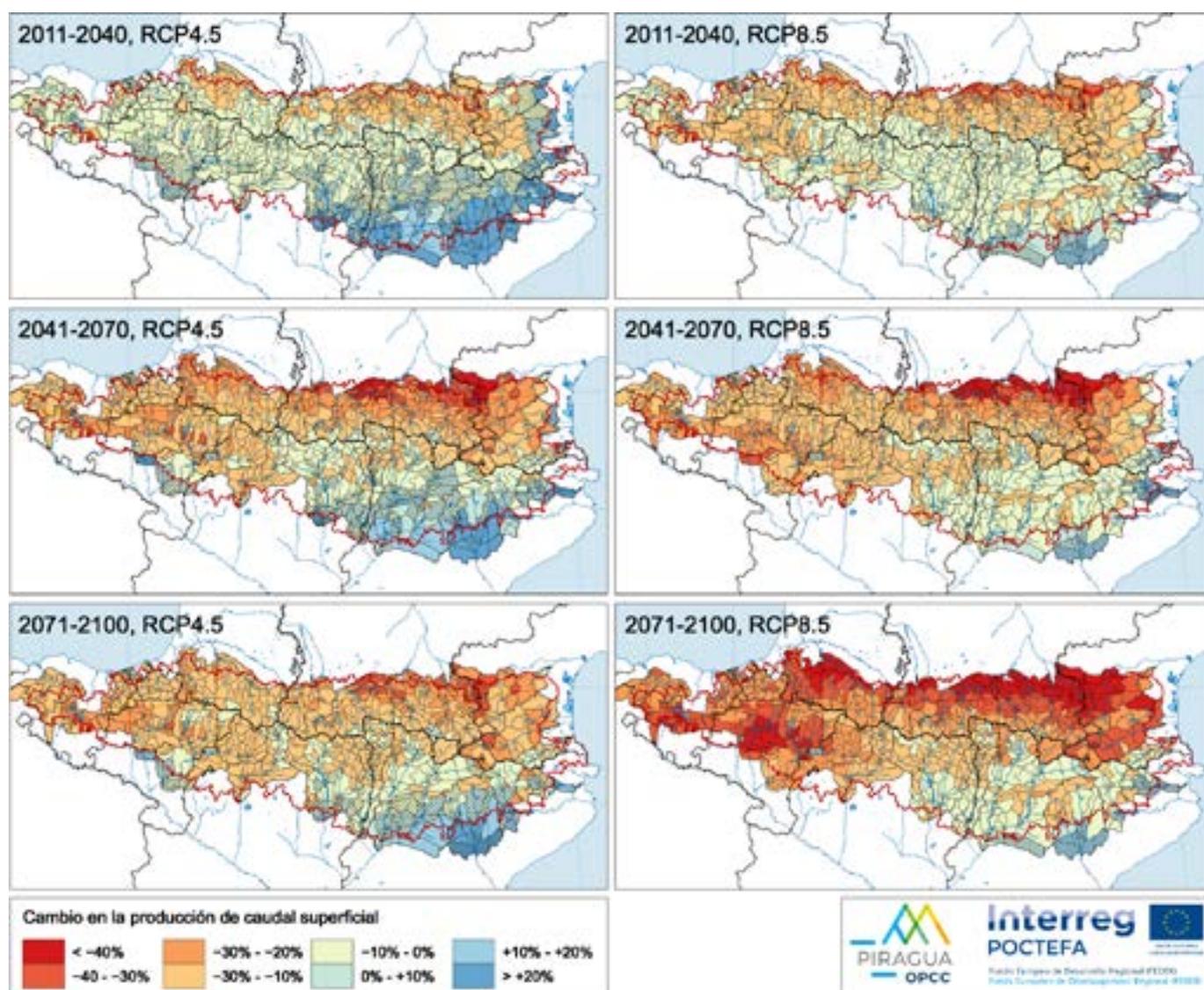


Figure 4.11. Changement dans la génération de débit moyenne annuelle par rapport à 1981-2010 pour trois horizons temporels et deux scénarios d'émissions : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER). Les rayures indiquent un faible niveau d'accord entre les simulations (moins de 80 % des simulations s'accordent sur le signe du changement).

(Source: PIRAGUA\_hydro\_climate.)

La Figure 4.12 montre le cycle annuel moyen du ruissellement total. Les diminutions les plus importantes du flux se présentent au printemps et à l'automne, avec une plus grande incertitude en hiver et au printemps. La ligne bleue sort de l'intervalle de crédibilité, plus tôt à l'automne qu'au printemps, c'est-à-dire qu'il est plus probable qu'il y ait une diminution de débit à l'automne qu'au printemps.

Le manteau neigeux, qui stocke les précipitations solides hivernales, est un réservoir d'eau essentiel pour la gestion des ressources hydriques. La neige fondue est une ressource hydrique importante

pour les bassins de la zone, et sa diminution peut obliger à changer de façon significative la gestion des ressources hydriques.

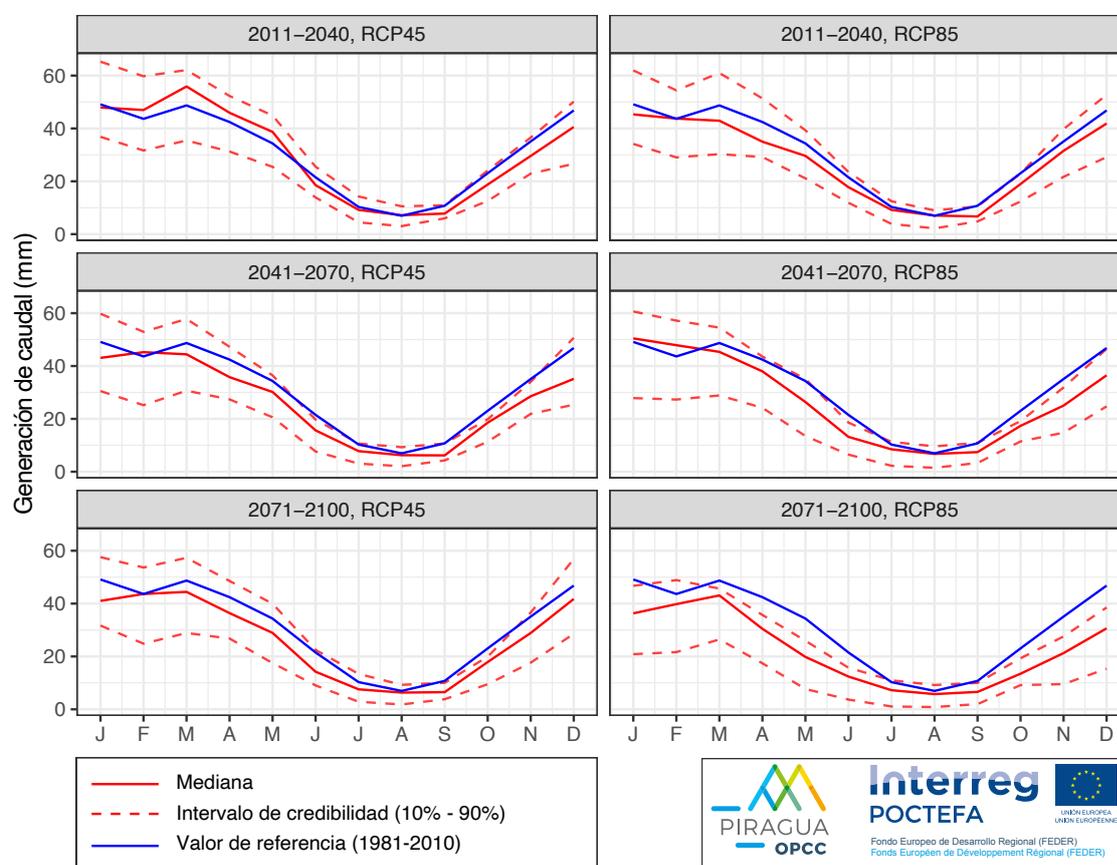


Figure 4.12. Génération de débit moyenne mensuelle sur l'ensemble des Pyrénées pour deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5) et trois horizons temporels : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER), ligne rouge continue, intervalle de crédibilité (10 %-90 %), lignes rouges discontinues, et valeur moyenne de référence (1981-2010), ligne bleue.

(Source: PIRAGUA\_hydro\_climate.)

La Figure 4.13 présente le changement attendu dans le flux de neige fondue. Le degré d'accord entre les simulations est faible pour la période la plus proche (2011-2040) et le scénario d'émissions RCP 4.5, mais à partir de la moitié du XXIe, nous observons une diminution généralisée de ce flux, qui peut dépasser 60 %, la diminution la plus intense étant celle du scénario RCP 8.5, comme il faut s'y attendre. À l'horizon le plus proche (2011-2040) et dans le scénario RCP 4.5, la carte présente une large zone bleue (hausse du flux), mais rayée, pour indiquer qu'il n'y a pas de consensus dans les modèles. Cette augmentation est due à la hausse des précipitations dans cette

zone et cet horizon temporel, comme nous l'avons vu précédemment.

