Le changement climatique dans les Pyrénées: impacts, vulnérabilités et adaptation

Bases de connaissances pour la future stratégie d'adaptation au changement climatique dans les Pyrénées

Le changement climatique dans les Pyrénées: impacts, vulnérabilités et adaptation

Bases de connaissances pour la future stratégie d'adaptation au changement climatique dans les Pyrénées

OPCC-CTP (2018). Le changement climatique dans les Pyrénées: impacts, vulnérabilités et adaptation
Bases de connaissances pour la future stratégie d'adaptation au changement climatique dans les Pyrénées

ISBN: 978-84-09-06268-3

Coordination et édition de textes: Juan Terrádez e Idoia Arauzo
Design de la couverture: La Page Original
Edition graphique et mise en page: Collserola
Photo de couverture: © OPCC

Mentions légales
Le contenu de cette publication ne reflète pas nécessairement les opinions officielles de l'Observatoire des Pyrénées Changement Climatique ou autres institutions de l'Union Européenne. Ni l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique, ni aucune personne ni entreprise agissant pour le compte de l'OPCC n'est responsable de l'utilisation qui peut en être faite des informations contenues dans ce rapport.

Avis sur le droit d'auteur

Cette licence permet à d'autres personnes de mélanger, d'ajuster et de créer à partir de leur travail à des fins non commerciales. Bien que, dans leurs nouvelles créations, elles doivent reconnaître les droits d'auteur et ne peuvent pas être utilisées à des fins commerciales, elles ne doivent pas nécessairement être sous licence avec les mêmes conditions.

Téléchargez le rapport complet et le résumé exécutif en ES, FR, CAT ou EN sur le portail d'information de l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique : https://opcc-ctp.org/

Impact sur le changement climatique dans les pyrénées

Depuis son lancement en 2010 sous la présidence de la région Midi-Pyrénées, l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique (OPCC) de la Communauté de Travail des Pyrénées (CTP) analyse la vulnérabilité au changement climatique de la région pyrénéenne au niveau social, économique et naturel, à travers des méthodologies coopératives transfrontalières. En 2018, conformément à la ligne de travail de l'Observatoire, la CTP a préparé un rapport de mise à jour de la connaissance sur les impacts du changement climatique dans le territoire pyrénéen.Ce rapport contient la base scientifique sur les impacts du changement climatique et son impact sur le territoire, ainsi qu'un recueil de recommandations sectorielles d'adaptation.Cet état des lieux est essentiel pour orienter plus efficacement les politiques d'adaptation au changement climatique, profiter des opportunités émergentes et maximiser les synergies positives avec les autres politiques sectorielles.Sa valeur ajoutée réside, sans aucun doute, dans l'esprit de coopération qui a marqué à la fois sa conception et son réalisation. Environ 100 scientifiques et experts de référence des deux côtés des Pyrénées ont collaboré à sa rédaction ainsi qu'aux différents processus de révision, garantissant un large consensus scientifique.Il est nécessaire de souligner que sans la longue trajectoire de coopération, de mise en réseau et de projection internationale avec des organisations telles que la Convention des Alpes, la Convention des Carpates ou l'Agence Européenne de l'Environnement, il serait impossible de créer des documents de référence tels que ce rapport.La vision de ce rapport est celle de l'Observatoire, qui considère les Pyrénées comme une "biorégion" sans prendre en compte les frontières administratives et dont les systèmes socio-économiques et biophysiques présentent une vulnérabilité particulière au changement climatique.Les preuves scientifiques rassemblées dans ce rapport montrent, comme d'autres études l'ont déjà signalé dans d'autres territoires, que les zones de montagne connaissent des augmentations de température plus élevées que les plaines et les impacts du changement climatique y sont donc plus intenses. En particulier, pour les Pyrénées, des impacts sont déjà observés dans tous les secteurs naturels et socio-économiques, tels que la disparition accélérée d'écosystèmes sensibles et d'éléments iconographiques comme les glaciers; l'altération du cycle de vie de nombreuses espèces, parmi lesquelles des espèces endémiques; l'incidence du changement climatique sur les risques naturels, sur les activités liées au tourisme, sur l'agriculture ou d'autres impacts observés dans le cycle hydrologique. Le changement climatique se positionne comme un facteur de stress supplémentaire qui aggrave les problèmes déjà connus sur le territoire pyrénéen, tels que le dépeuplement, les changements d'affectation des sols ou l'absence de changement de génération dans le secteur primaire.Le CTP considère la lutte contre le changement climatique et l'adaptation à ses impacts comme un instrument transversal offrant une multitude d'opportunités pour relever les défis des Pyrénées, qui sont aussi des défis mondiaux. De cette manière la CTP contribue à la réalisation de l'objectif 13 - Action pour le climat - de l'agenda de développement durable à l'horizon 2030 des Nations Unies.

D. Francisco Javier Lambán Montañés
Presidente de la CTP

1. Le climat et la variabilité climatique dans les Pyrénées 6

1.1 Le climat de la période glaciaire et la déglaciation 6
1.1.1 Le climat de l'Holocène 6
1.1.2 Les 2000 dernières années 7
1.2 Le climat actuel 10
1.2.1 Évolution de la température moyenne annuelle et saisonnière 10
1.2.2 Évolution de la précipitation annuelle et saisonnière 11
1.2.3 Évolution du manteau neigeux dans les Pyrénées 13
1.3 Projections de changement climatique dans les Pyrénées 16

2. L'impact du changement Climatique dans les secteurs biophysiques 18

2.1 L'impact du CC sur le territoire pyrénéen durant l'Holocène 18
2.2 Biodiversité de montagne: la faune 22
2.2.1 Changements dans la productivité et abondance des espèces 22
2.2.2 Modifications du cycle de vie (altérations phénologiques) et des interactions entre les espèces 24
2.2.3 Modifications de la répartition géographique 26
2.2.4 Altérations des interactions écologiques et du fonctionnement des écosystèmes 30
2.2.5 Plus grand risque d'invasion et/ou d'expansion des espèces exotiques 32
2.2.6 Impact sur l'interconnexion entre les réseaux d'espaces protégés 33
2.2.7 Conclusions et recommandations 33
2.3 Biodiversité de montagne: la flore 36
2.3.1 Altérations physiologiques et changements dans la productivité et l'abondance d'espèces 37
2.3.2 Les changements du cycle de vie (changements phénologiques) 37
2.3.3. Altérations écologiques et du fonctionnement des écosystèmes 38
2.3.4 Les changements dans la composition et les interactions des espèces dans la communauté écologique 38
2.3.5 Les vulnérabilités et les services écosystémiques 41
2.3.6 Conclusions et recommandations 42
2.4 Forêts 44
2.4.1 Les impacts potentiels du changement climatique sur la diversité des communautés végétales et sur la distribution des espèces forestières 44
2.4.2 Altération de la productivité des forêts et rôle des forêts en tant que puits de carbone 47
2.4.3 Impact du changement climatique sur le rôle des forêts dans l'atténuation des risques naturels 49
2.4.4 Altération des conditions de santé des forêts et possible déséquilibre avec les communautés d'agents pathogènes 51
2.4.5 Impact du changement climatique sur le risque d'incendies de forêt dans les Pyrénées 54
2.4.6 Conclusions et recommendations 56
2.5. Écosystèmes sensibles de haute montagne: lacs et tourbières 58
2.5.1 Caractéristiques des lacs et tourbières pyrénéens 58
2.5.2 Processus dans les lacs et tourbières de haute montagne dans un contexte de changement climatique 59
2.5.3 Impacts attendus 62
2.5.4 Principaux défis 64
2.5.5 Conclusions et recommandations 64
2.6 Cycle hydrologique et ressources en eau 66
2.6.1 Changements sur la quantité d'eau de surface : débits totaux 68
2.6.2 Changements des régimes d'écoulement mensuel 70
2.6.3 Modifications pour les eaux souterraines et les sources 70
2.6.4 Modifications des caractéristiques physico-chimiques des masses d'eau 73
2.6.5 Modifications dans la composition biologique des masses d'eau 74
2.6.6 Conclusions et recommandations pour l'adaptation 76

3. L'impact du changement climatique sur les secteurs socioéconomiques 78

3.1. Tourisme 78
3.1.1 Réduction de l'attrait touristique hivernal des stations de ski 78
3.1.2 Altération d'éléments iconographiques du paysage pyrénéen 82
3.1.3 Accroissement du risque des infrastructures touristiques face aux phénomènes hydrologiques, géologiques et événements climatiques extrêmes 83
3.1.4 Prolongation de la saison de tourisme de montagne 83
3.1.5 Conclusions et recommandations 85
3.2 Agropastoralisme de montagne 87
3.2.1 Impacts et vulnérabilités dans le secteur agricole 87
A. Déplacement des zones de compatibilité climatique de certaines cultures 87
B. Changements sur les rendements des cultures 88
C. Risque d'expansion de ravageurs dans les cultures 92
3.2.2 Alpages naturels: impacts et vulnérabilités 94
A. Changements dans la production et la qualité des pâturages 94
B. Modifications de la composition floristique et de la diversité des alpages 95
3.2.3 Secteur de l'élevage extensif: impacts et vulnérabilités 96
A. Réduction de la production animale et de son bien-être 96
B. Nouvelles zoonoses et propagation des maladies du bétail 97
3.2.4 Conclusions et recommandations 98
3.3 Énergie 102
3.3.1 Diminution de la capacité de production d'énergie hydroélectrique 102
3.3.2 Diminution de l'efficience dans la production d'énergie thermoélectrique 104
3.3.3 Changement climatique et énergies renouvelables 104
3.3.4 Variation saisonnière de la demande énergétique 106
3.3.5 Augmentation du risque de dommages sur les infrastructures énergétiques 107
3.3.6 Conclusions et recommandations 108
3.4 Risques naturels 111
3.4.1 Augmentation des événements météorologiques extrêmes 111
3.4.2 Augmentation de la fréquence des crues et des inondations 113
3.4.3 Accroissement des glissements de terrain et des chutes de bloc 115
3.4.4 Accroissement des risques liés à la dégradation du permafrost 115
3.4.5 Avalanches 117
3.4.6. Concevoir une stratégie d'adaptation aux risques naturels futurs 118
3.4.7 Conclusions et recomendations 119

Bibliographie 124

1. Le climat et la variabilité climatique dans les Pyrénées 124
1.1. Le climat de la période glaciaire et la déglaciation 124
1.2. Le climat actuel 125
1.3. Projections de changement climatique dans les Pyrénées 125
2. L'impact du CC dans les secteurs biophysiques 128
2.1 Changements dans la productivité et abondance des espèces 128
2.2 Biodiversité de montagne: faune 128
2.3 Biodiversité de montagne: flore 131
2.4 Forêts 133
2.5 Écosystèmes sensibles de haute montagne: lacs et tourbières 136
2.6 Cycle hydrologique et ressources en eau 137
3. L'impact du changement climatique dans les secteurs biophysiques 140
3.1 Tourism 140
3.2 Agropastoralisme 142
3.3 Énergie 143
3.4 Risques naturels 143

1. Le climat et la variabilité climatique dans les Pyrénées

Coordinateurs: José María Cuadrat (unizar), Blas Valero Garcés (IPE-CSIC)
Auteurs: Ana Moreno (IPE-CSIC), Blas Valero Garcés (IPE-CSIC), Deborah Verfaillie (METEO-FRANCE), Didier Galop (CNRS), Ernesto Rodríguez (AEMET), Ernesto Tejedor (UNIZAR), Fernando Barreiro-Lostres (IPE-CSIC), Jean-Michel Soubeyroux (METEO-FRANCE), Jordi Cunillera (SMC), José M. Cuadrat (UNIZAR), José María García-Ruiz (IPE-CSIC), Juan Ignacio López-Moreno (IPE-CSIC), Laura Trapero (CENMA), Marc Pons (CENMA), Marc Prohom (SMC), Miguel A. Saz (UNIZAR), Penélope González-Sampériz (IPE-CSIC), Petra Ramos (AEMET), Pilar Amblar (AEMET), Ramón Copons (CENMA), Roberto Serrano-Notivoli (UNIZAR), Simon Gascoin (CESBIO), Yolanda Luna (AEMET).

1.1 Le climat de la période glaciaire et la déglaciation

Les changements climatiques du Quaternaire (derniers 2,6 millions d'années) et en particulier la succession de périodes glaciaires et interglaciaires, ont eu des répercussions importantes sur les processus de surface (modelé du paysage, géomorphologie) et sur les écosystèmes pyrénéens, y compris sur la formation de grandes dépressions et de cirques glaciaires et la mise en place de dépôts glaciolacustres. Dans les Pyrénées, il existe des évidences de glaciations antérieures au dernier maximum glaciaire (DGM)[1] qui s'est produit il y a 22 000 ans durant le stade isotopique marin 2 lors de l'extension maximale des calottes glaciaires continentales. Ainsi, dans la vallée de l'Aragon, il existe des dépôts morainiques et fluvioglaciaires datés de 171 ka et 263 ka (García-Ruiz et al., 2013) et dans le Gallego d'autres indices remontent à 170 ka (Lewis et al., 2009). Dans la vallée de l'Ariège et en Cerdagne d'autres avancées glaciaires sont documentées respectivement vers 79 ka et 35 ka et 76ka (Pallàs et al., 2010 ; Delmas et al., 2011). Sur le versant nord, les plus grands glaciers ont atteint entre 40 et 60 km d'extension (Ariège, 52 km, Garonne 66 km), tandis que les glaciers du versant sud avaient des longueurs plus courtes et étaient confinés à l'intérieur du Massif, à l'exception des glaciers de la Noguera Pallaresa avec environ 50 km de long, de l'Esera avec 36 km, du Gállego avec 35 km et du Valira avec environ 32 km.Bien que la succession de périodes froides et chaudes soit généralement synchrone à l'échelle planétaire, l'extension maximale des glaciers pyrénéens ne s'est pas produite il y a 20 000 ans durant le LGM, mais bien avant, il y a 60 000 ans (Lewis et al., 2009) avec de légères variations entre les vallées. Cette synchronie est causé par le fait que le climat Pyrénéen a été contrôlé par l'interaction entre les processus atmosphériques et océaniques de l'Atlantique Nord, la dynamique atmosphérique subtropicale, et par les changements de rayonnement solaire d'origine orbitale (paramètres orbitaux) (González-Sampériz et al., 2017, Bartolomé et al., 2015). Toutefois, pendant le dernier maximum glaciaire (entre 22 et 19 ka), les glaciers pyrénéens ont connu une phase d'extension, bien qu'il s'agisse probablement d'une période relativement sèche, de sorte qu'ils n'ont pas dépassés l'étendue maximale atteinte 30 et 40 ka plus tôt.Le début de la dernière déglaciation, qui remonte à 19 000 ans, correspond à une augmentation rapide de la température et de l'humidité bien documentée dans les archives glaciaires (Bordonau, 1992, Palacios et al., 2017), les lacs (Millet et al., 2012, González-Sampériz et al., 2017) et les spéléothèmes (Bartolomé et al., 2015). Les glaciers pyrénéens ont considérablement reculé jusqu'à ce qu'ils soient cantonnés dans les têtes de bassins versants. La déglaciation était une période de climat instable, avec des changements millénaires et des événements brutaux causés par l'instabilité des calottes glaciaires et la dynamique de l'Atlantique Nord. Après une période initiale relativement sèche et aride, il y a eu une nouvelle expansion des glaciers il y a 17 000 ans, suivie de conditions plus chaudes et plus humides (14 700-12 900 ans), interrompues par une période de retour à des conditions quasi glaciaires au cours d'une courte période. Cette phase, connue sous le nom de Dryas récent, a provoqué une baisse de température de près de 2 ° C dans les Pyrénées (Bartolomé et al., 2015, Millet et al., 2012) et la croissance de de petits glaciers sur les deux versants (Pallàs et al., 2010). Cet épisode marque la fin de la dernière glaciation et le début de l'interglaciaire actuel : l'Holocène.

1.1.1 Le climat de l'Holocène

Le début de l'Holocène, il y a 11 700 ans, initiait un changement climatique important à l'échelle mondiale avec une hausse généralisée des températures aux

(1) Le Dernier Maximum Glaciaire (DMG) est défini comme la période au cours de laquelle les calottes glaciaires continentaux ont atteint leur extension maximale à l'hémisphère nord. Les phases isotopiques marines définissent les périodes glaciaires (nombres pairs) et les interglaciaires (nombres impairs) en fonction du composition isotopique des foraminifères accumulés sur le fond marin.

ENCUADRE 1.1 LA PEQUEÑA EDAD DE HIELO EN LOS PIRINEOS

Le Petit Âge Glaciaire (de 1300 à 1850 AD) était une période plus froide qui a débuté par une augmentation des tempêtes (Corella et al., 2016) et qui se caractérise par des phases plus humides alternant avec des périodes de sécheresses intenses. Cet épisode montre une grande variabilité dans les zones montagnardes (Morellón et al., 2012, Oliva et al., 2017). Certaines des phases les plus froides autour de 1650, 1770 et 1850 AD semblent associées à une baisse de l'activité solaire (minimums de Maunder, Spörer et Dalton), mais d'autres facteurs tels que les grandes éruptions volcaniques qui ont eu lieu à cette époque (éruptions du Laki en Islande entre 1783 et 1784 et du Tambora en Indonésie en 1815) ont également contribué à la baisse des températures. Une diminution de 1% du rayonnement solaire peut entraîner une diminution de la température moyenne mondiale entre 1 et 2 oC, ce qui suffirait à expliquer ces épisodes froids. Des périodes plus chaudes ont également eu lieu entre 1480-1570, 1715-1760, 1800-1815 et après 1850 AD. Certains enregistrements suggèrent que la période la plus pluvieuse, au moins à moyenne altitude, a eu lieu au XIXe siècle (Morellón et al., 2012). Les reconstitutions dendroclimatiques montrent que le dix- huitième siècle était caractérisé par une fréquence élevée d'événements extrêmes, qui se sont poursuivis au cours du XIXe siècle (Oliva et al., 2018). Pendant les phases les plus froides les glaciers pyrénéens ont progressé sur les deux versants (Copons et Bordonau, 1997, López-Moreno, 2000).

latitudes moyennes, associée à une augmentation de l'ensoleillement estival dans l'hémisphère nord et à la disparition des calottes glaciaires. Sur le versant sud des Pyrénées centrales, l'augmentation des précipitations au début de l'Holocène semble avoir été retardée et ne se remarque que seulement vers 9 500 ans avant le présent (Leunda et al., 2017). En général, le climat au début de l'Holocène (jusqu'à environ 8000 ans) était chaud et humide dans les Pyrénées, mais probablement caractérisé par des différences locales entre les expositions et surtout entre les régions méditerranéennes et atlantiques (González-Sampériz et al., 2017). Durant cette période, le climat était également caractérisé par une forte saisonnalité résultant l de a conFiguretion des paramètres orbitaux, qui a entraîné une augmentation de l'accumulation neigeuse sur les zones sommitales et des taux de fonte élevés pendant les étés. Sur le versant sud des Pyrénées centrales (séquence de la Basa de la Mora), l'instabilité climatique du début de l'Holocène (entre 9 800 et 8 100 ans) est marquée par quatre événements rapides qui ont eu lieu il y vers 9700, 9300, 8800 et 8300 ans avant le présent. Il y a environ 8100 ans et jusqu'à 5700 ans avant le présent, le climat était plus stable et les précipitations plus abondantes. Comme cela s'est produit dans de nombreuses régions montagnardes de l'hémisphère nord, la plupart des glaciers pyrénéens ont probablement disparu au début de l'Holocène, alors que les températures en Europe étaient probablement les plus élevées de toute la période interglaciaire (Rius et al., 2012; CLIVAR, 2010). Dans les Pyrénées, les températures maximales ont probablement pété atteintes au tout début et au cours de l'Holocène moyen, il y a entre 7000 et 6000 ans (Millet et al., 2012). La baisse graduelle des précipitations au cours de l'Holocène moyen a entraîné une transition vers des conditions plus sèches et probablement plus froides vers 5500 ans. Sur la chaîne pyrénéenne, il semble que ce changement intervienne plus tôt dans les régions atlantiques que dans les régions méditerranéennes (González-Sampériz et al., 2017, Leunda et al., 2017). Dans les Pyrénées centrales (Marboré), des indices démontrent l'existence d'une période d'avancée glaciaire appelée Néoglaciaire qui s'est produite entre 5100 et 4600 ans avant le présent (García-Ruiz et al., 2016).

1.1.2 Les 2000 dernières années

Au cours des 2000 dernières années, la variabilité climatique a été contrôlée à la fois par des processus internes, propres au système climatique et par des forçages externes, naturels ou anthropiques. Les processus internes sont dépendants des interactions non linéaires du système climatique et se manifestent sous la forme de différents modèles de circulation atmosphériques (l'Oscillation Nord Atlantique (NAO) ; l'Oscillation de l'Atlantique Est (EA) et l'Oscillation de Scandinavie (SCAN)) et/ou océanique). Les forçage externes sont quant à eux dépendants de causes naturelles (changements de l'insolation, volcanisme,…) et anthropiques (variations de la concentration de gaz à effet de serre et / ou d'aérosols,…) (Giralt et al., 2017). Tous ces processus et leurs interactions peuvent également expliquer les gradients régionaux et temporels d'humidité et de température.Au cours des deux derniers millénaires, quatre phases climatiques bien caractérisées ont été identifiées à l'échelle mondiale : la Période chaude et humide de l'Antiquité (de 250 ans avant notre ère, jusqu'à l'an 500), le haut Moyen Âge (connu sous sa dénomination anglophone de « Dark Ages » entre 500 et 900 AD), l'Anomalie Climatique Médiévale (ACM ou MCA pour son acronyme anglais, de 900-1300 AD) et enfin le Petit Âge Glaciaire (PAG ou LIA de l'anglais "Little Ice Age" entre 1300 et 1850 AD). L'intensité et la chronologie de ces phases montrent une grande variabilité dans la péninsule ibérique et plus largement en Europe (Cisneros et al., 2016, Moreno et al., 2012, Giralt et al., 2017).

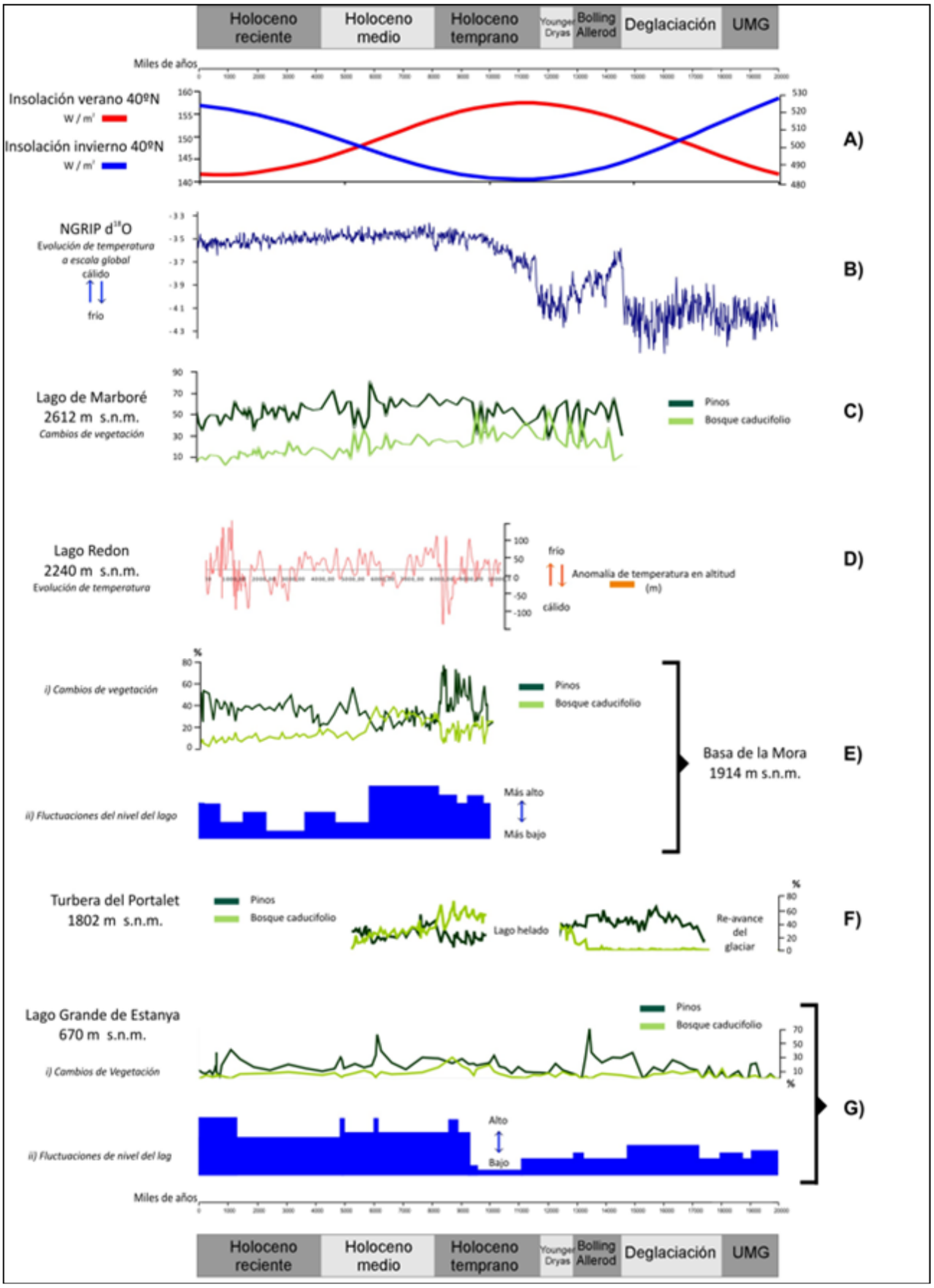

Holoceno reciente
Holoceno medio
Holoceno temprano
Younger Dryas
Bolling Allerod
Deglaciación
UMG
Miles de años
Insolación verano 40ºN
W / m²
Insolación invierno 40ºN
W / m²
A)
NGRIP d¹⁸O
Evolución de temperatura a escala global
cálido
frío
B)
Lago de Marboré
2612 m s.n.m.
Cambios de vegetación
Pinos
Bosque caducifolio
C)
Lago Redon
2240 m s.n.m.
Evolución de temperatura
frío
cálido
Anomalía de temperatura en altitud (m)
D)
i) Cambios de vegetación
ii) Fluctuaciones del nivel del lago
Más alto
Más bajo
Basa de la Mora
1914 m s.n.m.
E)
Turbera del Portalet
1802 m s.n.m.
Lago helado
Re-avance del glaciar
F)
Lago Grande de Estanya
670 m s.n.m.
i) Cambios de Vegetación
ii) Fluctuaciones de nivel del lag
Alto
Bajo
G)

Figure 1.1.1. Les enregistrements de la variabilité climatique depuis le dernier maximum glaciaire dans les Pyrénées. Les courbes et l'échelle de temps sont présentées en milliers d'années, de la droite de la figure vers la gauche. Les frises indiquent les principales périodes climatiques reconnues depuis 20 000 ans et leurs limites chronologiques (les abréviations UMG correspondent au «dernier maximum glaciaire»). Les courbes sont ordonnées altitudinalement à l'exception de celles situées en haut de la figure qui représentent des indicateurs globaux (orbitaux et planétaire). De haut en bas: A) évolution de l'insolation (quantité d'énergie qui atteint la Terre), en été (rouge) et en hiver (bleu), à 40º de latitude nord ; B) évolution de la température à échelle globale reconstruite à partir des isotopes de l'oxygène de la carotte NGRIP du Groenland (les valeurs les plus négatives impliquent les températures les plus basses et correspondent à la période glaciaire) ; C) Changements dans la végétation arboréenne basés sur la proportion de grains de pollen de pin (vert foncé) et d'espèces typiques de forêts de feuillus (bouleau, noisetier, chêne, frêne, orme, tilleul, etc., (vert clair) à partir de l'enregistrement du lac du Marboré ; D) Reconstitution de l'anomalie de température hivernoprintanière des 10000 dernières années à haute altitude dans les Pyrénées centrales à partir de l'enregistrement des Chrysophyte du lac Redón ; E) Changements dans la végétation arboréenne (pollen de pin (vert foncé) et feuillus (vert clair)) et fluctuations du niveau lacustre reconstituées à partir de l'enregistrement sédimentaire de la Basa de la Mora ; F) Changements dans la végétation arboréenne (pin (vert foncé) et feuillus (vert clair) enregistré dans la tourbière d'El Portalet ; G) Changements dans la végétation arboréenne (pin (vert foncé) et feuillus (vert clair)) et fluctuations du niveau lacustre reconstruites à partir des archives sédimentaires du Lago Grande de Estanya. Toutes les références détaillées de chacune de ces séquences et des indicateurs utilisés peuvent être retrouvés dans González-Sampériz et al., (2017).

ENCUADRE 1.2 UN RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE RÉCENT ET INHABITUEL

La variabilité climatique au Quaternaire a sculpté le territoire pyrénéen et contrôlé l'évolution des écosystèmes. Pendant la déglaciation, les changements dans la température moyenne ont atteint jusqu'à 6 oC, avec des périodes de changement climatique rapide de plus de 1 oC en quelques décennies. Durant l'Holocène, les changements de température ont été mineurs, mais des alternances de plusieurs phases humides/sèches ont été enregistrées. Le dernier millénaire est quant à lui marqué par une phase particulièrement sèche et chaude (Anomalie Climatique Médiévale, ACM, 900 -1300 AD) suivie par le Petit Âge Glaciaire (PAG, 1300-1850 AD) caractérisé par des températures de 0,9 oC inférieures aux moyennes et une augmentation des événements extrêmes. Au cours de ces siècles, de nombreux glaciers ont été réactivés et ont avancés pour atteindre leur étendue maximale durant l'Holocène, de sorte que les paysages et les écosystèmes pyrénéens se sont adaptés à des conditions plus froides avant le réchauffement climatique du XXe siècle. Le taux d'augmentation de la température au cours du réchauffement climatique du XXe siècle est plus élevé que celui des transitions glaciaire / interglaciaire et des changements survenus durant l'Holocène.

Durant l'Antiquité, une tendance à l'augmentation des températures est détectée à haute et moyenne altitude dans les Pyrénées (Pla et Catalán, 2011 ; Morellón et al., 2012), tandis que des conditions plus arides ou plus sèches semblent prévaloir à l'inverse de ce qui est enregistré dans le sud de la péninsule (Morellón et al., 2012). Durant le Haut Moyen Age, les températures moyennes ont diminué. Bien que les conditions d'humidité soit marquées par une grande variabilité régionale elles sont généralement caractérisée par une plus grande aridité en Méditerranée (Minorque, Cisneros et al., 2016) et dans les Pyrénées (Morellón et al., 2012). Toutefois, pour la même période certains enregistrements pyrénéens suggèrent une augmentation des précipitations et des événements extrêmes (tempêtes) (Corella et al., 2016).L'Anomalie Climatique Médiévale pourrait servir d'analogue à la période actuelle de réchauffement climatique et permettre de mieux évaluer la variabilité naturelle du climat antérieure à l'impact anthropique sur le climat. Cette période montre un caractère chaud et aride assez marqué en Méditerranée occidentale (Moreno et al., 2012). Plus au nord, les conditions étaient sèches (Morellón et al., 2012), bien que dans certains sites de haute montagne a l'instar des Pyrénées, des phases humides sont documentées (Pla et Catalán, 2011), ainsi qu'une fréquence plus élevée des tempêtes aux altitudes moyennes (Corella et al., 2016).

1.2 Le climat actuel

La disponibilité actuelle d'informations météorologiques instrumentales permet de mieux connaître le climat dans les Pyrénées et de mieux évaluer l'impact du changement climatique. Cependant, l'étude est complexe dans les zones montagneuses, car la topographie implique une grande diversité de milieux locaux, où la valeur des variables climatiques est difficile à déterminer. Il faut ajouter à cela un manque de données avec des séries longues et la diminution du nombre d'observatoires liée à l'altitude, les stations localisées en altitude étant peu nombreuses. C'est la raison pour laquelle il est très compliqué de comprendre ce qui se passe au-delà d'un certain seuil, malgré l'importance des informations climatiques en haute montagne autant d'un point de vue scientifique qu'appliqué, car certaines activités humaines et de nombreux processus écologiques se concentrent dans ces zones.Sur le versant français l'intérêt pour l'observation météorologique se manifeste depuis la fin du XVIIIe siècle avec l'enregistrement des mesures à Mont-Louis, à 1600 m d'altitude ; plus tard avec la création de l'Observatoire du Pic du Midi, en 1880, à 2880 m ; puis avec les nouveaux observatoires au cours du XXe siècle. Mais jusqu'au développement des réseaux automatisés, dans les années 90, les mesures sont irrégulières et rares au-dessus de 1500 m. Du côté espagnol, la situation est semblable. L'établissement récent de stations automatiques et d'un réseau climatologique reposant sur les observations de refuges de montagne représente une riche base de données pour étudier l'évolution des changements climatiques, mais la longueur temporelle réduit la portée du diagnostic. Pour minimiser ce problème, il faut davantage d'observatoires, promouvoir des actions de recueil de données et assurer la survivance des observations existant déjà, ainsi que leur qualité. Dans ce sens, l'exemple de la cordillère des Alpes est remarquable, où depuis le projet HISTALP on travaille depuis des années sur le relevé de séries climatologiques (Böhm et al., 2009).

Malgré ces limitations, il existe de nombreuses études sur le climat des Pyrénées, en particulier sur les précipitations et les températures (les travaux de Balseinte, 1966; Creus, 1983; Gottardi, 2009; Pérez Zanón et al., 2017 entre autres), et aussi sur la neige (Esteban et al., 2005; López Moreno, 2005 et 2009; Durand et al., 2012), sur le climat et les activités de loisirs (Pons et al., 2012 et 2015; Gilaberte et al., 2014), la variabilité et le changement climatique (Bücher et Dessens, 1991; Vicente Serrano et al., 2007; López Moreno et Vicente Serrano, 2007; Espejo et al., 2008; López Moreno et al., 2011; Esteban et al., 2012; Buisán et al., 2015) et sur les projections climatiques (López Moreno et al., 2011; Verfaillie et al., 2017 et 2018). Cependant, la plupart des travaux présente des conclusions limitées en raison de leur approche uniquement régionale, française, andorrane ou espagnole ; c'est-à-dire considérant seulement un versant des Pyrénées, ce qui ne permet pas de comprendre globalement les processus climatologiques à l'échelle de l'ensemble de la chaîne. Les actions entreprises par l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique ont permis de surmonter ces limitations, en plus d'optimiser l'utilisation des sources d'information et d'améliorer l'approche interdisciplinaire. La création d'une première base de données unique, avec contrôle de qualité et homogénéisée sur la période 1950-2010 a représenté un pas en avant fondamental, ainsi que l'utilisation d'une méthodologie commune pour caractériser le climat pyrénéen et observer sa variabilité. Ces informations générées dans le cadre de l'OPCC permettent de réaliser les premières approches de la connaissance des modèles temporels et spatiaux des températures et des précipitations sur l'ensemble des Pyrénées, et l'analyse de leurs tendances (Soubeyroux et al., 2011 ; Miquel, 2012 ; Cuadrat et al., 2013 ; Deaux et al., 2014).

1.2.1 Évolution de la température moyenne annuelle et saisonnière

Autant les études régionales sur l'Andorre, l'Espagne et la France, que les études générales sur l'ensemble de la chaîne, révèlent une augmentation claire des températures à n'importe quel moment de l'année (Spagnoli et al., 2002; Maris et al., 2009; López Moreno et al., 2010; El-Kenawy et al., 2011; Esteban et al., 2012); cette augmentation a été d'autant plus régulière et marquée ces trois dernières décennies, correspondant au diagnostic global réalisé par le Panel Intergouvernemental du Changement Climatique (IPCC, 2013).

En Andorre, l'estimation de la tendance réalisée à partir des informations de trois observatoires indiquent, pour la période (1935-2008), l'augmentation significative de la température maximale moyenne annuelle (0,13 à 0,15 ºC / décennie), la maximale estivale (0,22 ºC / décennie) et la minimale estivale (0,11 ºC / décennie). Ces tendances à l'augmentation thermique sont renforcées lorsque l'analyse se concentre sur la sous-période 1950-2008 (Esteban et al., 2012). Dans les Pyrénées centrales espagnoles, Pérez Zanón et al (2017) ont trouvé des anomalies régionales de 0,11 ºC / décennie pour les températures maximales et de 0,06 ºC / décennie pour les minimales sur la période 1910-2013, qui devraient augmenter jusqu'à 0,57 et 0,23 ºC / décennie sur la période 1970-2013

respectivement. Ces valeurs coïncident, en partie, avec les données observées sur le versant français : Deaux et al. (2014), pour la série de Tarbes-Ossun, indiquent un réchauffement des températures moyennes de 0,25 à 0,36 ºC / décennie avec une marge d'incertitude de 0,15 à 0,48 ºC / décennie, selon la période considérée ; et indiquent aussi que le signal d'augmentation est particulièrement important depuis les années 80, de même que dans les autres observatoires pyrénéens. Lorsque l'analyse vise l'ensemble des Pyrénées, le résultat est identique : dans les dernières décennies la température a nettement augmenté. C'est la conclusion de la recherche réalisée dans l'action Climat du Projet OPCC-POCTEFA EFA 235/11, à partir de l'étude de 32 séries de températures de grande qualité et homogénéisées pour la période 1959-2010. La tendance de l'indicateur de température moyenne annuelle pour la globalité de la période analysée est positive et statistiquement significative, sa valeur étant de l'ordre de 0,2 ºC par décennie. Cette augmentation thermique est générale sur toute la chaîne pyrénéenne, avec des anomalies systématiquement positives depuis 1980 jusqu'à aujourd'hui, et avec peu de différences entre le versant nord et le versant sud de celle-ci.