La Figure 4.14 présente le cycle annuel mensuel de la fusion nivale. Comme on peut s'y attendre, ce flux est plus important à la fin de l'hiver et au printemps, et pratiquement nul en été. Les graphiques montrent clairement comment la ligne rouge (moyenne des simulations) est systématiquement au-dessous de la bleue (climat de référence). C'est -à-dire que la moyenne des simulations indique clairement une diminution du flux de fusion nivale. Les lignes qui indiquent

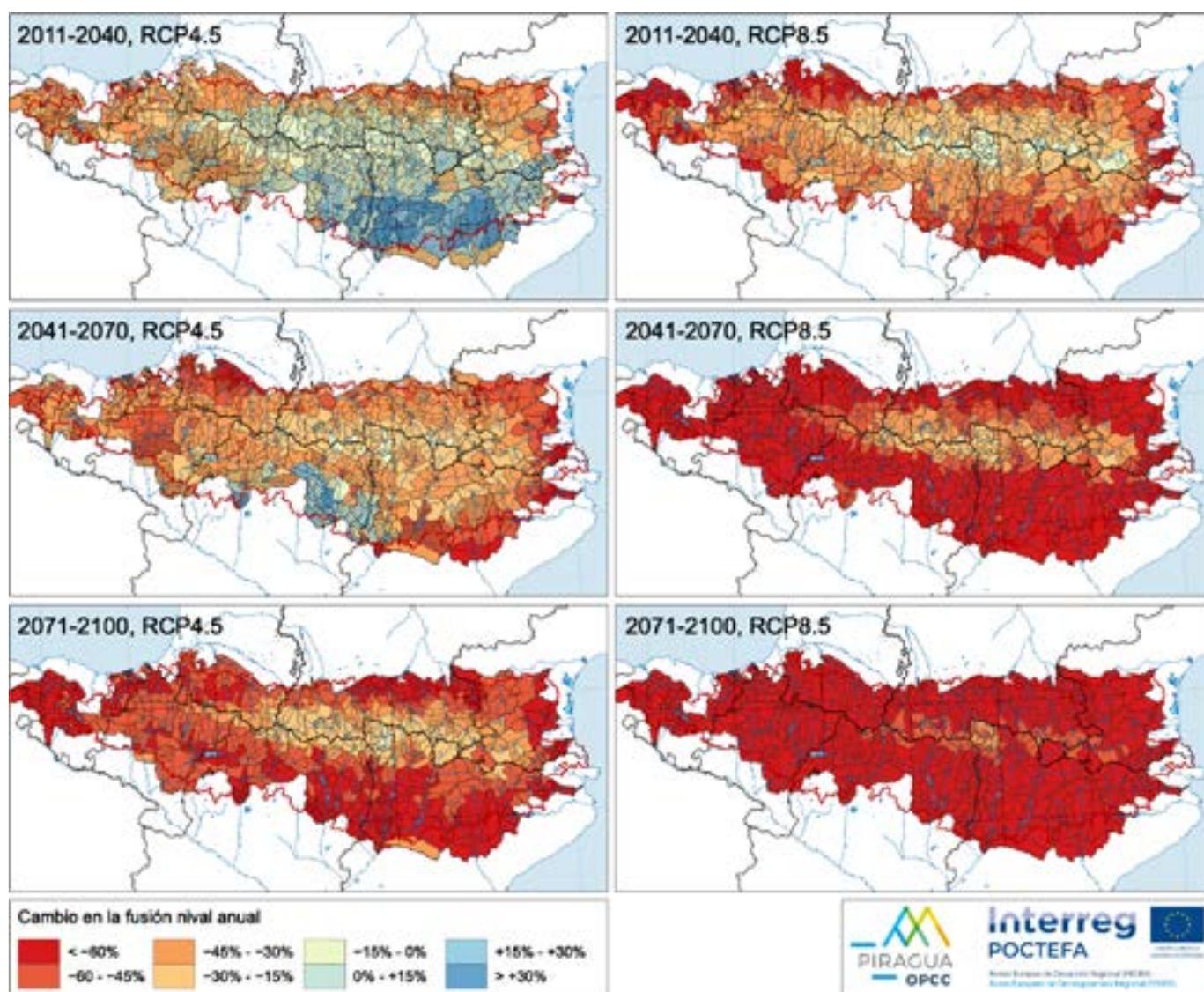


Figure 4.13. Changement dans la fusion nivale moyenne annuelle par rapport à 1981-2010 pour trois horizons temporels et deux scénarios d'émissions : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER). Les rayures indiquent un faible niveau d'accord entre les simulations (moins de 80 % des simulations s'accordent sur le signe du changement).

(Source: PIRAGUA\_hydro\_climate.)

les extrêmes de l'intervalle de crédibilité mettent, néanmoins, en évidence une incertitude élevée. Celle-ci est élevée, car la présence ou non de neige est très sensible à la hauteur moyenne de l'isoligne de 0 °C, de façon que de légères différences dans cette valeur provoquent de grands impacts dans la présence de la neige et la fusion nivale.

Pour la gestion des ressources hydriques, il est aussi important de connaître l'évolution de la recharge des aquifères. Comme nous l'avons mentionné auparavant, le flux de décharge des aquifères est fondamental pour le maintien des

débits circulants en période d'été, outre le fait que les aquifères constituent une ressource hydrique importante dans certains secteurs des Pyrénées, notamment sur leur versant nord.

Le changement de la recharge est présenté dans la Figure 4.15 (cette fois-ci uniquement avec SWAT, car SASER ne simule pas les eaux souterraines). Le schéma spatial du changement de la recharge est étroitement lié au schéma de changement des précipitations, mais est également influencé par le schéma d'évapotranspiration, la configuration des sols et la nature du substrat lithologique. Nous constatons qu'une diminution de la recharge est

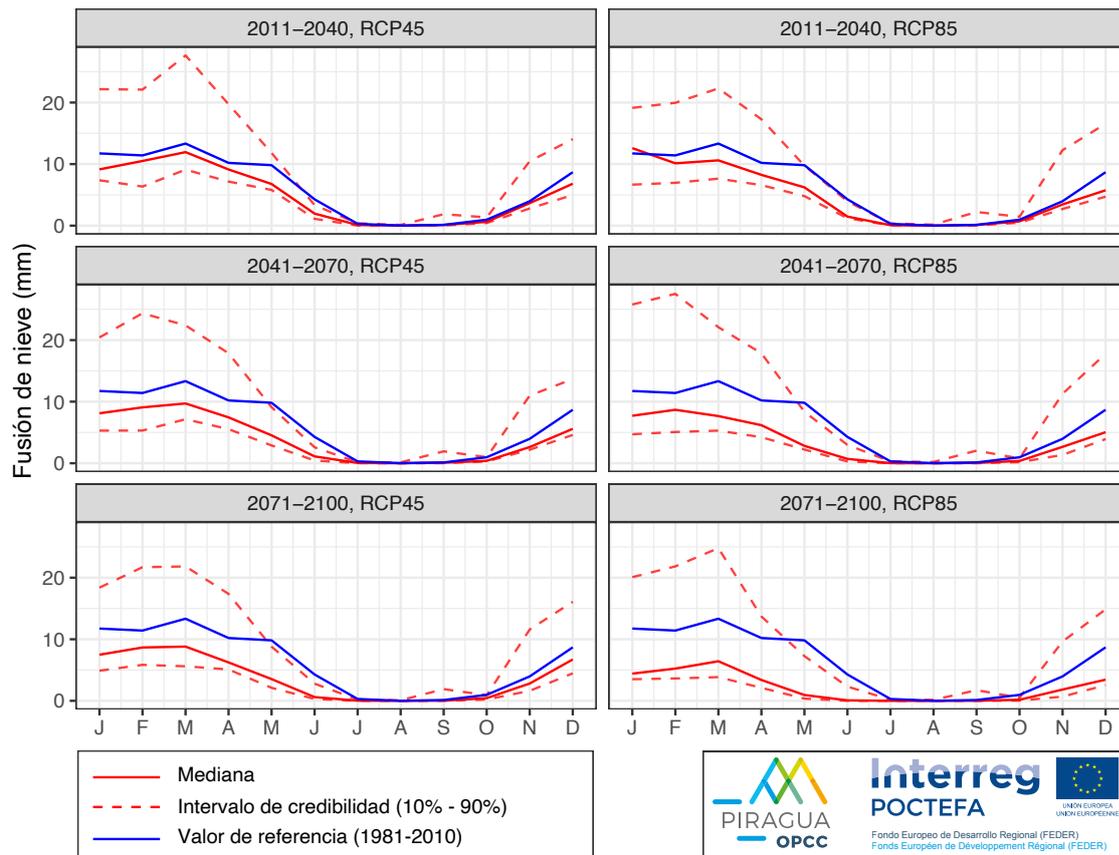


Figure 4.14. Fusión nivale moyenne mensuelle sur l'ensemble des Pyrénées pour deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5) et trois horizons temporels : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER), ligne rouge continue, intervalle de crédibilité (10 %-90 %), lignes rouges discontinues, et valeur moyenne de référence (1981-2010), ligne bleue.

(Source: PIRAGUA\_hydro\_climate.)

attendue dans pratiquement tout le domaine, à l'exception de quelques bassins au sud et à l'est du domaine (pas de consensus entre les modèles). À partir de la période temporelle centrale (2041-2070), les diminutions se trouvent dans une fourchette de 20 à 30 %.