Sur toute la série considérée, 1959-2010, l'année la plus chaude est 1997, avec une température moyenne supérieure de 1,5 ºC par rapport à la valeur moyenne de 1961-1990, suivie des années 2006 et 2003. En sens contraire, 1972 a été l'année la plus froide, avec 0,8 ºC de moins par rapport à la moyenne de référence, suivie des années 1963 et 1980. L'indicateur de température moyenne pour les quatre saisons montre que l'augmentation thermique au cours des cinq dernières décennies est très marquée en été : de l'ordre de 0,4 ºC par décennie, valeur qui dépasse les seuils statistiques significatifs. Au printemps, c'est un peu plus bas : de l'ordre de 0,2 ºC par décennie ; statistiquement significatif également. L'anomalie saisonnière en automne et en hiver est bien plus basse et de plus, la tendance n'est pas statistiquement significative à ces deux saisons, donc la valeur est sujette à un plus grand degré d'incertitude. Au niveau saisonnier on observe également peu de différences sur cet indicateur entre le versant nord et le versant sud des Pyrénées.L'analyse d'événements précis révèle que parmi les anomalies chaudes (positives) on remarque en particulier la température moyenne de l'été 2003, avec des valeurs de 3,6 ºC au-dessus de la moyenne de 1961-1990 (dans le contexte d'une vague de chaleur importante qui a touché une grande partie du continent européen) et celle de l'hiver 1990, avec 2,8 ºC au-dessus de la moyenne. En sens contraire, les anomalies froides (négatives) les plus importantes sont celles de l'hiver 1963, qui étaient de -2,5 ºC au-dessous de la moyenne et celle de l'automne 1974 avec une anomalie de -2,2 ºC.

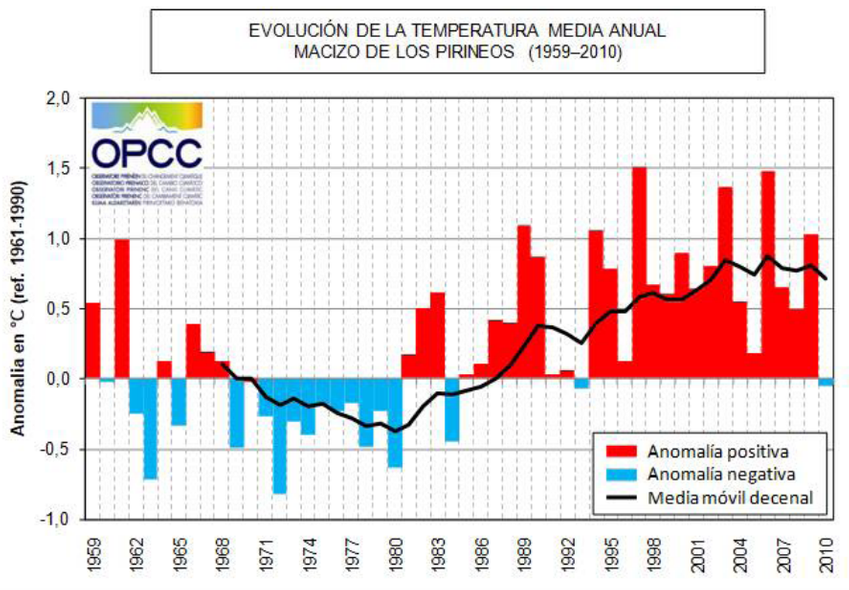


Figure 1.2.1. Évolution de la température moyenne annuelle dans l'ensemble des Pyrénées durant la période 1959-2010. On montre l'anomalie annuelle par rapport à la valeur moyenne de la période de référence 1961-1990 (en rouge, positive ; en bleu, négative) et l'évolution de la moyenne mobile pour une période de 10 ans (ligne noire). Source : OPCC, 2013.

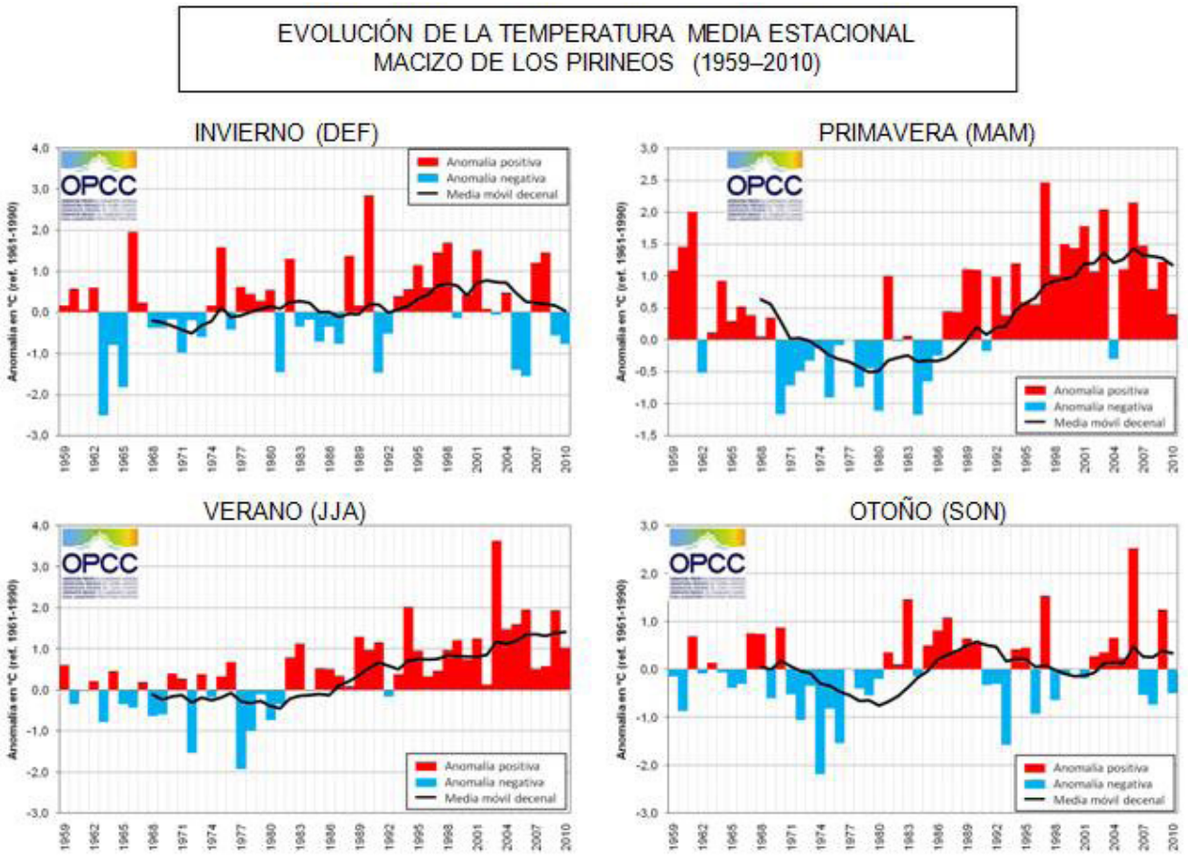


Figure 1.2.2. Évolution de la température moyenne annuelle dans l'ensemble des Pyrénées durant la période 1959-2010. L'anomalie annuelle est calculée par rapport à la valeur moyenne de la période de référence 1961-1990 (en rouge, positive ; en bleu, négative) et l'évolution de la moyenne mobile pour une période de 10 ans (ligne noire). Source : OPCC, 2013.

Il semble que la tendance au réchauffement va se maintenir au cours du XXIe siècle et au niveau saisonnier annuel elle pourrait osciller de 2,8 à 4 ºC, dans le pire des cas ; de plus, les effets du changement climatique seront plus prononcés sur le versant méridional de la chaîne et dans les zones côtières (López Moreno et al., 2008). Cependant, il faut reconnaître que notr

1.2.2 Évolution de la précipitation annuelle et saisonnière

Les modèles temporels et spatiaux de la précipitation montrent une certaine tendance à la diminution des totaux pluviométriques, et en particulier à la baisse de la fréquence des événements de plus grande intensité et une plus grande fréquence de périodes sèches de longue durée. Cependant, l'importante diversité spatiale de la région pyrénéenne oblige à prendre ces modèles de changement avec certaines réserves, car la modification qu'introduit le relief dans la circulation atmosphérique peut devenir très importante.

Il semble qu'on peut l'observer en Andorre, où Esteban et al., (2012) confirment des tendances décroissantes et statistiquement significatives pour la période 1935-2008, et qui se généralisent et renforcent entre 1950 et 2008. Par contre, dans les indices de précipitation on n'en détecte aucun avec une tendance significative pour la période 1935-2008, tandis que plusieurs présentent des valeurs décroissantes avec une signification statistique pour la sous-période 1950-2008. Dans le secteur central des Pyrénées espagnoles Pérez Zanón et al., (2016) observent une variabilité importante interannuelle, sans tendance significative, avec quelques différences entre le comportement saisonnier. Le pourcentage d'années avec des précipitations annuelles normales diminue dans la période 1950-2013 par rapport à la période

1910-1949, les années sèches et humides augmentant en même temps. La plus grande baisse s'observe en hiver, autour de 2,25 % par décennie, ce qui coïncide avec les recherches de López Moreno et al, (2005), qui ont identifié une diminution considérable de la couche de neige pour la période 1950-1999. Par contre on détecte une augmentation en automne de 2,25 % par décennie.La diminution des pluies s'observe également dans les Pyrénées espagnoles au cours de la deuxième moitié du XXe siècle, autant dans le volume total que dans le nombre de jours de précipitation, les périodes sèches et les précipitations extrêmes : dans le Pyrénées centrales on peut constater que la diminution est supérieure au printemps et en été ; en automne les observatoires qui montrent des tendances significatives sont rares ; et en hiver une diminution évidente est observée, bien qu'avec des contrastes spatiaux marqués (Vicente Serrano et al., 2007). Dans les Pyrénées et les Pré-Pyrénées orientales il semble également évident que les précipitations annuelles ont diminué depuis 1950, avec une tendance statistiquement significative comprise entre 3 et 5% par décennie ; et jusqu'à 8% par décennie en été (BAIC, 2018).

Ces analyses coïncident en grande mesure avec les résultats de l'étude de l'action Climat de l'OPCC, pour l'ensemble des Pyrénées, avec les données de 101 séries, pour la période 1959-2010. Dans les 50 dernières années, la baisse de la pluviométrie annuelle est de l'ordre de 2,5% par décennie. La valeur est statistiquement significative, mais présente une grande variabilité interannuelle : les années sèches ont prédominé durant les deux ou trois dernières décennies, avec des quantités annuelles de précipitation bien inférieures à la moyenne de la période de référence, suivies de quelques années pluvieuses, avec des données assez éloignées de la moyenne. Quant aux différences spatiales, la diminution des précipitations annuelles est plus marquée sur le versant sud, bien que les contrastes ne soient pas très évidents. Il y a eu des années particulièrement pluvieuses sur la série analysée, comme 1992 (avec une moyenne de 23,2% de plus que la période de référence 1961-1990), ainsi que 1979 et 1996 ; tandis que les années les plus sèches des cinq dernières décennies sont 1989 (23,1% de moins que la moyenne de référence), 1995 et 1983.

L'indicateur pour les quatre saisons de l'année n'a pas un comportement clair, bien que l'on observe dans toutes celles-ci une légère diminution mais un peu marquée en hiver et en été. Il est important de remarquer que les tendances saisonnières ne sont pas statistiquement significatives, ce qui empêche de tirer des conclusions très solides au niveau temporel. On peut observer une grande variabilité interannuelle à toutes les saisons de l'année, en intercalant des périodes sèches et des saisons pluvieuses ; bien que durant les deux premières décennies les périodes sèches prédominent, comme par exemple les hivers des périodes 1989-1993 et 2005-2008. Cependant et avec la prudence nécessaire pour interpréter les résultats, on peut comparer ce modèle général de baisse pluviométrique avec des comportements similaires observés dans d'autres régions de la zone méditerranéenne.

Il semble que cette tendance va continuer les années à venir selon les modèles de changement climatique. Les prédictions pour les Pyrénées montrent une baisse considérable des précipitations au cours du XXIe siècle, avec une baisse de la fréquence de jours de pluie, une augmentation de l'intensité des phénomènes plus extrêmes et une augmentation considérable de la durée des épisodes secs (Vicente Serrano et al., 2007). Cependant il ne faut pas oublier que la résolution spatiale des modèles actuels ne permet pas de représenter toute la diversité climatique caractérisant les Pyrénées à cause de leur diversité topographique, de leurs gradients importants d'altitude et de leur interaction avec la circulation atmosphérique, d'où le fait que les résultats de ces prédictions pour les zones de montagne si complexes doivent être pris avec réserves.

1.2.3 Évolution du manteau neigeux dans les Pyrénées.

Les limitations mentionnées dans les informations climatiques disponibles dans des zones de haute montagne sont encore plus évidentes lorsque nous nous référons à l'existence de registres avec une durée et une qualité suffisantes pour analyser l'évolution du manteau neigeux dans les Pyrénées durant les dernières décennies. Ce fait explique l'absence d'une évaluation globale adéquate des tendances du manteau neigeux sur l'ensemble de la chaîne pyrénéenne. Jusqu'à présent, les seules informations disponibles sur le versant espagnol sont basées sur les séries de synthèse générées à partir d'un rapport statistique robuste entre les séries climatiques de la zone et les données d'épaisseur de neige sur un réseau de balises où l'on mesure le manteau neigeux sur le versant sud des Pyrénées centrales (figure 6). On a pu en déduire une baisse statistiquement significative du manteau neigeux dans ce secteur pour la période 1950-2000 (López-Moreno, 2005). La réduction s'est confirmée pour la période 1950-2010 (figure 1.2.5) dans une étude ultérieure (García-Ruiz et al., 2011). Cette baisse a aussi été démontrée par une perte significative du signal nival dans le débit des rivières du versant sud des Pyrénées (Morán-Tejeda et al., 2013, Sanmiguel-Vallelado, 2017).La diminution des précipitations dans les mois d'hiver semble être la cause principale

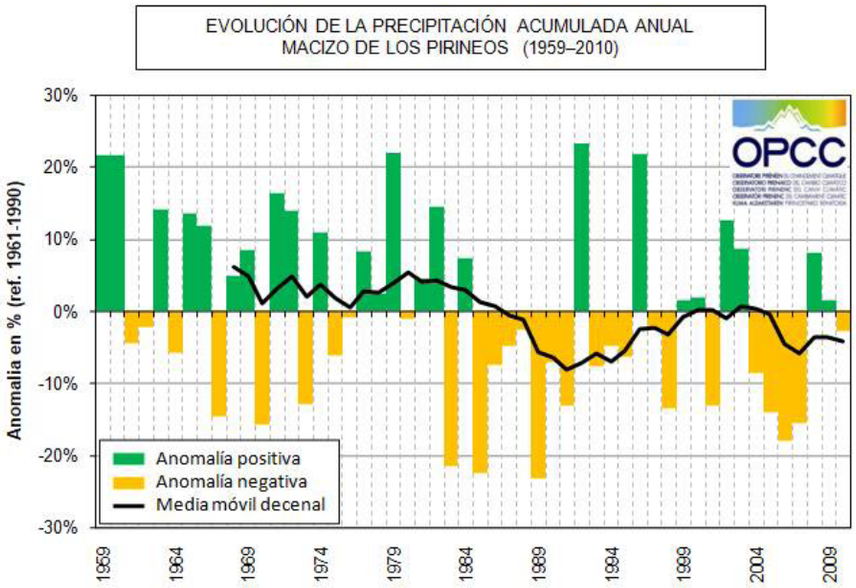


Figure 1.2.3. Évolution des précipitations annuelles dans l'ensemble des Pyrénées durant la période 1959-2010. L'anomalie annuelle est calculée par rapport à la valeur moyenne de la période de référence 1961-1990 (en vert, positive ; en jaune, négative) et l'évolution de la moyenne mobile pour une période de 10 ans (ligne noire). Source : OPCC, 2013.

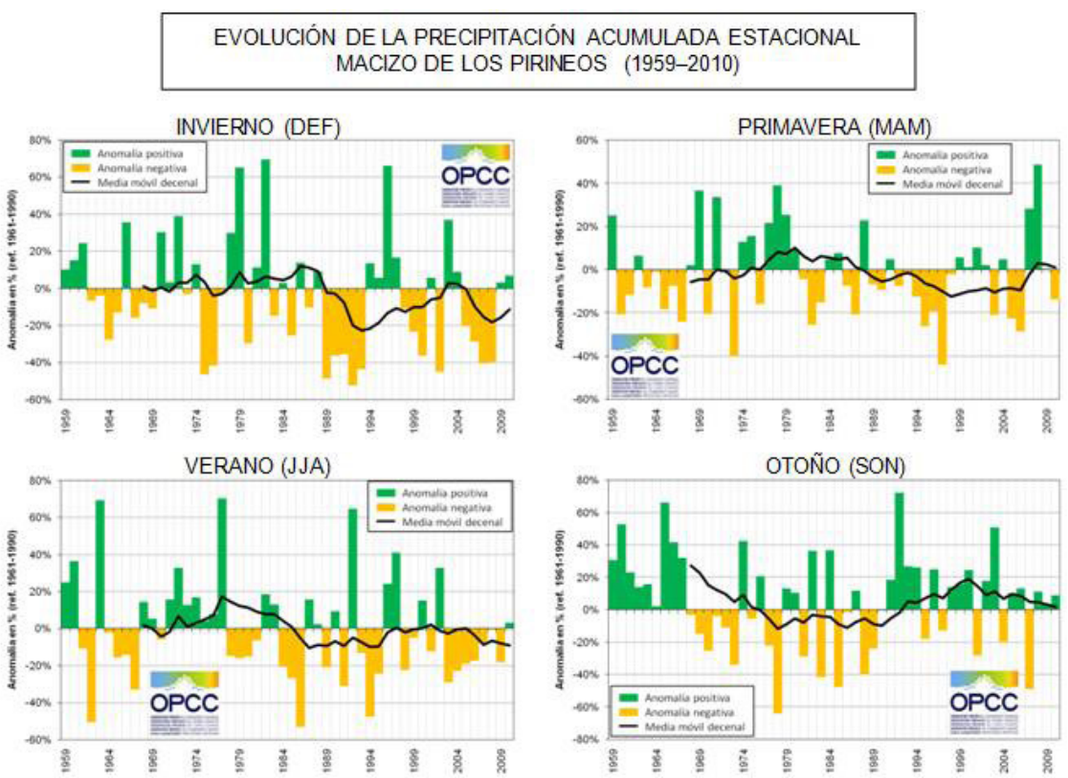


Figure 1.2.4. Évolution des précipitations saisonnières dans l'ensemble des Pyrénées durant la période 1959-2010. L'anomalie annuelle est calculée par rapport à la valeur moyenne de la période de référence 1961-1990 (en vert, positive ; en jaune, négative) et l'évolution de la moyenne mobile pour une période de 10 ans (ligne noire). Source : OPCC, 2013.

de la réduction du manteau neigeux. Cependant ces tendances apparaissent superposées à une variabilité interannuelle élevée, qui s'explique par les fortes oscillations des températures et des précipitations dans le temps. Cette variabilité s'interprète principalement par la fréquence annuelle des différents types de temps dans le sud-ouest européen durant les mois d'hiver, contrôlés en grande mesure par l'Oscillation de l'Atlantique Nord (NAO, López-Moreno et al., 2011). Ainsi, une abondance supérieure de neige sur le versant sud des Pyrénées centrales est associée à une fréquence supérieure des flux de l'ouest, sud-ouest et nord-ouest qui se produisent principalement dans les années où l'indice NAO est négatif (López-Moreno et Vicente-Serrano, 2006, Buisán et al., 2015). Bien que l'indice NAO ait mis en évidence une tendance positive à long terme, il a une forte variabilité décennale (Vicente-Serrano et López-Moreno, 2008), ce qui explique que dans les dernières décennies il y ait eu fréquemment des anomalies négatives, apportant à la chaîne pyrénéenne un enneigement important, en particulier à de hautes altitudes. D'ailleurs, lorsqu'on analyse des séries de neige des deux dernières décennies, la plupart des observatoires ne montrent pas de tendance statistiquement significative, et indiquent même une faible tendance à l'augmentation (Buisán et al., 2015). Bien que l'on ne dispose pas d'études spécifiques pour le versant français des Pyrénées, l'existence de tendances communes dans les précipitations et les températures sur les deux versants signifie qu'il y a eu là-bas aussi une diminution de l'accumulation de neige si l'on considère le long terme, mais avec un signal très variable durant les deux dernières décennies.

IDÉES CLE

• Dans l'ensemble des Pyrénées la température moyenne annuelle a montré une augmentation claire, estimée autour de 0,2º C par décennie, avec peu de différences entre les deux versants de la chaîne.

• L'augmentation est très claire à partir des années quatre-vingt, la dernière décennie étant la plus chaude depuis qu'il existe des registres instrumentaux.

• Au niveau des saisons, la hausse la plus significative est en été, de l'ordre de 0,4 ºC par décennie ; un peu moins au printemps, près de 0,2 ºC ; et des hausses plus modérées en automne et en hiver.

• On observe une tendance de diminution des volumes annuels des précipitations, en raison de la baisse observée des totaux d'hiver et d'été, bien qu'il n'y ait pas une tendance bien définie. Il y a des différences spatiales significatives et la variabilité interannuelle présente des valeurs particulièrement élevées.

• Ces résultats coïncident en grande mesure avec les résultats observés dans les régions voisines et avec la tendance générale du climat de l'Europe méditerranéenne.

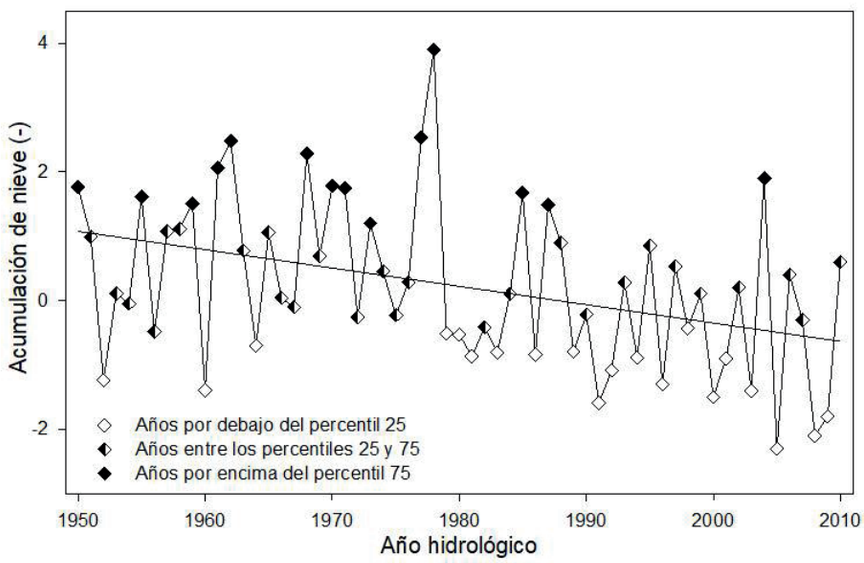


Figure 1.2.5. Évolution du manteau neigeux au mois d'avril simulé à partir du rapport entre température, précipitation hivernale et accumulation de neige sur un réseau de balises du versant sud des Pyrénées. Source : OPCC, 2013.

1.3 Projections de changement climatique dans les Pyrénées

L'étude du système climatique et de son évolution future se réalise normalement à travers l'utilisation de modèles climatiques. Ces modèles sont des représentations numériques du système climatique basées sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques de leurs composants, dans leurs interactions et dans leurs processus de réalimentation. Lorsque ces modèles englobent tout le système on parle de modèles climatiques globaux. Cependant ces modèles n'ont pas encore la résolution nécessaire pour certaines études et il est nécessaire d'utiliser des méthodes de régionalisation. Ces méthodes sont regroupées en deux grands groupes : les méthodes dynamiques et les méthodes statistiques. Parmi les premières on trouve les modèles régionaux, qui sont des modèles climatiques mais appliqués à une région déterminée.

Parmi les causes qui peuvent provoquer un changement dans le climat, se trouve l'altération de la composition de l'atmosphère globale ; il existe des évidences de ce phénomène à cause de l'activité humaine. Pour intégrer les effets possibles de ces altérations dans les modèles climatiques, la communauté scientifique a défini un groupe de scénarios dénommés Trajectoires de Concentration Représentatives (Representative Concentration Pathways, RCP). Ces scénarios se concentrent sur les émissions anthropogéniques et représentent le forçage radiatif total calculé pour l'année 2100 par rapport à l'année 1750 (par exemple, la RCP 2.6 signifie 2,6 W/m2). Ils sont basés sur la combinaison de modèles d'évaluation intégrés, modèles climatiques simples, modèles de chimie de l'atmosphère et modèles de cycle de carbone ; et ils peuvent en outre tenir compte de la variété de politiques climatiques, c'est-à-dire que chaque RCP peut être le résultat de différentes combinaisons de futurs économiques, technologiques, démographiques et politiques. Les simulations obtenues grâce à ces scénarios représentent ce que l'on appelle les projections climatiques (IPCC, 2013). Dans la région pyrénéenne les projections se réalisent en suivant deux méthodologies complémentaires basées sur des algorithmes dynamiques et statistiques, et sur la génération d'analyses de référence des températures et les précipitations journalières de haute résolution horizontale (grille de 5 km) (Peral et al., 2017) et verticale (réanalyse SAFRAN par altitudes de 300 m) (Verfaillie et al., 2017). Les projections s'obtiennent à partir des sorties d'un ensemble de modèles climatiques globaux (GCM) du CMIP5 (19 modèles), et de l'ensemble de modèles climatiques régionaux (RCM) d'Euro-Cordex (13 combinaisons GCM/RCM), en considérant quatre scénarios d'émissions (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5). Cet ensemble de projections permet d'explorer les incertitudes associées aux scénarios d'émissions, aux modèles climatiques et aux techniques de régionalisation. À partir d'une évaluation préliminaire de ces projections, une première approche de probabilité de prédiction du climat futur offre ces résultats :

• Les températures maximales et minimales journalières augmenteront au cours du XXIe sous les trois RCP analysées (RCP8.5, RCP6.0 et RCP4.5) (figure 7a-b), à toutes les saisons de l'année et sur toute la zone pyrénéenne. Cette augmentation sera plus rapide pour la RCP8.5, associée à des scénarios plus émissifs au cours de ce siècle.

• Les incertitudes associées aux RCP et aux modèles climatiques globaux pour les températures augmentent au cours du siècle, comme le montre la figure 1.3.1, et on peut observer autant une séparation entre les lignes d'évolution (entre RCP) que dans l'augmentation des zones foncées (entre modèles climatiques globaux).

• En ce qui concerne l'évolution des précipitations futures, sous les scénarios analysés et la méthodologie utilisée, on n'obtient pas de changements significatifs au cours du XXIe siècle, et les différentes conditions d'émission ont peu d'influence sur l'évolution de la pluviométrie (figure 1.3.1c). Le nombre de modèles indiquant une augmentation des précipitations est similaire au nombre de modèles montrant une baisse de celles-ci. Les incertitudes augmentent au fil du siècle, surtout dans le cas de la RCP 8.5.

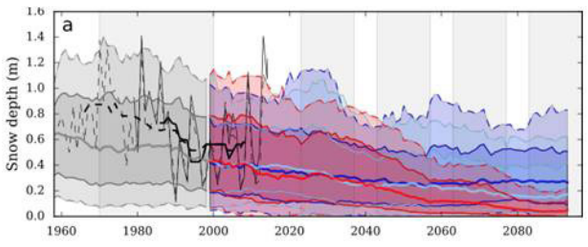


Figure 1.3.2 Évolution de la distribution statistique de l'épaisseur moyenne de neige dans les Pyrénées Centrales (altitude 1800 m) à partir de la série de l'observatoire de La Mongie (ligne noire continue), des simulations historiques (gris) et de la re-analyse SAFRAN (ligne noire pointillée), pour le futur de l'ensemble EURO-CORDEX, avec les RCP 2.6 (bleu foncé), RCP 4.5 (bleu clair) et RCP 8.5 (rouge). Source: résultats provisoires du projet CLIMPY.

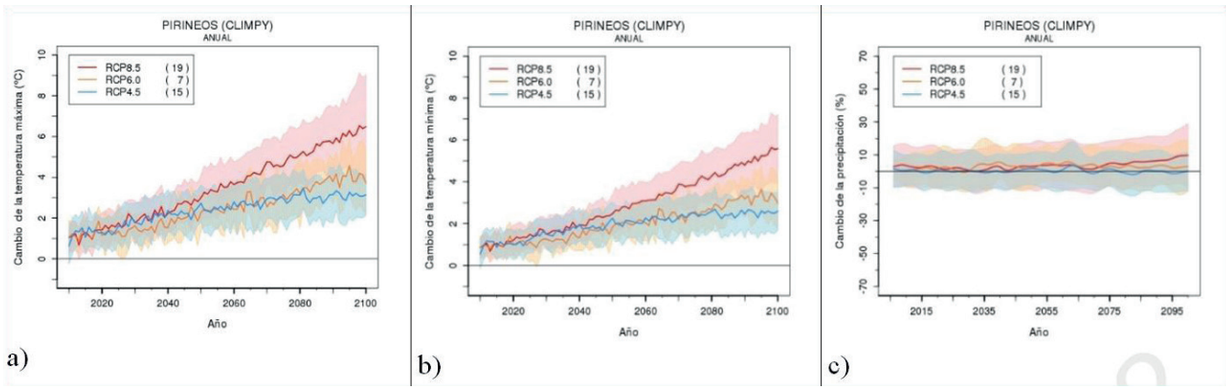


Figure 1.3.1. Évolution de l'anomalie moyenne annuelle de (a) température maximale, (b) température minimale et (c) précipitation moyenne pour les Pyrénées.

En prenant des fenêtres de 15 ans centrées en 2030, 2050 et 2090 et en estimant l'incertitude liée aux modèles à travers les centiles 17 et 83 on obtient:

• Pour l'horizon 2030, le changement de la valeur annuelle de la température maximale par rapport à la période de référence (1961-1990) pourrait varier, en moyenne et pour la zone pyrénéenne, de 1 à 2,7 ºC pour la RCP8.5 (on obtient des valeurs très similaires pour les autres RCP). On obtient des valeurs semblables ou légèrement inférieures pour la température minimale : entre 0,9 °C et 2,2 °C pour la RCP8.5.

• Pour l'horizon 2050, le réchauffement serait un peu plus élevé, avec un degré d'incertitude de plus en plus élevé avec l'augmentation des températures. Ainsi, pour la température maximale, les fourches iraient de 2,0 ºC à 4,0 ºC et de 1,4 ºC à 3,3 ºC pour les RCP8.5 et RCP4.5 respectivement, tandis que pour les températures minimales, elles iraient de 1,7 ºC à 3,3 ºC, et de 1,2 ºC à 2,8 ºC. L'augmentation des températures minimales continue à être légèrement inférieure à celle des températures maximales.

• Pour la fin du siècle, les rangs de valeurs s'élargissent encore plus, de même que l'intensité des changements. En outre, la séparation entre les évolutions associées aux RCP est encore plus claire. Pour la température maximale et pour la RCP8.5, en moyenne, son changement annuel serait entre 4,3 ºC et 7,1 ºC, tandis que pour la RCP4.5, il varierait entre 1,9 ºC et 4,2 ºC. Pour la température minimale, les intervalles correspondants se situeraient entre 3,6 ºC et 6,0 ºC, dans le premier cas, et 1,6 ºC et 3,5 ºC, dans le deuxième cas.

IDÉES CLÉ

• Les projections futures du climat dans la zone pyrénéenne montrent une augmentation progressive autant des températures maximales que des températures minimales au cours du XXIe siècle. Cette augmentation sera plus rapide dans les scénarios les plus émissifs.

• Ce réchauffement entraînera aussi une diminution autant de l'épaisseur de la neige que de la longueur de la période pendant laquelle la neige couvre le sol.

• Pour ce qui est des précipitations, l'accord entre les projections est inférieur à l'apport pour la température et on ne peut pas observer de changements significatifs.

Les projections du changement climatique pour la neige se réalisent à partir de ces scénarios climatiques et permettent de caractériser leur évolution future par rapport au climat actuel (Verfaillie et al., 2018). Les premiers résultats pour les Pyrénées indiquent une baisse significative de l'épaisseur de neige, bien qu'ils conservent une forte variabilité interannuelle. C'est ainsi que dans les Pyrénées Centrales, à 1800 m d'altitude (figure 1.3.2), l'épaisseur moyenne de la neige pourrait diminuer de la moitié à l'horizon 2050, par rapport à la référence actuelle ; tandis que la période de permanence de la neige dans le sol se réduirait de plus d'un mois, entre l'automne et le printemps au cours de la saison froide. Cependant ces chiffres varient beaucoup en fonction de l'altitude, avec une tendance à la réduction sensible au-delà de 2000 mètres, et ils dépendent aussi des scénarios d'émissions considérés (López-Moreno et al., 2009).

2. L'impact du CC dans les secteurs biophysiques

Coordinateurs: Blas Valero-Garcés (IPE-CSIC)
Auteurs: David Amouroux (U. Pau- Pays de L'Adour), Laure Gandois (Laboratoire EcoLab, CNRS, UPS, INPT) Laboratoire EcoLab, CNRS, UPS, INPT), Didier Galop (Gaël Le Roux (Laboratoire EcoLab, CNRS, UPS, INPT), Lluis Camarero (CEAB-CSIC), Jordi Catalán (CREAF-UAB), Jesús Miguel Santamaría (U. Navarra), David Elustondo (U. Navarra), Alberto de Diego (UPV-EHU), Ana Moreno (IPE-CSIC), Fernando Barreiro-Lostres (IPE- CSIC), Pilar Mata-Campo, (IGME), Pablo Corella (IFQSH-CSIC) Penélope González – Sampériz (IPE-CSIC), Anna Avila Castells (CREAF-UAB), Olaia Liñero , (UPV-EHU), Marisol Felip (U. Autónoma Barcelona)

RESUMÉ

Les changements climatiques caractérisant l'Holocène (11700 dernières années) ont eu un impact considérable sur l'espace pyrénéen et ses systèmes biophysiques. Ces changements ont été particulièrement significatifs sur la disponibilité hydrique et le couvert végétal, mais également sur la dynamique de la cryosphère, les processus d'érosion superficiels et les transports sédimentaires. A l'échelle millénaire, l'Holocène a une structure tripartite. Avec une phase initiale qui s'achève il y a 8000 ans, marquée par le développement progressif des forêts et une augmentation de l'érosion et des transports sédimentaires. Une deuxième phase qui perdure jusqu'à il y 4500 ans est quant à elle caractérisée par un développement de la couverture forestière à l'étage montagnard, une diminution de l'érosion et de la disponibilité hydrique et finalement une diminution de l'humidité jusqu'à l'actuel. Sur le territoire pyrénéen, l'impact des périodes de réchauffement durant l'Anomalie Climatique Médiévale (900-1300 AD) et de refroidissement ou d'augmentation de l'humidité du Petit Âge Glaciaire (1300-1850 AD) sont fortement atténués et modulés par l'activité humaine. Les changements récents montrent une synergie entre le réchauffement global et la grande accélération de l'Anthropocène.

2.1 L'impact du CC sur le territoire pyrénéen durant l'Holocène

Paléohydrologie

L'augmentation globale des températures et de l'humidité au début de l'Holocène se note par une augmentation des niveaux des lacs d'altitude soumis aux influences alantiques. Cependant, dans les secteurs de basses altitude plus sensible à la sécheresse estivale la hausse des températures et le maximum d'insolation estivale ont favorisé une forte évaporation et ont ainsi prolongé, voire accentué, l'aridité mise en place lors de la phase froide du Dryas Récent (12900-11700 cal BP) retardant ainsi de deux millénaires l'augmentation de l'humidité jusqu'à environ 9500 ans avant le présent. A l'échelle millénaire, l'Holocène se décompose en trois grandes parties (González-Sampériz et al., 2017) : une phase initiale humide, suivie d'une phase sèche et finalement une phase terminale plus humide. Dans l'ensemble, l'Holocène ancien (11700-8000 cal BP[2]) représente la période de plus grande disponibilité hydrique sur l'ensemble du territoire pyrénéen avec une diminution de cette ressource durant l'Holocène moyen (à partir de 5500-4500 ans) qui est marqué par un épisode sec vers 3000-2500 avant le présent. Les 2000 dernières années sont quant à elles caractérisées par une relative élévation des niveaux lacustres. A l'intérieur de cette variabilté millénaire, on enregistre également des changements hydrologiques rapides (à échelles séculaire ou moindre) signalés par une augmentation des ruissellements de surface attribués à des évènements de précipitations intenses ou à une fonte rapide du manteau neigeux. En règle générale, ces épisodes sont corrélés avec des phases froides enregistrées dans l'Atlantique Nord et le bassin méditerranéen. Les deux grandes dernières oscillations climatiques séculaires (Anomalie Climatique Médiévale (ACM) et Petit Âge Glaciaire (PAG)) enregistrées durant le dernier millénaire ont eu une répercussion significative sur l'hydrologie pyrénéenne. L'ACM (900-1300 AD[3]) se caractérise ainsi par un abaissement généralisé des niveaux lacustres, par une plus forte évaporation et une augmentation de la salinité dans les zones basses, mais également par une grande variabilité liée à l'intensité des ruissellements de surface. A l'inverse, le PAG (1300-1850 AD) est marqué par une élévation des niveaux lacustres et par des avancées glaciaires (Morellón et al., 2012). L'alternance de conditions sèches ou humides ACM / PAG durant le dernier millénaire peut être mise en relation avec les changements affectant l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO).