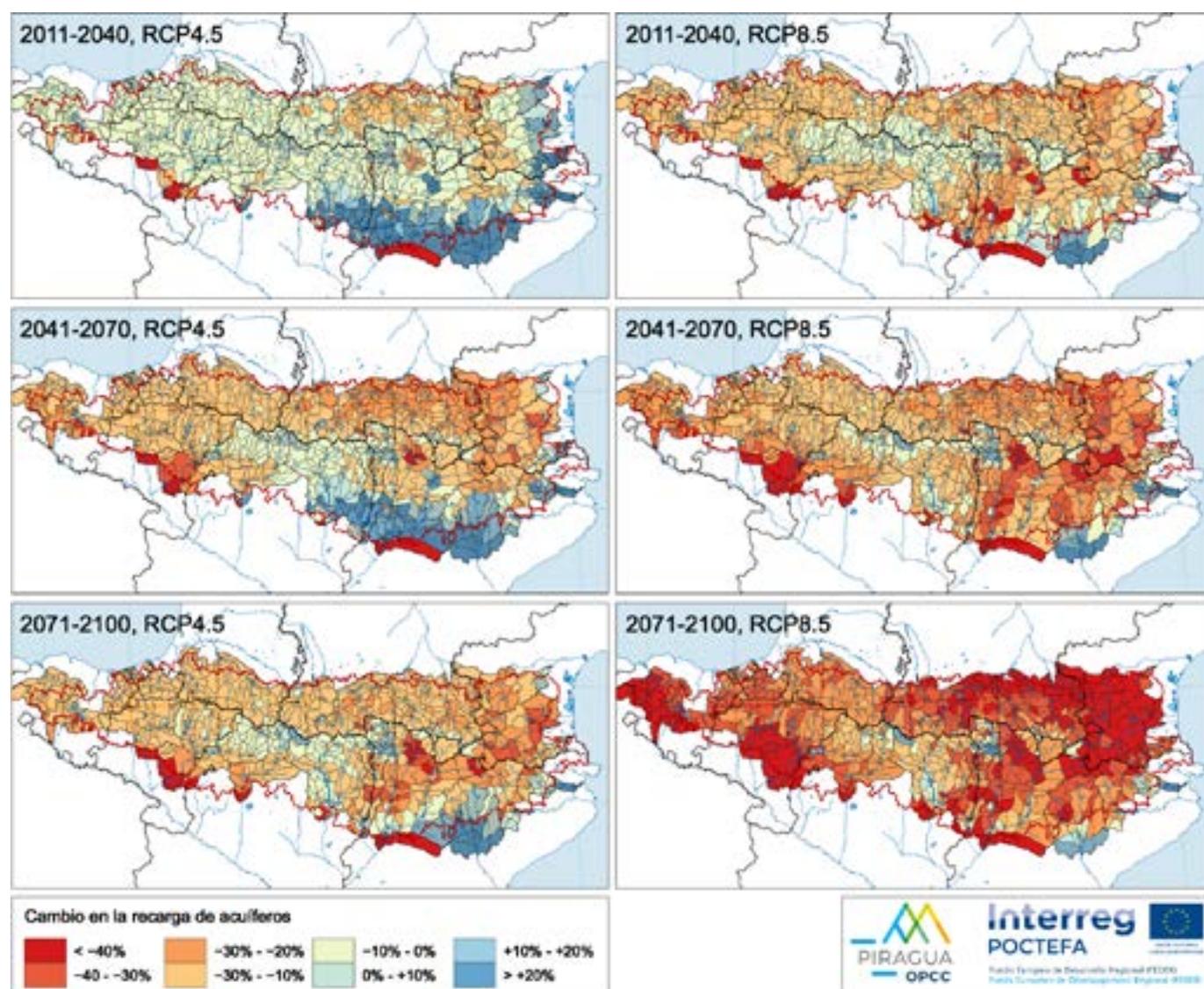


Figure 4.15. Changement dans la recharge des aquifères moyenne annuelle par rapport à 1981-2010 pour trois horizons temporels et deux scénarios d'émissions : valeurs moyennes de six modèles GCM (6 simulations SWAT). Les rayures indiquent un faible niveau d'accord entre les simulations (moins de 80 % des simulations s'accordent sur le signe du changement).

(Source: PIRAGUA\_hydro\_climate.)

La Figure 4.16 montre le cycle annuel de la recharge, étant plus importante en hiver et au printemps qu'en été et à l'automne. La comparaison de la moyenne des scénarios (ligne continue rouge) avec le climat de référence (ligne continue bleue) montre une diminution de la recharge dans tous les scénarios, celle-ci étant plus importante à mesure que nous avançons dans le XXI<sup>e</sup> siècle. Dans les périodes 2041-2070 et 2071-2100, la ligne bleue se trouve hors de l'intervalle de crédibilité, de telle sorte que nous pouvons affirmer que la diminution est certaine et significative. De toute façon, la plage d'incertitude est assez vaste entre janvier et avril.

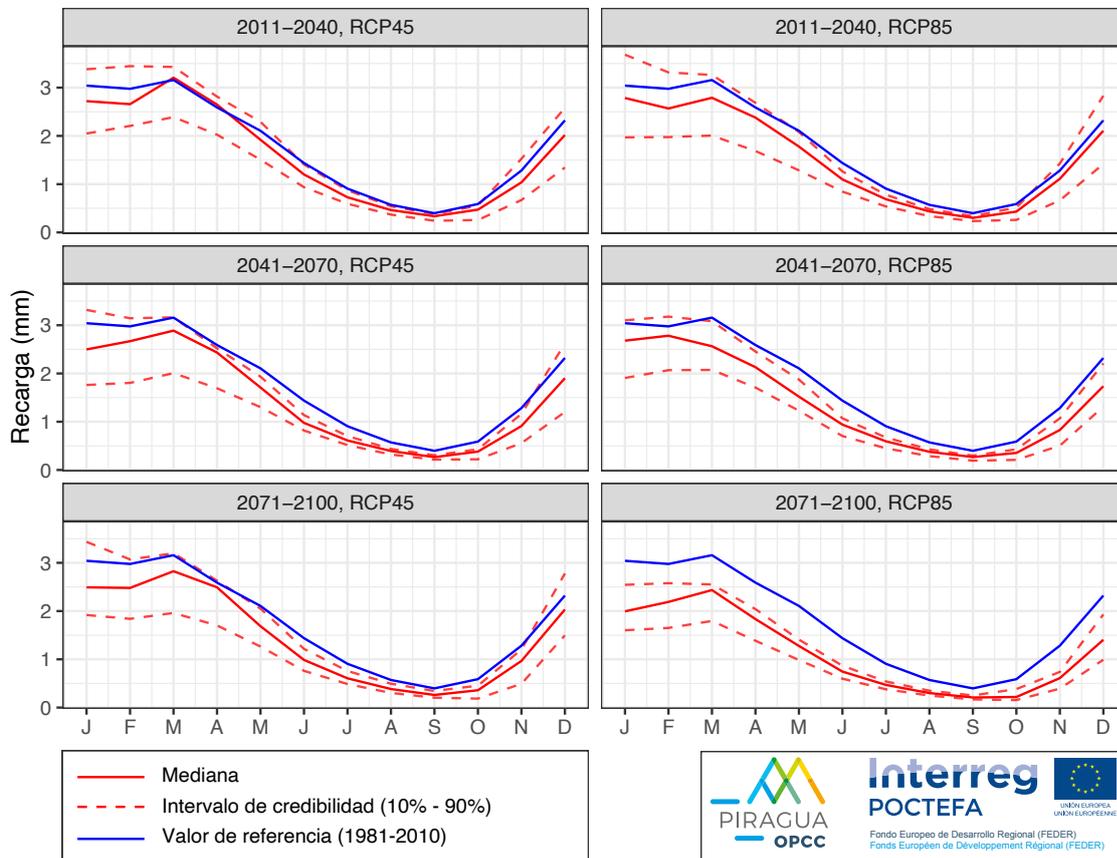


Figure 4.16. Recharge moyenne mensuelle sur l'ensemble des Pyrénées pour deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5) et trois horizons temporels : valeurs moyennes de six modèles GCM (6 simulations SWAT), ligne rouge continue, intervalle de crédibilité (10 %-90 %), lignes rouges discontinues, et valeur moyenne de référence (1981-2010), ligne bleue.

(Source: PIRAGUA\_hydro\_climate.)

### 4.3.4. Changements dans les variables d'état

L'humidité du sol est l'eau disponible pour la végétation et, par conséquent, est déterminante pour établir les schémas d'évaporation. Si l'humidité du sol diminue de façon générale, la transition saisonnière à un régime contrôlé par l'humidité du sol (la saison sèche) aura lieu plus tôt au printemps et le retour au régime contrôlé par la radiation (la saison humide) aura lieu plus tard à l'automne, ce qui affectera la végétation, qui sera plus souvent stressée, avec des impacts importants sur les écosystèmes et sur le paysage.

La Figure 4.17 présente le changement simulé dans la réserve d'humidité du sol. Dans presque tous les bassins et tous les horizons de temps, les cartes présentent clairement une diminution de l'humidité du sol, qui peut être de plus de 20 % dans les zones où celle-ci diminue plus (2071-2011, RCP 8.5). Ces résultats sont conformes à ce qui a été commenté dans la section précédente sur les changements de l'évapotranspiration. L'évapotranspiration diminue, car le sol est plus sec et il n'y a pas suffisamment d'eau pour répondre à la demande atmosphérique (la plus élevée).

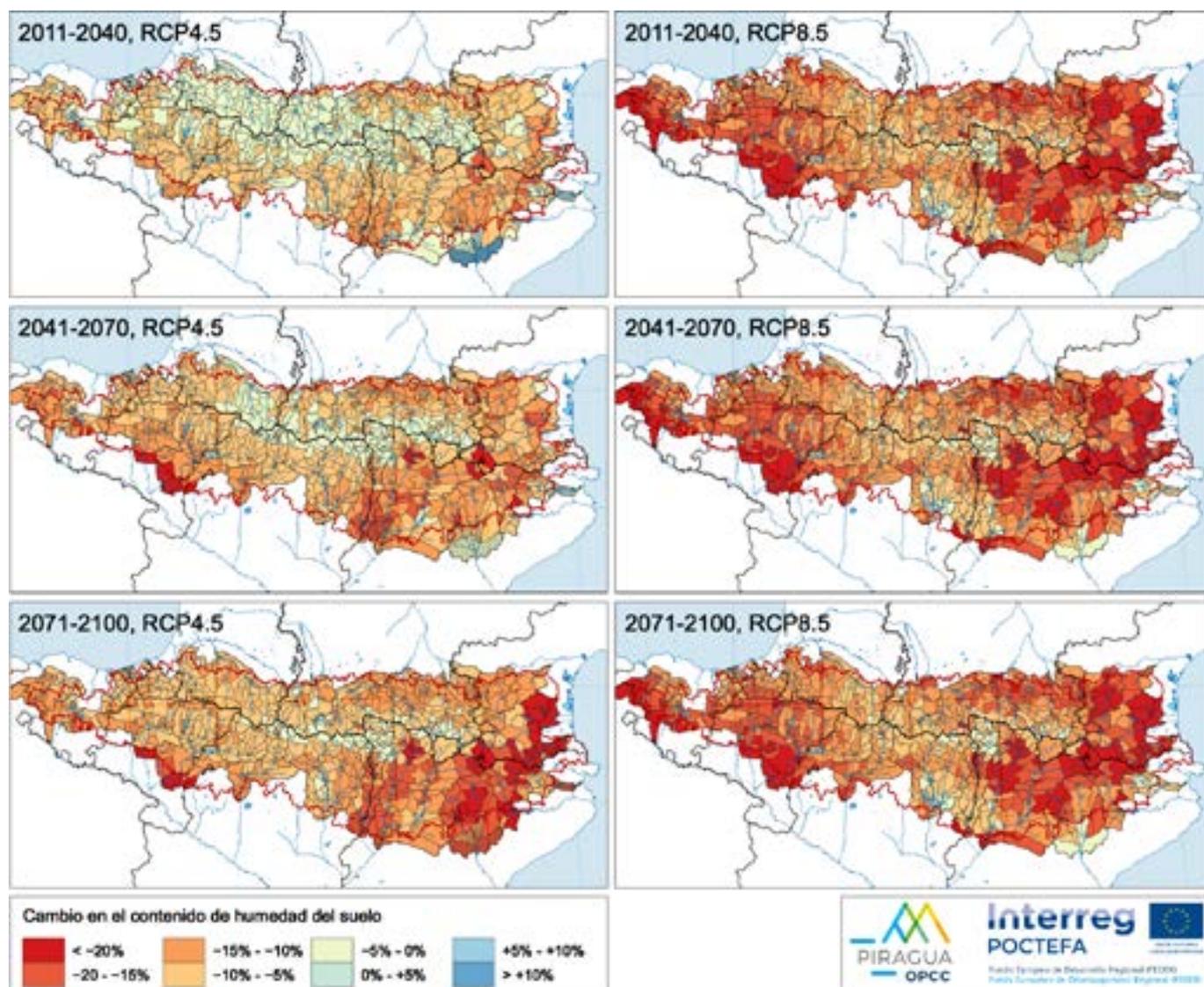


Figure 4.17. Changement de la réserve moyenne en eau du sol par rapport à 1981-2010 pour trois horizons temporels et deux scénarios d'émissions : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER). Les rayures indiquent un faible niveau d'accord entre les simulations (moins de 80 % des simulations s'accordent sur le signe du changement).