Ce mécanisme moteur de la variabilité climatique provoque selon sa position une augmentation des précipitations atlantiques dans les zones septentrionales (NAO+) ou méridionales (NAO-) de l'Europe telles que les Pyrénées. Les reconstitutions disponibles indiquent que durant l'ACM les situations de NAO+ ont été prédominantes entrainant une hausse des précipitations en Europe du Nord, tandis que durant le PAG se sont les

situations NAO- qui prévalaient, avec des précipitations plus marquées sur le Massif pyrénéen. Pour autant, il faut garder à l'esprit que l'effet local de la NAO sur les conditions d'aridité (en particulier sur le versant sud) est soumis à une importante variabilité décennale (Vicente-Serrano y López-Moreno, 2008). Ainsi, l'enregistrement sédimentaire laminé du lac de Montcortés, indique que le début (1347-1400 AD) et la fin (1844-1894 AD) du PAG étaient marqués par des précipitations fréquentes et intenses (Corella et al., 2017). Enfin, durant le XX° s. et dans le contexte du réchauffement actuel on note des évidences de diminution de la disponibilité hydrique dans les Pyrénées, avec une baisse des niveaux lacustres dans les zones de basse altitude et une diminution des épisodes de précipitations intenses. Les débits des rivières pyrénéennes ont également diminués durant les dernières décades, mais dans ce cas d'autres raisons que climatiques peuvent être évoquées telle que l'augmentation de la superficie forestière liée à l'abandon des usages traditionnels (Beguería et al., 2003; García-Ruiz et al., 2016).

Erosion et processus superficiels

L'étude des sédiments fluviaux a permis de reconstituer l'histoire des épisodes majeurs de crues pour les rivières de la péninsule ibérique (Benito et al., 2008). Dans les bassins atlantiques, les crues correspondent à des épisodes de pluies intenses associées à des fronts atlantiques contrôlés par la NAO. Dans les zones méditerranéennes, les précipitations extrêmes sont induites par des systèmes convectifs durant l'automne. L'accroissement de la torrentialité enregistré dans les lacs de haute altitude durant l'Holocène ancien (Basa de la Mora : Pérez-Sanz et al., 2013 ; Marboré : Oliva-Urcía et al., 2018) ou à altitude moyenne durant les périodes plus récentes (Montcortés: Corella et al., 2016) est associé a une plus grande disponibilité hydrique et à des contextes saisonniers. Concrètement, l'enregistrement du lac de Montcortès fourni le premier enregistrement à résolution annuelle des événements de précipitations intenses (>90mm) survenus durant les 3000 dernières années. Il montre que dans les zones pyrénéennes soumises aux influences méditerranéennes, les pluies torrentielles ont été plus fréquentes durant les périodes chaudes (ACM) que durant les épisodes froids (PAG). La plus forte variabilité hydroclimatique est enregistrée durant le XIV° s., à la transition entre l'ACM et le PAG. Durant certaines phases du PAG marquée par des hivers secs et froids, les débits des rivières ont diminués et les crues ont été à la fois moins fréquentes et plus irrégulières comparativement aux dynamiques observées pour la période de l'ACM (900-1300 AD).

Durant l'Holocène, les taux de dénudation ont changés en fonction de l'intensité des précipitations, du type de couverture végétale, des usages du sol et de la disponibilité en sédiments. A l'échelle régionale, les transports sédimentaires fluviaux ont probablement augmenté durant les périodes de forte activité hydrologique au cours de l'Holocène ancien et final. Le delta de l'Ebre a considérablement été engraissé durant la période romaine sous les effets d'une augmentation des flux sédimentaires exacerbés par une importante activité agricole et minière sur l'ensemble du bassin versant. Dans les bassins versants ibériques, les phases majeures d'agradation fluviale sont notées durant l'époque médiévale (1000-1500 AD) et à la transition entre l'ACM et le PAG, sans doute en raison d'un impact anthropique plus important (Benito et al., 2008).La présence d'un niveau de cendres daté des X-XI° s. dans les sédiments du lac de Tramacastilla (Vallée du Gallego) reflète une période d'incendies généralisés liés au développement des zones pastorales subalpines (Montserrat, 1992). Sur le versant sud des Pyrénées, une période d'érosion intense correspond au maximum démographique de la fin du XIX°s et du début du XX°s. lorsque les territoires de montagnes étaient soumis à une exploitation importante (García-Ruiz et al., 2015) dans un contexte climatique qui, correspondant à la fin du PAG, était marqué par de fortes précipitations et des crues fréquentes. Les changements récents caractérisant l'intensité des processus érosifs et le transport sédimentaire sont fortement déterminés par des modifications ayant affectés les usages des sols (abandon des activités agropastorales et reforestation) au cours des dernières décennies.

La tendance des dernières décennies qui montrent un plus grand déficit hydrique et moins d'événements extrêmes n'est pas inhabituelle dans le contexte de l'Holocène récent en Méditerranée occidentale. Cependant, les séries chronologiques les plus longues suggèrent que la fréquence des pluies torrentielles peut augmenter dans un contexte de réchauffement global.

(2) Pour les âges Before Present (BP), l'année 1950 est considérée comme le "présent".

(3)Les âges "Common Era" (CE) et "Before Common Era" remplacent la notation traditionnelle en archéologie de AD et BC.

(4) (5) La dénudation est l'érosion des sols et des sédiments de la bassins d'accueil. L'aggradation est l'accumulation de sédiments dans les rivières, les ruisseaux ou les lacs.

Evolution de la cryosphère

Il est probable que la plupart des glaciers pyrénéens aient disparu au cours des premiers millénaires de l'Holocène ou qu'ils ait été limités aux grands cirques les plus élevés (García-Ruiz et al., 2014). Beaucoup de ces glaciers se sont développés pendant le Néoglaciaire (il y a 5000 ans) et plusieurs cirques ont connu des fluctuations ultérieures telles qu'un recul glaciaire durant l'Âge du bronze et la période humide romaine, ainsi qu'une brève expansion au Moyen Âge tardif, entre les années 600 et 800 AD.

Au cours du PAG, de nombreux glaciers pyrénéens ont progressé pour atteindre leur étendue maximale Holocène. Au milieu du XIXe s. le PAG s'achève et les glaciers pyrénéens subirent les effets du réchauffement du climat. Depuis 1850, ces derniers ont régressé presque continuellement, bien qu'il y ait eu de brèves périodes de stabilisation ou même de rétablissement. La dégradation des glaciers est particulièrement aiguë depuis 1980.

En un siècle et demi, beaucoup d'entre eux ont disparu, d'autres sont devenus de simples champs de neige et, finalement, d'autres persistent mais ont connu une réduction notable de leur superficie et de leur épaisseur. L'évolution de certains glaciers et de la couverture de neige au niveau de l'étage subalpin montre que même pendant les années de forts cumul de neige, les glaciers continuent de régresser (García-Ruiz et al., 2015, López-Moreno et al., 2016). De petits secteurs de pergélisol où des sols polygonaux ont été identifiés sont toujours présents au-dessus de 2600 m. et 13 glaciers rocheux sont toujours actifs.

Changements dans la végétation

Le début de l'Holocène dans les régions des Pyrénées soumises aux influences atlantiques est caractérisé par le développement de la forêt dans les étages montagnards et subalpins. Les variations enregistrées dans le développement des conifères et des espèces forestières caducifoliés durant les premiers millénaires de l'Holocène révèlent la réponse rapide de la végétation aux fluctuations climatiques. Au cours de cette période, une forte saisonnalité et une évaporation élevée ont permis le maintien de paysages steppiques dans les zones méditerranéennes jusqu'à il y a environ 9200 ans. À partir de ce moment, une augmentation des températures hivernales et une plus grande disponibilité en eau ont favorisé l'expansion des feuillus, principalement dominée par le chênes et le noisetier (González-Sampériz et al., 2017). Au cours de l'Holocène moyen, entre 8200 et 6000 ans, en réponse à des hivers doux et à des conditions plus humides marquées par une répartition des précipitations plus uniformes tout au long de l'année, une forêt de type méditerranéen s'est développée sur le versant sud des Pyrénées centrales et orientales. Elle était composée de chênes semi-décidus dans l'étage montagnard ; elle s'est substituée aux conifères et pouvait s'établir jusqu'au niveau de l'étage subalpin (Leunda et al., 2017). La période comprise entre 6000 et 4800 ans avant le présent représente une phase de transition au niveau régional durant laquelle la saisonnalité a été plus marquée et caractérisée par une intensification de la saison sèche, particulièrement notable à plus basse altitude. Dans ces zones, les communautés les plus touchées étaient celles des formations caducifoliées subalpines qui ont cédées leurs places aux pins et aux genévriers. L'établissement de conditions plus arides il y a 4800 ans a causé la disparition d'importantes superficies forestières caducifoliées montagnardes et favorisé l'expansion des espèces semi-caducifoliées et persistantes, mais aussi un développement du pin à des altitudes plus élevées. La végétation s'est adaptée à des conditions arides pendant deux périodes : entre 2900 et 2400 ans avant le présent et pendant l'Anomalie Climatique Médiévale entre 900 et 1300 AD. Au cours du PAG, et plus particulièrement pendant les phases les plus froides et les plus humides, des changements sont intervenus dans la structure et la composition des forêts, bien qu'une diminution relative des activités humaines ait également influencé ces changements durant ces périodes. La limite supérieure de la forêt a connu une légère diminution dans les zones où elle était naturellement conservée (Camarero et al., 2015). Depuis la fin du PAG, les activités humaines et les changements dans l'utilisation des terres semblent être le principal moteur du changement de la végétation dans les Pyrénées. Cependant, au cours des dernières décennies, la croissance du pin noir (Pinus nigra) au-dessus de la limite forestière dans certaines zones du Parc National d'Ordesa et du Mont Perdu (PNOMP) suggère une remontée altitudinale de la végétation qui pourrait être liée à une moindre pression anthropique, mais aussi à une élévation des températures moyennes en altitude qui permettrait le développement de la végétation ligneuse.

Incendies

Les feux sont des perturbations qui agissent en tant que régulateurs des écosystèmes et sont modulées par la dynamique interne de ces derniers. Sur les pentes méridionales des Pyrénées, entre 1900 et 2200 m d'altitude, les enregistrement indiquent de plus grandes intensités et fréquences de feux au début de l'Holocène (entre 10500 et 7700 cal BP) en raison d'un ensoleillement maximal pendant l'Holocène ancien, qui aurait favorisé une sécheresse estivale et facilité

Figure 2.1.1. Synthèse des changements et des impacts associés au changement climatique durant l'Holocène sur le territoire pyrénéen (dernières 11700 années). Echelles qualitatives de mineures (0) à majeure

les départs d'incendies. De plus, l'expansion de la forêt mésophile fournissait une biomasse importante et nécessaire favorable à une fréquence plus élevée des feux d'origines naturelles dans les zones forestières des Pyrénées centrales (Gil-Romera et al., 2014). Au cours de l'Holocène moyen, la fréquence des incendies diminue sur le versant sud des Pyrénées, avec une activité de feu modérée qui peut être liée à une gestion anthropique et à des changements dans la composition forestière. Par contre, sur le versant nord la fréquence des feux est plus élevée entre 8500 et 5500 cal BP où elle est associée à un climat plus chaud et plus sec (Rius et al., 2012). Depuis la fin de l'Âge du bronze et pendant l'Âge du fer et la période romaine (essentiellement entre 2500 et 1800 cal BP), la présence humaine s'intensifie en altitude. Les incendies d'origine humaine apparaissent principalement à partir de cette période, en corrélation avec une agriculture itinérante, le développement de la métallurgie et des activités pastorales, notamment entre 2900 et 2650 cal BP et entre 1850 et 1550 cal BP. Dès cette période, l'action anthropique sur la végétation et par conséquent sur la dynamique des feux devient sensiblement plus importante (Rius et al., 2012, Gil-Romera et al., 2014). Il convient de noter que la variabilité temporelle des incendies enregistrée pendant l'Holocène sur le versant sud des Pyrénées peut être liée à la distribution spatiale du combustible, à son inflammabilité, ainsi qu'aux actions anthropiques locales. Malgré cela, on peut supposer qu'il existe une variabilité altitudinale dans les occurrences des feux. Ils auraient été plus fréquents et plus précoces dans les zones de basse altitude, où le combustible et la continuité du couvert végétal n'auraient pas été limitatifs et où les interventions humaines auraient été un vecteur important de déclenchement.

Changements rapides

Les données paléoenvironnementales et paléoclimatiques montrent que les écosystèmes pyrénéens et les processus de surface sont très sensibles et ont réagi rapidement aux fluctuations climatiques pendant l'Holocène. Au cours des phases de changement climatique rapide définies à l'échelle mondiale (Mayewski et al., 2004), la végétation, la disponibilité de l'eau, la cryosphère et les processus de surface ont été rapidement affectés sur le territoire pyrénéen. Un événement global de cette nature s'est produit il y a 8200 ans. Il est reconnu comme étant l'un des plus intenses et implique une baisse des températures et une augmentation de l'aridité sous nos latitudes. Dans les Pyrénées, lors de cet événement on note une diminution de la proportion d'arbres à feuilles caduques, plus sensibles que les conifères à une augmentation de l'aridité et à la diminution des températures, ainsi qu'une nette diminution

de l'isotherme 0 ° C, (selon l'enregistrement des chrysophytes du Lac Redó. Catalan, 2011). Au cours des 2000 dernières années, les modifications rapides des précipitations et des température durant l'ACM et la PAG (Giralt et al., 2017, Oliva et al., 2018) ont eu un impact sur le territoire pyrénéen, démontrant ainsi la vulnérabilité des écosystèmes montagnards aux changements climatiques rapides.

Changement climatique et impacts anthropiques

Différentes études montrent que durant les derniers siècles, les impacts anthropiques sur la végétation, l'hydrologie et l'érosion dans les Pyrénées sont si intenses qu'il n'est pas toujours facile de les séparer des réponses au changement climatique. La première preuve d'un impact humain significatif dans le paysage pyrénéen s'est produite au Néolithique ancien, bien que certains changements dans la végétation puissent être interprétés comme une déforestation humaine ou une réponse au changement climatique (Galop et al., 2013). C'est au cours des 2000 dernières années que la transformation du paysage a été intense et continue, plus marquée dans les zones de basse altitude qu'au niveau de l'étage subalpin, où pour des raisons évidentes la pression humaine a été plus saisonnière car liée au pâturage. Les premiers impacts importants de l'activité anthropique à basse altitude apparaissent il y a environ 3100 ans avec une phase de déforestation et la présence de pollen de céréales à Estaña (Morellón et al., 2008). Les changements dans la composition de la végétation à des altitudes plus élevées ont été interprétés comme une réponse aux fluctuations climatiques ou à la déforestation humaine (Pérez-Sanz et al., 2013, Leunda et al., 2017). Depuis l'époque médiévale, il existe de nombreuses preuves de changements dans le paysage liés à la déforestation et aux activités humaines. C'est au Moyen Age, durant l'épisode climatique favorable de l'ACM que se sont produits des changements majeurs dans les paysages pyrénéens, avec une déforestation importante des étages subalpins et montagnards et l'augmentation des cultures à plus basse altitude. Cette déforestation a profondément transformé le paysage de la haute montagne pyrénéenne tout en modifiant son fonctionnement hydrologique et les processus géomorphologiques. Au cours du Petit Âge Glaciaire, dans les zones de haute altitude, les activités humaines ont localement diminué en raison des conditions climatiques plus froides et contraignantes. Toutefois, dans les zones de moyenne montagne, la fin du PAG (milieu du XIXe siècle) correspond au début d'une phase d'occupation humaine maximale qui s'étend jusqu'au milieu du XX° siècle. Depuis lors, le réchauffement climatique a coïncidé avec l'exode rural et le dépeuplement de la montagne.

ENCUADRE 2.1.1 LES PYRÉNÉES DURANT UN ÉPISODE CLIMATIQUE PLUS CHAUD : L'ANOMALIE CLIMATIQUE MÉDIÉVALE

C'est durant le bas Moyen Âge au cours d'une période climatique relativement plus chaude -l'Anomalie Climatique Médiévale (ACM, 900 - 1300 AD) – que se sont produit sur le territoire pyrénéen des changements majeurs et encore observables de nos joursi. L'augmentation de la pression anthropique liée à une forte hausse démographique coïncide avec une phase marquée par des températures plus élevées, une irrégularité hydrologique, une saisonnalité et une torrentialité plus importantes et par la récurrence d'épisodes plus arides. Durant cette période, on note à l'étage subalpin une diminution des forêts mésophiles et un développement des pins, des genévriers et de certaines herbacées steppiques (Artemisia). A plus basse altitude, la dynamique est caractérisée par une expansion des cultures céréalières et de l'arboriculture (olivier, vigne, châtaignes et noix). Les pelouses subalpines qui caractérisent le paysage actuel des Pyrénées sur le versant sud au-dessus de 1600 m. ont connu une expansion remarquable après une importante phase de déforestation. Cette déforestation et les changements dans l'utilisation des terres ont profondément transformé le paysage de la haute montagne pyrénéenne et en ont en même temps modifié le fonctionnement hydrologique et certains processus géomorphologiques.Le MCA peut-il servir d'analogue à la phase de réchauffement climatique actuel ? Bien que les premières phases du réchauffement climatique du XX° siècle correspondent à un déclin des activités agro-pastorales en haute montagne, le changement global dans les Pyrénées se caractérise actuellement par des conditions plus chaudes et des transformations anthropiques intenses. Bien que les causes des changements climatiques ne soient pas identiques, les deux périodes partagent une augmentation rapide de la température, une plus grande irrégularité hydrologique et une forte pression anthropique.

2.2 Biodiversité de montagne: la faune

Coordinateurs: Juan Terrádez (CTP-OPCC), Idoia Arauzo (CTP-OPCC)
Auteurs: Juan Terrádez (CTP-OPCC), Idoia Arauzo (CTP-OPCC)
Coauteurs: José Antonio Atauri (Oficina Técnica EUROPARC-España), Josep María Nebot (Universitat de Barcelona, Institut de Recerca de la Biodiversitat (IRBio) i Dpt. de Biologia Evolutiva, Ecologia i Ciències Ambientals), Bernat Claramunt (CREAF, Universitat Autònoma de Barcelona) Sofía Morcelle (SEO/BirdLife), Ricardo García-González, (IPE- CSIC), Guillem Masó Ferrerons (IPE-CSIC).

RÉSUMÉ

Les conditions climatiques jouent un rôle décisif dans la composition, la structure et le fonctionnement des systèmes naturels. Les écosystèmes de haute montagne, qui se caractérisent par une grande richesse d'espèces endémiques avec d'étroites aires de répartition, des faibles effectifs de populations, des exigences spécifiques d'habitat et des capacités limitées de dispersion, sont particulièrement vulnérables aux variations des conditions climatiques. En effet, en montagne le climat est l'un des principaux régulateurs du fonctionnement des écosystèmes, car même les petites variations de température peuvent avoir une incidence sur la répartition et l'abondance de nombreuses espèces. Les impacts du changement climatique sur la faune des Pyrénées pourraient se manifester de différentes manières, notamment i. des changements généraux dans la physiologie de certaines espèces (par exemple, des adaptations physiologiques à travers des processus microévolutifs), ii. des altérations dans la phénologie des espèces (comme, par exemple, des variations du nombre d'événements de reproduction, la date d'éclosion des œufs, ou la date de début et de fin des mouvements migratoires), iii. des variations dans l'abondance, la composition et la répartition géographique des populations (qui se manifestent à travers des changements latitudinaux et altitudinaux de la zone de répartition des différentes espèces) et qui, avec les altérations phénologiques, peuvent déboucher sur iv. des altérations écologiques plus profondes à travers des déséquilibres entre les cycles biologiques d'espèces interconnectées entre elles (comme, par exemple, les systèmes prédateur-proie ou plante-herbivore), capables d'altérer le fonctionnement de l'ensemble de l'écosystème. De plus, le changement climatique pourrait augmenter le v. risque d'invasion et/ou d'expansion de certaines espèces exotiques, favorisant leur transport et leur implantation ultérieure, grâce aux nouvelles conditions climatiques favorables et à la réduction de la concurrence interspécifique avec les espèces natives. Par ailleurs, il ne faut pas oublier qu'en agissant en synergie avec les impacts climatiques directs, il existe plusieurs facteurs, pour la plupart de nature anthropique, dont l'ampleur est telle qu'elle en fait un enjeu encore plus important pour la conservation de la faune pyrénéenne. Parmi eux, il est important de mentionner la destruction et la fragmentation de l'habitat, les changements d'utilisation du sol, la surexploitation des ressources hydriques, la pollution atmosphérique et des eaux, l'abandon des activités agropastorales, et l'introduction et la diffusion des espèces exotiques. L'action combinée des impacts anthropiques et des impacts du changement climatique, à travers les altérations mentionnées, peuvent entraîner la modification de certains processus écologiques clés dans les écosystèmes de haute montagne, ce qui pourrait compromettre leur propre survie, en limitant également leur capacité à fournir des biens et des services à la société.

2.2.1 Changements dans la productivité et abondance des espèces

Le changement climatique peut affecter la physiologie de nombreuses espèces, en influant sur leur productivité et, en définitive, sur leur survie à long terme (Parmesan et al., 2006). La corrélation entre variables climatiques et paramètres démographiques des espèces de haute montagne a été largement démontrée par la communauté scientifique (Provenzale, 2008 ; Bionda et Brambilla, 2012 ; Garcia et al., 2014 ; EEA. 2016 ; Pacifici et al., 2015 ; De Pous., 2016). Dans les écosystèmes de la région biogéographique alpine, les impacts du changement climatique sur la physiologie et la productivité de certaines espèces se sont avérés plus évidents que dans d'autres régions biogéographiques. Dans ces environnements, le climat est le principal facteur régulateur de l'écosystème. Par conséquent, les communautés d'animaux et de plantes se trouvent dans un état d'équilibre délicat avec les variables climatiques.

Impacts observés et prévus:

La réduction de l'ampleur et de la persistance des chutes de neige enregistrée au cours des dernières décennies dans les Pyrénées a des conséquences sur les différentes espèces qui vivent dans des environnements neigeux. C'est le cas des grands mammifères d'altitude comme le chamois pyrénéen ou isard (Rupicapra pyrenaica). Plusieurs études ont montré la corrélation entre les changements démographiques dans la population pyrénéenne de cet ongulé et les années avec une couverture de neige inférieure à un certain seuil (Jacobson et al., 2004 ; Willisch et al., 2013 ; Kourkgy et al., 2015). Il a notamment été démontré que les changements phénologiques chez les espèces végétales dont s'alimentent les isards agissent comme un signal de lancement des étapes importantes dans leur cycle de vie comme la reproduction, la conception ou la durée

de la gestation. De la même manière, on a observé que certaines espèces d'oiseaux caractéristiques des environnements de haute altitude, comme la perdrix des neiges (Lagopus muta pyrenaica), voient leur physiologie et leur abondance altérées en raison du changement climatique. García-González et al. (2016) ont notamment souligné que la hausse des températures pourrait réduire la quantité de neige ou sa durée, diminuant ainsi l'étendue des zones d'alimentation préférées des perdrix des neiges. La croissance réduite de la végétation d'altitude a une incidence directe sur la disponibilité en aliments pour la perdrix des neiges et, par conséquent, sur son état physiologique, son succès reproducteur et sa capacité de survie. Selon Novoa et al. (2016) les variables qui expliquent le mieux les différences dans le succès de la reproduction de cette espèce dans les Pyrénées sont la date du dégel total et le comportement des précipitations après l'éclosion des pontes au printemps, des variables qui sont altérées par le réchauffement mondial (Buisan et al., 2015 ; Morán-Tejeda et al., 2017). Les amphibiens font partie des groupes de vertébrés les plus vulnérables aux changements physiologiques induits par le changement climatique. Leur peau perméable, leur cycle de vie biphasé et leurs œufs sans coquille expliquent pourquoi les amphibiens sont extrêmement sensibles aux petits changements de température et d'humidité (Carey et Alexander, 2003). Il a été démontré que leur succès de reproduction, leurs fonctions immunes et leur degré de sensibilité aux polluants chimiques peuvent se voir directement affectés par le réchauffement mondial (Pound et al., 2006 ; Araujo et al., 2011 ; Dastansara et al., 2017). L'un des effets négatifs le plus important dans la physiologie des amphibiens est principalement dû aux changements qui se produisent pendant la période de latence métabolique durant la saison hivernale. L'augmentation de la mortalité et la réduction de la capacité de reproduction chez certaines populations de crapaud commun (*Bufo bufo*) en est un bon exemple : les hivers de plus en plus doux entraînent le raccourcissement de la période de latence métabolique hivernale, générant une détérioration générale de l'état corporel de nombreux individus (Reading, 2007). De plus, les températures minimales de plus en plus douces empêchent le métabolisme de ces amphibiens de les mener à l'état de latence totale durant l'hiver. Voilà pourquoi les individus continuent de consommer leurs réserves et de réduire en conséquence leur masse corporelle. La perte de masse corporelle a une incidence directe sur une réduction des probabilités de survie (Bonardi et al., 2011 ; Caruso et al., 2014). Les événements climatiques extrêmes également, comme les sécheresses et les vagues de chaleur, génèrent des effets négatifs sur les populations de certains amphibiens. Il a été démontré que la vague de chaleur de l'année 2003 a généré des impacts négatifs considérables dans la survie de la grenouille commune (*Pelophylax perezi*) en Europe. Piracés et al. (2015) ont constaté des baisses annuelles de population considérables dans les populations du triton pyrénéen (*Calotriton asper*) dans neuf ravins du Parc National d'Ordesa et du Mont-Perdu, directement liées aux années présentant le plus grand nombre d'événements climatiques extrêmes (principalement des crues et des sécheresses). Enfin, la physiologie et le comportement des invertébrés peuvent également être affectés par la modification des conditions climatiques. C'est le cas, par exemple, de la chenille processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa*), dont les populations ont augmenté ces dernières années leur succès reproducteur et étendu leur zone de répartition dans certaines zones des Pyrénées suite à la hausse des températures minimales et à la réduction du nombre de jours de pluie (Buffo et al., 2007 ; Rousselet et al., 2010 ; Taïgo et al., 2017).

2.2.2 Modifications du cycle de vie (altérations phénologiques) et des interactions entre les espèces

L'un des effets les plus évidents du changement climatique sur la faune sont les altérations du cycle de vie (Knudsen et al., 2011). Des événements importants dans la vie des animaux, tels que la reproduction, la ponte, la migration et l'hibernation, modifient leur calendrier en raison de l'augmentation des températures. Le cycle biologique de nombreuses espèces change de manière significative et le changement climatique semble être la cause principale. Les réponses phénologiques au changement climatique sont très différentes entre les espèces, ce qui peut donner lieu à la désynchronisation de certaines de ces interactions-clés. Les désynchronisations peuvent entraîner des altérations considérables dans la structure des communautés de haute montagne. Les espèces migratrices et les espèces aussi bien terrestres qu'aquatiques, dont la température corporelle dépend de la température environnementale, sont particulièrement vulnérables à ces changements (Dell et al., 2005 ; Jiguet et al., 2010 ; Parmesan, 2006 ; Dingemanse y Kalkman, 2008 ; Schlüter et al., 2010 ;

(6) Cycle de vie qui consiste en deux phases différentes (larve et adulte) avec une métamorphose de transition entre les deux.

Tryjanowski et al., 2010 ; Barthès et al., 2014). Les changements phénologiques, également de bons indicateurs du changement climatique, ont une importance écologique critique, car ils peuvent avoir un impact sur la compétitivité des différentes espèces donc, par conséquent, sur la structure des communautés, et enfin, sur le fonctionnement de l'écosystème.

Impacts observés et prévus:

Dans le cas des oiseaux migrateurs, la plus importante variabilité climatique ayant caractérisé ces dernières décennies altère les patrons migrateurs de certaines espèces résidentes temporaires dans les Pyrénées (Walther et al., 2002 ; Rubolini et al., 2007 ; Panuccio et al., 2016). Parmi les principaux changements documentés, citons l'avancement de la date d'arrivée sur le continent européen au printemps, observée chez plus de 100 espèces (Bradley et al., 1999 ; Rubolini et al., 2007), le retard dans la partie automnale et, en général, les changements dans les patrons migrateurs, particulièrement intenses chez les oiseaux migrateurs de courte distance (Møller et al., 2008 ; Saiano et al., 2011; Panuccio et al., 2017). L'avancement de la date d'arrivée en Europe est lié à la hausse des températures hivernales en Afrique subsaharienne, lieu d'hivernage de la plupart de ces espèces. Par ailleurs, le retard de la partie automnale semble avoir un lien avec les températures élevées enregistrées aux lieux d'arrivée. Saiano et al. (2011) ont notamment calculé un avancement moyen de la date d'arrivée d'environ 0,16 jour par an depuis 1959, avec des valeurs maximales pour certaines espèces pouvant atteindre 0,27 jour par an.

Par ailleurs, le changement climatique semble affecter différemment les différents types d'oiseaux migrateurs en Europe. La part d'individus, notamment, qui migrent sur de grandes distances, augmente au détriment du nombre d'individus résidents et migrateurs sur de courtes distances (Møller et al., 2011). De nombreuses études prévoient une intensification de ces altérations phénologiques à l'avenir, qui pourraient même parvenir à modifier considérablement la part d'oiseaux migrateurs sur de longues et courtes distances en Europe (Bloom et al., 2012; Charmantier, 2014).

Les événements climatiques extrêmes semblent également à la cause de certains changements phénologiques chez les oiseaux. Dans le cas de l'hirondelle commune (Hirundo rustica), espèce migratrice qui hiberne en Afrique et qui nidifie chaque année des deux côtés de la chaîne de montagnes, on a relié l'incidence croissante de vagues de chaleur et de sécheresse à une plus importante variabilité à la date d'arrivée en Europe (Saino et al., 2004). Lorsque les conditions sont meilleures dans les lieux d'hivernage

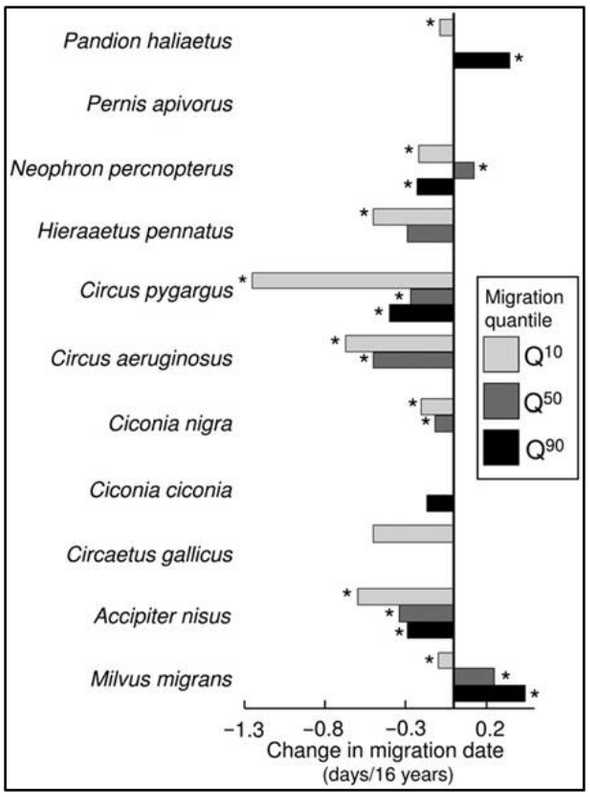


Figure 2.2.1. Estimation de l'avancement de la date d'arrivée dans la Péninsule ibérique de 11 espèces d'oiseaux migrateurs entre 1999 et 2011 (nombre de jours pour 16 ans). En gris clair = Q10, correspond à 10 % des oiseaux comptabilisés, en gris foncé (Q50), correspond à 50 % des oiseaux comptabilisés et en noir (Q90), 90 % des oiseaux comptabilisés. Source: Panuccio et al., 2017

(peu d'événements climatiques extrêmes et doux), la qualité de l'habitat est meilleure et la plus grande disponibilité des aliments que cela implique permet aux adultes d'arriver plus tôt aux lieux de reproduction en Europe. Par conséquent, les opportunités de réaliser une deuxième ponte avec succès augmentent (Saino et al., 2004). Si à l'avenir les événements climatiques extrêmes s'intensifient dans les lieux d'hivernage, le succès reproducteur de l'espèce pourrait se voir affecter, car cela pourrait entraîner une diminution du nombre de partenaires capables de réaliser une seconde ponte consécutive (Walther, 2010).

ENCUADRE 2.2.1. PROJET LINDUS 2 : SUIVI DES OISEAUX MIGRATEURS, ÉDUCATION ENVIRONNEMENTALE ET ÉCOTOURISME SUR LE TERRITOIRE TRANSFRONTALIER DES PYRÉNÉES

Les Pyrénées occidentales constituent un lieu privilégié pour l'observation des milliers d'oiseaux qui, chaque année, empruntent la route migratoire occidentale de l'Europe. LINDUS-2 est un projet de coopération transfrontalière dans les Pyrénées développé entre 2010 et 2014 à travers le projet Lindus. Son principal objectif est l'observation et l'enregistrement des passages migratoires des oiseaux par les cols de montagne de cette chaîne. Comme nouveauté, le programme scientifique s'élargit également à l'étude des chauves-souris, qui empruntent en grand nombre cette route migratoire et hibernent même en Navarre. Au travail d'identification et de comptage des oiseaux à quatre points stratégiques (Lindus, Organbidexka, Portalet et Somport), Lindus-2 ajoute la sensibilisation sociale qui se développe à travers la participation d'écovolontaires et de nombreuses autres initiatives. Le projet cherche également à promouvoir l'écotourisme lié à l'observation des oiseaux sur le territoire Lindus et à mettre en valeur le patrimoine naturel et culturel de la zone. Lindus-2 est développé de 2016 à 2018, ce qui permet de réaliser un suivi des oiseaux pendant trois saisons de migration, et permettra d'obtenir des données précieuses d'observation pour disposer d'informations supplémentaires sur les changements dans la phénologie des oiseaux migrateurs qui traversent tous les ans les Pyrénées. En outre, le projet LINDUS 2 permet de promouvoir des initiatives de science citoyenne, comme l'initiative de « comptage d'oiseaux », où l'on invite les citoyens à participer activement aux recensements de l'avifaune à travers une application mobile appelée « eBIRD ». Le projet fait partie du Programme Opérationnel de Coopération Territoriale Espagne-France-Andorre (POCTEFA 2014-2020) avec 65 % du financement provenant du Fonds Européen de Développement Régional (FEDER). Il s'agit d'un travail de coopération transfrontalière entre le Gouvernement de Navarre, son entreprise publique GAN-NIK (Gestión Ambiental de Navarra, S.A.), la Mairie de Burguete, SEO/BirdLife et la Ligue pour la Protection des Oiseaux (LPO-Aquitaine), qui couvre un large territoire en Navarre, Aragon et Aquitaine.

Les changements phénologiques affectent également les invertébrés. Parmi les insectes, les études sur les lépidoptères et les principales espèces de pollinisateurs ont révélé leur sensibilité particulière aux changements de température (Herrera et al., 2014). Concernant les lépidoptères, des avances de date des premières observations ont été enregistrées au cours des dernières décennies chez la plupart des espèces étudiées, vraisemblablement liées à la hausse des températures moyennes (Diamond et al., 2011). On retrouve une preuve évidente de l'effet du changement climatique sur la phénologie des animaux chez les amphibiens. Ces trente dernières années, des avances comprises entre une et trois semaines par décennie ont été enregistrées à la date de début de l'activité de reproduction et de ponte d'œufs de nombreux amphibiens (Scott et al., 2008; Phillimore et al., 2010 ; Green et al., 2017). Les reptiles également semblent avoir connu des progrès considérables dans leur phénologie au cours des 30 dernières années. À l'exception des années les plus froides, la date d'apparition de plus de 15 espèces de reptiles présentes dans les Pyrénées s'est avancée progressivement chaque année (Prodon et al., 2017). Il est très probable que la tendance actuelle constatée dans les changements phénologiques de nombreuses espèces animales se maintienne, voire s'accentue à l'avenir, à mesure que les températures augmentent, et qu'il y ait une plus grande variabilité climatique en raison du réchauffement mondial (Vitasse et al., 2018). En plus de modifier les calendriers phénologiques de certaines espèces, l'effet cumulé pourrait finir par altérer gravement les interactions entre les différentes espèces, avec des conséquences sur tous les niveaux de la chaîne trophique, affectant la dynamique de nombreuses espèces et des écosystèmes de haute montagne (Gordo et al., 2005 ; García et al., 2014 ; MacCarty et al., 2017).

2.2.3 Modifications de la répartition géographique

ne autre des réponses les plus fréquentes de la faune au changement climatique consiste à se déplacer vers des latitudes et/ou des altitudes supérieures, à la recherche de zones présentant des conditions climatiques toujours appropriées, modifiant ainsi sa répartition géographique d'origine. La plupart des études, réalisés avec différents modèles et différentes approches, s'accordent à prévoir un déplacement général vers le nord des actuelles zones de répartition, un rétrécissement des zones de répartition les plus méridionales et un déplacement vers de plus hautes altitudes des espèces de montagne (Parmesan et al., 2006 ; Dirnböck et al., 2011). Les effets de ces déplacements pourraient être particulièrement négatifs sur les espèces qui se trouvent aux extrémités ou aux limites de leur zone de répartition actuelle, comme c'est le cas de nombreuses espèces de montagne. Dans leur ensemble, les variations de la répartition actuelle des espèces pourraient occasionner des changements dans les actuelles communautés de montagne qui, de manière générale, pourraient se caractériser par des augmentations de certaines espèces généralistes, au détriment de certaines espèces plus spécialistes (Singer et Parmesan, 2010). Il existe un consensus sur le fait que l'intensité de ces déplacements dépendra non

seulement de l'évolution du changement climatique et de la capacité de réponse de chaque espèce, mais également, et sûrement en grande partie, de l'évolution d'autres facteurs non climatiques intégrés dans le concept de changement global (Schweiger et al., 2008).

Impacts observés et prévus:

En général, un déplacement moyen de la zone de répartition géographique des espèces européennes est estimé à environ 17 km vers de plus hautes latitudes, et/ou de 11 m vers des altitudes supérieures, par décennie (Chen et al., 2011). Un aspect critique pour les espèces de faune de montagne réside dans le fait que les déplacements ascendants sont souvent limités par d'autres facteurs liés à l'activité humaine comme la fragmentation de l'habitat ou les changements d'utilisation du sol. Ces facteurs peuvent altérer la connectivité entre des zones du territoire, entravant les migrations vers des altitudes supérieures et, par conséquent, la capacité des différentes espèces à s'adapter aux nouvelles conditions (Dirnböck et al., 2011). De plus, les déplacements en hauteur, en montagne, impliquent une perte d'habitat, car la zone de répartition se réduit inévitablement à mesure que l'on monte. Par conséquent, certaines espèces courent le risque d'être progressivement isolées dans les petites zones d'habitat favorable restant, avec l'augmentation conséquente de leur vulnérabilité, voire de leur risque d'extinction, en raison de la pénurie alimentaire et de la variabilité génétique toujours moins importante de leurs populations (Schneider et al., 2002 ; Maclean y Wilson, 2011; Flousek et al., 2015). Ce phénomène pourrait avoir des effets particulièrement négatifs sur des espèces et des populations présentant une faible diversité génétique comme, par exemple, la marmotte (Marmota marmota). Selon une étude récente de Bichet et al (2016), les actuelles populations de cette espèce présentent une faible variabilité génétique due au fait qu'après son extinction dans les Pyrénées il y a plus de 10 000 ans, elle a été réintroduite avec succès à partir de deux populations différentes seulement, qui présentaient en outre peu d'échange génétique entre elles. Le faible nombre d'individus fondateurs (près de 400, réintroduits en 40 ans), ainsi que l'isolement géographique et génétique, sont des facteurs qui pourraient réduire considérablement la capacité d'adaptation et de résilience de la marmotte face aux effets du changement climatique.

Chez la plupart des espèces de haute montagne, la limite inférieure de la zone de répartition est restreinte par les conditions climatiques défavorables, tandis que la limite supérieure est conditionnée par la disponibilité d'un type particulier de végétation, d'espèce végétale ou d'habitat. C'est pourquoi les changements produits dans la zone de répartition des espèces pyrénéennes dépendront également de la capacité de la végétation à déplacer son aire de répartition avec le temps : si la vitesse à laquelle se déplacent les communautés végétales est inférieure à la vitesse à laquelle varient les conditions climatiques, les nouvelles zones de répartition potentielle de nombreux animaux pourraient se réduire considérablement par rapport aux zones d'origine (Costa et al., 2009 ; Alexander et al., 2017).

Quant aux mammifères, les espèces endémiques de haute montagne et ayant une faible capacité de dispersion semblent présenter une plus forte sensibilité aux effets du changement climatique dans leur répartition. Citons par exemple le cas du desman des Pyrénées (*Galemys pyrenaicus*). D'après les conclusions d'une étude réalisée par Murueta-Holme *et al.* (2010) sur l'impact du changement climatique sur ce petit mammifère dans les principaux Massifs du nord de la Péninsule ibérique, sa zone de répartition pourrait connaître un rétrécissement très important au cours de ce siècle. Les températures moyennes estivales et le bilan hydrique notamment semblent être les principaux facteurs qui déterminent la présence et la répartition potentielle de *G. pyrenaicus.* Il est prévu que les deux facteurs varient considérablement au cours de ce siècle en raison du réchauffement global. Si les projections de ce modèle étaient confirmées, les effets du changement climatique, en synergie avec la perte d'habitat pourraient compromettre la survie future de l'espèce.Certaines espèces d'oiseaux pourraient également connaître un rétrécissement de leur aire de répartition dans les Pyrénées. Même si la capacité de voler augmente considérablement leur capacité de dispersion, la réduction de l'aire de répartition des communautés végétales dont dépendent de nombreuses espèces pourrait être déterminante chez des espèces telles que la perdrix des neiges (*Lagopus muta pyrenaica*) (García-González *et al.,* 2016: Novoa *et al.,* 2016).

(7) On appelle changement global l'ensemble des changements environnementaux résultant des activités humaines sur la planète, notamment les changements dans les processus qui déterminent le fonctionnement du système Terre (Wikipedia.org).

(8) La variabilité génétique se réfère à la variation sur le matériel génétique (génome) d'une population ou d'une espèce. Pour pouvoir s'adapter aux effets négatifs du changement climatique, une grande diversité génétique permettant d'activer des mécanismes génétiques adaptatifs est nécessaire pour compenser les effets environnementaux négatifs. À mesure que cette variabilité diminue entre les populations de certaines espèces et plantes déterminées, ces dernières deviennent plus vulnérables aux changements dans les conditions environnementales. Cependant, l'adaptation au changement environnemental pourrait se faire également à travers ce que l'on connaît sous le nom de « plasticité phénotypique » (voir par ex. Kourkgy et al. 2016, entre autres).

CADRE 2.2.2. PROMOUVOIR L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LA GESTION DES AIRES PROTÉGÉES.

La Fondation Fernando González Bernáldez et EUROPARC-Espagne développent actuellement le projet « Promouvoir l'adaptation au changement climatique dans la gestion des aires protégées d'Espagne », avec le soutien de la Fondation Biodiversité à travers l'appel d'offres d'Ayudas pour la réalisation de projets en matière d'adaptation au changement climatique.

Le projet s'inscrit dans l'une des lignes prioritaires du Plan National d'Adaptation d'Espagne, qui vise à incorporer l'adaptation dans les différents secteurs, dans ce cas la conservation de la biodiversité. L'objectif principal du projet est de faciliter l'intégration de critères d'adaptation au changement climatique dans la planification et la gestion des zones protégées, en encourageant l'échange de connaissances et d'expériences pilotes parmi les gestionnaires d'aires protégées et en développant des outils pratiques qui permettent d'incorporer les preuves scientifiques déjà disponibles à la pratique de la gestion. Pour atteindre ces objectifs, un prix des bonnes pratiques d'adaptation en aires protégées a été organisé. Il permettra d'identifier des actions d'adaptation dans l'ensemble du pays et de les diffuser.

En parallèle, des critères d'adaptation sont actuellement incorporés à titre expérimental dans le processus d'élaboration du plan de gestion de trois aires protégées : le Paysage Protégé de la Sierra de Santo Domingo (Saragosse), la Zone Spéciale de Conservation d'Urbasa et d'Andía (Navarre) et le Parc National du Teide (Tenerife). Il est attendu que les résultats de ces expériences pilotes, ainsi que les actions rassemblées dans le cadre du prix, servent de matériel d'intérêt pour l'ensemble des gestionnaires des aires protégées, à travers un outil en ligne et de réédition et de distribution du Manuel 13 « Les aires protégées dans le contexte du changement mondial : incorporation de l'adaptation au changement climatique dans la planification et la gestion »,

De même, l'aire de répartition potentielle de certaines espèces d'amphibiens pourrait se voir considérablement réduite dans les prochaines décennies en raison du réchauffement global. Il est très probable qu'en raison des exigences environnementales spécifiques de ce groupe et de sa haute sensibilité physiologique aux changements dans les variables abiotiques, combiné à la fragmentation croissante des franges étroites d'habitat favorable, limitent encore plus les zones de répartition potentielle de ces vertébrés à l'avenir. De ce fait, certaines populations pourraient être de plus en plus isolées, réduisant ainsi leur résilience au changement climatique (Araújo *et al.,* 2006 ; Hickling *et al.,* 2006 ; Maiorano *et al.,* 2011). Une étude portant sur l'impact du changement climatique dans la répartition potentielle et la variation génétique de l'euprocte des Pyrénées *Calotriton asper,* Pou *et al* (2015) ont conclu que, même en envisageant les scénarios les plus optimistes, entre 2020 et 2080 cette espèce endémique des Pyrénées pourrait connaître une réduction considérable de son aire de répartition potentielle, en partie en raison des possibilités minimales de dispersion qu'elle possède. Malgré la grande perte de zones potentiellement idéales pour cet amphibien, les modèles révèlent également certaines zones qui pourraient rester relativement stables dans le temps, surtout dans la zone centrale de leur répartition actuelle (Figure 2.2.2).

Les projections futures pour les populations de certains insectes, tels que les papillons, sont particulièrement alarmantes. En général, on s'attend à une réduction de l'aire de répartition de 80 % des espèces de papillons en Europe, tandis que l'on estime que seuls 20 % des espèces pourraient bénéficier des éventuels effets positifs résultant des hausses des températures moyennes (Settele *et al.,* 2008). Il est important de souligner que les Pyrénées concentrent la plus forte densité d'espèces de papillon citées par les annexes de la Directive Habitats (Romo *et al.,* 2015). Cela s'explique par le fait que la biorégion pyrénéenne réunit les conditions écologiques et bioclimatiques particulières de la plupart de ces espèces. En tenant compte du fait que l'extension des aires de répartition de ces papillons est principalement limitée par les conditions climatiques (Romo *et al.,* 2015), il est essentiel pour assurer leur conservation à moyen et long terme de tenir compte l'évolution des conditions climatiques dans les politiques de conservation actuelles et futures.Certaines espèces de papillon typiques des zones montagneuses européennes ont vu leurs aires de répartition potentielle réduites au cours des

(9) Résilience est le terme employé en écologie des communautés et des écosystèmes pour indiquer leur capacité à absorber les perturbations, sans altérer de manière significative leurs caractéristiques de structure et de fonctionnalité ; pouvant revenir à leur état d'origine une fois la perturbation terminée.

dernières décennies et on prévoit une poursuite de cette tendance dans l'avenir (Willson *et al.,* 2015). C'est le cas de *Parnassius apollo*, une espèce qui a connu une forte hausse de sa limite altitudinale inférieure de répartition dans le sud de la France et probablement également dans de nombreuses zones montagneuses du sud de la Péninsule ibérique (Catalan *et al.,* 2017). Cette régression semble être directement liée à une plus courte durée annuelle de la couche de neige, qui renforce l'isolement thermique des individus immatures de ce papillon, ce qui a eu des répercussions sur son taux de survie.

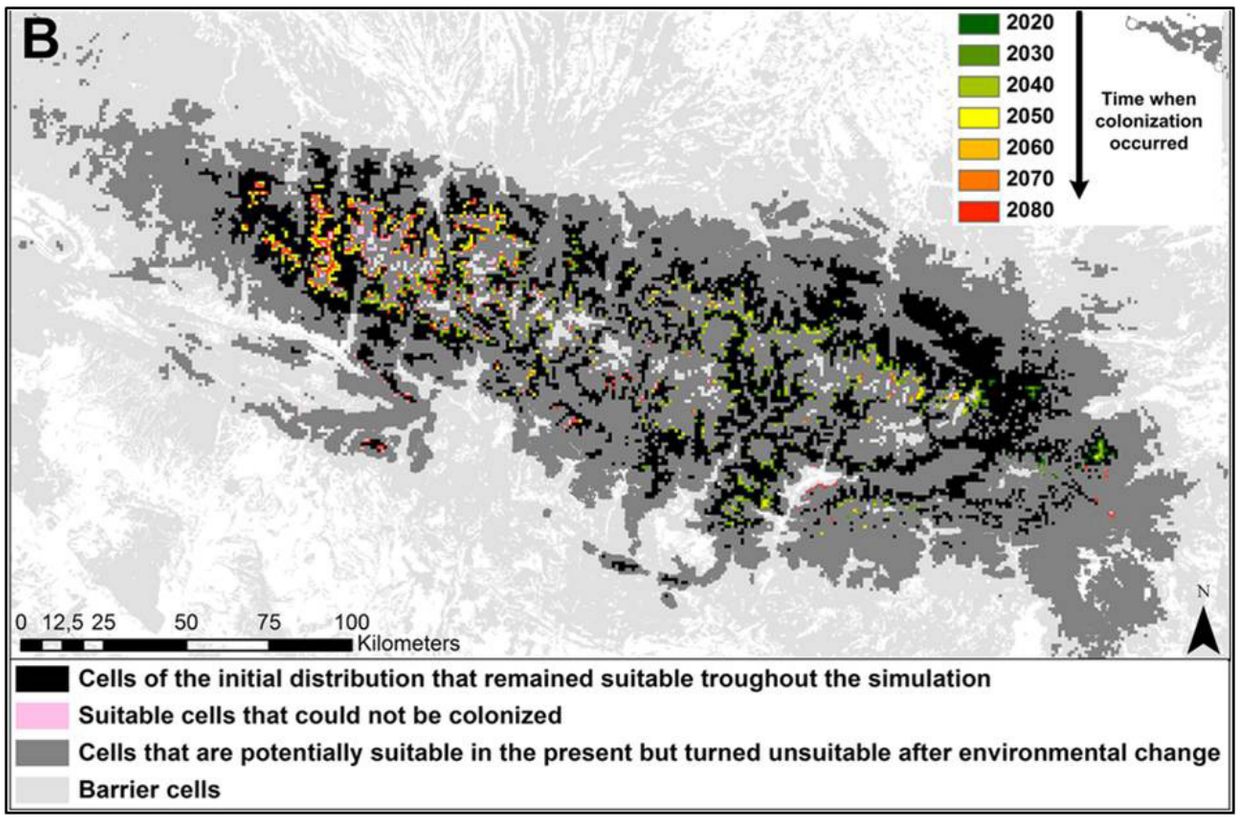


Figure 2.2.2. Évolution estimée de la répartition potentielle de Calotriton asper en 2080 par rapport à la répartition actuelle, en utilisant la moyenne des trois modèles de circulation mondiale (GCM : CCCMA, HADCM3 et CSIRO) et le scénario d'émissions SRES A2. Les zones en gris correspondent aux zones potentiellement idéales actuellement pour le Calotriton asper, mais qui ne le seront probablement pas à l'avenir, et les zones en noir correspondent aux zones du territoire pyrénéen qui resteront potentiellement idéales malgré les changements et les limites de dispersion de l'espèce. Les différentes couleurs indiquent le moment estimé de colonisation des nouvelles zones colonisées. Source : de Pou et al., 2015

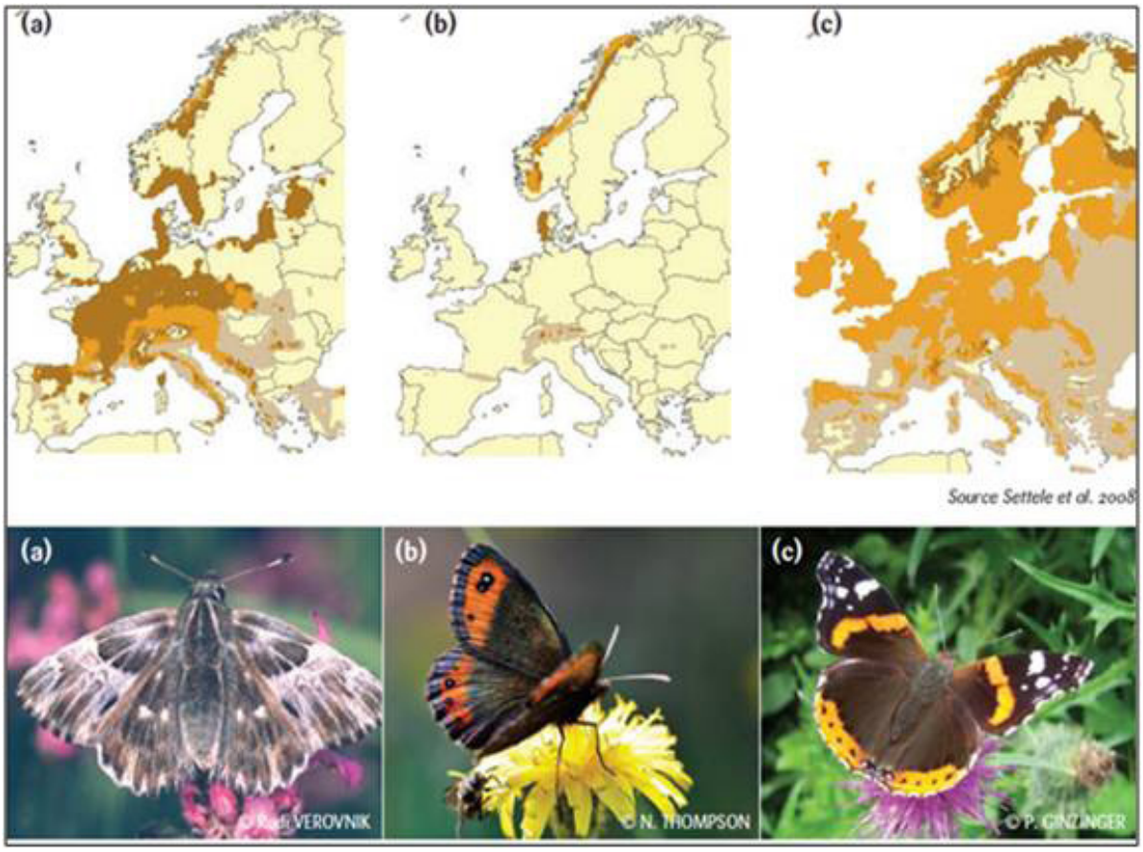


Figure 2.2.3. Changements attendus dans les zones idéales du point de vue climatique (marron claire : zones perdues, marron foncé : zones gagnées) pour trois espèces de papillons européens (a) Carcharodus flocciferus ; (b) Erebia montana et (c) Vanessa atalanta, en 2080, en utilisant le scénario d'émissions A2. Source : Settele et al., 2008

Las proyecciones futuras son especialmente
Les projections futures sont particulièrement préoccupantes pour l'*Erebia montana,* une espèce pour laquelle tous les modèles employés par Schmitt *et al* (2013) prédisent un risque élevé de disparition dans les Pyrénées et dans le Massif central en raison, au moins en bonne partie, du réchauffement mondial. La répartition potentielle et la diversité de certains insectes pollinisateurs, tels que les bourdons et les abeilles, pourraient également se voir affectées par le changement climatique (Lecocq *et al.,* 2013 ; Groom *et al.,* 2014 ; Miller-Struttmann *et al.,* 2015). Les changements progressifs notamment dans les conditions climatiques altèrent les zones de répartition et la phénologie de ces insectes clés (Kuhlmann *et al.,* 2012), entraînant des variations spatiales et/ou temporelles de leurs niches climatiques potentielles (MooLlanes et *al.,* 2013). De nombreuses études ont démontré que le déclin actuel du bourdon *Bombus terrestris* en Europe peut s'expliquer en partie par le changement climatique et notamment par l'augmentation fréquente et l'intensité des événements climatiques extrêmes comme les sécheresses et les vagues de chaleur (Bartomeus *et al.,* 2013 ; Groom *et al.,* 2014). Concernant les Pyrénées, Ornosa *et al* (2017) ont détecté un déplacement progressif des principales espèces de bourdon vers de plus hautes altitudes, en quête de conditions climatiques et environnementales

(10) La niche écologique est un terme qui décrit la position relationnelle d'une espèce ou d'une population dans un écosystème. Lorsque nous parlons de niche écologique, nous faisons référence à l'« occupation » ou au rôle joué par une certaine espèce au sein d'une communauté. Par exemple, la niche écologique des écureuils est de vivre dans les arbres et de s'alimenter de plantes et de fruits secs.

idéales. En même temps, Rasmont *et al* (2015) prévoient une réduction considérable des zones idéales du point de vue climatique pour une grande partie des espèces de bourdon présentes dans la chaîne de montagnes, notamment pour *Bombus barbutellus, B. bohemicus, B. campestris, B. confusus, B. cryptarum, B. terrestris* et *B. cullumanus* (figure 2.2.4).

Il est fort probable qu'au cours des prochaines années le processus de déclin, auquel sont actuellement confrontés ces pollinisateurs, s'accentue à mesure que le réchauffement global s'intensifie. Si la nécessité de se déplacer en quête de conditions favorables est de plus en plus importante, mais que les zones idéales du point de vue climatique se réduisent progressivement en raison du changement climatique, la capacité d'adaptation de ces insectes-clés pourrait se voir considérablement réduite.

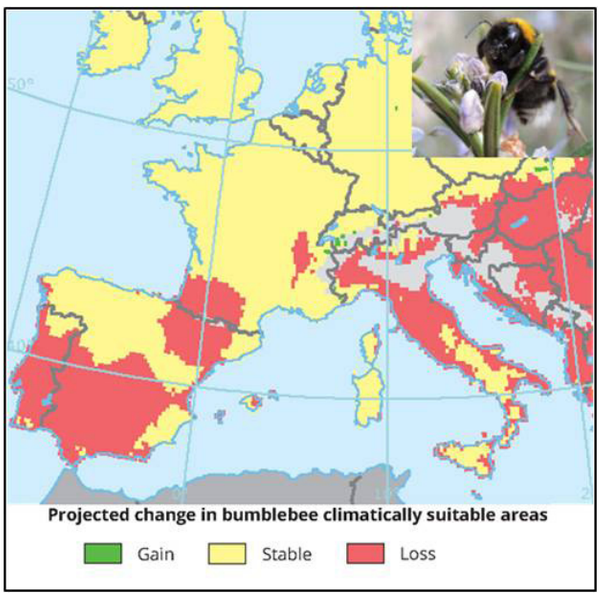


Figure 2.2.4. Changement prévu dans la zone idéale du point de vue climatique pour le bourdon Bombus terrestris (l'espèce de bourdon la plus grande et l'une des plus nombreuses d'Europe) en envisageant un scénario combiné de changement climatique et de changements d'utilisation du sol selon le SEDG (Objectif de Développement Européen Durable) et le scénario d'émissions SRES B1. En vert les zones gagnées, en jaune les zones stables et en rouge les zones perdues. Source : EEA. 2016 de Rasmont et al., 2015

2.2.4 Altérations des interactions écologiques et du fonctionnement des écosystèmes

L'action combinée des impacts du changement climatique peut provoquer la désynchronisation entre les cycles de vie des populations interconnectées du point de vue écologique, comme par exemple les espèces aux relations proie-prédateur ou parasite-hôte. Si ces espèces répondent différemment aux variations des conditions climatiques (altérations phénologiques différentes), les interactions entre elles courent le risque de se désynchroniser, pouvant ainsi altérer le fonctionnement de tout l'écosystème.

Impacts observés et prévus:

Les réponses phénologiques et les changements de répartition des espèces ont d'éventuelles répercussions négatives sur les espèces des niveaux trophiques supérieurs et, en général, sur les espèces qui interagissent entre elles à travers des synergies de nature différente (relations interspécifiques). Parmi les exemples, citons les cas des systèmes herbivore-plante, ou prédateur-proie, car les changements de présence et/ou d'abondance qui affectent une espèce précise ont également une incidence sur les autres espèces associées, à travers des écarts ou des décalages entre les calendriers phénologiques. Ces décalages peuvent altérer la capacité de certaines espèces à exercer des fonctions clés dans l'écosystème (Filadelfia, 2007), et, par conséquent, également le fonctionnement de l'écosystème.Un exemple particulièrement alarmant est la désynchronisation entre la phénologie de la floraison des plantes et le cycle de vie des abeilles (relation interspécifique plante-pollinisateur). Il a été démontré que le changement climatique pourrait avoir une influence négative sur la capacité des insectes pollinisateurs pour polliniser les plantes (Schweiger *et al.,* 2010). Étant donné le rôle important joué par les pollinisateurs dans la stabilité des écosystèmes et dans le maintien de la biodiversité tant à l'échelle locale que mondiale (Bascompte et Jordano, 2007), les répercussions sur l'écosystème pourraient être très graves. Même si cela n'a pas encore fait l'objet d'un test de grande ampleur, il est prévisible que les espèces des systèmes pollinisateur-plante les plus vulnérables au réchauffement global soient les plus spécialisées car, en principe, elles sont moins flexibles dans le choix des espèces avec lesquelles elles interagissent (Benadi *et al.,* 2014). Un exemple d'altération de l'interaction entre

(11) On appelle niveau trophique chacun des ensembles d'espèces, ou d'organismes, d'un écosystème qui coïncident par la position ou la fonction qu'ils occupent dans le flux d'énergie et des nutriments, c'est-à-dire ceux qui occupent une place équivalent dans la chaîne alimentaire.
(12) Une relation interspécifique ou association interspécifique est l'interaction qui a lieu entre au moins deux espèces différentes.

espèces en raison du réchauffement global est le cas du coucou commun (*Cuculus canorus*). Ce migrateur de longue distance et parasite de nid perd la synchronie avec certains de ses principaux hôtes (Saino *et al.,* 2009 ; Kolářová *et al.,* 2017). Selon Barret (2014), le changement climatique altère l'association entre le coucou commun et ses principaux hôtes habituels. Ces derniers, pour la plupart des oiseaux migrateurs de courte distance, ont tendance à avancer leur arrivée printanière davantage que le coucou, et par conséquent leur reproduction également. Ce décalage entre migrations et temps de nidification du coucou et de ses hôtes peut avoir de graves implications dans le succès reproducteur de l'espèce parasite. Les papillons semblent également être vulnérables aux problèmes de désynchronisation entre les espèces. Pour le papillon *Boloria titania*, on prévoit au cours des prochaines décennies une réduction considérable du territoire dans laquelle se superposent son adéquation climatique avec la zone idéale du point de vue climatique pour la plante dont il a besoin pour vivre (*Polygonum bistorta*). Cela pourrait réduire considérablement sa niche potentielle disponible dans les Pyrénées, augmentant ainsi le risque d'extinction de ce papillon spécialiste (Figure 2.2.5).

Des discordances trophiques, comme celles de ces deux espèces, constituent une pression supplémentaire sur certaines espèces spécialistes caractéristiques de la biorégion pyrénéenne (Reid *et al.,* 2005 ; Schweiger *et al.,* 2008 ; Palomo, 2017), et renforcent leur risque d'extinction futur.

2.2.5 Plus grand risque d'invasion et/ou d'expansion des espèces exotiques

Même si les environnements froids caractéristiques des zones élevées et des hautes latitudes sont considérés comme moins vulnérables aux invasions biologiques, le réchauffement mondial pourrait augmenter le risque d'invasions et d'établissement d'espèces exotiques également dans les environnements de haute montagne (Pauchard *et al.,* 2016). Le changement climatique pourrait favoriser l'établissement de nouvelles espèces exotiques dans les Pyrénées, facilitant ainsi leur transport et leur implantation ultérieure à travers l'établissement de conditions climatiques favorables (Pysek *et al.,* 2013), et/ou grâce à la réduction de la concurrence interspécifique avec les espèces natives (Hellmann *et al.,* 2008 ; Cubas *et al.,* 2017). Les espèces exotiques envahissantes étant pour la plupart d'entre elles opportunistes et généralistes, elles ont tendance à mieux s'adapter aux variations climatiques rapides par rapport à la plupart des espèces natives (Hellmann *et al.,* 2008). De plus, l'augmentation des températures déplace les barrières climatiques à des altitudes plus élevées, augmentant ainsi la probabilité d'apparition de nouvelles invasions (notamment de plantes), ainsi que l'établissement de certaines espèces déjà présentes (Capdevila-Argüelles *et al.,* 2011 ; Petitpierre *et al.,* 2016).

Impacts observés et prévus

Le déplacement en hauteur de l'aire de répartition des

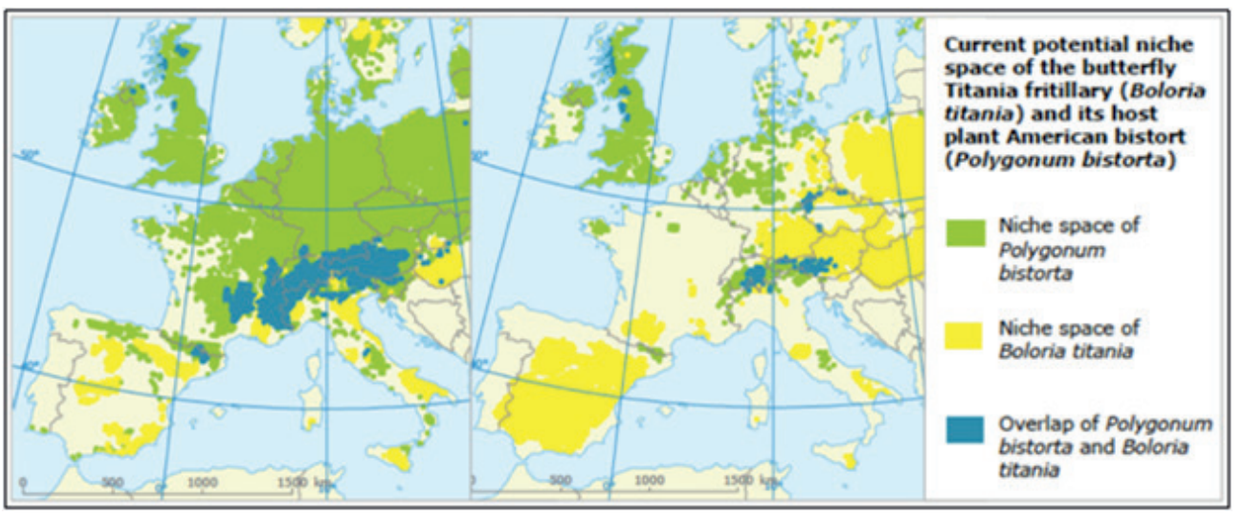


Figure 2.2.5. Niche potentielle actuelle du papillon Boloria titania et de la plante Polygonum bistorta (gauche) et projection de la possible réduction de la zone de superposition entre deux zones de répartition potentielle pour 2080 (zones en bleu), selon le scénario d'émissions SRES A1B. Source : Schweiger et al., 2008. © Ecological Society of America.

espèces natives peut supposer un avantage compétitif pour l'expansion et l'implantation de certaines espèces exotiques, car ces dernières disposeraient de nouvelles niches idéales du point de vue climatique et de faibles niveaux de concurrence pour les ressources en raison du déplacement des espèces d'origine. D'après le modèle employé par Gallardo et al (2017), le changement climatique pourrait provoquer une augmentation des zones idéales du point de vue climatique pour l'expansion de certaines espèces exotiques aquatiques et terrestres présentes en Europe (jusqu'à plus de 70 % par rapport à l'aire de répartition actuelle). Concernant le territoire espagnol, français et andorran, les résultats de cette étude prévoient un plus grand nombre d'invasions dans les zones montagneuses par rapport aux zones basses, aussi bien à moyen qu'à court terme. Les auteurs soulignent également le rôle clé joué jusqu'à maintenant par les espaces protégés européens comme refuge des espèces natives contre les invasions biologiques, et alertent de la manière dont le changement climatique pourrait menacer gravement ce rôle important au cours des prochaines décennies. Enfin, il est important de souligner que, même si le changement climatique pourrait être un facteur clé dans l'expansion potentielle et l'implantation d'espèces exotiques dans les Pyrénées, le facteur déterminant continue et continuera d'être son introduction préalable par l'homme. À cet égard, les possibles initiatives d'adaptation dans ce domaine passent par une augmentation de la sensibilisation citoyenne à l'ampleur de la problématique, ainsi que par l'intensification des réseaux actuels de surveillance, de contrôle et de prévention de l'introduction d'espèces exotiques.

2.2.6 Impact sur l'interconnexion entre les réseaux d'espaces protégés

Le mouvement d'animaux et de plantes vers des zones du territoire où les conditions sont encore favorables pourrait déplacer les aires de répartition en dehors des zones actuellement protégées, augmentant ainsi leur vulnérabilité à différents dangers et facteurs de stress. De la même manière, certaines aires protégées, qui jusqu'à maintenant étaient interconnectées à travers des continuités naturelles ou artificielles, vont probablement être isolées pour certaines espèces qui ne tolèreraient pas les nouvelles conditions climatiques des corridors. Ce phénomène pourrait être particulièrement notable dans les espaces protégés comptant des espèces endémiques qui se caractérisent par une capacité de dispersion réduite et un haut degré de spécialisation écologique (Araujo et al., 2011). Le réseau des sites Natura 2000 est un élément clé dans la gestion actuelle et future de la biodiversité pyrénéenne. Pour faire face aux nouveaux défis climatiques et à leurs conséquences, il sera nécessaire de prendre les mesures opportunes pour que la capacité de résilience des espèces les plus vulnérables puisse surmonter les impacts les plus pernicieux du changement climatique. Pour ce faire, il est indispensable d'adapter l'actuel réseau Natura 2000 à travers des initiatives et des actions destinées à assurer l'interconnectivité des différents espaces. Dans ce sens, la restauration d'habitats très vulnérables ou dans un état d'équilibre délicat, et la protection de nouveaux espaces pouvant faciliter le déplacement et la diffusion des espèces les plus menacées au fur et à mesure des modifications de leur aire de répartition, sont quelques-uns des principaux enjeux qui devront être abordés par les politiques de conservation dans les zones de montagne du territoire de la CTP. Des initiatives telles que la « Stratégie européenne pour l'infrastructure verte » peuvent être un exemple inspirant, car elle propose l'établissement d'un réseau européen d'écosystèmes sains à travers l'emploi d'infrastructures vertes fondées sur la nature.

2.2.7 Conclusions et recommandations

Les écosystèmes montagneux sont particulièrement sensibles et vulnérables au changement climatique ; de plus, ils sont fréquemment l'habitat d'une faune très spécifique ou endémique. Par ailleurs, ils fournissent une multitude de biens et de services de grande valeur pour toute la société. La communauté scientifique est d'accord pour souligner qu'au cours des prochaines décennies l'action commune du changement climatique et la perte d'habitat dues aux changements d'utilisation du sol seront les principales causes de perte de biodiversité et d'extinction des espèces dans le monde. Le changement climatique influe sur la biodiversité des zones montagneuses à travers des changements physiologiques et phénologiques de plantes et d'animaux, des changements de durée de la saison de croissance, des changements de répartition des populations, ainsi qu'en favorisant le risque d'invasion, d'établissement et d'expansion d'espèces exotiques.Pour comprendre les réponses des espèces pyrénéennes aux effets du changement climatique et ses différents mécanismes d'adaptation, il est nécessaire de renforcer les efforts de promotion de nouveaux réseaux d'observation de la biodiversité de haute montagne et de renforcer leur dynamisation,

(13) En écologie des populations, la concurrence interspécifique est l'interaction qui se produit lorsque des individus de différentes espèces se disputent les mêmes ressources dans un écosystème (par exemple, l'aliment ou l'espace de vie).

ainsi que d'encourager le maintien à moyen et long terme des réseaux d'observation existants. Seule l'amélioration de la connaissance permettra de définir les meilleures actions d'adaptation, pour assurer des stratégies de conservation efficaces à long terme. Cette section présente, de manière synthétique et non exhaustive, les principaux enjeux auxquels devront faire face les politiques de conservation des Pyrénées dans la perspective du changement climatique. Elle présente également une relation des principales recommandations pour l'adaptation, à travers leur classement, selon trois typologies de solutions adaptatives ou mesure d'adaptation : mesures *vertes*, *grises* et *douces*.

Principaux enjeux

• Sauvegarder les zones pyrénéennes les plus représentatives en termes de biologie de la conservation, en prêtant une attention particulière aux habitats singuliers, particulièrement sensibles à la variabilité climatique ou dans un état d'équilibre délicat avec les conditions environnementales ;

• Réduire les manques de connaissances et les incertitudes concernant l'introduction potentielle, l'expansion et les stratégies de lutte contre les nuisibles, les vecteurs de maladies et les espèces exotiques envahissantes ;

• Encourager la création de nouveaux réseaux d'observation des effets du changement climatique sur la biodiversité, ainsi que promouvoir la dynamisation et le maintien à long terme des réseaux d'observation de haute montagne existants ;

• Promouvoir l'intégration des considérations sur l'adaptation au changement climatique dans les plans, programmes et autres outils actuels de planification et de protection de la biodiversité dans les Pyrénées ;

• Limiter la fragmentation des habitats et garantir, dans la mesure du possible, la connectivité écologique progressive des aires protégées des Pyrénées ;

• Encourager les études combinant facteurs climatiques et anthropiques ;

• Promouvoir la collaboration et l'échange d'informations entre les organismes compétents dans la gestion et la protection de la biodiversité sur les différents territoires, en identifiant et impliquant les interlocuteurs de la planification territoriale, du secteur vétérinaire, de l'élevage, agricole, forestier et les organismes compétents en matière d'environnement et de gestion des espaces protégés ;

• Identifier les zones et les espèces les plus préoccupantes en termes de vulnérabilité au changement climatique et, en général, au changement mondial, pour définir des zones prioritaires pour la conservation, ainsi que des opportunités pour la restauration.

Mesures soft ou douces [14]

• Favoriser la création d'un catalogue de zones pyrénéennes particulièrement sensibles au changement climatique pour les zones de la chaîne de montagnes avec des écosystèmes emblématiques et uniques, vulnérables ou particulièrement sensibles, ou qui possèdent des espèces menacées ou endémiques dont la répartition et les caractéristiques empêchent leur déplacement ;

• Promouvoir des utilisations du territoire pyrénéen compatibles avec la conservation et pouvant amortir les effets du changement climatique ;

• Harmoniser les politiques d'adaptation des autres secteurs avec les objectifs de protection, d'amélioration et de restauration de la biodiversité pour optimiser les synergies positives entre elles (principe de développement durable) ;

• Renforcer et rediriger les plans actuels de suivi et de contrôle des espèces pyrénéennes vulnérables, les plans de prévention, de contrôle et de gestion des espèces exotiques envahissantes et nuisibles en considérant les potentiels effets induits par le changement climatique ;

• Approfondir l'étude du déplacement des zones de répartition des espèces causé par le changement climatique et le potentiel d'adaptation des différentes espèces menacées ;
• Mettre à jour les listes rouges des espèces en tenant compte de leur vulnérabilité actuelle et potentielle face au changement climatique ;

(14) Les mesures douces ou mesures non structurelles pour réduire les effets négatifs du changement climatique. Cette catégorie de mesures est typiquement représentée par les études de recherche visant à couvrir des lacunes de connaissance ou à enrichir les bases de connaissance sur le changement climatique, ses effets et les secteurs les plus vulnérables. Cette catégorie comprend aussi le développement de méthodologies et de systèmes spécifiques pour réduire les risques inhérents au changement climatique (ex. Développement d'un Early Warning System transfrontalier pour la gestion des vagues de chaleur dans le Massif)

IDÉES CLÉ

• Les écosystèmes montagneux sont particulièrement sensibles et vulnérables aux changements climatiques et constituent un habitat pour une faune très spécifique ou endémique.
• Le changement climatique affecte la biodiversité montagnarde à travers des changements dans la physiologie et la phénologie des plantes et des animaux, des changements dans la durée de la saison de croissance, des changements dans la répartition des populations et l'augmentation du risque d'invasions, établissement et expansion d'espèces exotiques.
• Les changements climatiques observés modifient la distribution de certaines espèces, qui sont obligées à bouger en hauteur à la recherche des conditions idéales pour leur développement. Il est hautement probable que cette situation s'intensifie à l'avenir.
• Le cycle de vie de nombreux groupes d'animaux a subi des avances au cours des dernières décennies. Il est hautement probable que cette situation s'intensifie à l'avenir.
• Le changement climatique affecte l'interaction entre certaines espèces qui dépendent les unes des autres pour leur survie.
• Il est très probable que l'action conjointe du changement climatique et la perte de l'habitat en raison de changements dans l'aménagement du territoire seront les principales causes de la perte de la biodiversité et de l'extinction des espèces dans les Pyrénées au cours de ce siècle

• Favoriser la création de bases de données transfrontalières, comme les atlas pyrénéens des espèces végétales et animales ;

• Promouvoir la création de mécanismes, de méthodologies et de forums participatifs pour la coordination de mesures d'adaptation intersectorielles et transfrontalières destinées à garantir la protection des espèces et des habitats pyrénéens particulièrement vulnérables au changement climatique ;

• Renforcer la connaissance et le suivi de la stabilité et la résilience des différents écosystèmes pyrénéens, et définir des méthodologies transfrontalières pour évaluer quantitativement tout changement de leur capacité à fournir des services écosystémiques (ex. : définition des indicateurs) ;

• Sensibiliser la population à l'importance et aux risques liés au problème des espèces envahissantes et à leurs interactions avec le changement climatique, et informer les groupes intéressés des « bonnes pratiques » pour éviter de nouvelles introductions ;

• Promouvoir la diffusion d'initiatives de « science citoyenne » dans les Pyrénées, conçues comme des initiatives de collaboration efficace entre citoyens et chercheurs pour enrichir les bases de données sur le suivi phénologique des espèces, les observations des écosystèmes sensibles, le recueil de données d'échantillonnage et de répertoires ;

• Garantir la diffusion effective des actions d'adaptation finalement promues, leur progrès et les résultats obtenus, à tous les acteurs intéressés et à la société.