(Source: PIRAGUA\_hydro\_climate.)

La Figure 4.18, qui indique le cycle annuel moyen de l'humidité du sol et son changement par rapport au climat de référence (ligne bleue), nous observons que la diminution est généralisée. Au milieu du siècle, la ligne bleue est hors de l'intervalle de crédibilité, indiquant une certitude élevée par rapport à la diminution de l'humidité du sol. L'incertitude des simulations est plus grande à l'automne qu'en été.

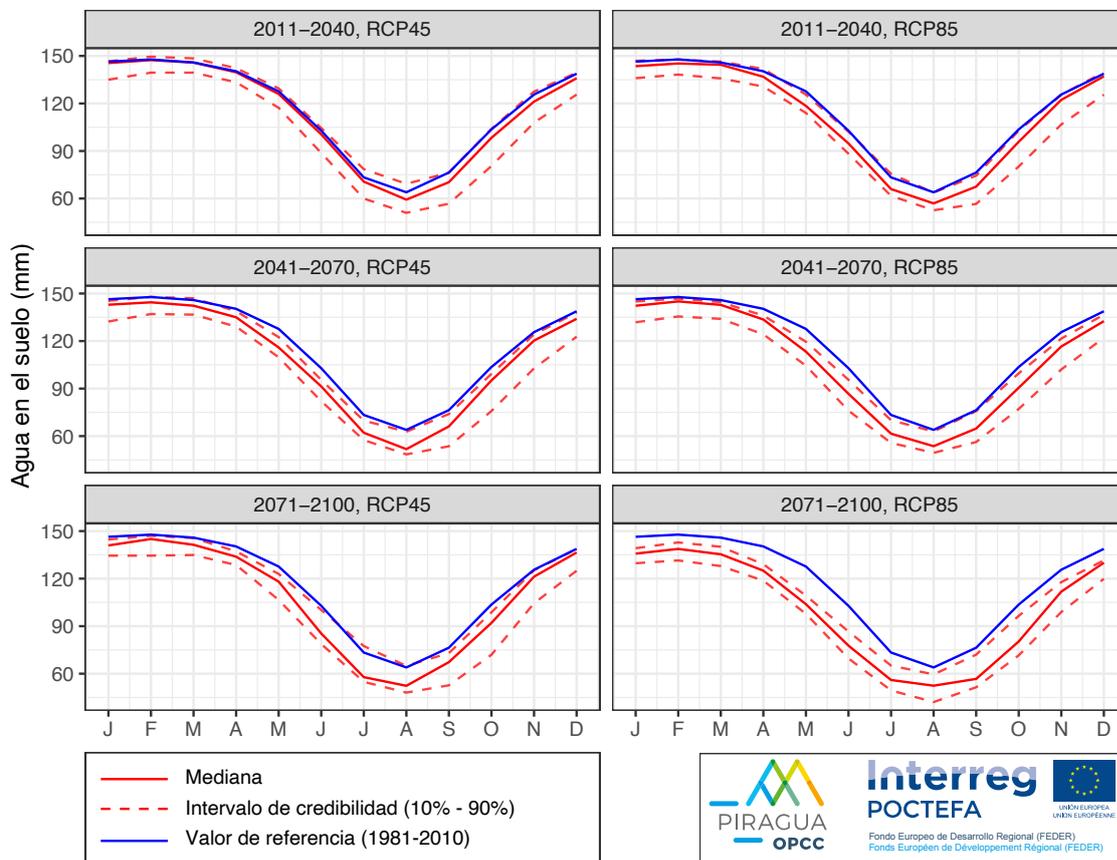


Figure 4.18. Réserve moyenne mensuelle en eau du sol sur l'ensemble des Pyrénées pour deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5) et trois horizons temporels : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER), ligne rouge continue, intervalle de crédibilité (10 %-90 %), lignes rouges discontinues, et valeur moyenne de référence (1981-2010), ligne bleue.

(Source: PIRAGUA\_hydro\_climate.)

La Figure 4.19 présente le changement simulé du manteau neigeux moyen annuel. Elle indique une diminution généralisée dans tout le domaine, notamment dans les zones de plus faible altitude, qui perdront le peu de neige qu'elles avaient. Dans le scénario RCP 8.5, la diminution est homogène sur tout le territoire et de plus de 80 %. C'est-à-dire que l'on peut s'attendre à une perte généralisée de neige et une transition des régimes hydriques de nivaux à pluviaux. Les zones qui résistent le plus à la perte de neige sont celles de la zone centrale des Pyrénées, notamment la vallée d'Arán.

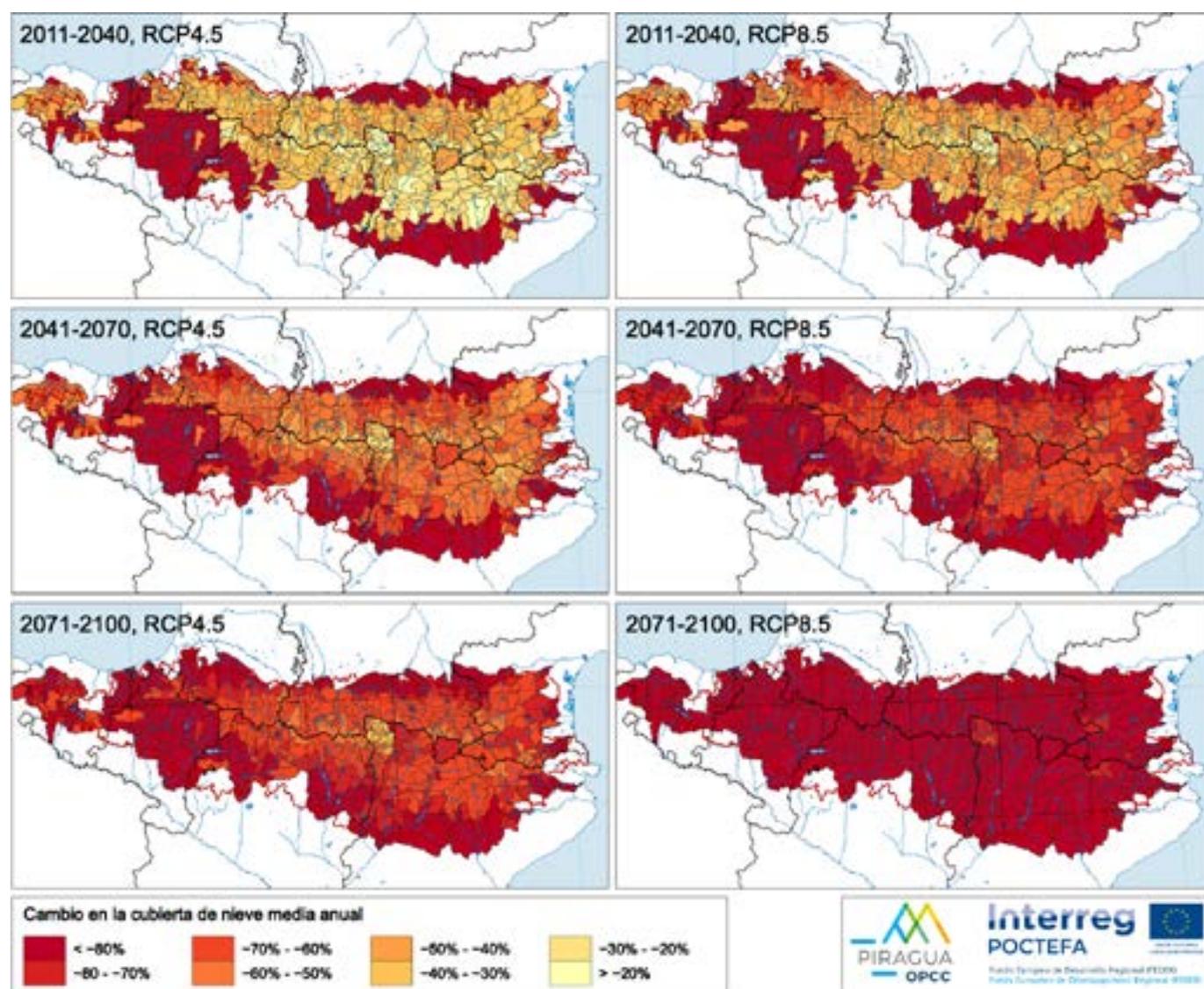


Figure 4.19. Changement de la couverture neigeuse moyenne annuelle (snow water equivalent) par rapport à 1981-2010 pour trois horizons temporels et deux scénarios d'émissions : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER).

(Source: PIRAGUA\_hydro\_climate.)

La Figure 4.20 donne une meilleure idée de l'ampleur de la diminution et de l'incertitude. À l'horizon le plus proche, la ligne bleue (climat de référence) est déjà hors de l'intervalle de crédibilité des simulations et, à mesure que nous avançons dans le siècle, la diminution augmente rapidement. La période avec présence de neige se rétrécit rapidement, les mois de février et de mars étant les périodes où une certaine présence de neige se maintient.