Mesures vertes [15]

• Promouvoir l'identification et la protection ultérieure des populations et des sous-populations d'espèces sensibles au changement climatique, avec des taux élevés d'échange génétique, ainsi que les habitats et les écosystèmes particulièrement sensibles ou vulnérables aux effets du changement climatique ;

• Encourager l'élaboration de solutions adaptatives fondées sur la nature (Natural Based Solutions) pour améliorer la possibilité de migration et les changements de répartition dans les aires protégées des Pyrénées, par le maintien de corridors écologiques entre elles (améliorer la connectivité écologique) ;

• Améliorer la caractérisation des micro-réglages climatiques des différentes populations, des zones de refuge et des gradients climatiques variables à une échelle de détail raisonnable ;

• Recycler et réadapter en conséquence les limites administratives des espaces protégés actuels et futurs à la biologie des espèces, en plus des effets prévisibles du changement climatique ;.

• Encourager l'incorporation de gradients altitudinaux dans l'actuel réseau des aires protégées des Pyrénées, afin d'améliorer la protection des populations dont les répartitions géographiques sont en cours de déplacement géographique en raison du changement climatique.

(15) Les mesures vertes ou basées sur les services écosystémiques : ce type de mesures comprend toutes les mesures, bonnes pratiques, études ou initiatives ayant pour principe l'utilisation des services écosystémiques rendus par les différentes ressources naturelles pour pallier les effets négatifs du changement climatique (par ex. pratiques sylvicoles conservatrices pour accroître la capacité des forêts des Pyrénées à réduire les risques hydrogéologiques).

2.3 Biodiversité de montagne: la flore

Coordinateur: Gérar Largier (CBNPMP)
Auteurs: Gérard Largier (CBNPMP)
Coauteurs: Gilles Corriol (CBNPMP), Jocelyne Cambecèdes (CBNPMP), Patxi Heras (Bazzania) Marta Infante Sánchez (CBNPMP), Benjamin Komac (IEA-CENMA), Daniel Gomez (IPE-CSIC), Juan Terrádez (CTP-OPCC) Estela Illa Bachs (UB).

Figure 2.2.1. Androsace ciliata DC., plante endémique des Pyrénées Photo CBNPMP/C. Bergès

RÉSUMÉ

A la croisée d'influences climatiques très contrastées, méditerranéennes, océaniques et montagnardes, et avec une grande variété de situations écologiques liées notamment à la géologie, au relief, à l'exposition et à l'altitude, les Pyrénées recèlent une grande diversité biologique. Leur situation méridionale, un étage alpin assez développé et de hauts Massifs calcaires sont des causes supplémentaires d'une grande richesse sur le plan de la flore et des végétations, et d'une forte originalité par rapport aux autres montagnes européennes, avec un nombre élevé d'espèces endémiques (environ 200 taxa, Villar et al., 1994). Les Pyrénées sont ainsi un hot spot de la biodiversité européenne.

A l'échelle des Pyrénées, la biodiversité est prise en compte dans les stratégies de conservation de la nature aux échelles européenne, nationales et locales, avec en particulier un réseau important d'aires protégées. Au-delà de son intérêt intrinsèque en matière de biodiversité, cette richesse originale est en interaction avec des activités socio-économiques (pastoralisme, gestion forestière, cueillette, tourisme, activités sportives…) dont certaines ont joué un rôle majeur dans l'organisation spatiale des formations végétales (pâturages et forêts) et gardent des effets prépondérants sur leur évolution.Les zones de montagne sont réputées pour être très sensibles aux changements climatiques (Beniston *et al.*, 1996 ; Theurillat & Guisan, 2001), toutefois l'analyse des effets des changements climatiques et de la vulnérabilité des écosystèmes est relativement complexe à mener, du fait des différents facteurs en jeu, et en particulier la part des usages et de leurs propres évolutions, de l'effet des évènements extrêmes, des possibilités de compensations entre facteurs, et enfin du manque d'études à moyen et long terme.Par ailleurs beaucoup d'études s'appuient sur des perspectives générales d'élévation des températures et de baisse des précipitations, mais pour les précipitations les tendances ne ressortent pas nettement pour le moment. Les premières synthèses sur l'évolution du climat à l'échelle des Pyrénées [projet OPCC1, volet climat] mettent en avant une « *hausse significative du point de vue statistique de +0,2°C par décennie, plus marquée au printemps et en été* » et une « *baisse du cumul annuel des précipitations de l'ordre de 2,5% par décennie, plus présente sur le versant sud des Pyrénées que sur le versant nord et difficile à distinguer à l'échelle saisonnière* ». Les tendances envisagent une élévation des températures aux échéances 2030, 2050, 2090, mais les précipitations hivernales pourraient augmenter sur le versant nord à l'horizon 2030 et baisser au-delà (*cf.* section 1.3), avec des incertitudes élevées pour les précipitations.

Un autre facteur important à observer est la circulation atmosphérique (en particulier l'effet de foehn [16] caractéristique des Pyrénées), dont on sait mal comment elle agit à l'échelle locale sur l'organisation de la végétation. Le modèle général d'organisation de la végétation dans les montagnes en étages altitudinaux avec des variations selon les expositions masque des variations importantes à l'échelle locale, *a fortiori* dans les Pyrénées, compte tenu de la diversité des situations bioclimatiques et de l'effet des compensations entre facteurs[17].Enfin, la réponse des organismes et des populations sera fonction de la plasticité phénotypique [18] et des possibilités d'évolution génétique. Des adaptations rapides et des microévolutions peuvent se produire mais nous savons actuellement peu de choses sur ces processus ainsi que sur la manière dont un changement climatique pourrait agir en interaction avec les autres paramètres du changement global (Peñuelas *et al.*, 2013).Certaines espèces et écosystèmes pourraient être plus adaptés que l'on ne le pense à des changements climatiques mais on manque de références sur le sujet (Martín-Vide, 2016).

2.3.1 Altérations physiologiques et changements dans la productivité et l'abondance d'espèces

Nous restituons une méta-analyse de la recherche bibliographique : il y a un manque de preuves scientifiques et de mention de travaux concrets sur l'altération de la productivité et de l'abondance de la flore pyrénéenne.Le climat est d'une manière générale un facteur limitant pour les espèces et les écosystèmes de montagne compte tenu des facteurs spécifiques du milieu montagnard (gradient altitudinal, diversité topographique et des expositions). La modification des différents paramètres climatiques (température, rayonnement, précipitations) combinée à l'augmentation de la concentration en CO2 joue sur la photosynthèse avec un effet sur la croissance et le développement de tous les végétaux, bien connu et documenté sur les espèces cultivées et les arbres En particulier les études sur la productivité des forêts indiquent un déplacement en altitude de l'optimum de croissance (facteurs limitants : sécheresse, déficit de pression de vapeur de l'air, température basses) (Savva. *et al.*, 2006 ; Jolly *et al.*, 2005), phénomène analysé pour le hêtre dans les Pyrénées occidentales françaises entre 1970 et 2009 (Vitasse *et al.*, 2010) .Les pressions environnementales peuvent avoir des effets sur le métabolisme des plantes et induire des changements dans la composition chimique et la concentration en nutriments des différents organes végétaux. Ces modifications peuvent avoir des effets sur les sols et également sur l'appétence des herbivores pour les plantes des pâturages (voir chapitre 2.2) avec une incidence possible sur les réseaux trophiques (Rivas-Ubach *et al.*, 2012).L'adaptation de nombreuses plantes montagnardes à des conditions extrêmes (sécheresse des parois, rayonnement, courte durée de végétation, poids de la neige) pourraient les placer en situation critique si ces conditions s'atténuent et avec l'arrivée d'espèces plus compétitives. Le CENMA a étudié la distribution potentielle du rhododendron en Andorre face au changement climatique en utilisant l'accumulation potentielle de neige (la présence de neige en hiver et au printemps étant primordiale pour l'espèce). Selon les trois scénarios climatiques, la niche écologique de l'espèce pourrait être réduite de 37,9-70,1 km2 par rapport à l'aire actuelle d'ici la fin du siècle et se limiterait à des habitats d'éboulis et de pelouses rocailleuses (Komac *et al*., 2016).Un effet paradoxal de l'augmentation globale de la température en montagne serait la température subie plus froide des biocénoses chionophiles, liées à un long enneigement, du fait d'une moindre protection du manteau neigeux. Dans le cadre du programme FLORAPYR l'un des objectifs poursuivis est justement le suivi des combes à neige pour étudier l'évolution de ces milieux très particuliers en fonction des changements de paramètres climatiques (température et durée d'enneigement, Komac & Olicard, 2014, *cf. infra*).

2.3.2 Les changements du cycle de vie (changements phénologiques)

Les travaux menés sur la phénologie soulignent un décalage des cycles phénologiques qui varient selon les années (avancée du cycle les printemps chauds et retard les printemps froids). Différentes sources font état d'avancée des dates de débourrement et d'un allongement de la durée de la saison de végétation (Menzel *et al.*, 2006 ; Linderholm, 2006 ; Menzel & Fabian, 1999 ; Vitasse *et al.*, 2009). Toutefois les données de suivi en montagne semblent encore insuffisantes pour donner des tendances à long terme et pouvoir distinguer les changements attribués au réchauffement global et de la variabilité interannuelle des températures, d'après les données recueillies dans le cadre du programme scientifique et pédagogique Phénoclim initié en 2004 et basé sur l'observation participative de la phénologie d'une dizaine d'espèces dans les Alpes (CREA, en ligne, http://phenoclim.org/fr). Les changements phénologiques peuvent ainsi avoir des effets sur la précocité de la floraison et de la fructification, sur le cycle de développement des insectes (passage plus rapide d'un stade larvaire au suivant) avec des risques consécutifs de désynchronisation des interactions entre organismes (plantes/pollinisateurs, plantes/herbivores, voir point 2.2.4). On notera enfin que réchauffement et sécheresse ont des effets opposés sur la phénologie de la sénescence foliaire[19] des espèces à feuilles caduques et qu'en conséquence « *l'impact du changement climatique dépendra donc de l'importance relative de chaque facteur* » dans un territoire donné. (Estiarte & Peñuelas, 2015)

(16) Phénomène météorologique lié à l'altitude qui a pour conséquence le réchauffement et le dessèchement lors du passage d'une masse d'air au dessus d'un large relief. Par vent du sud, le versant nord des Pyrénées peut connaître ainsi des élévations spectaculaires de température.
(17) Modification de l'effet d'un facteur écologique (climatique, édaphique, topographique ou biotique) par l'action d'un autre (par exemple pour une plante de milieux secs, précipitations élevées compensées par un sol filtrant).
(18) Capacité d'un organisme à modifier l'expression de ses caractéristiques en réponse à des facteurs environnementaux.
(19) « La photopériode et la température sont les principaux facteurs qui contrôlent la sénescence des feuilles chez les espèces à feuilles caduques hivernales, le stress hydrique imposant une influence supplémentaire. La photopériode exerce un contrôle strict sur la sénescence foliaire aux latitudes où les hivers sont sévères et où la température gagne en importance dans la régulation à mesure que les hivers deviennent moins sévères. En moyenne, le réchauffement climatique retardera et la sécheresse fera progresser la sénescence des feuilles, mais à des degrés variables selon les espèces. » (Estiarte et Peñuelas, 2015).

2.3.3. Altérations écologiques et du fonctionnement des écosystèmes

Le cas des écosystèmes prairiaux a été notamment étudié (Grime 1973 ; Callaway *et & al*., 2002 ; Adler *et al*.., 2011). Il est largement reconnu que la plus forte diversité spécifique concerne les formations sous pression moyenne de pâturage ou de fauche, et que les interactions entre les plantes souvent considérées comme négatives (compétition) peuvent être aussi bien positives (facilitation) et expliquer une grande diversité (Michalet *et al*., 2006 ; Grime *et al*., 2000). Les effets des changements climatiques se manifesteront en combinaison avec ces pressions, comme par exemple la combinaison du stress d'origine climatique et des perturbations anthropiques (voir encadré 1). La plupart des modèles prédisent ainsi que l'effet combiné de ces facteurs pourrait altérer encore plus le fonctionnement des écosystèmes déjà perturbés dans les décennies à venir, altérant leur diversité jusqu'aux limites de l'effondrement (Grime *et al*., 2000 ; Brooker, 2006).

Dans le cas des forêts on peut s'interroger sur d'éventuels effets amplificateurs des variations et changements climatiques sur des peuplements forestiers dont la composition spécifique de la strate arborée et/ou la diversité génétique a pu être appauvrie par une gestion simplificatrice vers un nombre réduit d'essences-objectif et par certains choix sylvicoles, en particulier dans des forêts aux niches écologiques très variées. Les effets des interventions sylvicoles sur la diversité génétique des arbres forestiers sont connus même si insuffisamment documentés (Valadon, 2004). Le processus d'adaptation, incluant des phases de création et d'érosion de la diversité génétique interagit en effet avec les conditions de milieu et le changement climatique mais aussi la gestion (Lefèvre et Collin, 2009).

ENCUADRE 2.3.1. TESTS PILOTES POUR ÉTUDIER L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES ESTUAIRES DES PYRÉNÉES.

Un dispositif suivi en 2010-11 dans les estives de la Pierre-Saint-Martin (Pyrénées-Atlantiques) a permis d'analyser les interactions entre d'une part la sécheresse, qui serait due à l'effet combiné d'un changement climatique et des perturbations anthropiques, et d'autre part le rôle modérateur des interactions biotiques. Ce dispositif permettait de moduler les précipitations, simuler la fauche et tester différentes situations de concurrence.Les résultats montrent l'importance des interactions entre espèces comme facteur prépondérant sur la diversité. Ces interactions peuvent être inhibées par un niveau élevé de stress hydrique et de perturbations (Le Bagousse-Pinguet *et al*., 2014). Cependant la diminution des précipitations sur le versant nord n'est pas évidente et il convient de mentionner que selon Le Treut (2013 : 230) la plupart des travaux de recherche se sont intéressés « *aux seuls effets d'une augmentation de température ou éventuellement d'une diminution des précipitations* », ce qui n'est pas forcément la tendance observée pour le moment dans certains secteurs de la chaîne.

2.3.4 Les changements dans la composition et les interactions des espèces dans la communauté écologique

Les modifications dans les aires de distribution des espèces est l'un des effets annoncés des changements climatiques, par contraction, déplacement ou extension des aires, en fonction des caractéristiques propres des espèces et de celles des milieux qu'elles occupent. La contraction et le déplacement peut conduire à l'extinction locale de certaines espèces à toutes les altitudes particulièrement par la disparition des niches écologiques des étages élevés (Bergamini *et al*., 2009 ; Colwell *et al*., 2008 ; McCain & Colwell, 2011 ; Thomas, 2010), phénomènes qui ont d'ailleurs probablement modelé la composition floristique actuelle en fonction des variations passées du climat. La complexité des facteurs écologiques en montagne fait que des phénomènes de compensation peuvent contrecarrer ces projections (*cf*. par exemple l'effet des inversions thermiques dans les vallées encaissées).

Par ailleurs, les approches « espèces » sont souvent réductrices, négligeant les connaissances écologiques (Austin, 2002 ; 2007) et ne prennent pas en compte les interactions entre espèces et le fonctionnement des communautés, ni le rôle joué par la diversité génétique. De fait, de nombreuses études envisagent sur des réponses possibles comme des modifications dans la compétition entre espèces permettant à certaines d'entre elles de se maintenir voire de migrer vers le bas malgré le changement climatique tandis que d'autres auront migré en altitude (Lenoir *et al*., 2010). Dans les Massifs montagneux où les effets des changements climatiques sur la flore et la végétation ont été étudiés, la tendance générale indique une augmentation du nombre d'espèces végétales ayant besoin de chaleur

au détriment de celles nécessitant des conditions plus froides (phénomène appelé thermofilisation, Holzapfel & Vinebrooke, 2005) mais avec une grande variabilité de réponse selon les Massifs et même localement dans le même Massif (Gottfried *et al*., 2102).

Les communautés végétales des combes à neige, composées d'une flore spécifique, comme le Saule herbacé (*Salix herbacea* L.), sont des végétations tout particulièrement sensibles du fait des conditions de sol et de microclimat très sélectives de ces milieux (Grabherr, 2003). Les combes à neige sont sans doute l'habitat naturel alpin où les conditions microclimatiques risquent de changer le plus rapidement (Grabherr, 2003 ; Heegaard & Vand-vik, 2004). Dans le cas d'un scénario de réchauffement avec une fonte des neiges plus précoce, on observerait un allongement de la période de végétation, une dessiccation et une activité biologique des sols accrue et la soumission de la végétation à des températures plus froides (!) (Baudière & Gauquelin, 2005). Ces effets contribueraient à l'évolution du milieu, celui-ci pouvant alors être occupé par d'autres espèces moins spécialistes et plus opportunistes (ou au contraire plus résistantes au froid).

Dans le cas inverse, une augmentation de la durée moyenne d'enneigement ou de gel aurait pour conséquence de raccourcir la période de végétation, déjà très contrainte, et d'en modifier la composition ou la structure (Braun-Blanquet, 1948 ; Eynard, 1978 ; Corriol & Mikolajczak, 2014). Les végétations de combes à neige alpines, essentiellement vivaces, adaptées au contexte, sont cependant capables d'intégrer des variations climatiques interannuelles très importantes et de réagir à des tendances sur un long terme. Les performances de reproduction des espèces concernées pourraient être affectées plus que leur cycle phénologique (Lluent *et al.*, 2013) Le dispositif de suivi des combes à neige mis en place dans le cadre du programme OPCC-1 est poursuivi dans le cadre du programme Florapyr (14 sites sur les 3 pays Espagne, France, Andorre, Komac & Olicard, 2014). Les états des lieux sur la végétation et les relevés annuels sur la phénologie et les températures effectués depuis 2011-12 ne permettent pas encore de donner des tendances en s'affranchissant des variations interannuelles. Le dispositif va être conforté par des travaux complémentaires et notamment la mise en place d'unités de simulation du réchauffement (mise en place d'Open Top Chamber sur 4 sites).

ENCUADRE 2.3.2LE DISPOSITIF INTERNATIONAL GLORIA POUR LA SURVEILLANCE DE LA FLORE ALPINE.

Actuellement, on recense plus d'études menées sur différents groupes de faune (oiseaux, paillons, libellules, insectes pollinisateurs) que sur la flore et la végétation (Le Treut, 2013) (plus d'information au chapitre 2.2.3). La végétation alpine est particulièrement sensible aux changements environnementaux et est susceptible de répondre aux variations climatiques. Le dispositif international GLORIA a pour objectif d'étudier l'évolution de la flore alpine grâce à un protocole déployé sur l'ensemble des montagnes alpines du monde. Ce dispositif, compte 6 sites de suivi floristique dans la péninsule Ibérique dont 2 dans les Pyrénées aragonaises. (Pauli *et al.*, 2004).

Les premières analyses entre la réalisation de l'état initial (2001) et le premier suivi (2008) donnent une élévation moyenne de la flore alpine européenne de 2,7 m durant la période considérée, avec des différences importantes entre les montagnes sous influence méditerranéenne qui perdent des espèces (-1,4 en moyenne) et les Massifs nord-européens qui gagnent globalement des espèces (+3,9 en moyenne) (Pauli *et al.*, 2012). Ce résultat ne semble pas contradictoire avec l'hypothèse de thermophilisation, simplement les montagnes méridionales perdraient des espèces sous l'effet de sécheresses estivales (Moncorps, 2015). Un tel dispositif a vocation à être suivi à long terme pour pouvoir confirmer ou infirmer les tendances. Le dispositif n'est par ailleurs pas analysable à l'échelle de chaque Massif faute d'échantillonnage suffisant. Pour les Pyrénées il sera complété par deux nouveaux sites mis en place dans le cadre du porgramme Florapyr. Enfin, le suivi des températures sur les sites Gloria donne des informations sur la durée de la saison de végétation à l'étage alpin qu'il sera intéressant de comparer avec les données relevées sur les sites de suivi des combes à neige.

Actuellement à l'échelle des Pyrénées, Le Treut (2013) notent « [qu'] *il semble qu'aucune analyse ne permette des estimations quantitatives de risque d'extinction pour les espèces confrontées au changement climatique* » et considèrent que « *de telles estimations restent hors de portée encore compte tenu des capacités actuelles de modélisation et de la nature des données disponibles ou collectables* ». Une première tentative d'identification des espèces sensibles au changement climatique dans les Pyrénées a été menée dans la cadre du volet biodiversité du projet OPCC1 avec une première liste d'environ 80 plantes (rapport exécutif OPCC1). Cette approche reste à conforter. La réalisation de la Liste rouge de la flore des Pyrénées dans le cadre du programme Florapyr devrait faire intervenir un critère de sensibilité au changement climatique (réalisation 2018-19, méthodologie : UICN, 2012, critères A3, A4 ou B2(b)) mais un tel critère est cependant difficile à définir compte tenu des incertitudes sur les scénarios climatiques.

On considère souvent que la limite supérieure actuelle de la forêt va probablement s'élever sous l'effet du changement climatique et que cela pourrait constituer une menace pour le pastoralisme, par développement des forêts dans les estives. Il faut rappeler que les forêts ont atteint des altitudes plus élevées par le passé dans les Pyrénées : on trouve ainsi des traces de l'exploitation des forêts en Ariège jusque vers 2200 (Bonhote *et al*., 1988) au Moyen-âge. La prise en compte de la déprise pastorale montre que c'est un facteur prépondérant dans la remontée des arbres en altitude et de la limite supérieure de la forêt (Bodin, 2010). Par ailleurs, les possibles évolutions internes dans la composition des forêts aux altitudes moyennes sont peu étudiées (par exemple reconquête du sapin dans les hêtraies montagnardes, dans les secteursoù il avait régressé sous l'effet des usages [Galop & Jalut, 1994]). Des travaux dans les Alpes ont pu montrer que la dynamique forestière produit un déplacement apparent d'essences vers le haut sous l'effet de la fermeture et la maturation des forêts des altitudes moyennes (Bodin *et al*, 2013). A basse altitude, les études sur le hêtre montrant une remontée en altitude de l'optimum de croissance (Vitasse *et al,.* 2010) suggèrent des extinctions locales à terme à basse altitude au pied des Pyrénées nord-occidentales comme déjà constaté en Catalogne (Grime, 1973 ; Jump *et al.*, 2006). Toutefois, la remontée de l'optimum de croissance n'implique pas nécessairement des extinctions de populations. Le cas est connu de hêtres qui n'atteignent pas la strate dominante de forêts mixtes dans des situations de stress pédoclimatique sans pour autant s'éteindre si la sylviculture est suffisamment extensive. Dans le piémont des Pyrénées centrales françaises, les études paléoécologiques et historiques témoignent de la présence du sapin en abondance au néolithique dans le Volvestre, de sa régression à partir de l'antiquité sous l'effets des usages (défrichements, pression agro-pastorale, exploitation intensive) alors qu'il conserve actuellement une forte capacité de colonisation (Gonin *et al*., 2014).

Le développement de plantes exotiques envahissantes en montagne se produit depuis déjà plusieurs décennies à la faveur des travaux, des reboisements et des déplacements (humains et d'engins de chantier), voire des déprises pastorales (comme dans le cas de l'Épicéa commun), avec des incidences possibles sur les paysages, le fonctionnement des écosystèmes, certains services d'approvisionnement (pastoralisme, domaines skiables, où une espèce comme l'Épicéa commun ferme le paysage des Pyrénées centrales françaises). Il a été démontré que les environnements froids subissent moins d'invasions biologiques que les environnements chauds, les changements climatiques pourraient amplifier ces phénomènes en fonction des paramètres concernés (Pauchard *et al.*, 2016 ; Gallien *et al.*, 2016) .

Le CENMA a étudié l'évolution des niches écologiques potentielles de *Buddleja davidii* et de *Senecio inaequidens* en Androrre sous l'effet du changement climatique au cours du siècle passé. Les résultats montrent que selon les scenarios, entre 10 et 70% du territoire seraient susceptibles d'être climatiquement viable pour les deux plantes (10-40% pour le *Buddleja* et 30-70% pour le *Senecio*, selon l'étude réalisée).

(20) Stress physiologique lié aux conditions de sol et de climat, atténué par le couvert d'autres essences.

2.3.5 Les vulnérabilités et les services écosystémiques

Les fonctions écologiques des écosystèmes remplissent des services de support, services de régulation, services d'approvisionnement et services culturels. Nous détaillons ci-après les services apportés par la flore et la végétation qui pourront être impactés par les évolutions climatiques (Moncorps, 2014), en soulignant quelques éléments de vulnérabilité (Moncorps, 2015).Le rôle de la végétation dans les services de support apparait dans le cycle de l'eau, la production de biomasse et le cycle des éléments nutritifs, la formation et le maintien des sols, l'offre d'habitat pour la biodiversité. Les services de régulation concernent:

- La régulation du cycle de l'eau, de l'érosion et des risques naturels, ainsi que le maintien de la couverture neigeuse par un couvert végétal continu et adapté au contexte bioclimatique. Les pressions d'usage et d'aménagement, les pressions climatiques ou encore les choix d'espèces dans la restauration des milieux peuvent impacter notablement ces services;

- la régulation de la qualité de l'eau;

- la régulation de la qualité de l'air;

- la régulation du climat et du stockage de carbone : outre la fonction classique reconnue aux forêts (avec une capacité de stockage trois fois plus importante pour les forêts montagnardes par rapport aux forêts de plaine), les prairies de moyenne montagne et les tourbières constituent également des puits de carbone ;

Les services d'approvisionnement correspondent aux biens commercialisés, sources de revenus et d'emplois : la production de bois (à relativiser dans les Pyrénées compte tenu des difficultés d'exploitation liées aux contraintes naturelles), la valorisation pastorale des milieux herbacés, la valorisation des espaces pour certaines activités de loisirs (domaines skiables), la valorisation des plantes de cueillette (pharmacologie, cosmétique, herboristerie, liquoristerie…).

ENCADRÉ 2.3.2 LE PROGRAMME ECOVARS ET LA RESTAURATION DES PRAIRIES DE HAUTE MONTAGNE

Dans les Pyrénées françaises, le programme Ecovars de restauration écologique dans les milieux herbacés d'altitude (Malaval, 2015) (domaines skiables et bord de route) vise à maintenir ou restaurer ces services grâce à une amélioration des techniques d'intervention et l'utilisation de matériel végétal d'origine locale soutenu par une marque commerciale (Pyrégraine de néou). Des approches similaires sont en cours de développement en Andorre et Aragon.

Production au champ d'Achillea millefolium L., d'origine pyrénéenne pour un usage en restauration écologique dans les Pyrénées. Photo CBNPMP/Gérard Largier

Les services culturels concernent:

- Les loisirs et le tourisme : l'identité et l'attractivité touristique des Pyrénées s'appuient sur les paysages et leur aspect sauvage, dans lesquels la végétation est un élément important (avec un certain paradoxe quand on sait comment les activités humaines l'ont façonné) ainsi que les espèces emblématiques (flore endémique en particulier) ; au-delà du grand public les Pyrénées et leur biodiversité ont attiré de longue date un tourisme scientifique ;

- Les valeurs éducatives et la connaissance scientifique ; cela concerne en particulier les caractéristiques et spécificités floristiques du Massif ;

- La dimension identitaire, patrimoniale et artistique (esthétique), dans laquelle les éléments floristiques jouent également un rôle important.

(21) El mosaico de medios o paisajístico se refiere a la mezcla de retazos naturales y manejados por el hombre que varían en tamaño, forma y ordenación espacial

Au sujet de l'offre d'habitat pour la biodiversité, une question revient régulièrement à savoir « *en quoi et comment les espaces protégés peuvent contribuer à la préservation de la biodiversité et des espaces montagnards* » (Le Treut, 2013) dans un contexte de changements climatiques ? Il s'agit de savoir si les espèces et écosystèmes sensibles pourront se maintenir dans des zones souvent considérées comme des refuges climatiques alors qu'elles n'ont pas été spécialement définies sur la base d'un tel critère et qu'elles seront tout autant soumises aux changements s'ils ont lieu. Une question est celle des continuités écologiques entre ces aires et la possibilité de maintenir des flux de gènes et des voies de migration. Là encore, les travaux sont généralement basés sur des modèles « espèces animales», les experts n'étant pas forcément d'accord sur leur bonne représentativité pour les territoires considérés (manque d'études de référence pour les montagnes). Certains gestionnaires d'espaces protégés ont mis en place des programmes sur les continuités écologiques dans le cadre de «plans climat » (Parc national des Pyrénées, Parc naturel régional des Pyrénées ariégeoises, Réserve naturelle régionale du Massif de Pibeste-Aoulhet).

2.3.6 Conclusions et recommandations

Le Treut (2013) dans le chapitre « Montagne » du rapport de synthèse « Les impacts du changement climatique en Aquitaine – un état des lieux scientifique » propose « q*uelques pistes générales possibles, à des degrés d'opérationnalité et de réalisme éthique à conforter, d'adaptation ou de mitigation adaptées aux écosystèmes et espèces de montagne face au changement climatique »* qui peuvent s'appliquer à l'ensemble des Pyrénées et que nous complétons sur certains aspects*:*

« - Réévaluer les objectifs de gestion à la lueur du challenge du changement climatique et réduire dans la mesure du possible les stress anthropiques locaux représentant des facteurs susceptibles d'altérer la capacité de résistance de la biodiversité à s'adapter aux changements globaux (fragmentation, pollution…). Utiliser la diversité des ressources génétiques forestières locales pour renforcer la capacité d'adaptation des forêts au changement climatique. ». On soulignera cependant que la réévaluation des objectifs de gestion reste complexe compte tenu des incertitudes qui pèsent sur les scénarios climatiques, en particulier pour l'évolution des précipitations et de l'enneigement. Pour la question des ressources génétiques, qui concerne également les milieux ouverts non forestiers, nous recommandons une approche à l'échelle locale.

« - Maintenir les usages traditionnels des sols là où ils ont été les formes majoritaires de gestion, en garantissant les missions originelles en harmonie avec le maintien des cultures et traditions locales historiques. Protéger les traditions et les héritages culturels, ceux en connexion avec les territoires, qui sont les mieux à même de garantir un maintien de la diversité spécifique locale et des écosystèmes sensibles (pastoralisme…). »

« - Promouvoir les initiatives originales qui associent « faible pression en terme de gestion » et « création d'hétérogénéité spatiale ». Par exemple, comme dans les pays du nord de l'Europe, il apparaît crucial de continuer à faucher et où pâturer les pelouses les plus mésophiles, afin d'éviter l'envahissement par des espèces compétitrices qui menacent fortement la diversité des communautés et des paysages. ». Cependant « *faible pression* » et « *création d'hétérogénéité spatiale* » sont antinomiques et par ailleurs la création d'hétérogénéité n'est pas une fin en soit si l'on pense à l'immense et assez homogène écosystème constitué par la forêt boréale.

« - Préserver en priorité les caractéristiques écosystémiques essentielles (celles qui en déterminent la structure et le fonctionnement intrinsèques) et protéger les espèces (notamment les espèces clé de voûte) les plus à même de s'adapter et d'être une source pour toute récupération éventuelle. Préserver les espèces identifiées comme redondantes (« doublons »), de telle façon qu'en cas de perturbation locale, l'une d'elles au moins subsiste. Protéger les variables (ressources, espèces) qui puissent œuvrer comme des tampons, avec un tempo de persistance adapté au changement climatique (Baron et al.*, 2009) ».*

« - Reconnaître et améliorer les missions des espaces protégés. Préserver les zones identifiées comme « refuges » par exemple les localités de développement de populations d'espèces rares ou menacées ou les stations moins susceptibles d'être concernées par le changement climatique. Ces zones pourraient être utilisées comme sources pour le repeuplement ou

(22) résilience

(23) ou en banque de semences

comme zones-cibles pour établir des populations transplantées ». Elles devraient faire l'objet d'un état des lieux préalable des introductions passées de matériel végétal (en particulier forestier) afin d'identifier les secteurs exempts de sources génétiques allochtones dans lesquels. La préservation de ces zones refuges doit comprendre des mesures vis-à-vis des espèces exotiques envahissantes. « *- Dans les cas les plus extrêmes, pour les espèces les plus sévèrement impactées, certaines stratégies de mitigation recommandent 1) le maintien et la reproduction en captivité d'espèces à haut risque d'extinction et/ou 2) la translocation (migration assistée) de populations, le déplacement d'organismes d'une zone à une autre, séparée par une barrière (zone urbaine, aménagée…).* »

« - Malgré les effets positifs attendus sur la biodiversité en termes de mitigation du changement climatique consécutifs directement à la réduction de l'émission de GES, certains auteurs (Araújo et al.*, 2011) appellent à un changement majeur de paradigme dans les politiques de conservation et au déploiement d'approches plus efficaces que celles mises en œuvre actuellement : requalification des zones de conservation existantes, création de nouvelles zones et développement de mécanismes plus opérationnels de gestion intégrée facilitant la connectivité entre zones de conservations dans leur dimension verticale (altitudinale) mais aussi horizontale. ».*

Cela suppose une réflexion et une organisation à l'échelle panpyrénéenne.Les conclusions du chapitre « Montagne » du rapport Le Treut (2013) convergent avec celles du « 3e rapport sur le changement climatique en Catalogne » Martín-Vide, 2016). Tout en rapportant les résultats de travaux scientifiques qui identifient des impacts attribués aux changements climatiques, elles apportent les mêmes types de réserves (manque de scénarios fiables ou incertitudes sur les impacts liées à l'imprécision des scénarios, recherches souvent préliminaires, variabilité selon les situations locales) et soulignent le besoin d'études et de suivi. Tout en soulignant l'intérêt des modèles, Le Treut (2013) recommande notamment de « *se garder de généraliser trop rapidement des observations ou expérimentations réalisées dans des contextes spécifiques* » et de « *faire la part des choses entre les travaux qui s'appuient réellement sur des mesures et travaux de terrain et ceux (plus nombreux souvent, et à des échelles trop grandes) qui s'appuient sur des modèles uniquement*.». On rappellera l'exemple classique de la remontée ascendance des essences forestières dont le moteur climatique a pu paraître une évidence alors que d'autres facteurs de nature non climatique s'exercent en premier lieu.
En matière d'études et de suivi sur biodiversité et de flore, les travaux de l'OPCC en général et ceux du programme FLORAPYR en particulier doivent s'inscrire dans la durée au-delà du temps de projets spécifiques: des dispositifs comme le suivi des combes à neige, GLORIA ou le programme de science participative Phénoclim nécessitent des durées longues pour produire des jeux de données analysables en lien avec les données climatiques observées. La consolidation et la mise à jour en continu de l'Atlas de la flore des Pyrénées, initié également dans le cadre de l'OPCC, permettra de disposer d'un état des lieux actualisé et mobilisable pour réaliser des analyses croisées. Enfin, il serait intéressant d'imaginer d'autres dispositifs visant à suivre l'évolution génétique des populations végétales dans les secteurs préservés d'apports exogènes ou *a contrario* dans des secteurs où du matériel végétal allochtone a été introduit de longue date et se développe en interaction avec la flore locale (comme c'es le cas de l'introduction d'autres espèces de sapins méditerranéens [complexe d'espèces] en vallée de Bagnères-de-Luchon, au sein de la sapinière pyrénéenne (introgression avec *Abies Alba*). De tels dispositifs seraient utiles pour raisonner certains choix d'adaptation qui souvent conduisent à des introductions d'espèces alors que la flore locale et les écosystèmes naturels peuvent rester les solutions dans un contexte en évolution.

2.4 Forêts

Coordinateurs: Sébastien Chauvin (FORESPIR), Julia Gladiné Martín(FORESPIR)
Auteurs: Sébastien Chauvin (FORESPIR), Julia Gladiné Martín (FORESPIR), Emmanuel Rouyer (CRPF Occitanie), Jean-Baptiste Daubrée (DSF) , Christophe Drénou (CNPF-IDF) José Ramón González-Olabarria (CTFC), Pere Casals Tortras (CTFC), Raphaël Delpi (FORESPIR).
Co-auteurs: Alejandro Cantero (Fundación HAZI Fundazioa), Jesus Julio Camarero (IPE), Lluis Coll (CTFC), Thomas Villiers (ONF).

RÉSUMÉ

La forêt couvre 59 % de la surface de la chaine pyrénéenne et représente à la fois une ressource naturelle renouvelable, des écosystèmes riches en biodiversité, des espaces touristiques et d'accueil du public particulièrement recherchés, une protection contre les phénomènes naturels (avalanches, chutes de blocs, crues, …) et un important stock naturel de CO2. Le relief, les expositions diverses, les influences climatiques atlantiques et méditerranéennes et la diversité des substrats géologiques entraînent des conditions de fertilité très variées (FORESPIR, 2007). Depuis plusieurs décennies déjà, les forêts de montagne sont soumises à d'importants changements du fait d'interactions de facteurs socio-économiques et environnementaux (Ameztegui *et al.,* 2010) mais les facteurs climatiques, biologiques et sociaux dans lesquels les forêts auront à se développer restent encore largement incertains.Les modèles climatiques à l'échelle locale prévoient une hausse des températures et assez peu d'évolution des précipitations moyennes cumulées annuelles.

Cependant les principaux modèles prevoient une augmentation importante des variations saisonnières des précipitations avec, d'une manière générale, un processus de sécheresse de plus en plus marqué, notamment en hiver et en été. En dehors de toute intervention humaine ces évolutions climatiques peuvent impacter les forêts Pyrénéenes, notamment par l'augmentation de la sécheresse édaphique estivale (Aussenac et Guehl, 2000 ; Bréda *et al.,* 2006) mais également par une modification du régime de certaines pertubations (ravageurs, incendies, tempêtes). Parallèlement, le nouveau contexte climatique peut également supposer une augmentation du taux d'accroissement des arbres du fait de l'allongement de la saison de végétation et de l'accentuation de l'activité photosynthètique. Au-delà des potentiels impacts des modifications climatiques sur les arbres et les forêts elles-mêmes il est important de tenir compte des conséquences prévisibles sur les nombreuses fonctions et services écosystémiques rendus par les forêts de montagne. En effet, le changement climatique peut entraver, entre autre, de façon importante la multifonctionnalité des forêts pyrénéennes en entraînant des dépérissements dans les forêts de production ou de protection, des destructions d'espèces ou habitats remarquables, une détérioration du cadre paysager forestier.

2.4.1 Les impacts potentiels du changement climatique sur la diversité des communautés végétales et sur la distribution des espèces forestières

Les récents changements socio-économiques des zones rurales, à l'origine d'un changement d'usage des sols sans précédent du fait de sa rapidité, ainsi que le constat d'un changement climatique avéré, constituent les principaux moteurs du changement global dans les Pyrénées *(*Garcia *et al.,* 2016*)*.Ceci étant, l'incertitude croissante autour de l'environnement climatique, biologique et social est largement reconnue, incertitude dans laquelle vont se développer les forêts du futur y compris sur le territoire du Massif Pyrénéen.

Changements de la diversité des communautés végétales

Bien que sur la majorité des montagnes européennes les pâturages abandonnés aient évolués vers des boisements, l'interraction entre le procesus d'abandon des terres agricoles et pastorales, leurs transformations en paysages forestiers ou « ligneux » (broussailles) et le changement climatique *(*Ameztegui *et al.,* 2016) ou les services écosystémiques comme la biodiversité ou la sequestration du CO_2 *(*Montané *et al.,* 2007; Garcia-Pausas *et al.,* 2017*)* demeure méconnue.Une étude récente sur les modifications du couvert végétal dans les Pyrénées aragonaises entre 1957 et 2007 montre un important procesus de revégétalisation caractérisé par l'avancée des strates buissonantes puis de la forêt (Lasanta et Vicente-Serrano, 2007*)*. Ces auteurs concluent que les changements de végétation qui se sont produits au cours des 20 dernières années ont contribué dans certains cas à l'homogénéisation du couvert végétal et dans d'autres cas à son hétérogénéisation. L'homogénéisation a lieu principalement dans les forêts déjà en place qui se densifient en l'absence d'exploitation forestière, alors que le procesus d'hétérogénéisation se concentre sur

des terres abandonnées qui présentent des couverts végétaux très variés en fonction de la période au cours de laquelle ces terres ont cessé d'être exploitées, de la gestion mise en œuvre et des conditions naturelles.

Néanmoins, les changements d'habitats naturels et la biodiversité dépendent des dynamiques naturelles des espèces qui les composent *(*Garcia *et al,.* 2016*)*. Une étude comparative des communautés de l'écotone entre les pâturages alpins et la limite supérieure de la forêt entre 1998 et 2009 a revélé qu'une augmentation significative de la couverture arborée de 20% à 35% n'a pas été suffisante à moyen terme pour être à l'origine d'un changement significatif de la richesse et la composition des espèces de plantes alpines et subalpines *(*Pardo *et al.,* 2013 *in* Garcia *et al.,* 2016*)*. Les pâturages supra forestiers ne paraissent pas non plus être affectés pour le moment par de fortes transformations de leur biodiversité à la différence des changements enregistrés sur certains pâturages de versants à forte pente et orientés au sud qui ont une dynamique plus rapide. Cependant, d'autres études, comme celle réalisée dans le Parc National d'Ordesa et Monte Perdido, livrent une vision préoccupante des changements de la biodiversité des communautés alpines *(*Pauli *et al.,* 2012*)*. Selon les résultats de cette etude, les pâturages présentent un haut degré de naturalité et une flore riche mais conditionnée par les températures basses. Ils sont donc particulièrement sensibles au réchauffement climatique, les espèces adaptées au froid étant remplacées petit à petit par d'autres espèces thermophiles (Gottfried *et al.,* 2012*)*. L'avancée moyenne de leur distribution a ainsi été évaluée à 2,7 m. sur les cimes européennes *(*Pauli *et al.,* 2012 *à* Garcia *et al.,* 2016*)*.

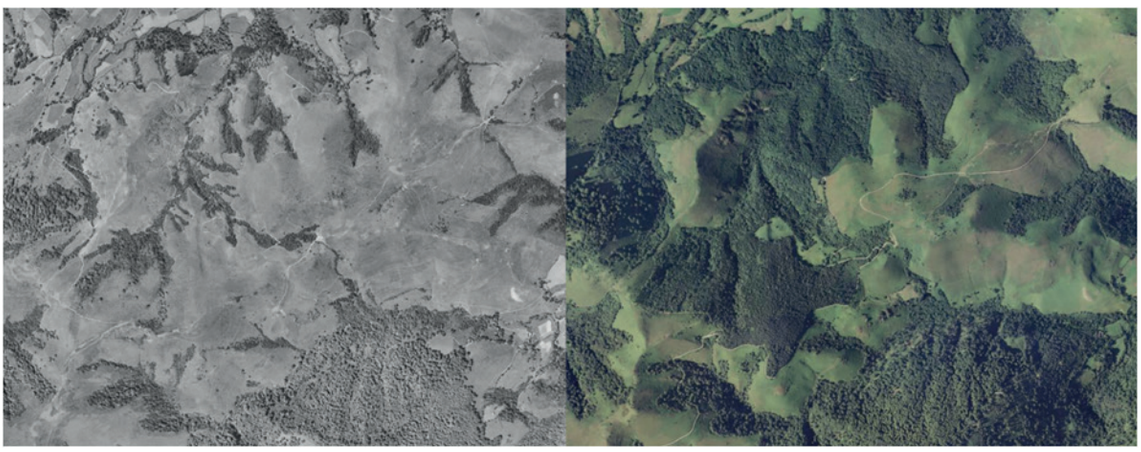


Figure 2.4.1. Exemple de conquête de la forêt sur des terres agricoles et pastorales entre 1959 et 2016 dans les Pyrénées-Atlantiques françaises (canton de Montagne Basque). Source : IGN

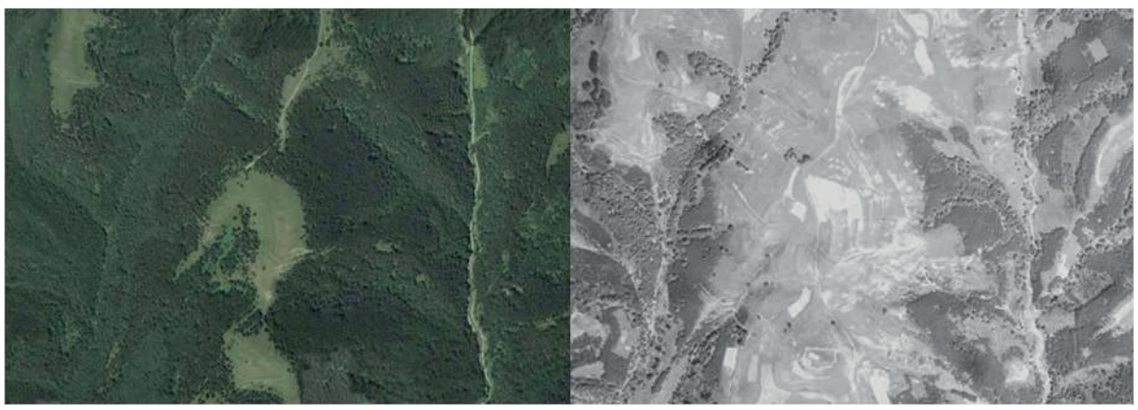


Figure 2.4.2. Exemple de conquête de la forêt sur des terres agricoles et pastorales entre 1945 et 2017 dans la vallée de Belagua (Navarre). Source : Système d'Information Territorial de Navarre

Changements dans la distribution altitudinale des espèces forestières

Les espèces végétales ne se répartissent globalement pas de manière uniforme. Elles se restringent à certaines zones géographiques déterminées sur lesquelles elles ont pu se former ou qu'elles ont pu coloniser au grès des évolutions et où les conditions biotiques et abiotiques sont favorables à leur croissance et à leur reproduction *(*Matias, 2012*)*. Cependant, les changements importants d'usage des sols et du climat que l'on enregistre à l'échelle globale (IPCC, 2007) altèrent ces conditions, ce qui induit des changements phénologiques, l'acroissement des populations de plusieurs espèces ou une modification de leur dynamique naturelle *(*Matias, 2012*)*. En Europe, la limite supérieure arborée et l'étage alpin est en train d'évoluer vers des altitudes plus élevées. Dans le cas des arbres, les déplacements vers des altitudes supérieures doivent être analisés avec précaution puisqu'ils sont fortement liés au processus d'abandon des pâturages de haute montagne : l'absence d'activité pastorale permet ainsi la recolonisation par la végétation forestière de ces espaces laissés libres, conduisant à restaurer la limite supérieure naturelle arborée avant intervention humaine. Dans une étude récente menée sur le versant sud des Pyrénées un déplacement moyen de la limite de la forêt de 35 m. a été observé sur les 50 dernières années (Ameztegui *et al.,* 2016). En outre, la remontée altitudinale de la majorité des espèces végétales des milieux forestiers des Alpes Françaises (Lenoir *et al*., 2008), du hêtre en Espagne (Penuelas *et* Boada, 2003) et de sept espèces d'arbres en Scandinavie (Kullman, 2002) a pu être démontrée. D'autres études ont estimé que la remontée altitudinale de certains étages de végétation pourrait atteindre 700 m. sous le scenario d'une augmentation prévue de la température moyenne de 4°C (Courbaud *et al.,* 2010). Cependant, peu d'études ont abordé les réponses du changement climatique des communautés biologiques tout le long du gradient altitudinal des chaines montagneuses où l'on s'attend à ce que la diversité écologique soit en déclin. (Regato, 2008). La comparaison des inventaires historiques floristiques de différents Massifs européens met en exergue que cette migration en altitude de la limite de la forêt affecte les prairies alpines et particulièrement les espèces rares ou spécialisées (Rixen et Wipf, 2017).Il convient de préciser que les études déjà réalisées en France (Badeau *et al.,* 2005 ; Piedallu *et al.,* 2009 ; Cheaib *et al.,* 2012) et en Espagne sur les effets possibles du changement climatique sur la distribution potentielle future des essences ou sur leur vulnérabilité concernent le plus souvent les échelles nationales ou régionales ; les Pyrénées sont alors en marge des territoires analysés engendrant une validité des modèles probablement moins bonne que dans d'autres zones et des résultats moins pertinents et difficilement exploitables.La modélisation de la distribution potentielle de quatre pinèdes à crochet (*Pinus uncinata*) dans les Pyrénées Catalanes et Andorranes pour les années 2020, 2050 et 2080 selon différents scénarios de changement climatique (A2 et B2) suggère que ces formations forestières auront, dans les années 2080, des aires bioclimatiques optimales situées à des altitudes supérieures à celles d'aujourd'hui. Celles-ci atteindraient ainsi 2472 m. d'altitude moyenne dans le cas du scénario A2 (scénario présentant une évolution probable des températures mondiales de +3,4°C pour 2090–2099 par rapport à 1980–1999) et 2340 m. d'altitude moyenne dans le cas du scénario B2 (scénario présentant une évolution probable des températures mondiales de +2,4°C pour 2090–2099 par rapport à 1980–1999). Cela conduit ainsi à faire remonter en partie les zones de broussaille et les pâturages alpins montagneux (Pérez *et al.,* 2011 ; Martínez *et al.,* 2012). En revanche, ces forêts subalpines pourraient souffrir, en général, d'une réduction moins importante de leur aire d'occupation que les pelouses alpines ou les broussailles alpines et subalpines. Il a en effet été estimé que ces dernières pourraient perdre jusqu'à 90% de leur aire de répartition potentielle selon le scénario A2 et 70 % selon le scénario B2. Les peuplements situés en zones arrosées (comme les sapinières par exemple), pourraient être menacés par des dépérissements du fait d'épisodes de sécheresses plus fréquents, des températures plus élevées et des effets induits de la gestion forestière passée *(*Camarero *et al.,* 2011*)*. En Aragon, dans le Parc National d'Ordesa et Monte Perdido, on observe un phénomène d'expansion des broussailles et des forêts aux dépends des pâturages supra forestiers. Ce phénomène se traduit par une colonisation rapide des prairies de fauche d'altitudes moyennes par le Pin Sylvestre (*Pinus sylvestris*). A plus haute altitude la dynamique de colonisation n'est pas aussi rapide et a été caractérisée par une « densification » progressive tout au long du siècle passé, induite par l'abandon des pâturages mais aussi favorisée par le réchauffement climatique (Camarero et Gutiérrez, 2004).

Conclusions

Les études disponibles suggèrent que les deux principaux moteurs du changement global (climat et usage des sols) ont une grande incidence dans la composition et la structure des forêts et dans leurs limites altitudinales. Elles suggèrent également une densification de la végétation du fait notamment de

la diminution de l'activité forestière et de l'abandon de l'activité agricole et pastorale sur les pâturages, les prairies de fauche des étages montagnards et subalpins. Cela conduit ainsi à une recolonisation par la broussaille, puis la forêt.Ces changements pourraient avoir pour conséquence une altération de la biodiversité. Les habitats naturels des espèces floristiques et faunistiques alpines, rares et spécialistes, seront les plus affectés par l'avancement d'habitats actuellement situés à des altitudes moindres. L'analyse de la bibliographie scientifique suggère cependant une variabilité spatiale et temporelle importante dans les processus et met en évidence que les changements observés ne suivent pas toujours les modèles établis.

2.4.2 Altération de la productivité des forêts et rôle des forêts en tant que puits de carbone

La productivité d'un peuplement forestier est définie par l'accroissement du volume de biomasse par hectare. Pour croître et se développer, un arbre a besoin de lumière, de dioxyde de carbone et d'oxygène, d'eau et de nutriments présents dans le sol. Cette productivité est également conditionnée par un certain nombre de facteurs endogènes propres au peuplement (structure, densité, composition…) et aux stations (profondeur du sol, orientation, altitude).

Dans le cycle naturel de l'arbre, la productivité va croître rapidement dans les premières années de développement jusqu'à atteindre un pic pour ensuite progressivement diminuer dans la phase de sénescence (Ryan *et al.,* 1997). Au cours du 20ème siècle, et particulièrement dans sa seconde moitié, on a pu observer une augmentation considérable et généralisée de la productivité des forêts européennes (Spiecker *et al.,* 1996) du fait de facteurs favorables comme la hausse des températures, l'augmentation de la concentration en dioxyde de carbone et la fertilisation azotée provenant entre autre de pollutions d'origine anthropique (Nellemann *et al.,* 2001 ; Kahle *et al.,* 2008 *et* Solberg *et al.,* 2009 *;* Bontemps *et al.,* 2011 *;* Bontemps *et al.,* 2012). L'arrivée plus précoce de températures clémentes et l'adoucissement des saisons automnales et hivernales modifient le cycle annuel de développement des arbres en augmentant la période de végétation des arbres. Néanmoins, l'augmentation excessive des températures dans un contexte de disponibilité hydrique limité combinée à des épisodes de sécheresse plus sévères et plus fréquents, peut impacter négativement la croissance des arbres. Lors de ces épisodes, certaines essences adoptent des stratégies d'évitement en régulant leur photosynthèse de sorte à diminuer leur évapotranspiration (fermeture des stomates). Ainsi, Soubeyroux *et al., (*2012) ont analysé l'impact du changement climatique sur l'occurrence de période de sécheresse en France et ont mis en évidence que « *même sans évolution des sécheresses météorologiques, une aggravation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes liés à un déficit d'humidité du sol est à attendre dès la première moitié du XXIème siècle* » Certaines études montrent déjà que l'occurrence de ces phénomènes extrêmes associés à des dérèglements du climat peuvent fortement impacter la productivité forestière (températures, sécheresses majeures, incendies, attaques de pathogènes ou maladies) (Bréda *et* Badeau, 2008).

Dans les zones où certaines espèces sont déjà en limite d'aire de répartition (le hêtre, le pin sylvestre et le sapin en région Face à ce scénario, il faut compter avec la capacité d'adaptation des peuplements forestiers. Ainsi, si l'évènement perturbateur ne dépasse pas un certain seuil, le peuplement forestier dans son ensemble peut « *absorber une forte perturbation sans changer d'état* » (concept de résistance ; Gunderson, 2000 *in* Charru, 2012) ou, suite à l'évènement, retrouver à court ou moyen termes l'état dans lequel il se trouvait préalablement à la perturbation (concept de résilience ; Dobbertin, 2005). Cette capacité de résilience dépend de la durée et de la fréquence de la perturbation, ainsi que de l'espèce affectée (Manion, 1981 *;* Dobbertin, 2005 *à* Charru, 2012).

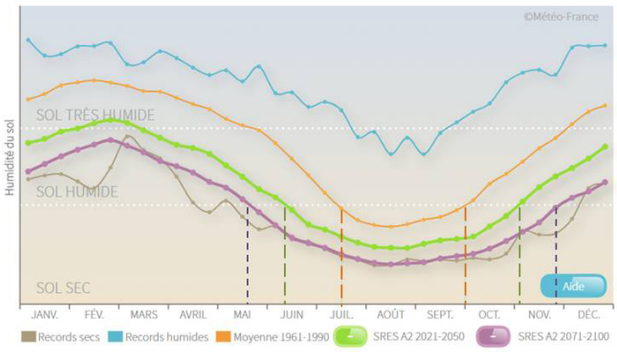


Figure 2.4.3 . Cycle annuel d'humidité du sol ; Moyenne 1961, records et simulation climatiques pour deux horizons temporels. Source : Météo France.

Ainsi, à disponibilité en CO2 atmosphérique équivalente à ce qu'elle est aujourd'hui, on peut mettre en avant plusieurs grandes tendances quant à la productivité forestière:

- Sur les zones touchées par une augmentation des températures mais sans contraintes hydriques particulières (l'évolution des précipitations restant particulièrement incertaine), on peut s'attendre à une possible augmentation de la productivité forestière,

- Sur les zones touchées par une augmentation des températures et par une diminution des précipitations (ou tout au moins une modification du régime des pluies en termes de fréquence), on peut s'attendre à une diminution de la productivité forestière ; cette possibilité doit cependant être pondérée par la réserve utile maximale (RUM) du sol.

- Dans tous les cas, la survenance répétée de phénomènes extrêmes sera de nature à affaiblir les peuplements ce qui pourra conduire, si les seuils de tolérance sont dépassés, à des dépérissements pouvant réduire le volume de bois sur pied.

En plus du climat, la productivité des forêts est fortement liée à la capacité des arbres à capter et stocker du dioxyde de carbone (CO_2). En étant capté par les stomates des feuilles, le CO_2 atmosphérique va, avec les apports en eau et grâce à l'énergie de la lumière, permettre la fabrication de cellulose, des sucres, et d'autres composants nécessaires à la formation du bois, de l'écorce, des racines et des feuilles. Ainsi, plus l'arbre se développe plus il stockera de carbone (on considère qu'1m^3 de bois consomme 1 tonne de CO_2).

Le stockage de carbone dans l'écosystème forestier français – feuillus, résineux, bois mort, sols – représentait, en 2013, 80 millions de tonnes de dioxyde de carbone par an, soit près d'un cinquième des émissions nationales de gaz à effet de serre.
Les sols forestiers sont, en outre, particulièrement importants puisqu'ils représentent à eux seuls 57% du CO_2 de l'écosystème forestier (Dupouey *et al.,* 2002).
Le captage et la séquestration du dioxyde de carbone par la forêt et dans le sol sont donc primordiaux dans les actions d'atténuation du changement climatique. Or, les incertitudes sur les phénomènes issus du changement climatique et pouvant impacter la forêt et sa capacité à capter et à stocker le CO_2 (tempête, sécheresses, incendies, attaques sanitaires…) sont nombreuses. Aussi, la gestion forestière et la filière bois jouent un rôle important dans l'atténuation des effets du changement climatique en accompagnant les forêts dans leur processus d'adaptation et en continuant à stocker du CO_2 dans les écosystèmes forestiers, tout en fournissant un matériau durable qui permet de séquestrer durablement ce dioxyde de carbone dans les produits bois. Ce bois pourra enfin se substituer à d'autres matériaux et sources d'énergie plus émettrices de gaz à effet de serre. Plusieurs projets visant à mieux appréhender et à optimiser le rôle de la filière forêt-bois dans l'atténuation du changement climatique par le stockage du CO_2 ont récemment été menés.Une récente étude menée par l'IGN (Institut Géographique National) et l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) (Roux *et* al.*,* 2017) a notamment analysé l'impact de 3 scénarios de politique de prélèvement forestier sur le volume de CO_2 stocké par la forêt française, selon qu'il s'agisse du stockage dans l'écosystème forestier ou du stockage issu de la substitution énergétique/matériaux et la séquestration des produits bois.

Les trois scénarios illustrent le rôle fort joué par la filière forêt-bois dans l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050, rôle qui pourrait également s'accroître. Ainsi, dans les trois scénarios, on constate une légère augmentation des capacités de stockage de carbone ; c'est la répartition du stockage dans les compartiments du carbone forestier qui diffère. Cette étude tient également compte de trois types de perturbations liées au changement climatique qui peuvent affecter la forêt (hausse des températures, tempêtes, invasions biologiques) et donc sa capacité à stocker du carbone. Quelque soit la perturbation, l'étude conclue que « *la capacité de stockage de carbone de la filière forêt-bois à l'horizon 2050 demeure positive […] ; c'est une gestion active de la ressource qui permet d'amortir la chute de la capacité d'atténuation de la filière* ».

(24) La réserve utile maximale des sols (RUM) représente la quantité maximale d'eau qu'un sol peut contenir et est conditionnée par de nombreux paramètres comme la texture, la profondeur de prospection des racines, la charge en cailloux ou encore la densité apparente. Ce paramètre est une composante d'entrée au calcul de réserve en eau du sol (RU), qui représente l'eau réellement disponible dans le sol. Source : http://silvae.agroparistech.fr

2.4.3 Impact du changement climatique sur le rôle des forêts dans l'atténuation des risques naturels

En zone de montagne, la probabilité qu'un phénomène naturel se produise (influencé par la météorologie spécifique à ce milieu) y est plus importante que sur n'importe quel autre milieu naturel. Les phénomènes naturels propres à la montagne se déclenchent classiquement sous l'effet d'évènements climatiques (précipitations de pluie ou de neige, cycles de gel/dégel, fortes chaleurs, etc.) et prennent naissance sur des versants qui peuvent dominer des enjeux socio-économiques (habitats, infrastructures, voies de communication…). C'est la rencontre du phénomène naturel (type, intensité, période de retour) et des enjeux menacés qui déterminera alors le niveau de risque naturel.Comme vu précédemment, la forêt et les milieux naturels sont fortement représentés dans les Pyrénées puisqu'ils occupent une part importante de la surface du Massif des Pyrénées. Ainsi, sur l'ensemble de la chaîne, les forêts dominent entre 600 et 2 000 mètres (Villiers *et al.,* 2016).La forêt pyrénéenne joue donc un rôle important de protection contre les phénomènes naturels que l'on retrouve sur le Massif (avalanches de neige, ravinements, crues torrentielles, laves torrentielles, chutes de blocs et glissements de terrain). Elle est en mesure de limiter les déclenchements (fixation des sols par le système racinaire et fixation du manteau neigeux en zone de départ d'avalanche, limitation des ruissellements de surface) et d'en réduire les impacts (freinage, canalisation ou arrêt de blocs rocheux ou d'avalanches en pente moyenne).

Figure 2.4.4. Arrêt d'un bloc rocheux par un hêtre. Source : S. Chauvin, FORESPIR

L'analyse de l'impact du changement climatique sur le rôle de protection des forêts intègre deux approches : la dynamique naturelle des milieux forestiers et les risques biotiques et abiotiques pouvant affecter les milieux forestiers. En effet, toutes les formations végétales et toutes les essences forestières ne « protègent » pas de la même façon contre les risques naturels. Or, le changement climatique peut influencer la façon dont la couverture végétale va évoluer, mais peut également entraîner toute une série de facteurs ne dépendant pas de la dynamique naturelle de la végétation conduisant à une altération du rôle de protection des forêts. Ainsi, le mode de gestion des peuplements forestiers est un élément clé pour éviter le déclenchement de phénomènes naturels et limiter l'intensité de leurs impacts sur les enjeux socio-économiques du Massif.

Les caractéristiques de la couverture végétale d'une zone potentiellement exposée à un phénomène naturel ont une forte incidence sur sa capacité à maîtriser un aléa. A ce niveau, les deux paramètres importants dont il faut ici tenir compte sont le changement de type de végétation et le changement de l'essence dominante d'un peuplement forestier (Villiers *et al.,* 2016). Ainsi, une dynamique forestière stable permet au peuplement forestier de s'adapter progressivement aux changements tout en conservant les mêmes essences (du fait notamment de la diversité génotypique et de la sélection naturelle). Dans ce cas, si le peuplement forestier joue déjà un rôle de protection avéré (et sans modification des phénomènes naturels et des enjeux socio-économiques), sa maîtrise de l'aléa pourra se maintenir. A l'inverse, une dynamique forestière régressive, accompagnée d'une dynamique herbacée régressive vers des terrains peu végétalisés modifiera profondément la capacité de la végétation à maîtriser un aléa. Cependant, plusieurs dynamiques intermédiaires interviennent et l'évolution présumée des milieux doit également tenir compte des interventions humaines, des populations animales domestiques et sauvages, notamment des grands ongulés, de la pression pastorale et de leurs impactConcernant les changements possibles d'essences dominantes sous l'effet des changements climatiques, on peut globalement envisager une succession de type :

(25) La diversité génotypique désigne la variété d'information portée par le génome d'un organisme, contenu dans chaque cellule.

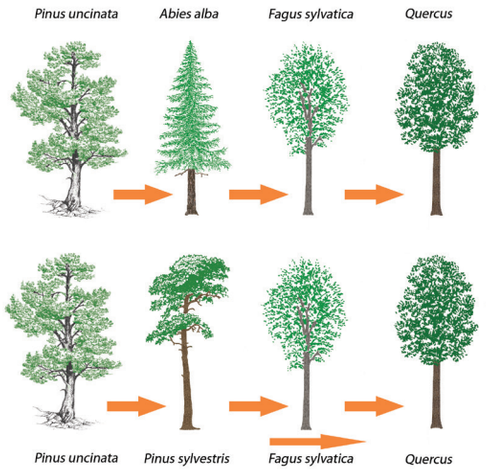


Figure 2.4.5. Type de succession possible d'essences sous l'effet des changements climatiques en zone de montagne Pyrénéenne. Source : FORESPIR d'après Villiers et al., 2016.

Néanmoins ces successions potentielles dans la dynamique forestière supposent une disparition totale de l'essence précédente, or, que ce soit à l'échelle des individus à « court terme » par l'acclimatation ou la plasticité phénotypique ou à l'échelle de la population à plus long termes par l'adaptation génétique, la forêt disposent de mécanismes d'adaptation (Rozenberg, 2015). Ainsi, l'augmentation du risque du fait de changements de végétation, dépendra en partie de la rapidité des changements climatiques et du temps d'adaptation et de la régénération disponible dont les arbres disposeront pour combler les éventuelles niches écologiques libérées (Villiers *et al.*, 2016). Au-delà des évolutions naturelles de la couverture végétale, un second élément doit être pris en compte si l'on veut mieux comprendre les impacts du changement climatique sur les forêts de protection : les risques biotiques et abiotiques pouvant affecter les milieux forestiers. Leur occurrence ou leur intensité peuvent être liés aux modifications climatiques (tempêtes, incendies, sécheresses, gelées, vagues de chaleur), ou biologiques (insectes ravageurs, pathogènes, grands ongulés…) et sont à même de modifier la capacité de la forêt à maîtriser des phénomènes naturels (indépendamment de la façon dont évolueront ces phénomènes face au changement climatique). En dehors de toute intervention humaine, ces deux éléments (dynamique naturelle et risques biotiques et abiotiques), intimement liés aux évolutions climatiques, conditionnent ainsi grandement le rôle des forêts dans l'atténuation des risques naturels. A couvert forestier suffisant, la composition et la structure des peuplements influencent l'occurrence et l'intensité d'un phénomène naturel : par exemple, les troncs des feuillus étant davantage résistants aux chocs, leur progression au détriment des conifères dans les zones de montagne pourrait améliorer la protection contre les chutes de blocs, tandis que la remontée de l'aire de présence des résineux au-delà de l'étage subalpin, permettrait de limiter les départs d'avalanche en contribuant à mieux stabiliser le manteau neigeux tout en limitant les départs d'éboulement (*INTERREG CLIMCHALP, 2008*).

Dans tous les cas, la dynamique naturelle des peuplements forestiers de montagne est très difficilement prévisibles (car dépendant d'une multitude de facteurs intervenant sur le très long terme). Ces évolutions nécessitent donc une vigilance de la part des gestionnaires forestiers qui peuvent améliorer le rôle de protection de la forêt s'ils interviennent à temps sur les peuplements dont le rôle de protection diminue. Dans un contexte où la demande sociale vis-à-vis de la forêt de protection ne cesse de croître, ce rôle protecteur doit être accompagné par une méthode de diagnostic et des préconisations d'interventions sylvicoles adaptées.

ENCADRÉ 2.4.1. LE GUIDE DE GESTION DES FORÊTS DE PROTECTION DES PYRÉNÉES

Le projet INTERREG POCTEFA 2007-2013 « OPCC », a permis de concevoir le « Guide de gestion des forêts pyrénéennes à rôle de protection ». Ce document technique a pour objectif de permettre aux gestionnaires d'identifier les itinéraires sylvicoles à mettre en œuvre lorsque deux conditions sont réunies : la présence d'un risque naturel avéré et une régression de la maîtrise des aléas par la végétation. Ce guide s'applique à l'ensemble des Pyrénées andorranes, espagnoles et françaises et traite de la gestion des forêts à rôle de protection contre les aléas naturels, mais sans rôle de production.

Sa structure permet au lecteur de

1) disposer d'un corpus d'information sur les phénomènes naturels et le rôle de la végétation

2) évaluer le niveau de risques naturels sur une zone en croisant les niveaux d'aléas et d'enjeux,

3) évaluer l'indice de maîtrise des aléas des peuplements forestiers en place et4) selon le niveau de maîtrise des aléas, d'identifier quelles actions doivent être mises en place pour maintenir un niveau de maîtrise des aléas suffisant par les peuplements forestiers.

2.4.4 Altération des conditions de santé des forêts et possible déséquilibre avec les communautés d'agents pathogènes

De longues dates, l'Homme s'est inquiété de l'état sanitaire des arbres et plus largement des forêts, le bois et les produits forestiers étant des ressources essentielles à sa subsistance (alimentation, chauffage) puis à son développement (construction, chimie vert). Plus tard, au début des années 1980, différents phénomènes biotiques (attaques d'agents pathogènes) ou abiotiques (notamment climatiques) ont conduit à une détérioration progressive de l'état de santé de certaines forêts en Europe. Ces phénomènes ont suscité une préoccupation générale de la société et ont ainsi amené les forestiers à proposer des méthodes de suivi des écosystèmes forestiers.

Le réseau européen de suivi systématique des écosystèmes forestiers

Bien que plusieurs méthodes aient été développées, dans les années 1980, l'idée d'un réseau structuré de suivi de l'état sanitaire des forêts s'est progressivement imposée. Plusieurs pays européens s'en sont dotés de manière concomitante de sorte que, par une circulaire européenne de 1986, les dispositifs nationaux similaires de chaque pays se sont structurés en un réseau européen de suivi systématique des écosystèmes forestiers (Nageleisen et Taillardat, 2016).

Ainsi, depuis maintenant une vingtaine d'années on évalue chaque année l'état sanitaire des arbres de plus de 5000 placettes en Europe.Ce réseau dispose de deux niveaux selon la complexité et l'exhaustivité des paramètres suivis :

- Niveau I : suivi statistique systématique de placettes implantées aux nœuds d'une maille carrée de 16 km de côté ;

- Niveau II : suivi plus précis sur certaines parcelles expérimentales d'un ensemble de paramètres dendrométriques, sanitaires, écologiques, stationnels, météorologiques… afin de comprendre l'influence des paramètres les uns avec les autres.

Focus sur le Massif pyrénéen

En el conjunto de la cordillera pirenaica existen 168 parSur l'ensemble du Massif pyrénéen, ce sont 168 placettes du réseau européen dont les données sont mobilisables (Rouyer et al., 2014). Ces placettes permettent, chaque année, de faire le bilan de l'état sanitaire des arbres sur placettes fixes et de mettre en évidence des tendances régionalisées ou par essence. Plusieurs paramètres sont ainsi été étudiés : le déficit foliaire, la décoloration foliaire, la mortalité de branches et la mortalité d'arbres.Du fait de changements récents dans les protocoles de relevés, concernant la décoloration foliaire et la mortalité des branches, l'historique de données comparables ne remonte

	Nivel I	Nivel II	Total
Andorra	11	3	**14**
España	98	4	**102**
Francia	45	7	**52**
Total	**154**	**14**	**168**

Tableau 2.4.1. Répartition des placettes du réseau européen de suivi des écosystèmes forestiers sur le Massif des Pyrénées. Source : Rouyer et al., 2014

(26) Les paramètres dendrométriques désignent les caracteristiques physiques mesurables et quantifiables des arbres (comme le diametre, la circonférence, la hauteur, le volume, l'âge) et des peuplements forestiers (comme la densité, la hauteur moyenne, le volume moyen, la surface terrière, l'accroissement moyen).

qu'à 2011 et ne permet pas de cerner des tendances concernant l'évolution de ces paramètres. Ainsi, le paramètre le plus à même de servir d'indicateur des effets du changement climatique sur les peuplements forestiers est le déficit foliaire. En effet, en situation de stress, les arbres perdent une partie de leurs ramifications. Ramifications qu'ils peuvent recréer (résilience) par le développement de bourgeons latents, à la faveur de conditions climatiques plus favorables (Drenou, 2012). Ce paramètre dispose d'un historique de données assez important, puisqu'il est suivi depuis 1997 dans le Réseau européen de suivi systématique des écosystèmes forestiers, La valorisation de ces données a permis, d'une part, d'étudier les évolutions temporelles concernant les espèces, mais également d'identifier de potentielles différences spatiales dans la réaction des écosystèmes forestiers (Rouyer *et al.,* 2014).Plusieurs tendances issues du travail d'analyse réalisé dans le cadre du projet INTERREG POCTEFA « OPCC » sur les données mobilisables des placettes du réseau européen peuvent se dessiner (OPCC-CTP, 2013).Si le taux de mortalité des arbres reste faible (inférieure à 0,5 % / an, à l'exception de 2004 suite aux attaques de scolytes succédant à la canicule de 2003), quelques signes de dégradation commencent à être perceptibles : déficit foliaire et mortalité de branches dans la partie supérieure des houppiers (Goudet, 2015).En effet, d'après les données du Département Santé Forêts, le déficit foliaire tend à augmenter notamment en zone méditerranéenne (Maaf et IGN, 2016) mais également méditérranéo-pyrénéenne (Rouyer *et al.,* 2014 ; Goudet, 2015).

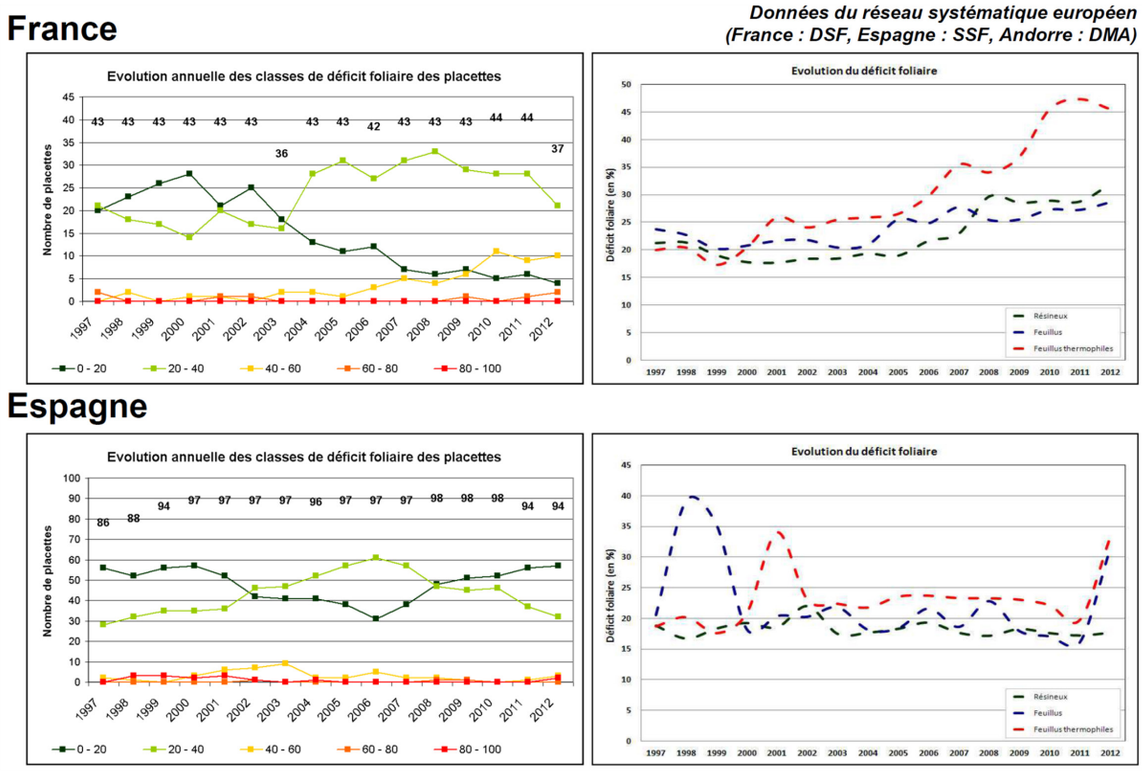


Figure 2.4.5. Evolution et tendances du déficit foliaire (période 1997-2012) différenciées par pays et par groupes d'essences à partir de la base des données du réseau européen. Source : Rouyer et al., 2014.