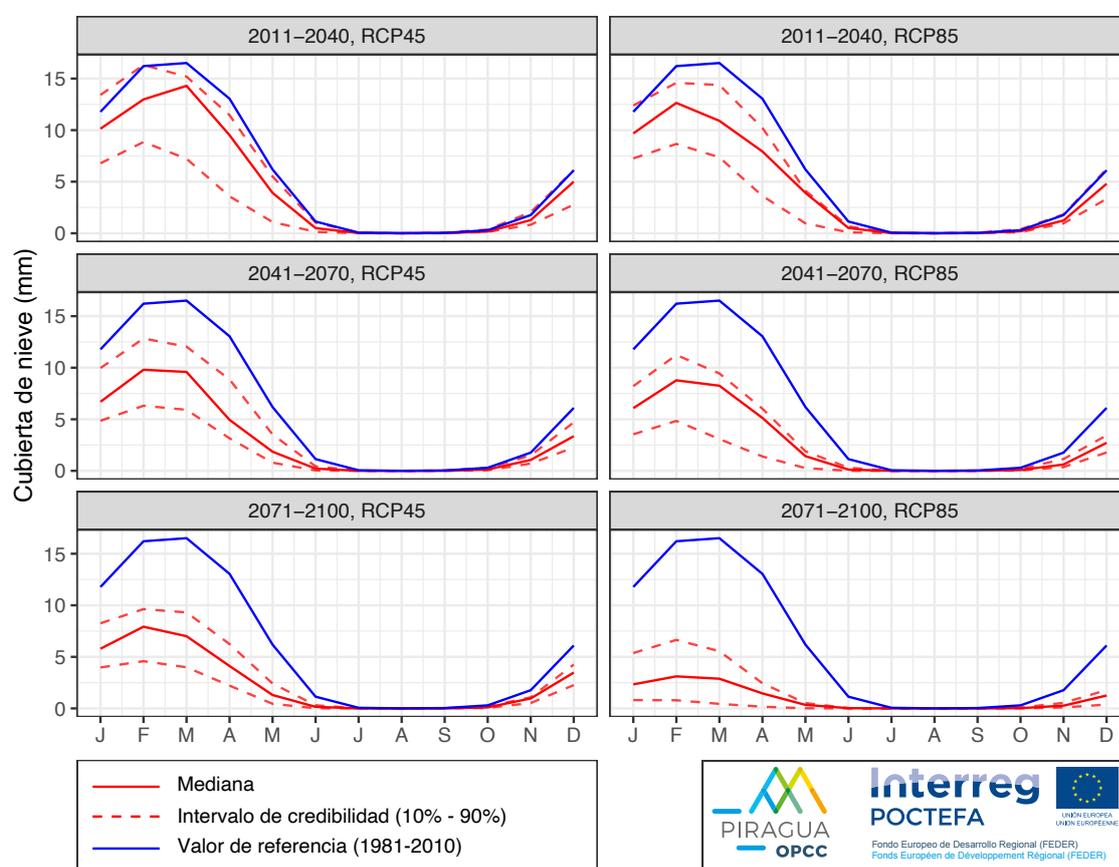


Figure 4.20. Couverture neigeuse moyenne annuelle de l'ensemble des Pyrénées pour deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5) et trois horizons temporels : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER), ligne rouge continue, intervalle de crédibilité (10 %-90 %), lignes rouges discontinues, et valeur moyenne de référence (1981-2010), ligne bleue.

(Source: PIRAGUA\_hydro\_climate.)

### 4.3.5. Changements d'autres variables : stress hydrique et apport

Dans cette section, nous présentons deux variables qui découlent des précédentes. Nous analysons tout d'abord l'indice d'aridité, puis le débit superficiel (exprimé sous forme d'apport annuel).

La Figure 4.21 indique le changement de l'indice d'aridité, défini comme le quotient entre l'évapotranspiration potentielle et l'évapotranspiration réelle. Afin d'interpréter les

changements de cette variable, nous devons nous souvenir que l'évapotranspiration potentielle est celle qui aurait lieu si le sol était toujours bien humide. Comme cette situation n'existe pratiquement jamais, l'évaporation réelle est presque toujours plus faible. Le type de couverture végétale et l'humidité du sol jouent un rôle très important dans ce processus, car plus le sol est sec, plus les plantes auront du mal à transpirer au rythme potentiel. Plus la différence entre l'évapotranspiration potentielle et l'évapotranspiration réelle est grande, plus l'aridité et le stress de la végétation sont élevés.

Les résultats des simulations indiquent un

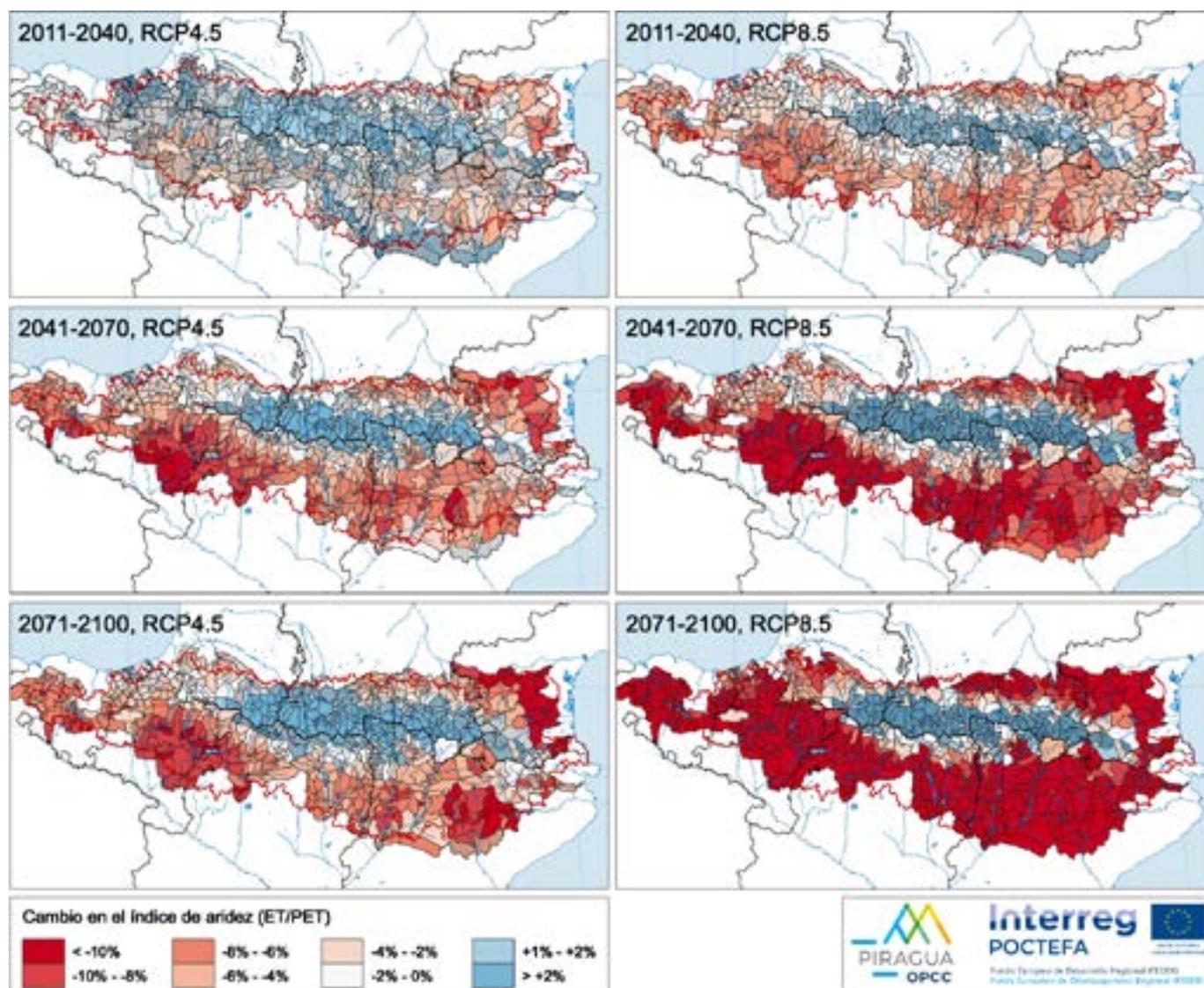


Figure 4.21. Changement de l'indice d'aridité annuelle (évapotranspiration réelle / évapotranspiration potentielle) par rapport à 1981-2010 pour trois horizons temporels et deux scénarios d'émissions : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER). Les rayures indiquent un faible niveau d'accord entre les simulations (moins de 80 % des simulations s'accordent sur le signe du changement).

(Source: PIRAGUA\_hydro\_climate.)

contraste entre un secteur où l'aridité diminue (zone centrale des Pyrénées septentrionales), bien que sans forte concordance entre les simulations, et des secteurs où l'aridité augmente (avec un bon niveau de concordance). Dans les zones où l'aridité diminue, c'est principalement parce que la couverture neigeuse diminue et, par conséquent, davantage d'eau liquide est disponible pour la végétation au sol. Ce sont des zones où l'eau est disponible en quantité suffisante pour répondre à l'augmentation de la demande d'évaporation atmosphérique. En revanche, dans les régions où l'aridité augmente, il n'y a pas assez d'eau pour répondre à l'augmentation de la demande.

Le rythme saisonnier de l'indice d'aridité (Figure 4.22) indique une tendance moyenne nette à l'augmentation de l'aridité (valeurs les plus basses de l'indice), notamment durant la saison de plus grande croissance végétale, entre mai et novembre. L'incertitude est élevée durant la période temporelle la plus proche (2011-2040), la ligne bleue qui représente le climat actuel se situant dans l'intervalle de crédibilité des simulations. Toutefois, à partir de la moitié du XXIe, l'intervalle de crédibilité se situe nettement en-dessous du climat actuel, notamment durant la période estivale.