(27) Bourgeon qui ne développe pas l'année de sa formation et peut être dans un état végétatif ou se développer après un événement.
(28) Les scolytes désignent diverses espèces et genres de xylophages de coléoptères qui participent à la décomposition du bois mort, mais ils peuvent également attaquer plusieurs espèces d'arbres vivants et causer des dommages importants pouvant entraîner la mort de l'arbre.

Cette hausse est particulièrement marquée depuis le début des années 2000 et tendrait à toucher les feuillus dits thermophiles qu'ils soient à feuillage persistant comme le chêne vert (*Quercus ilex*) et le chêne-liège (*Quercus suber*) ou à feuillage caduque comme le chêne pubescent (*Quercus pubescens*), voire le châtaignier (*Castanea sativa*). Ce même rapport fait état sur la même période d'une constance du déficit foliaire pour le chêne sessile *(Quercus petraea)* et le chêne pédonculé (*Quercus robur*) et d'une légère augmentation pour les résineux : épicéa commun (*Picea abies*), sapin pectiné (*Abies alba*), douglas (*Pseudotsuga menziesii*) et pin maritime (*Pinus pinaster*) (*Maaf-IGN, 2016*).

Par ailleurs, le réseau des correspondants observateurs de la santé des forêts permet d'enregistrer l'apparition et l'impact des différents ravageurs.Ainsi a-t-on pu constater depuis 1989 l'impact croissant de pathogènes comme Diplodia sapinea (*Sphaeropsis sapinea*) sur les pins après les épisodes de sécheresse et les orages de grêle. Le suivi des cycles des insectes défoliateurs montre également que les pics de défoliation sont parfois accentués par les conditions climatiques (chenilles processionnaires des pins). Autre exemple, la présence croissante de la maladie des bandes rouges (*Dothistroma septospora*) limite les plantations de pin laricio sur la partie ouest de la chaîne des Pyrénées. Enfin, une attention particulière est portée sur l'arrivée de ravageurs exotiques, notamment les nématodes du pin qui font l'objet d'un plan de suivi européen.

Craintes et perspectives

Les principaux facteurs explicatifs qui ressortent sont les variables d'alimentation en eau de l'année en cours mais également des deux années précédentes : précipitation et différence entre précipitation et évapotranspiration (Ferretti et al., 2014 à Maaf-IGN, 2016). Ce qui confirme le rôle prépondérant du changement climatique et son impact sur les écosystèmes forestiers à long terme si le régime des précipitations et des températures tend à changer.

Au-delà de la dégradation sanitaire des arbres, une amplification du phénomène de dépérissement fait craindre des mortalités importantes au sein de certaines essences moins adaptées et en conséquence des modifications des cortèges floristiques des écosystèmes avec « migration » des aires de distribution plus au Nord ou en altitude (Bertrand et al., 2011).

Mentionnons tout de même que la variabilité génétique des arbres peut être un atout primordial vis-à-vis du changement climatique et que la gestion peut aider à anticiper les bouleversements attendus en adaptant d'ors et déjà la sylviculture et le choix des essences pour les interventions forestières des années à venir.

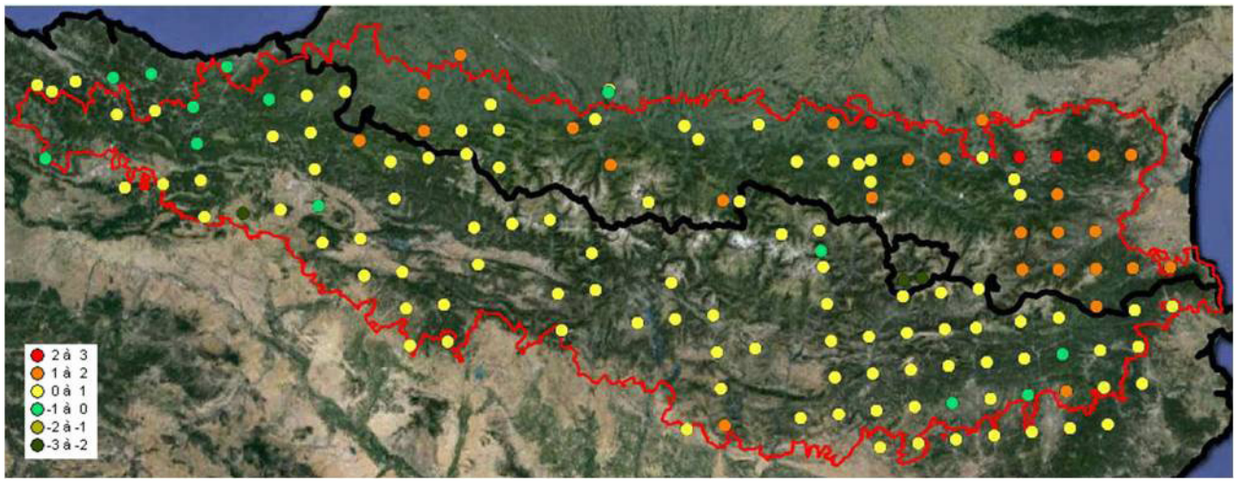


Figure 2.4.6. Coefficient de pente de la régression linéaire du déficit foliaire (période 1997-2012) sur les placettes du réseau européen. Source : Rouyer et al., 2014.

ENCADRÉ 2.4.2. ARCHI, UNE NOUVELLE MÉTHODE DE DIAGNOSTIC SANITAIRE BASÉE SUR L'ANALYSE DE L'ARCHITECTURE DES ARBRES

Les dépérissements des arbres ne sont pas tous fatalement irréversibles. Des phénomènes de résilience existent. La méthode ARCHI base son diagnostic sur la caractérisation de cette dynamique de retour à la normale et l'observation des différentes réactions physiologiques architecturales. La méthode ARCHI est développée depuis quelques années par l'Institut pour le Développement Forestier (IDF) en partenariat avec le CIRAD (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) et le DSF (Département Santé Forêts).

Son principe est de réaliser deux séries d'observations. La première concerne les symptômes de dégradation du houppier (ramification appauvrie, mortalité…) ; la deuxième porte sur les processus de restauration du houppier, en particulier le développement de gourmands. L'étude du rapport de force entre ces processus antagonistes - dégradation et restauration - permet de porter un diagnostic sur l'arbre. Par simplification, le nombre de résultats possibles a été limité à cinq : l'arbre sain, l'arbre stressé, l'arbre résilient, l'arbre en descente de cime et l'arbre en dépérissement irréversible (Lebourgeois *et al.,* 2015).

La méthode ARCHI se décline essence par essence. Aujourd'hui, plusieurs essences bénéficient déjà de clés de détermination ARCHI (*Quercus robur, Quercus petraea, Quercus pubescens, Abies alba, Pseudotsuga menziesii, Castanea sativa*) et d'autres vont pouvoir être développées et traduites en castillan dans le cadre du projet INTERREG POCTEFA CANOPEE *(Fagus sylvatica, Pinus sylvestris, Pinus uncinata, Pinus nigra subsp. salzmanii*).

2.4.5 Impact du changement climatique sur le risque d'incendies de forêt dans les Pyrénées

L'occurrence et la propagation des grands incendies dépendent de l'existence de sources d'inflammation, du volume et de la continuité du combustible et de son humidité. Historiquement, les Pyrénées n'ont pas été affectées par de grands incendies, du fait notamment des conditions climatiques propres aux milieux montagneux et à l'humidité des combustibles liée à ces conditions. A titre d'exemple, en Catalogne, la limite altitudinale à partir de laquelle on observe une diminution importante de la probabilité d'un incendie de forêt est évaluée à 700 mètres (Gonzalez *et al.,* 2006). En revanche, le nombre de départs de feu à certaines époques de l'année, la continuité et le volume de combustible en zone Pyrénéenne est similaire (voire dans certains cas supérieur) aux zones méditerranéennes limitrophes, de même que le nombre de départs de feu naturels (causés par la foudre) (González-Olabarria *et al.,* 2015). Actuellement, une grande partie des incendies qui ont lieu dans les Pyrénées est généralement causée par les activités en relation avec la gestion des pâturages (González-Olabarria *et al.,* 2015). L'abandon des activités agro-pastorales, qui s'est principalement produit au cours du XXème siècle, a conduit à un embroussaillement des zones pastorales de moyenne et de haute montagne (Améztegui *et al.,* 2010), augmentant ainsi la quantité et la continuité du combustible. Le facteur qui détermine le déclenchement et la propagation d'un feu est la teneur en eau du combustible. Ainsi, un accroissement de la température et une durée plus longue de la période de sécheresse estivale peuvent augmenter la disponibilité du combustible et le risque d'incendie, en augmentant par là-même la fréquence des années « à risque » (Moriondo *et al.,* 2006).

Actuellement, une grande partie des incendies en haute montagne a lieu durant l'hiver, quand les froids hivernaux ont asséchés l'herbe et les zones de broussailles. Il est ainsi prévu qu'une « continentalisation » du climat des Pyrénées, avec la diminution de la couverture neigeuse, augmente le risque d'occurrence et de propagation de grands incendies. Par conséquent, si l'on ne peut assurer que le régime des incendies sera similaire aux zones limitrophes (davantage méditerranéennes), on ne peut néanmoins pas exclure que dans le futur l'occurrence des incendies estivaux soit plus étendus et sévères (Figure 2.4.7).

La végétation des Pyrénées, en comparaison avec la végétation méditerranéenne, n'a pas évoluée en même temps que des feux dévastateurs. Actuellement, la majorité des incendies dans les Pyrénées sont relativement peu étendus et se propagent rapidement, tout en affectant peu la réserve de graines et le sol. Bien que les connaissances sur la réponse des espèces Pyrénéennes (végétales et animales) aux grands incendies soit peu abondantes, l'augmentation de la sévérité des incendies aura un impact significatif sur la structure et la composition de la végétation, en augmentant l'érosion des bassins versant, le risque avalancheux et torrentiel. L'extension probable des grands incendies pourrait entrainer une réduction de la surface forestière et, par conséquent, une homogénéisation du paysage. Cela aura sans le moindre doute un effet négatif sur la biodiversité, la protection contre les risques naturels, la beauté des paysages et donc le tourisme sur les territoires

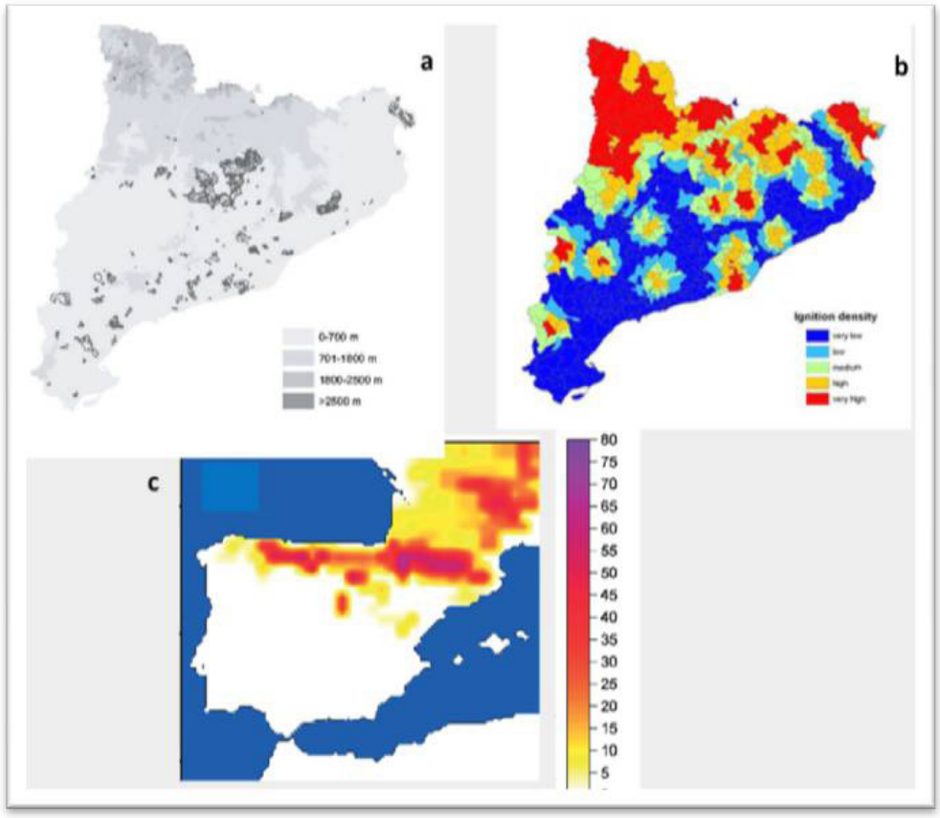


Figure 2.4.7. Le régime des incendies en zones Pyrénéennes (ex. Catalogne), est défini par le régime des précipitations (a: Gonzalez et al., 2006), et les activités agropastorales qui déterminent le nombre de départs de feu hivernaux (b: densité des départs de feu causés par les écobuages, dans Gonzalez-Olabarria et al., 2015). Mais ces facteurs peuvent être modifiés par une plus grande récurrence des années « à risque d'incendie » (c: pourcentage de changement dans le nombre d'années à haut risque d'incendie pour un scénario de changement climatique B2, selon Moriondo et al., 2006)

affectés (voir chapitre 3.1). Un autre aspect à prendre en compte est la perception du risque de la part des touristes potentiels. Si l'impact du risque d'incendie n'a pas fait l'objet d'une étude approfondie en Europe, aux États Unis il a été observé une relation directe entre l'augmentation des incendies durant une année d'une part et la diminution de l'affluence touristique et des pertes économiques du secteur hôtelier d'autre part (Thapa *et al.,* 2004). La lutte contre les incendies dans les Pyrénées requiert une meilleure prévision du niveau de risque et du comportement d'un éventuel feu ainsi qu'une gestion active du combustible dans les zones clés (Encadré 2.4.3). La météorologie en zones de montagne est très variable et, en général, on ne dispose que de peu d'information sur sa variabilité spatiale. Par conséquent, la fiabilité de la prédiction météorologique est très faible à fine échelle. L'utilisation traditionnelle du feu est depuis toujours, dans les Pyrénées, un instrument pour améliorer les pâturages et modifier la distribution et la composition de la végétation (Montané *et al.,* 2009). L'activité agricole passée et le pastoralisme jusqu'à aujourd'hui ont conduit à créer un paysage en mosaïque, caractéristique de nombreuses vallées et de la haute montagne Pyrénéenne. La conservation du paysage et par conséquent la diminution du risque d'incendie, passent par une valorisation économique plus forte des activités agricoles, pastorales et forestières existantes dans les zones de montagne, principalement par une meilleure reconnaissance et mise en valeur de la qualité de ses produits. De plus, la lutte contre les incendies requiert une gestion active des zones clés pour éviter la propagation et diminuer la sévérité des grands incendies de forêts (Casals *et al,* 2009).

2.4.6 Conclusions et recommendations

Du fait de sa situation orientée Est-Ouest, le Massif des Pyrénées complique la migration que les espèces montagnardes pourraient opérer en réponse au changement climatique (en limitant les remontées des espèces du sud vers le nord). Malgré cela, il existe peu d'études globales sur les impacts du changement climatique sur les forêts Pyrénéennes intégrant l'ensemble de son gradient Est-Ouest et Nord-Sud. Un travail important est actuellement mis en œuvre dans le cadre de l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique pour combler ces lacunes. La forêt des Pyrénées a un lien étroit avec l'évolution de la société rurale. De nombreux enjeux socio-économiques sont ainsi directement liés à l'évolution des milieux naturels et des facteurs qui les conditionnent. Le changement climatique, en modifiant les températures et la pluviométrie, altère le régime des perturbations, qu'elles soient biotiques (pathogènes, maladies...) ou abiotiques (incendies, tempêtes…) et impacte donc fortement la dynamique et le fonctionnement des écosystèmes forestiers. Il ne faut cependant pas omettre d'autres facteurs qui ont des effets à plus court terme sur les forêts, qu'il s'agisse de la pression cynégétique (véritable enjeu pour la régénération), la diminution de l'activité pastorale traditionnelle ou plus simplement la gestion forestière à des fins de production de bois. Changement de structure, de composition, d'état sanitaire, d'aires de répartition géographique, vulnérabilité à des phénomènes extérieurs (pathogènes, phénomènes climatiques…) sont autant d'effets (positifs ou négatifs) qu'il convient d'anticiper et d'accompagner car ils conditionneront l'évolution du couvert végétal Pyrénéen et pourront induire une modification importante de toutes les composantes de la multifonctionnalité de notre forêt de montagne.

Prédire la réponse des forêts face au changement climatique est un exercice compliqué et incertain qui requiert un volume important de connaissances, d'autant plus que l'on sait que les réponses ne sont pas aussi rapides et linéaires que nous l'envisagions initialement.

Principaux défis

La forêt et sa gestion doivent se concevoir à long terme. Les décisions prises aujourd'hui conditionneront nos forêts de demain.Aussi, afin d'augmenter la résilience des forêts Pyrénéennes face aux effets négatifs du changement climatique, il convient :

- d'améliorer les connaissances à l'échelle Pyrénéenne des effets et impacts du changement climatique sur les forêts (en particulier les plus vulnérables à court et moyen terme) et les processus d'adaptation (naturels ou anthropiques),

- de maintenir et développer les activités agricoles, pastorales et sylvicoles sur les zones de montagne ; activités garantes d'une gestion durable des milieux aux effets multiples : diminution du volume et de la continuité des combustibles, mosaïque d'habitats plus résilients, limitation des risques et accroissement de la résilience des forêts en cas d'accidents sanitaires ou climatiques…,

- de favoriser le porter à connaissance des avancées techniques et scientifiques à destination des publics non spécialistes.

Les acteurs Pyrénéens, au premier rang desquels les propriétaires, les scientifiques, les gestionnaires et les pouvoirs publics, doivent donc œuvrer dès aujourd'hui et urgemment pour que la forêt puisse évoluer dans les meilleures conditions possibles et ainsi s'adapter aux changements.

Recommandations

Mesures douces [29]

· Expérimenter et faire connaître différents modèles de gestion forestière adaptative pour augmenter la capacité de résilience des forêts face à des évènements climatiques défavorables répétés et/ou extrêmes.

- Pérenniser et déployer le réseau d'observation de l'évolution phénologique des forêts pyrénéennes (périodes de débourrement).

- Promouvoir les synergies entre les différents processus d'observations et de suivi (télédétection, sciences participatives…).

- Approfondir les connaissances et les expérimentations sur la variabilité génétique

(29) Les mesures douces ou mesures non structurelles pour réduire les effets négatifs du changement climatique. Cette catégorie de mesures est typiquement représentée par les études de recherche visant à couvrir des lacunes de connaissance ou à enrichir les bases de connaissance sur le changement climatique, ses effets et les secteurs les plus vulnérables. Cette catégorie comprend aussi le développement de méthodologies et de systèmes spécifiques pour réduire les risques inhérents au changement climatique (ex. Développement d'un Early Warning System transfrontalier pour la gestion des vagues de chaleur dans le Massif)

des arbres afin de permettre d'anticiper les potentielles altérations en adaptant dès maintenant la sylviculture et le choix des espèces pour les interventions forestières des années à venir.

• Identifier et mettre en valeur les possibles pertes d'espèces et d'habitats forestiers vulnérables au changement climatique afin d'évaluer l'appauvrissement génétique dans les zones de montagne.

• Promouvoir le développement d'un dispositif de surveillance, d'alerte et de réponse opérationnelle face aux ravageurs forestiers et aux pathologies pouvant affecter les forêts Pyrénéennes.

• Améliorer les connaissances sur les impacts du changement climatique sur les écosystèmes forestiers dans leur ensemble.

• Communiquer à destination du grand public et des élus locaux sur les interactions entre forêt et changement climatique (impacts potentiels, utilité, adaptation…) et sur le rôle joué par les gestionnaires

• Améliorer les capacités de prévision du risque incendie en développant un indice adapté aux spécifités du Massif (végétation, météorologie, topograpie…).

• Affiner les connaissances sur les zones de compatibilité climatique et sur les aires de distribution potentielle des forêts des Pyrénées pour identifier les zones les plus vulnérables et ainsi guider les propriétaires et gestionnaires dans leurs choix sylvicoles.

• Accompagner les propriétaires forestiers pour favoriser les essences adaptées aux stations qui satisfont à leurs exigences en matière de disponibilité en éléments nutritifs, en oxygène et en eau

Mesures vertes [30]

• Renforcer et appuyer la gestion forestière durable pour diminuer la vulnérabilité des forêts face à des perturbations naturelles : favoriser une sylviculture dynamique afin de minimiser les risques d'accidents et à optimiser la résilience des peuplements.

IDÉES CLÉS

• Les forêts pyrénéennes fournissent de multiples biens et services : production de bois et autres produits forestiers non ligneux, captage et stockage du CO2, la protection contre les risques naturels, un réservoir de biodiversité, l'accueil du public…

• Le changement climatique aura de forts impacts sur le fonctionnement des forêts des Pyrénées du fait notamment de l'augmentation des températures et des modifications du régime des précipitations (augmentation de la période de végétation, modification de la productivité, changement dans la distribution des espèces…). Le changement climatique peut également avoir des conséquences dont les effets peuvent impacter les forêts pyrénéennes (incendies, ravageurs, pathogènes, tempêtes…).

• En plus des effets du changement climatique, d'autres facteurs du changement global (usage des sols, pratiques…) impactent fortement la dynamique et le fonctionnement des forêts pyrénéennes. La gestion forestière est un levier fondamental de l'adaptation des forêts au changement climatique : « par son action aujourd'hui, le forestier prépare la forêt de demain ».

• Promouvoir l'utilisation du bois local (transformé localement) comme matériau : cela garantit une séquestration « sécurisée » du CO2 et permet de limiter l'utilisation d'autres matériaux à plus fort impact en gaz à effets de serre.

• Promouvoir l'utilisation du bois énergie local en substitution d'énergies plus émettrices de gaz à effets de serre (l'impact carbone de la combustion du bois est nul car cela libère le CO2 qui a été stocké par l'arbre tout au long de son développement).

• Optimiser la gestion des milieux naturels des zones nouvellement exposées au risque Incendie en promouvant une gestion active (notamment sylvicole et agropastorale) afin de limiter le volume et la continuité de combustibles sur des zones à risque.

(30) Les mesures vertes ou basées sur les services écosystémiques : ce type de mesures comprend toutes les mesures, bonnes pratiques, études ou initiatives ayant pour principe l'utilisation des services écosystémiques rendus par les différentes ressources naturelles pour pallier les effets négatifs du changement climatique (par ex. pratiques sylvicoles conservatrices pour accroître la capacité des forêts des Pyrénées à réduire les risques hydrogéologiques).

2.5. Écosystèmes sensibles de haute montagne: lacs et tourbières

Coordinateurs: Blas Valero Garcés (IPE-CSIC)
Auteurs et co-auteurs: David Amouroux (U. Pau- Pays de L´Adour), Laure Gandois (Laboratoire EcoLab, CNRS, UPS, INPT), Didier Galop (Laboratoire EcoLab, CNRS, UPS, INPT), Gaël Le Roux (Laboratoire EcoLab, CNRS, UPS, INPT), Lluis Camarero (CEAB-CSIC), Jordi Catalán (CREAF-UAB), Jesús Miguel Santamaría (U. Navarra), David Elustondo (U. Navarra), Alberto de Diego (UPV-EHU), Ana Moreno (IPE-CSIC) Fernando Barreiro – Lostres (IPE-CSIC), Pilar Mata-Campo, (IGME), Pablo Corella (IFQSH-CSIC) Penélope González – Sampériz (IPE-CSIC), Anna Avila Castells (CREAF-UAB), Olaia Liñero , (UPV-EHU), Marisol Felip (U. Autónoma Barcelona),

RÉSUMÉ

Les lacs et les tourbières de haute montagne sont des éléments emblématiques des paysages pyrénéens. Ils sont très vulnérables aux changements climatiques et à l'augmentation des pressions humaines. Depuis des millénaires, ils jouent un rôle essentiel de maintien de la biodiversité, contribuent au stockage de carbone, constituent des ressources en eau. Ces zones humides ont constitué des lieux nécessaires pour l'activité pastorale et plus récemment elles sont devenues des ressources touristiques. Leur conservation dans le cadre d'un développement durable des montagnes est un défi et une occasion de sensibiliser le public aux effets du changement global sur ces territoires considérés à tort comme vierges de tout impact humain.

2.5.1. Caractéristiques des lacs et tourbières pyrénéens

Les lacs et tourbières de haute montagne dans les Pyrénées sont des éléments emblématiques du paysage pyrénéen, vulnérables aux récents changements climatiques et à l'augmentation de la pression humaine. Plus d'un millier de lacs de haute montagne ont été inventoriés dans les Pyrénées en fonction de divers critères d'altitude et de superficie (Castillo-Jurado, 1992 - superficie> 0,5 ha dans dans les étages de montagnes et alpins, principalement entre 2000 et 2500 m d'altitude). Les 17 plus grands lacs (le plus grand étant de 0,3 km^2) ont une surface totale de 7,87 km^2. Selon l'inventaire de Jurado Castillo (1992), le 75% des lacs ont une superficie de moins de 0,04 km^2 et leur bassin versant varie en superficie entre 0,1 km^2 (Gentianes, GavePau) et 32,6 km^2 (Bains Panticosa Gallego), avec une moyenne de 1,67 km2. En ce qui concerne la profondeur, deux types de lacs se distinguent: relativement peu profonds (<profondeur maximale de 10 à 15 m) et profonds (> 15 m). Au total il existe 90 lacs avec des profondeurs supérieures à 25 m, dont 47 dépassent les 40 m de profondeur.

Les tourbières sont des écosystèmes caractérisés par une accumulation de matière organique (turfigénèse) du fait des conditions anoxiques dues à une saturation en eau du milieu. Dans les Pyrénées, les tourbières sont généralement des bas-marais minérotrophes alimentées par les eaux de surface ou par les eaux souterraines. Leur formation dépend de la topographie et des conditions hydro-climatiques. Le retrait des glaciers à la fin de la dernière déglaciation a favorisé la formation de larges tourbières qui ont rempli les dépressions disponibles et accumulé de la matière organique jusqu'à aujourd'hui.Les petites tourbières de haute altitude sont généralement plus récentes et se sont par ex. formées dans des dépressions laissées par les activités humaines passées ou par paludification. Il n'existe pas d'inventaire exhaustif des tourbières des Pyrénées pour l'ensemble du Massif. Elles semblent moins nombreuses que dans d'autres montagnes au climat Atlantique similaire (Heras *et al.*, 2017). En particulier, les informations sur les petites tourbières (<1 ha) sont très limitées quoique potentiellement abondantes et associées à des petits lacs de montagne. Il existe également des tourbières développées à basse et moyenne altitude comme les tourbières en Navarre (Atxuri, Belate, Gesaleta et Baltsagorrieta) ou côté français dans les Pyrénées centrales (par ex. Bernadouze, et col d'Ech). Les données existantes sur l'épaisseur de tourbe accumulée dans ces écosystèmes au cours des derniers milliers d'années sont limitées à quelques endroits, de sorte qu'il n'y a pas d'estimation fiable du réservoir de carbone accumulé par celles-ci. La dynamique de ces écosystèmes de montagne originaire initialement du retrait glaciaire quaternaire est fortement conditionnée aux processus de la cryosphère dans leurs bassins versants (enneigement, fonte des neiges, dynamique des névés et du permafrost). Les caractéristiques de ces lacs et tourbières (haute altitude, hautes radiations solaires dont UV, ultra-oligotrophie due à la pénurie en nutriments, températures basses, présence d'une couche de glace pendant plusieurs mois, etc.) les rendent très sensibles au facteur climatique (régimes de température et de précipitations, vent, etc.) (Fig. 2.5.1). D'un côté, ces "sentinelles" des changements globaux situés sur le territoire pyrénéen sont extrêmement sensibles aux fluctuations climatiques et environnementales ainsi que la dégradation de leur bassin versant. D'un autre côté,

elles sont des archives environnementales avec leurs sédiments qui enregistrent les signaux des paysages, des évolutions des écosystèmes aquatiques ainsi que les processus biotiques et abiotiques ayant eu lieu dans les derniers mois et millénaires.

Les lacs et les tourbières fournissent des services au territoire pyrénéen au-delà leur qualité d'indicateurs du changement global. Au cours des dernières décennies, l'économie de nombreuses zones de montagne est devenue de plus en plus dépendante des activités touristiques liées aux sports d'hiver et à la randonnée estivale. Certains éléments uniques aux hautes montagnes tels que les glaciers, les ibones, les tourbières et les écosystèmes de la toundra alpine sont des éléments iconiques indispensables aux économies locales, avec toutefois des degrés de protection et mesures de conservation variables dans les différents territoires pyrénéens. Compte tenu de la grande importance des ressources en eau de haute montagne et de ces éléments paysagers singuliers pour de multiples secteurs (tourisme, agriculture, production d'énergie, environnement, approvisionnement en eau, etc.), la qualité des services fournis par les lacs et tourbières dépend directement des réponses de la cryosphère-hydrosphère-biosphère au changement climatique sur le territoire pyrénéen. La haute montagne est le château d'eau, la centrale électrique et le terrain de jeu de tous les territoires pyrénéens, une région avec des besoins croissants en ressources hydriques et énergétiques pour la consommation agricole et humaine.

2.5.2. Processus dans les lacs et tourbières de haute montagne dans un contexte de changement climatique

Les processus biogéochimiques dans les lacs et les tourbières de haute montagne sont déterminés par la nature extrême de ces habitats (Catalan et al., 2006). Les agences territoriales, les agences de l'eau et les services ministériels d'Espagne, de France et d'Andorre maintiennent des programmes d'analyse pour vérifier l'état écologique de certains lacs des Pyrénées (CHE: http://www.chebro.es/; ACA: http: // aca- web.gencat.cat/) Les eaux de haute montagne sont généralement très pauvres, avec une très faible teneur en sels dissous, oligotrophe et avec une grande transparence.Le type de bassin et le substrat géologique sont des déterminants de la composition chimique des eaux (formations carbonatées versus siliceuses) et du cycle du carbone (présence de

Figure 2.5.1. Cycles biogéochimiques dans les lacs et tourbières de haute montagne

(31) http://www.chebro.es/
(32) http://aca-web.gencat.cat/

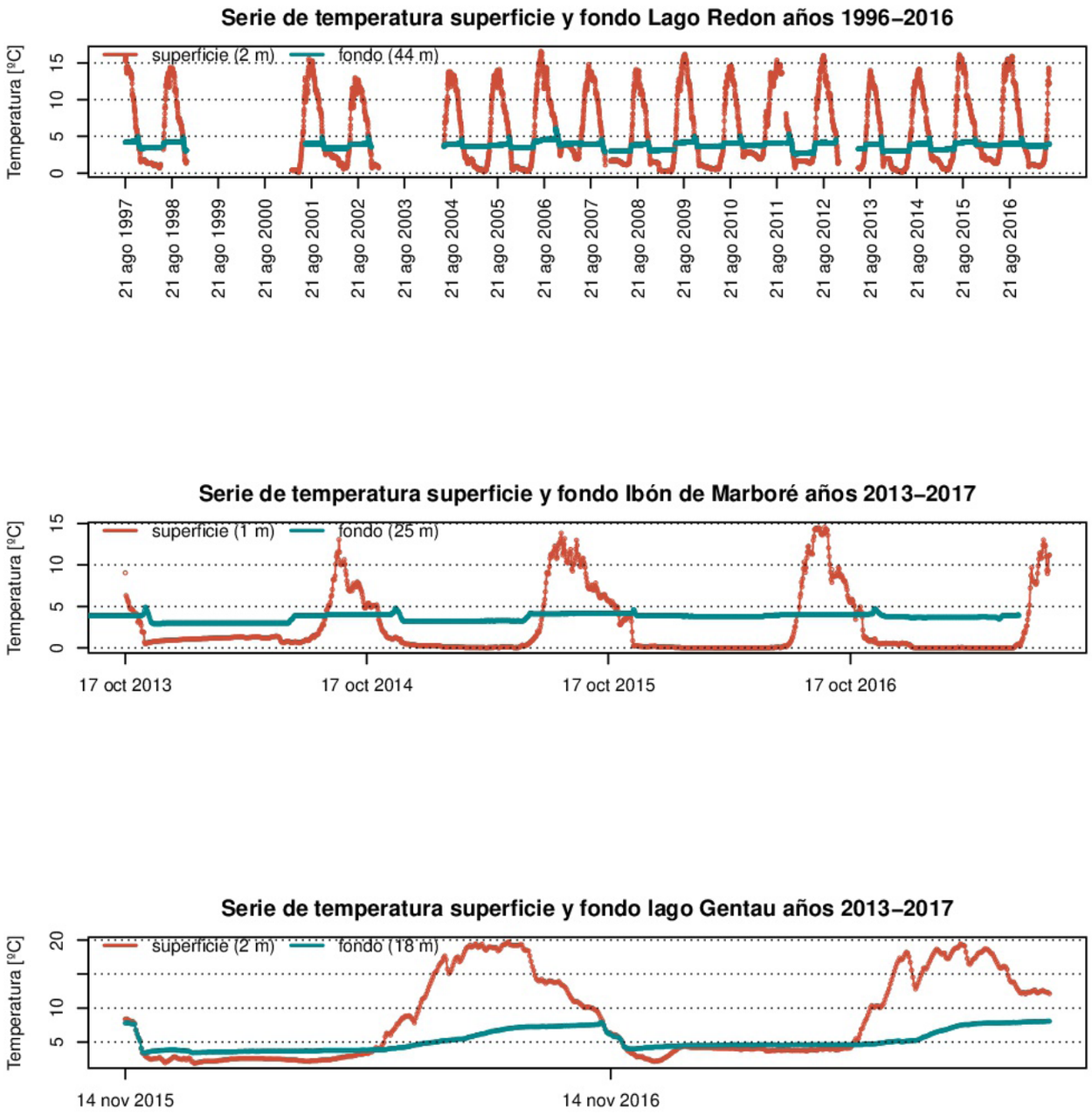


Figure 2.5.2. Profiles de température en surface et profondeur au lac Redon (1969-2016), Marboré (2013-2017) et lac Genteau (2013-2017).Source : Données issues du projet CLAM-IGME et REPLIM.

carbone organique dissous associé à l'abondance des sols dans le bassin). Les cycles biogéochimiques sont fortement contrôlés par le substrat (alcalinité, cycle du carbone), micro- et macrobiotes (nutriments) et par les dépôts atmosphériques (nutriments, contaminants). En particulier, le pH de l'eau est l'un des paramètres qui contrôle la présence de certaines microalgues et macrophytes. Le pH dépend de l'alcalinité et est lié au substrat du bassin (Catalan et al., 2006).

Selon une étude réalisée par l'été 2000 (Catalan *et al.,* 2006), 70% des lacs sont ultraoligotróficos TP <4,7 mg L-1), 22% oligotrophe (4,7 <TP <9,3 mg L-1) et 6% sont mésotrophes (9,3 <TP <31 µg L-1). Pendant la saison sans glace, la pénétration de la lumière atteint le fond dans plus de 75% des lacs, ce qui permet le développement de biotes autotrophes. Le rayonnement ultraviolet peut être très élevé dans ces systèmes, bien que leurs effets sur les micro-organismes indiquent des tendances différentes. Lakes et agissent de la tourbe comme accumulateurs dans les sédiments de contaminants organiques et inorganiques (métaux lourds) (Catalan *et al.,*1993; Camarero, 2003, Le Roux *et al.,* 2016). Plus de 75% des lacs étudiés (Camarero, 2003) montrent des facteurs d'enrichissement des métaux supérieurs à 1,5 démontrant l'effet de la pollution atmosphérique en haute montagne, plus élevé dans les Pyrénées centrales et orientales que dans les pays occidentaux (Fig. 2.5.3A).