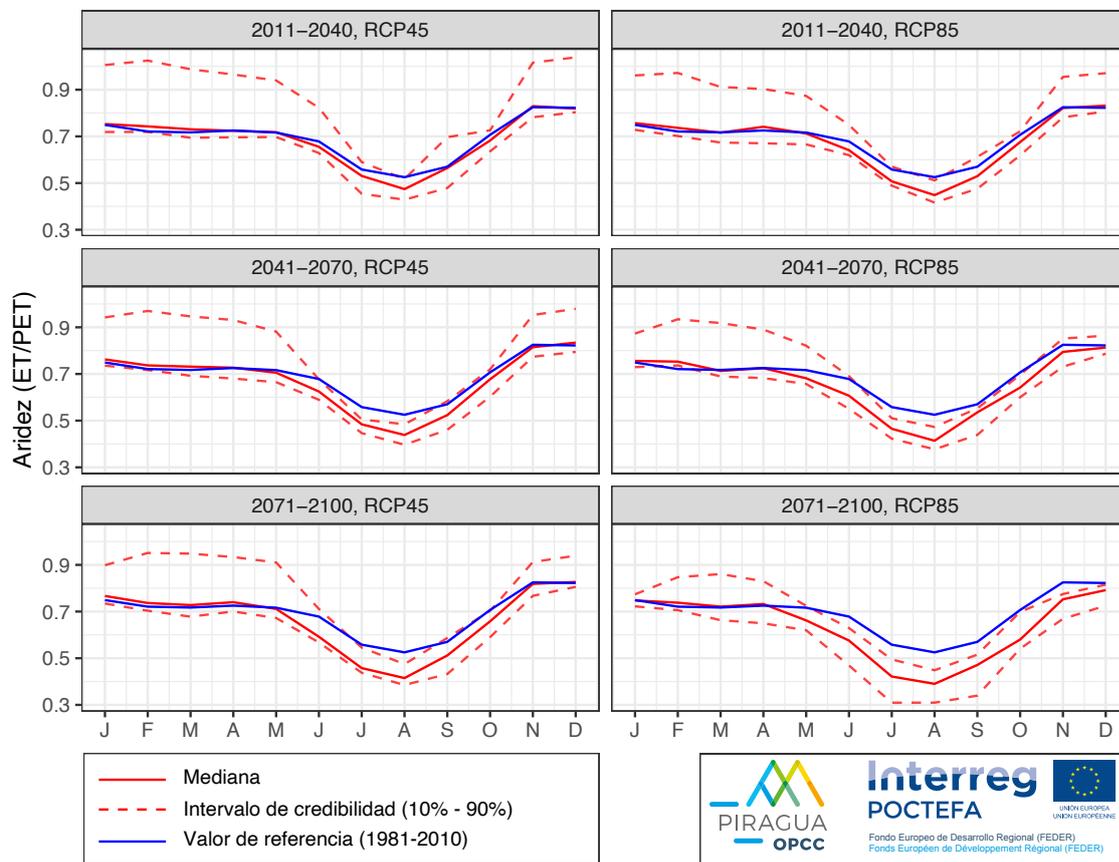


Figure 4.22. Aridité moyenne mensuelle (évapotranspiration réelle / évapotranspiration potentielle) de l'ensemble des Pyrénées pour deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5) et trois horizons temporels : valeurs moyennes de neuf modèles GCM (6 simulations SWAT + 3 simulations SASER), ligne rouge continue, intervalle de crédibilité (10 %-90 %), lignes rouges discontinues, et valeur moyenne de référence (1981-2010), ligne bleue.

(Source: PIRAGUA\_hydro\_climate.)

Concernant les ressources en eau et leur gestion, la variable la plus importante est le débit circulant superficiel, qui peut se résumer par l'apport cumulé (quantité d'eau qui s'écoule en un point d'un lit, durant une période de temps cumulée). Très fréquemment, la planification hydrologique se réalise en termes de volume d'eau annuel. La Figure 4.23 indique le changement attendu pour cette variable. La tendance simulée s'oriente vers une diminution généralisée des apports par rapport à l'horizon actuel. Cette diminution est plus accentuée sur le versant nord des Pyrénées (bassins français) et s'accroît à mesure que nous avançons dans le XXI<sup>e</sup>, ainsi qu'à l'horizon des plus grandes émissions.

Il existe un degré important de convergence quant à ce résultat, comme nous pouvons le constater dans la Figure 4.24. La diminution de l'apport s'observe tous les mois de l'année, bien qu'elle soit plus grande les mois de printemps et d'été et plus faible les mois d'hiver. L'incertitude se maintient dans la plupart des périodes temporelles et scénarios d'émissions, notamment durant l'hiver, lorsqu'il est possible que les plus grands débits dus à l'accélération du dégel et à la plus grande proportion de précipitations liquides compensent la perte de débit. À partir des mois de printemps, il existe, néanmoins, une convergence élevée et la ligne bleue qui représente le climat actuel se situe hors de l'intervalle de crédibilité des simulations. Ce n'est qu'à l'horizon le plus proche (2011-2040)

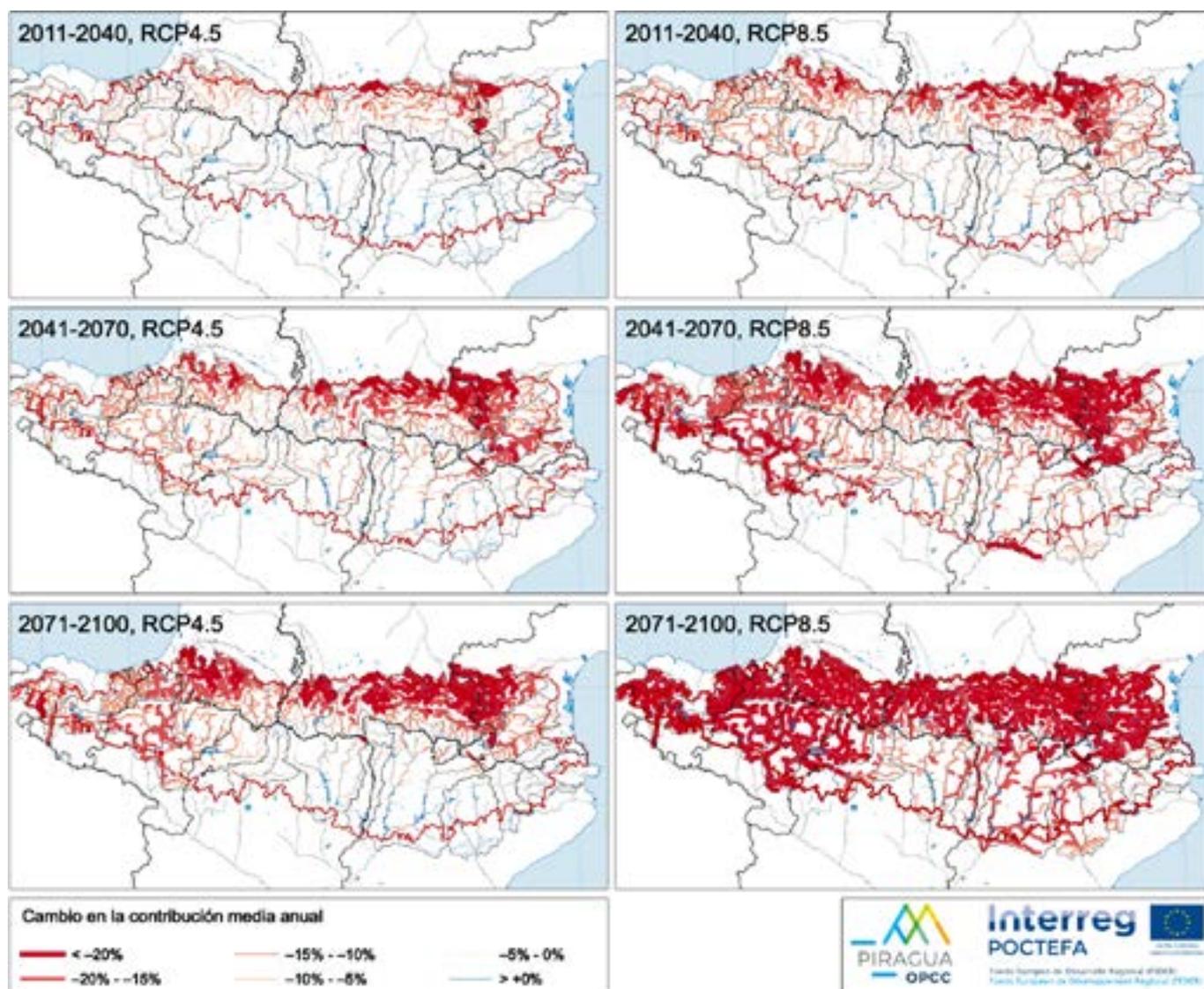


Figure 4.23. Changement de la contribution (apport de débit) annuelle par rapport à 1981-2010 pour trois horizons temporels et deux scénarios d'émissions : valeurs moyennes de six modèles GCM (6 simulations SWAT). La ligne discontinue indique un faible niveau de convergence entre les simulations (moins de 80 % des simulations concordent sur le signe du changement).

(Source: PIRAGUA\_hydro\_climate.)

qu'il existe un certain chevauchement.

Du fait de l'importance de la contribution de débit pour la gestion des ressources hydriques, nous avons également représenté le changement en termes relatifs (Figure 4.25). Dans ce cas, la valeur 0 représente l'absence de changement par rapport au climat présent, alors que des valeurs positives et négatives indiquent respectivement, des changements vers un apport plus important et plus faible. Conformément à ce que nous avons vu dans la figure précédente, il existe un degré élevé de convergence parmi les simulations sur la tendance à la diminution des apports de débit. La diminution moyenne oscille entre 10 %

entre juillet et octobre à l'horizon 2011-2040 et le scénario RCP 4.5 (atteignant 20 % dans le cas du scénario RCP 8.5) et 25 % en fin de siècle et à l'horizon RCP 4.5 (près de 50 % au mois de juin dans le scénario RCP 8.5). Comme nous pouvons le constater, il s'agit de changements majeurs qui auront, sans aucun doute, d'importantes conséquences dans la disponibilité des ressources en eau et leur gestion.

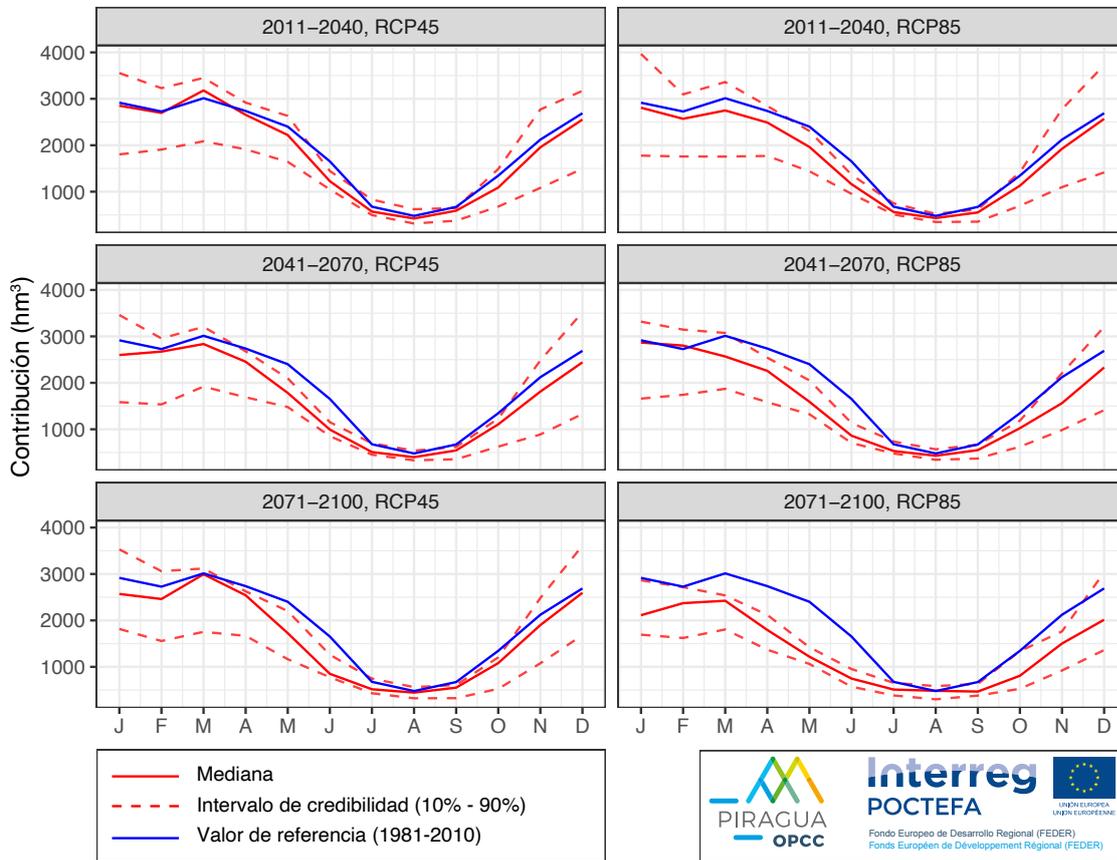


Figure 4.24. Contribution moyenne mensuelle de l'ensemble des rivières des Pyrénées pour deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5) et trois horizons temporels : valeurs moyennes de six modèles GCM (6 simulations SWAT), ligne rouge continue, intervalle de crédibilité (10 %-90 %), lignes rouges discontinues, et valeur moyenne de référence (1981-2010), ligne bleue.

(Source: PIRAGUA\_hydro\_climate.)

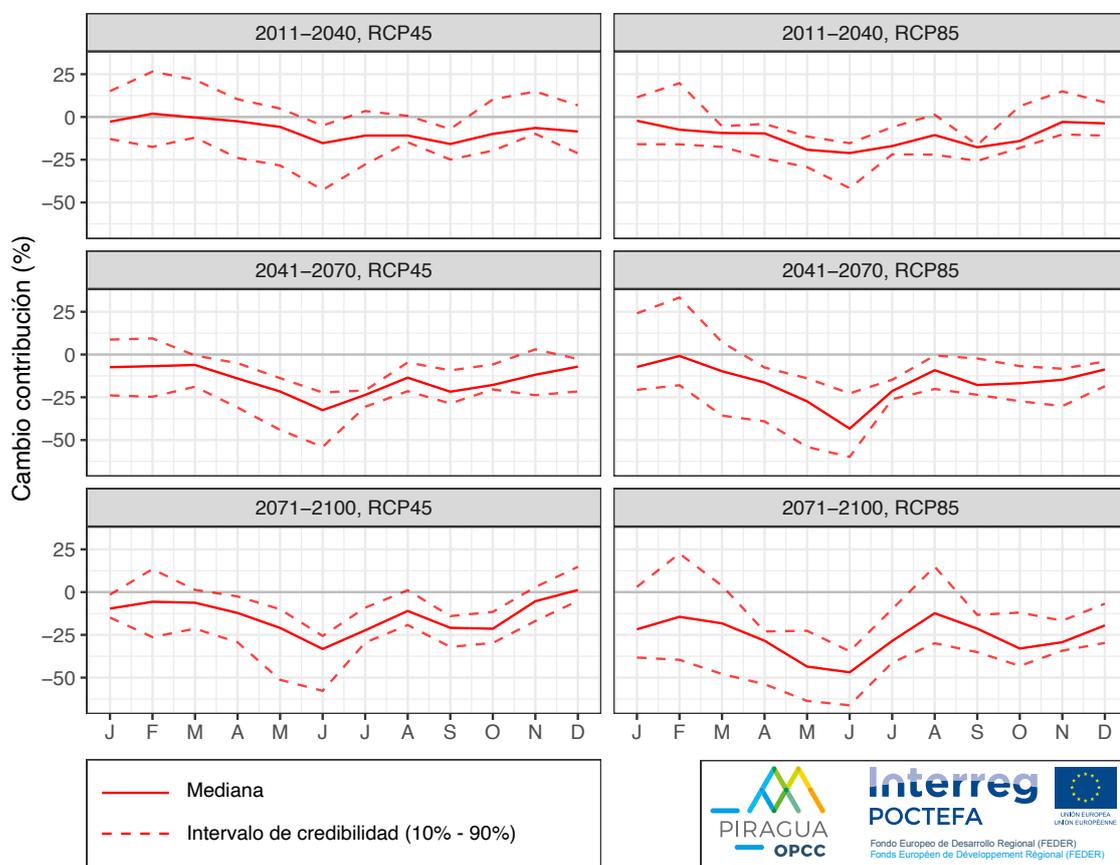


Figure 4.25. Changement dans la contribution moyenne mensuelle de l'ensemble des rivières des Pyrénées pour deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5) et trois horizons temporels : valeurs moyennes de six modèles GCM (6 simulations SWAT), ligne rouge continue, intervalle de crédibilité (10 %-90 %), lignes rouges discontinues, et valeur moyenne de référence (1981-2010), ligne bleue.

(Source: PIRAGUA\_hydro\_climate.)

## 4.4. Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de l'étude d'impact du changement climatique sur les ressources en eau des Pyrénées, élaborée dans le cadre du projet PIRAGUA. Nous avons élaboré une méthodologie qui prend en compte les incertitudes à différents niveaux (scénarios d'émissions, modèles globaux du climat, méthodes de régionalisation, correction du biais et modèles d'impact). Il est peu commun de trouver des études d'impact sur le changement climatique qui prennent en compte les incertitudes dans toutes les étapes de la méthodologie, notamment dans l'étape finale, celle du modèle d'impact. Dans ce cas, nous avons utilisé deux modèles très différents (SWAT et SASER), ce qui nous permet d'avoir suffisamment confiance en la fiabilité des résultats obtenus.

L'étude indique qu'à l'avenir, le climat dans les Pyrénées sera clairement plus chaud sur tout le domaine d'étude, et plus sec, bien que les précipitations moyennes annuelles puissent augmenter dans le sud-est du domaine (zone méditerranéenne méridionale), bien qu'il existe une incertitude élevée concernant ce dernier point. L'évapotranspiration réelle diminue également à mesure que nous avançons dans le siècle, avec un consensus élevé entre simulations à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle, bien que l'évapotranspiration potentielle augmente. Cela s'explique par une diminution de la disponibilité en eau du sol. Tout cela se traduira par un climat plus aride dans l'ensemble du domaine, sauf en altitude où la fusion nivale plus précoce et plus prononcée contribuera à augmenter l'humidité du sol et donc l'eau disponible pour la végétation.

La neige a une influence majeure sur le régime hydrologique des bassins pyrénéens. L'étude montre que la couverture de neige diminuera à l'avenir sur tout le domaine, avec de fortes réductions, et que la fonte des neiges diminuera en raison de la diminution du manteau neigeux et de l'augmentation de la sublimation. En conséquence, les bassins pyrénéens auront à l'avenir un régime moins neigeux et plus pluvial. Concernant les ressources en eau, la recharge des aquifères diminuera, sauf dans les zones où les précipitations peuvent augmenter, si elles le font effectivement. La production de ruissellement diminuera également de manière généralisée sur

pratiquement tout le domaine, en particulier sur le versant nord des Pyrénées, à l'exception de quelques sous-bassins dans le sud-est de la zone pyrénéenne. Les changements les plus marqués concerneront la température et la réduction de la neige, qui sont étroitement liées, ce qui modifiera la saisonnalité et donc le régime hydrologique des bassins étudiés.

Par conséquent, l'apport des principales rivières des Pyrénées à la sortie du massif sera affectée par d'importantes diminutions, pouvant atteindre plus de 20 % de réduction de l'apport annuel sur le versant nord du massif à la moitié et à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle, bien qu'elles seront plus modérées (entre 10 et 15 %) sur le versant sud, où les bassins les plus occidentaux seront plus affectés que les orientaux.



---

## *Bibliographie*

---

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>.

Babault, J., Teixell Chácharo, A., Teixell, A. (2007). El relieve de los Pirineos. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* 15(2), 135-150. <https://raco.cat/index.php/ECT/article/view/120965>.

Bard, A., Renard, B., Lang, M., Giuntoli, I., Korck, J., Koboltschnig, G., Janža, M., d'Amico, M., Volken, D. (2015). Trends in the hydrologic regime of Alpine rivers. *Journal of Hydrology* 529, 1823-1837. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.07.052>.

Barriendos, M., Coeur, D., Lang, M., Llasat, M.C., Naulet, R., Lemaitre, F., Barrera, A. (2003). Stationarity analysis of historical flood series in France and Spain (14th-20th centuries). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3, 583-592. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-583-2003>.

Beguiría, S., Palazón, L., Grusson, Y., Sánchez-Pérez, J.M., Sauvage, S., Cakir, R., Quintana-Seguí, P., Barella, A., Vidal, J.P. (2022a). PIRAGUA\_hydro\_analysis [Dataset]. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC). <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14667>.

Beguiría, S., Palazón, L., Grusson, Y., Sánchez-Pérez, J.M., Sauvage, S., Cakir, R., Quintana-Seguí, P., Barella, A., Vidal, J.P. (2022b). PIRAGUA\_hydro\_climate [Dataset]. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC). <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14668>.

Beguiría, S., Palazón, L., Travasset, O., Le Coent, P., Forey, I. (2022c). PIRAGUA\_resources [Dataset]. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC). <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14641>.

Beguiría, S., López-Moreno, J.I., Lorente, A., Seeger, M., García-Ruiz, J.M. (2003). Assessing the effects of climate oscillations and land-use changes on streamflow in the central Spanish Pyrenees. *Ambio* 32(4), 283-286. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-32.4.283>.

Clemens, P.J., Bucini, G., Winter, J. M., Beckage, B., Towler, E., Betts, ., Cummings, R. Chang-Queiroz, H. (2019). An analog approach for weather estimation using climate projections and reanalysis data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 58(8), 1763-1777. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-18-0255.1>.

CLIMPY-OPCC. (2019). Caracterización de la evolución del clima y provisión de información para la adaptación en los Pirineos [Proyecto de investigación]. [https://opcc-ctp.org/es/climpy\\_visitado\\_en\\_junio\\_de\\_2022](https://opcc-ctp.org/es/climpy_visitado_en_junio_de_2022).

Dai, A., Qian, T., Trenberth, K.E., Milliman, J.D. (2009). Changes in continental freshwater discharge from 1948 to 2004. *Journal of Climate* 22, 2773-2792. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2592.1>.

Espinoza-Villar, J.C., Guyot, J.L., Ronchail, J., Cochonneau, G., Filizola, N., Fraizy, P., Labat, D., de Oliveira, E., Ordoñez, J.J., Vauchel, P. (2009). Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon basin (1974-2004). *Journal of Hydrology* 375, 297-311. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.03.004>.

- 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 (Surface water resources of the Aragonais Pyrenees). Ed. Geoforma, Logroño, 192 pp.
- 
- 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>.
- 
- Giuntoli, I., Renard, B. (2010). Identification des impacts hydrologiques du changement climatique: constitution d'un réseau de référence pour la surveillance des étiages. Rapport d'étude CEMAGREF-ONEMA. <https://hal.inrae.fr/hal-02595597>.
- 
- Giuntoli, I., Renard, B., Vidal, J.-P., Bard, A. (2013). Low flows in France and their relationship to large-scale climate indices. *Journal of Hydrology* 482, 105-118. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.038>.
- 
- Hartmann, D.L., Klein Tank, A.M.G., Rusticucci, M., Alexander, L.V., Broennimann, S., Charabi, Y., Dentener, F.J., Dlugokencky, E.J., Easterling, D.R., Kaplan, A., Soden, B.J., Thorne, P.W., Wild, M., Zhai, P.M. (2013). Observations: atmosphere and surface. In: Stocker, T., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 159-254.
- 
- Hisdal, H., Stahl, K., Tallaksen, L.M., Demuth, S. (2001). Have streamflow droughts in Europe become more severe or frequent? *International Journal of Climatology* 21, 317-333. <https://doi.org/10.1002/joc.619>.
- 
- Llasat, M.C., Barriendos, M., Barrera, A., Rigo, T. (2005). Floods in Catalonia (NE Spain) since the 14th century. Climatological and meteorological aspects from historical documentary sources and old instrumental records. *Journal of Hydrology* 313, 32-47. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.02.004>.
- 
- Llasat, M.C., Llasat-Botija, M., Petrucci, O., Pasqua, A.A., Rosselló, J., Vinet, F., Boissier, L. (2013). Towards a database on societal impact of Mediterranean floods in the framework of the HYMEX project. *Natural Hazards and Earth System Science* 13, 1-14. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-1-2013>.
- 
- Llasat, M.C., Pardo, E., Llasat-Botija, M. (2022). PIRAGUA\_flood [Dataset]. Universidad de Barcelona (UB). <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14650>.
- 
- 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., Beguería, S., Vicente-Serrano, S.M., García-Ruiz, J.M. (2007). Influence of the North Atlantic Oscillation on water resources in central Iberia, Precipitation, streamflow anomalies, and reservoir management strategies. *Water Resources Research* 43, <https://doi.org/10.1029/2007WR005864>.
- López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Gimeno, L., Nieto, R. (2009). Stability of the seasonal distribution of precipitation in the Mediterranean region, Observations since 1950 and projections for the 21st century. *Geophysical Research Letters* 36, <https://doi.org/10.1029/2009GL037956>.
- 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>.
- Martín Ranz, M.C., Puigdefábregas Tomás, J., García Ruiz, J.M. (1983) Diferencias espaciales en la respuesta hidrológica a las precipitaciones torrenciales de noviembre de 1982 en el Pirineo Central. *Estudios geográficos* 44(170-171), 291-310.
- Milliman, J.D., Farnsworth, K.L., Jones, P.D., Xu, K.H., Smith, L.C. (2008). Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951 - 2000. *Global and Planetary Change* 62, 187-194. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.03.001>.
- OPCC (2022). Geoportal del Observatorio Pirenaico del Cambio Climático (OPCC), <https://opcc-ctp.org/geoportal>, consultado en junio de 2022.
- Piao, S., Ciais, P., Huang, Y., Shen, Z., Peng, S., Li, J., Zhou, L., Liu, H., Ma, Y., Ding, Y., Friedlingstein, P., Liu, Ch., Tan, K., Yu, Y., Zhang, T., Fang, J. (2010). The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature* 467 (2), 43-51. <https://doi.org/10.1038/nature09364>.
- Pineda, N., M. Prohom, A. Serra, G. Martí, C. Garcia, E. Velasco, A. Gracia (2013). Causes que van provocar la riuada a la Val d’Aran el 18 de juny de 2013, Resums de les Ponències de la Jornada “La gestió de les inundacions“, p. 120-125, Barcelona, 27 i 28 de novembre de 2013.
- Quintana-Seguí, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., Morel, S. (2008). Analysis of near-surface atmospheric variables: Validation of the SAFRAN analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47(1), 92-107. <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1636.1>.
- Quintana Seguí, P., Peral, C., Turco, M., Llasat, M. D. C., Martin, E. (2016). Meteorological analysis systems in North-East Spain: validation of SAFRAN and SPAN. *Journal of Environmental Informatics* 27(2), 116-130. <http://dx.doi.org/10.3808/jei.201600335>.
- Quintana-Seguí, P., Turco, M., Herrera, S., Miguez-Macho, G. (2017). Validation of a new SAFRAN-based gridded precipitation product for Spain and comparisons to Spain02 and ERA-Interim. *Hydrology and Earth System Sciences* 21(4), 2187-2201. <https://doi.org/10.5194/hess-21-2187-2017>.
- Quintana-Seguí, P., Le Cointe, P. (2022). PIRAGUA\_atmos\_analysis [Dataset]. Observatori de l’Ebre (URL-CSIC). <http://digital.csic.es/handle/10261/271111>.

- Quintana-Seguí, P., Vidal, J.-P., Le Cointe, P. (2022). PIRAGUA\_atmos\_climate [Dataset]. Observatori de l'Ebre (URL-CSIC). <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14666>.
- 
- Rice, J.S., Emanuel, R.E., Vose, J.M., Nelson, S.A.C. (2015). Continental U.S. streamflow trends from 1940 to 2009 and their relationship with watershed spatial characteristics. *Water Resources Research* 51, 6262-6275. <https://doi.org/10.1002/2014WR016367>.
- 
- Sen, P.K. (1968). Estimates of regression coefficients based on Kendall's tau, *Journal of the American Statistical Association* 63:324, 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- 
- Stahl, K., Hisdal, H., Hannaford, J., Tallaksen, L.M., van Lanen, H.A.J., Sauquet, E., Demuth, S., Fendekova, M., Jodar, J. (2010). Streamflow trends in Europe: evidence from a dataset of near-natural catchments. *Hydrology and Earth System Sciences* 14, 2367–2382. <https://doi.org/10.5194/hess-14-2367-2010>.
- 
- Vicente-Serrano, S.M., Peña-Gallardo, M., Hannaford, J., Murphy, C., Lorenzo-Lacruz, J., Dominguez-Castro, F., López-Moreno, J.I., Beguería, S., Noguera, I., Harrigan, S., Vidal J.-P. (2019). Climate, Irrigation, and Land Cover Change Explain Streamflow Trends in Countries Bordering the Northeast Atlantic. *Geophysical Research Letters* 46 (19), 10821-10833. <https://doi.org/10.1029/2019GL084084>.
- 
- Vidal, J. P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., Soubeyroux, J. M. (2010). A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the SAFRAN system. *International Journal of Climatology* 30(11), 1627-1644. <https://doi.org/10.1002/joc.2003>.
- 
- Ward, Ph., de Ruiter, M., Mard, J., Schröter, K., Van Loon, A., Veldkamp, T., von Uexkull, N., Wanders, N., AghaKouchak, A., Arnbjerg-Nielsen, K., Capewell, L., Llasat, M.C., Day, R., Dewals, B., Di Baldassarre, G., Huning, L., Kreibich, H., Mazzoleni, M., Savelli, E., Teutschbein, C., van den Berg, H., van der Heijden, A., Vincken, J., Waterloo, M.J., Wens, M. (2020). The need to integrate flood and drought disaster risk reduction strategies. *Water Security* 11, 100070. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100070>.
- 
- 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>.
- 
- Xoplaki, E., González-Rouco, J.F., Luterbacher, J., Wanner, H. (2004). Wet season Mediterranean precipitation variability, influence of large-scale dynamics and trends. *Climate Dynamics* 23, 63-78. <https://doi.org/10.1007/s00382-004-0422-0>.
- 
- Yue, S., Pilon, P., Phinney, B., Cavadias, G. (2002). The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes* 16, 1807-1829. <https://doi.org/10.1002/hyp.1095>.
- 
- Yue, S., Pilon, P., Phinney, B. (2003). Canadian streamflow trend detection: impacts of serial and cross-correlation. *Hydrological Sciences Journal* 48(1), 51-63. <https://doi.org/10.1623/hysj.48.1.51.43478>.
-

Zabaleta, A., Beguería, S., Antiguiedad, I., Lambán, J., Hakoun, V., Jung, M., Le Cointe, P., Caballero, Y. (2022). PIRAGUA\_indicators [Dataset]. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC). <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14658>.

---

Zhang, X.S., Amirthanathan, G.E., Bari, M.A., Laugesen, R.M., Shin, D., Kent, D.M., Macdonald, A.M., Turner, M.E., Narendra. K.T. (2016). How streamflow has changed across Australia since the 1950s: evidence from the network of hydrologic reference stations. *Hydrology and Earth System Sciences* 20, 3947-3965. <https://doi.org/10.5194/Hess-20-3947-2016>.

---



---

*Partenaires*



---

*Associés*



---

*Avec le soutien de*



Govern d'Andorra



Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER)  
Fonds Européen de Développement Régional (FEDER)