Les sédiments dans divers lacs montrent que les dépôts atmosphériques de métaux lourds ont été importants à l'époque romaine, médiévale et contemporaine associés à l'activité minière et métallurgique et a diminué depuis la fin du XXe siècle, avec une réduction Pb essences (Camarero *et al.,* 1998). D'autre part, les autres polluants organiques ont augmenté au cours des dernières décennies (Arellano *et al.,* 2015). Les lacs pyrénéens ont subi une acidification modérée en raison des pluies acides produites durant la seconde moitié du XXe siècle (Camarero, 2017). Les cycles physiques annuels dans les lacs et tourbières montrent une grande variabilité saisonnière, selon la disponibilité de l'eau, régime de température saisonnière et les périodes de couverture de glace. Les cycles biologiques suivent le même schéma saisonnier, avec différentes phases de productivité maximale des communautés phytoplanctoniques (Camarero *et al.,* 1999 ; Felip et Catalan, 2000 ; Ventura *et al.,* 2000). Seulement dans certains lacs sont disponibles des séries de mesures limnologiques pluriannuelles (Redon, depuis 1996, Marboré depuis 2013, fig. 2.5.2, à partir de Sánchez et al, 2017). Les tourbières sont des écosystèmes essentiels dans l'hydrologie et le cycle du carbone dans les zones de montagne (Parish *et al.,* 2008). En eux, le carbone est stocké par l'accumulation de matière organique et agit comme des filtres pour l'eau (polluants, matière organique, particules du sol) qui assurent la qualité de l'eau dans les eaux d'amont

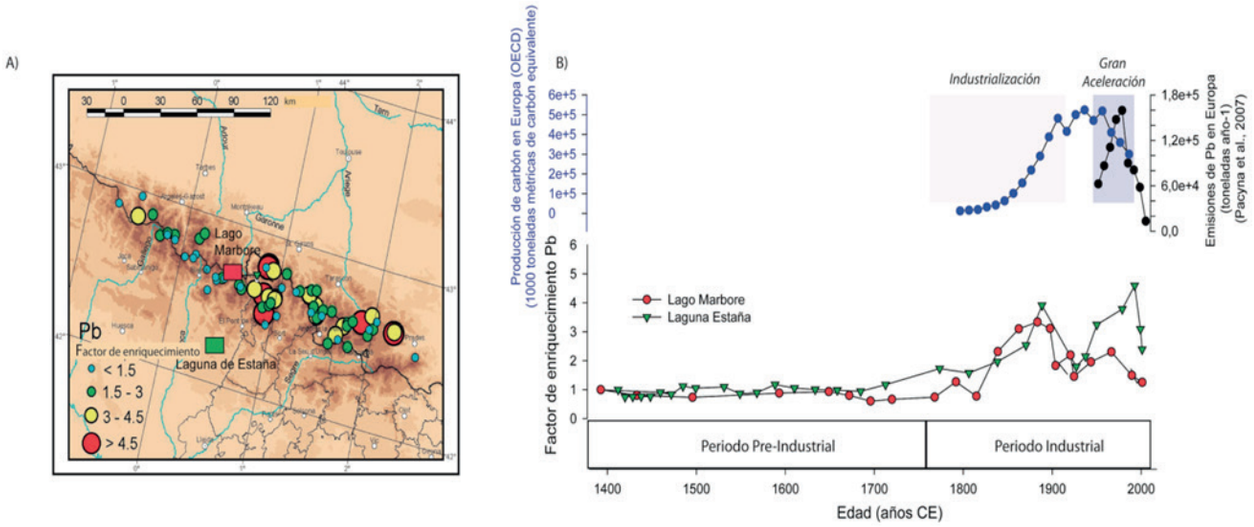


Figure 2.5.3. A. Distribution géographique du facteur d'enrichissement en plomb dans les sédiments de surface des lacs des Pyrénées. B. Facteurs d'enrichissement en métaux lourds dans les lagunes de Marboré et d'Estaña au cours des 600 dernières années. Source : Camarero, 2003

des bassins hydrologiques. Malgré leur extension relativement faible, ils apparaissent dans de nombreux bassins et conservent une biodiversité unique. Les tourbières à sphaignes des Pyrénées se situent à la limite sud de leur répartition géographique et sont donc très sensibles aux changements climatiques et anthropiques. Le cycle du carbone dans les tourbières de haute montagne est complexe et non quantifié. Les tourbières sont les écosystèmes terrestres les plus efficaces en tant que réserves de carbone. Les tourbières tempérées contiennent sept fois plus de carbone par hectare que tout autre écosystème. Les tourbières ont accumulée du carbone depuis des millénaires, mais les taux d'accumulation naturels inconnus tout au long de l'Holocène (dernières 11.700 ans), l'anthropocène et les variations possibles du XXe siècle son inconues en raison du réchauffement climatique. Un mineur et contrôlée par les processus environnementaux (inondations, feux, etc.) des échelles de temps, des tourbières peuvent potentiellement agir comme émetteurs de CH_4 et de CO_2 dans l'atmosphère ou les bassins versants (sous forme de carbone organique dissous ou particulaire). Enfin, les microenvironnements de ces écosystèmes contiennent une grande biodiversité. Pour connaître la résilience de ces écosystèmes aux changements climatiques et aux pressions anthropiques locales (déforestation, feux pour augmenter les pâturages, etc.), il est nécessaire d'identifier et de quantifier les processus sur une échelle annuelle et saisonnière.

2.5.3. Impacts attendus

Les zones d'altitude les plus élevées de toutes les montagnes du monde sont des zones où l'incidence du changement climatique est particulièrement élevée. Les principaux impacts attendus sur les lacs et les tourbières de haute montagne et leurs bassins de réception sont liés à l'altération de leurs caractéristiques physico-chimiques et biologiques en réponse à la variation de la disponibilité en eau et à l'augmentation des températures. À ces altitudes, non seulement la température de l'eau est importante, mais aussi la durée de la couverture de glace du lac et le manteau neigeux dans son bassin. Parmi les autres processus ainsi essentiels à caractériser, on compte les changements prévus dans le cycle de mise en glace et de dégel, dans le type et l'abondance de certaines communautés biologiques et dans la composition chimique de l'eau (alcalinité). Dans les bassins versants, la dégradation des névés et la disparition des sols gelés de façon saisonnière (pergélisol) entraînera des changements dans l'hydrologie de surface et la perte de communautés végétales relictuelles. Associés à des lacs et des tourbières, les communautés végétales des zones humides et névés, et de nombreuses espèces boréo-alpines à la limite de leur distribution sont particulièrement vulnérables à tout changement thermique ou modèle de précipitations. Certains services écosystémiques (qualité et quantité d'eau, tourisme) peuvent être affectés également. Les changements dans l'état trophique des lacs de haute montagne ont été détectés dans la plupart des montagnes du monde (Elser *et al.,* 2009 ; Camarero et catalans, 2012) et les causes ont été attribuées à la fois à des changements dans le régime thermique et des vents causée par le changement climatique ainsi que les changements dans les dépôts atmosphériques d'azote et de phosphore liés aux changements dans la circulation synoptique des masses d'air. L'augmentation attendue du rayonnement UV dans les zones de montagne peut avoir un effet important sur les communautés planctoniques des lacs comme le montrent des études dans l'Himalaya et les Alpes (Sommaruga *et al.,* 1999). Des études menées dans les Alpes autrichiennes ont montré que l'effet combiné de ces facteurs rend les lacs dans la gamme d'altitude entre 1500 et 2000 m ultrasensibles aux changements de température et de précipitations, car c'est dans cette gamme d'altitude où les changements dans la durée de couverture de glace et le manteau neigeux sont plus prononcés. En général, les lacs profonds ont une inertie thermique plus élevée, de sorte qu'ils devraient réagir plus lentement aux changements physiques (gradients de température et densité), chimique (salinité, l'alcalinité, pH, nutriments) et biologique (productivité primaire, composition des communautés biologiques). Les impacts attendus sur les lacs et les tourbières des Pyrénées en raison de la variabilité climatique chevauchent ceux causés par les activités anthropiques.

D'un point de vue historique, les lacs des Pyrénées, malgré leur éloignement, ont subi d'importants impacts anthropiques au cours des derniers millénaires. Le dépôt de métaux lourds remonte à l'époque romaine. Ceux qui sont situés à des altitudes plus basses ont vu leurs bassins versants déboisés depuis l'époque médiévale et soumis à une pression plus forte du bétail (González-Sampériz *et al.,* 2016). L'introduction du poisson est aussi une pratique ancienne (premières références au XVe siècle, Miró et Ventura, 2013). Au cours du XXe siècle, les principaux impacts ont été la construction de barrages hydroélectriques et l'augmentation du tourisme et des infrastructures liées aux sports d'hiver et d'été. Les impacts du changement climatique sur ces écosystèmes pyrénéens sont principalement associés aux changements de régimes thermiques. La tendance générale à une augmentation de la température moyenne dans les Pyrénées (2 ° C depuis la fin de petit âge glaciaire et avec un taux de 0,2°C / décennie depuis 1950) et la période a diminué avec la couverture de glace est un changement essentiel dans le régime thermique saisonnier des lacs. La plupart

des études indiquent que le réchauffement thermique a causé moins d'accumulation et réduit la durée de la couverture neigeuse dans la plupart des montagnes du monde, il est très probable que cet effet s'accélèrera très nettement dans le futur. Certains modèles (Schneider *et al.,* 2010) prévoient que la température de l'eau de surface des lacs (épilimnion) augmentera de plus de 10ºC au cours du 21ème siècle, en accord avec les observations disponibles. Ces projections de changements dans l'hydrologie, la couverture de glace et la température de l'eau dépassent les variations observées dans ces lacs au cours des 11700 dernières années (Holocène).Dans plusieurs lacs pyrénéens (Arreo, Basa de la Mora, Marboré, Montcortès, Redon) étudiés durant les derniers siècles grâce aux sédiments, des changements importants dans le flux de sédiments, la flore (algues, diatomées) et la faune (micro et macro-invertébrés) à la fin du petit âge glaciaire (fin du XIXe siècle) et dans les dernières décennies ont été documentés. Les causes de ces changements sont complexes et peuvent inclure des facteurs climatiques (augmentation de la température) et des facteurs anthropiques (dépôt atmosphérique accru de nutriments). Dans les Pyrénées, le lac Redon est l'un des meilleurs étudiés et montre une nette tendance a la croissance de la température moyenne de l'eau (accélérée au cours des dernières décennies) tout au long du XXe siècle (catalan *et al.,* 2002; III rapport CCC, 2016) . Ces changements de température, plus élevés en été et en particulier à l'automne, ont favorisé les espèces de diatomées planctoniques de floraison courte à l'automne (*Fragilaria nanana* et *Cyclotella pseudostelligera*) et aussi quelques chrisophytes formant des kystes au printemps. La durée de la couverture de glace contrôle également directement le type de communautés de crustacés planctoniques (Catalan *et al.,* 2009). Il manque de longues séries chronologiques pour enregistrer la dynamique dans le passé récent de ces écosystèmes et il est encore difficile à attribuer les changements observés au cours des dernières années aux fluctuations climatiques, l'impact anthropique ou les synergies attendues entre les deux. Il existe d'autres effets indirects des changements climatiques résultant de la fonte des glaciers et pergélisol persistant (permafrost), en particulier la libération de métaux traces ou de polluants organiques: une des causes est l'augmentation de la mobilisation des matières organiques et des polluants associés (Bacardit et Waiter, 2010). En plus de l'héritage et l'impact continu de certaines métaux traces, les effets du changement climatique peuvent amplifier à la fois leur remobilisation dans les réservoirs de ces écosystèmes en augmentant leurs taux de dépôt et transfert (Le Roux *et al.,* 2016).

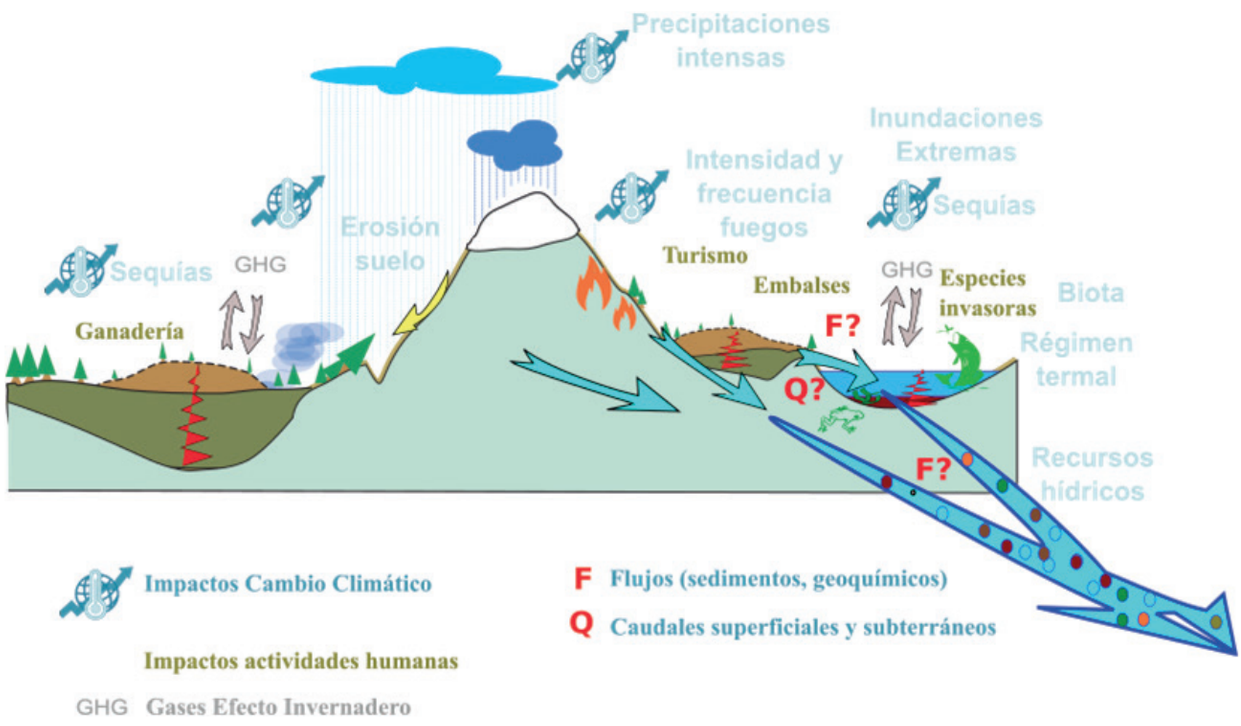


Figure 2.5.4. Impacts prévisibles dans les lacs et tourbières de montagne en raison des changements climatiques et des impacts anthropiques. Source : élaboration propre.

Dans les tourbières, les principaux impacts attendus du changement climatique sont: la dégradation des tourbières, la perte de zones inondées, l'inversement de l'effet de puits de carbone et la perte de services écosystémiques. Ces changements affecteront la capacité de ces écosystèmes à être des réservoirs de carbone, des régulateurs de la quantité et de la qualité des eaux et à sauvegarder la biodiversité. L'augmentation de la variabilité dans les précipitations de haute montagne augmentera la fréquence et l'intensité des sécheresses et des inondations, avec des changements possibles dans les zones inondées des tourbières. L'augmentation de la température prolongera la productivité en augmentant la durée de la saison de croissance. Les taux de décomposition de la tourbe augmenteront également, augmentant potentiellement les émissions de CH_4 et de CO_2. La fusion du pergélisol augmentera probablement aussi les émissions de CH_4 et entraînera une diminution de la concentration de carbone organique dissous dans les fleuves. Les changements hydrologiques affecteront également à la fois l'accumulation et la décomposition de la tourbe et l'émission de gaz à effet de serre, car les surfaces sèches émettent moins de CH_4 et plus de N_2O et de CO_2, par opposition aux zones inondées. L'élévation altitudinale de la limite de la forêt à la suite des températures estivales plus élevées peut entraîner l'expansion de la forêt dans les zones de tourbières ouvertes, entraînant une réduction de l'albédo et un renforcement positif du réchauffement de la planète. Une augmentation de la torrentialité peut augmenter l'érosion des tourbières, qui en outre peuvent être amplifiées par le drainage et le surpâturage. Des périodes de sécheresse plus intenses peuvent entraîner une augmentation de la fréquence des incendies et de leur intensité, bien que les activités humaines continuent d'être la principale cause des incendies. Les effets combinés du changement climatique et des changements locaux de l'hydrologie auront des conséquences importantes sur la répartition et l'écologie des plantes et des animaux qui habitent ou utilisent les tourbières. Les activités humaines augmentent la vulnérabilité des tourbières au changement climatique. En particulier, le drainage, la combustion ou le surpâturage amplifieront les émissions de carbone.

2.5.4. Principaux défis

Les principaux défis pour comprendre et évaluer les effets du changement climatique dans les lacs de haute montagne et les tourbières des Pyrénées sont liés à la complexité des processus biotiques et abiotiques dans ces écosystèmes, aux incertitudes de nos modèles, au manque de séries chronologiques enregistrées, à la variabilité naturelle de ces écosystèmes et à notre capacité à mettre en œuvre des mesures de gestion. L'un des principaux défis consiste à identifier et évaluer les impacts associés au changement climatique et à la pression anthropique croissante dans ces écosystèmes. D'autre part, nous devons réduire les incertitudes sur les risques plus grands, les effets négatifs possibles et les pressions futures sur les écosystèmes de haute montagne des Pyrénées. Le manque d'informations détaillées sur les caractéristiques de ces écosystèmes (des inventaires détaillés à la quantification des processus biogéochimiques) rend impossible l'estimation de la résilience de ces systèmes de montagne face aux pressions du changement climatique et anthropique. Enfin, ces écosystèmes doivent être inclus dans la gestion intégrale du territoire pour garantir leur conservation et l'utilisation durable des ressources de montagne.

2.5.5. Conclusions et recommandations

En dépit de l'éloignement des principales sources des activités humaines, l'impact des changements climatiques sur les lacs et les tourbières des systèmes de haute montagne est difficile à distinguer des effets des activités humaines (tourisme, dépôt des éléments nutritifs, l'utilisation des ressources en eau, etc ...). Bien que l'impact humain puisse être décisif dans certains cas, l'augmentation de la température peut mettre ces systèmes de haute montagne dans une situation de risque plus élevé, en soumettant les communautés biologiques à un niveau de stress plus élevé. Du point de vue du biote, la plasticité phénotypique des communautés lacustres et des tourbières peut leur permettre de mieux s'adapter aux fluctuations climatiques et environnementales. Il est important d'analyser les impacts potentiels d'un point de vue holistique qui inclut de nombreux facteurs climatiques tels que anthropique, global (dépôt de pollution par les nutriments) et locales (effets spécifiques du tourisme dans chaque région). L'adaptation et l'atténuation des effets du changement climatique sur les systèmes lacustres et les tourbières de haute montagne doivent comprendre les effets associés au changement global afin de les réduire autant que possible.Les lacs et les tourbières des Pyrénées sont des éléments uniques, reconnus et valorisés par le public et pouvant favoriser sa participation tant dans leur suivi et leur conservation que dans la compréhension des impacts du Changement Global dans les zones de montagneParmi les mesures générales pour la gestion durable des lacs et des tourbières et leur adaptation aux éventuels effets négatifs des changements globaux, nous pointons les points suivants:

Medidas *soft* [33]

- Développer des groupes de travail pluridisciplinaires, transfrontaliers et stables à long terme, composés de représentants de tous les groupes d'intérêt (mairies, entreprises touristiques, sociétés hydroélectriques, autorités régionales, scientifiques, associations environnementales, ONG, etc.) pour guider le débat sur les effets du changement climatique - et anthropique - sur ces écosystèmes vulnérables grâce à des modèles d'observation participatifs.

- Établir et maintenir des réseaux d'observation et de suivi détaillé de ces écosystèmes et promouvoir des projets intégrés avec la participation de tous les agents du territoire.

- Inclure dans les plans de gestion des espaces naturels les risques associés au changement climatique.

Mesures *vertes* [34]

- Promouvoir un tourisme écologique avec le minimum d'impact sur les espaces protégés et l'intégration maximale des citoyens dans sa conservation. Développer des programmes éducatifs aux niveaux local, régional et transfrontalier pour expliquer les services écosystémiques et leur capacité à agir comme puits de carbone, leur capacité naturelle de rétention d'eau, ainsi que leurs fonctions de protection de la biodiversité et de protection des montagnes contre les phénomènes érosifs.

Mesures *grises* [35]

- Inciter les entreprises de tourisme dans les montagnes à s'adapter aux objectifs de conservation et de gestion durable de ces écosystèmes.

IDÉES CLE

- Les lacs et les tourbières sont des écosystèmes emblématiques des Pyrénées, mais très vulnérables. Leur conservation offre une opportunité de sensibilisation des citoyens aux défis du changement climatique et à la pression anthropique croissante.

- Afin de gérer les effets du changement climatique dans les lacs de haute montagne et les tourbières des Pyrénées, nous avons besoin de stratégies de suivi qui nous permettent de mieux comprendre les processus complexes qui se déroulent dans ces écosystèmes et de réduire les incertitudes des modèles.

- Il s'agit également de faire progresser les politiques consensuelles de gestion durable.

(33) Les mesures douces ou mesures non structurelles pour réduire les effets négatifs du changement climatique. Cette catégorie de mesures est typiquement représentée par les études de recherche visant à couvrir des lacunes de connaissance ou à enrichir les bases de connaissance sur le changement climatique, ses effets et les secteurs les plus vulnérables. Cette catégorie comprend aussi le développement de méthodologies et de systèmes spécifiques pour réduire les risques inhérents au changement climatique (ex. Développement d'un Early Warning System transfrontalier pour la gestion des vagues de chaleur dans le Massif).
(34) Les mesures vertes ou basées sur les services écosystémiques : ce type de mesures comprend toutes les mesures, bonnes pratiques, études ou initiatives ayant pour principe l'utilisation des services écosystémiques rendus par les différentes ressources naturelles pour pallier les effets négatifs du changement climatique (par ex. pratiques sylvicoles conservatrices pour accroître la capacité des forêts des Pyrénées à réduire les risques hydrogéologiques).
(35) Les mesures grises ou infrastructurelles, sont toutes celles qui basent leur action palliative sur la construction ou la mise en place d'éléments infrastructurels concrets (par ex. construction de digues dans les zones habitées à haut risque d'inondations torrentielles).

2.6 Cycle hydrologique et ressources en eau

Coordination: Santiago Beguería (EEAD-CSIC)
Auteurs: Santiago Beguería, Estación Experimental de Aula Dei (EEAD-CSIC), Zaragoza; Yvan Caballero, BRGM; Enrique Navarro, Instituto Pirenaico de Ecología (IPE- CSIC), Zaragoza; Marilen Haver, EcoLab, UMR5245 CNRS – Université de Toulouse; Anne Zabaleta, UPV/EHU, Bilbao; Luis Javier Lambán Jiménez, Instituto Geológico y Minero de España (IGME), unidad de Zaragoza.

RÉSUMÉ

Les Pyrénées ont une importance fondamentale pour les ressources en eau des territoires situés des deux côtés de la division hydrologique, car c'est dans ses bassins de tête que se produisent une partie très importante des débits de surface et des eaux souterraines qui sont utilisées en aval dans les bassins de l'Èbre, Adour, Garonne, etc.L'analyse des séries instrumentales de flux circulants montrent une tendance générale à la diminution des débits moyens annuels au cours des dernières décennies. Cette diminution ne peut être attribuée qu'en partie au changement climatique étant donnée l'importance de l'effet des changements d'occupation du sol et de la végétation, surtout dans la partie sud de la cordillère. On a également observé des changements des régimes mensuels, liés à une modification de la relation neige / pluie en hiver, moins d'accumulation de neige et accélération de la fusion, qui se traduisent par des changements importants des régimes d'écoulement des rivières, qui évoluent vers des régimes de type pluvial, avec de plus gros débits en hiver, une précocité et une diminution des flux de fonte printaniers et des saisons sèches plus longues et intenses. L'analyse des données enregistrées au cours des dernières décennies n'a pas fourni de signaux clairs de changement en termes de fréquence des débits extrêmes.La plupart des modèles climatiques annoncent pour la région pyrénéenne des élévations de températures et une diminution des précipitations au cours du XXIe siècle. Ces changements augmenteraient le stress sur la végétation, entraînant une évapotranspiration plus élevée, qui affecterait à son tour les autres composants du bilan hydrologique (ruissellement de surface et recharge). En conséquence, le teneur en eau dans le sol diminuerait, les situations de saturation seraient de moins en moins fréquentes et se limiteraient à des périodes hivernales et printanières. Outre les changements de forçage climatique, le bilan hydrologique des Pyrénées sera affecté par des changements de la couverture végétale. Celle-ci pourrait en effet bénéficier d'une reprise des processus de revégétalisation, d'ores et déjà observés au cours des dernières décennies du XXe siècle, suite à l'abandon des activités agricoles. Par ailleurs, le réchauffement conduirait à une migration des étages altitudinaux, alors que la pression humaine augmentera sur certains secteurs, au travers des stations de ski, du développement touristique et de la création de résidences secondaires.Les changements en termes de débits annuels et saisonniers peuvent entraîner une baisse de la qualité des eaux, du fait de la diminution de l'effet de dilution des substances polluantes.Le panorama général proposé dans ce chapitre va donc dans le sens d'une aggravation des tendances actuellement observées, entraînant une moindre disponibilité de ressources en eau dans le futur. Les ressources en eau générés dans les Pyrénées sont donc essentielles pour l'agriculture irriguée et la production d'aliments, pour la production d'énergie hydroélectrique, pour l'industrie et pour l'approvisionnement domestique non seulement des populations des Pyrénées, mais encore d'un territoire beaucoup plus large qui comprend des millions d'habitants et certaines des concentrations urbaines les plus importantes de la région. Tout changement qui affecte le cycle hydrologique des Pyrénées est donc susceptible d'avoir des répercussions sur un territoire et une population beaucoup plus vastes.

La gestion adéquate des ressources en eau des Pyrénées oblige à comprendre les détails de son bilan hydrologique, c'est-à-dire comment se répartit l'eau précipitée entre évapotranspiration (eau qui retourne dans l'atmosphère sous forme de vapeur, soit par évaporation directe ou par le biais de la transpiration des plantes), génération d'écoulement de surface et recharge des eaux souterraines. Ces processus, à leur tour, déterminent les volumes d'eau dans les différentes réservoirs d'eaux superficielles (rivières, lacs) et souterraines (aquifères) et dans d'autres parties du système, telles que la couverture glaciaire et nivale, l'humidité du sol, les tourbières et autres zones inondées et enfin végétation elle-même. Dans la répartition des précipitations entre les différents flux de sortie, l'évapotranspiration se distingue par son importance, qui peut atteindre entre 40 % (Gipuzcoa, Garonne) et 80 % du total (bassins plus méditerranéens). Le reste se distribue entre production d'écoulement de surface et recharge des aquifères. Il convient de noter que l'évapotranspiration parvient, certains mois, à dépasser en quantité la précipitation. Ceci s'explique par la mobilisation de l'eau contenue dans le sol ou dans les aquifères (lorsque ceux-ci sont très proches de la surface). De plus, dans les bassins versants de montagne, la fonte saisonnière du manteau nival est une autre source de décalage entre le régime

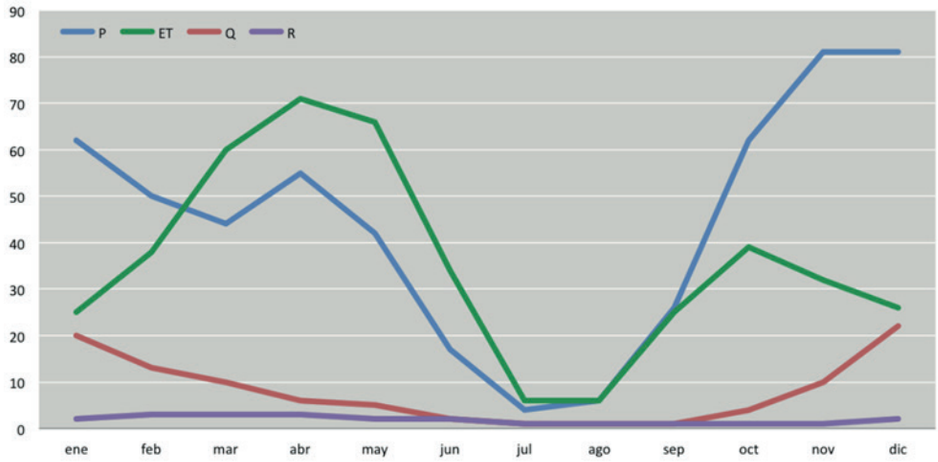


Figure 2.6.1. Bilan hydrologique mensuel typique d'un bassin de climat méditerranéen, avec indication des entrées par précipitation (P), les sorties par évapotranspiration (E), le débit de surface (Q) et la recharge (R). Unités : l m-2. Source : adaptation de Beguería et al., 2015.

des précipitations et celui des écoulements dans les cours d'eau.

La plupart des modèles climatiques prévoient pour les Pyrénées une augmentation de la température et une diminution des précipitations au cours du XXIe siècle. Ces changements entraîneraient une augmentation du stress sur la végétation pendant les périodes les plus sèches de l'année, ou lors d'épisodes de pénurie (sécheresses). Dans le même temps, la période de croissance de la végétation serait plus précoce et plus longue dans l'année. Tout cela entraînerait une évapotranspiration plus élevée, qui à son tour affecterait les autres composants du bilan hydrologique (ruissellement de surface et recharge des eaux souterraines). L'augmentation de la température entraînerait aussi une diminution de la contribution sous forme de neige, et une accélération de la fusion. En conséquence, le contenu de l'eau dans le sol diminuerait, les conditions de saturation seraient de plus en plus en plus rarement atteintes et ne s'observeraient qu'en hiver et au printemps. De nombreuses études s'accordent sur l'importance de tous ces changements pour le bilan hydrologique des ressources en eau des Pyrénées (ACA, 2009; García-Ruiz et al., 2011).Outre les changements en termes de forçage climatique, le bilan hydrologique des Pyrénées sera probablement affecté par des changements d'occupation du sol, qui se caractériserait par la continuité des processus déjà observés au cours des dernières décennies du XXe siècle, tels que : 1) l'expansion des forêts et garrigues, comme conséquence de l'abandon des activités agricoles et d'élevage; et 2) une pression humaine croissante sur certaines secteurs, tels que les stations de ski et les complexes touristiques et de résidence secondaire.

La plupart des modèles climatiques prévoient pour les Pyrénées une augmentation de la température et une diminution des précipitations au cours du XXIe siècle. Ces changements entraîneraient une augmentation du stress sur la végétation pendant les périodes les plus sèches de l'année, ou lors d'épisodes de pénurie (sécheresses). Dans le même temps, la période de croissance de la végétation serait plus précoce et plus longue dans l'année. Tout cela entraînerait une évapotranspiration plus élevée, qui à son tour affecterait les autres composants du bilan hydrologique (ruissellement de surface et recharge des eaux souterraines). L'augmentation de la température entraînerait aussi une diminution de la contribution sous forme de neige, et une accélération de la fusion. En conséquence, le contenu de l'eau dans le sol diminuerait, les conditions de saturation seraient de plus en plus en plus rarement atteintes et ne s'observeraient qu'en hiver et au printemps. De nombreuses études s'accordent sur l'importance de tous ces changements pour le bilan hydrologique des ressources en eau des Pyrénées (ACA, 2009; García-Ruiz *et al.,* 2011).Outre les changements en termes de forçage climatique, le bilan hydrologique des Pyrénées sera probablement affecté par des changements d'occupation du sol, qui se caractériserait par la continuité des processus déjà observés au cours des dernières décennies du XXe siècle, tels que : 1) l'expansion des forêts et garrigues, comme conséquence de l'abandon des activités agricoles et d'élevage; et 2) une pression humaine croissante sur

certaines secteurs, tels que les stations de ski et les complexes touristiques et de résidence secondaire. Les scénarios futurs pour les ressources en eau des Pyrénées projettent des réductions de la quantité totale des ressources disponibles, notamment sous forme d'écoulements de surface, qui peuvent atteindre diverses magnitudes selon les études. En outre, on s'attend aussi à des changements importants des régimes mensuels des débits, avec une augmentation des débits d'hiver et une baisse des pics de printemps en raison d'une fusion nivale plus précoce, ainsi que des étiages plus sévères et prolongés.Par ailleurs, les prévisions de demande pour la moitié du XXIe siècle tablent sur une stabilité ou même une diminution de certaines demandes comme l'approvisionnement urbain ou industriel, en raison de l'amélioration de l'efficacité des systèmes de distribution et de consommation. Ces tendances peuvent parfois contraster avec les plans d'expansion de l'irrigation agricole mentionnés dans certains plans hydrologiques de bassin, tels que celui du bassin de l'Èbre (465.000 hectares de plus pour la période 2016-2021, qui s'ajouteraient aux 900.000 actuels; Plan hydrologique de l'Èbre 2015-2021).Tous ces changements, tant en termes de disponibilité des ressources que pour l'évolution des demandes conduiront à une plus grande incertitude associée à la disponibilité des ressources en eau dans les Pyrénées et en aval, ce qui accentue la nécessité de proposer des mesures d'adaptation. Dans ce chapitre, nous aborderons donc les questions suivantes:

- Quelles sont les tendances d'évolution des ressources en eau de surface et souterraines des Pyrénées, observées dans les dernières décennies?

- Quelles sont les projections d'évolution des ressources en eau tout au long du XXIème siècle, et quel est leur degré de confiance?

- Quelles conséquences auront les changements du cycle hydrologique des Pyrénées sur la qualité des eaux, les cycles biologiques et les écosystèmes associés aux plans d'eau?

- Comment peut-on faire face à ces conséquences?

Pour répondre à ces questions nous disposons, fondamentalement, de deux approches méthodologiques:

- Approche statistique: L'analyse de séries temporelles suffisamment longues des principales variables du bilan hydrologique (précipitations, températures, débits) permet de déterminer l'existence de tendances d'évolution à la hausse ou à la baisse. Cette méthode, que nous pourrions qualifier de rétrospective, doit nous permettre aussi de d'identifier la cause des variations observées, à savoir la relation avec le forçage climatique ou avec d'autres causes telles que les changements d'occupation du sol.

- Approche de modélisation: L'utilisation de modèles de simulation numérique calibrés au cours de la période d'observation permet de tester différents scénarios futurs en faisant varier les caractéristiques du forçage climatique, l'occupation du sol, la gestion des ressources en eau, etc. Cette méthode, qualifiée de méthode prospective, nous permet d'évaluer quelles peuvent être les conséquences de différents scénarios futurs sur les différentes composantes du bilan hydrologique et sur la disponibilité future des ressources en eau.

2.6.1 Changements sur la quantité d'eau de surface : débits totaux

Les données empiriques, par le biais de l'étude des séries instrumentales du réseau hydrométrique (constitué de stations hydrométriques) couvrant les Pyrénées, montre des signes de changement dans les contributions moyennes annuelles des rivières des Pyrénées au cours des dernières décennies. García-Ruiz *et al.,* (2001) ont constaté une diminution statistiquement significative des contributions annuelles pour 28 des 31 stations hydrométriques des Pyrénées centrales espagnoles, pour la période 1964-1994. Plus récemment, Vicente-Serrano *et al.,* (2015) ont trouvé des baisses également importantes dans les principales rivières des Pyrénées orientales espagnoles. López-Moreno et al., (2010), en étudiant la totalité du bassin de l'Èbre sur la période 1950-2010, ont trouvé des baisses de débit significatives pour 55 des 88 stations de jaugeage. Dans les Pyrénées françaises, le rapport Acclimaterra (Le Treut, 2013) montre une diminution de 25 à 30% du débit moyen annuel de la Garonne à son embouchure, pour la période 1959-2010, mais, à cette échelle de travail, il est difficile d'isoler l'influence des changements des usages de l'eau, qui ont également varié au cours de la même période. Une étude récente (Zabaleta *et al.,* 2017 ; IHOBE, 2017) réalisée des deux côtés des Pyrénées à leur extrême occidental (Golfe de Biscaye), sur les débits journaliers de 18 stations pour la période 1955-2015 (60 ans) et de 43 stations pour 1975-2015 (40 ans), montre également une tendance à la baisse des débits. Sur une période plus courte (1995-2015, 20 ans) et en utilisant 117 stations, la même étude indique cependant une tendance à l'augmentation des débits annuels sur certains points. À l'extrémité est (sous-bassins pyrénéens du Têt et du Tech), Lespinas et al. (2009; 2014) ont également détecté des tendances

à diminuer les flux annuels.L'attribution des baisses de débit dans les cours d'eau, c'est-à-dire l'identification de leurs causes et surtout la discrimination entre causes climatiques et non climatiques, ont été abordées dans plusieurs travaux.

Outre ce travail de détection de signal, l'utilisation de modèles de simulation hydrologique permet aussi d'estimer l'évolution future des débits annuels face à divers scénarios de changement climatique. Ainsi, López-Moreno et al., (2014) ont estimé, pour le versant sud des Pyrénées et à l'horizon 2050, que les changements climatiques prévus entraîneraient une diminution des débits annuels de 10 à 20 % par rapport à la période 1970-2000, en fonction du bassin étudié. La Confédération Hidrográphique de l'Èbre a estimé cette baisse à 5 % en moyenne pour l'année 2027 et la totalité du bassin (CHE, 2015). Quintana-Seguí et al., (2010), pour les rivières pyrénéennes du bassin de Rhône-Alpes, ont estimé une baisse des débits annuels de 10 à 20 % pour la période 2035-2065 par rapport à la période 1970-2000. Pascual et al., (2014) ont estimé des baisses des débits annuels allant de 25 à 34 % dans les bassins catalans pour le dernier quart du XXe siècle, et Manzano (2009) estime cette réduction à 10 % pour 2040. Candela et al., (2012), pour l'horizon 2050, estiment des baisses de l'ordre de 20 % des débits, associés à des baisses de précipitation et considèrent aussi une baisse de la recharge des nappes aquifères d'environ 18 %. Caballero et al., (2007) estiment pour l'Ariège une baisse d'environ 20 % des débits annuels et saisonniers pour la période 2055-2065, par rapport à la période de référence 1985-1995. Les simulations effectuées dans des bassins de tête des réservoirs du Zadorra dans le Golfe de Biscaye, indiquent une diminution des débits annuels allant de 8 à 15 % pour l'année 2060, par rapport à la période 1961-2000 (IHOBE, 2017; Meaurio, 2017).La plupart de ces travaux tiennent compte de l'effet du changement climatique uniquement, mais si l'on y intègre l'effet des changements d'occupation du sol et en supposant un scénario qui prolonge la tendance au reboisement des dernières décennies, la chute des débits annuels des cours d'eau du versant sud des Pyrénées augmente de 10 à 20 % (López-Moreno et al., 2014). Dans la zone la plus occidentale et atlantique, les simulations considérant différents types d'utilisation du sol n'ont pas montré beaucoup d'influence sur les débits moyens annuels, mais plutôt sur les débits en saison sèche (IHOBE, 2017; Meaurio, 2017).

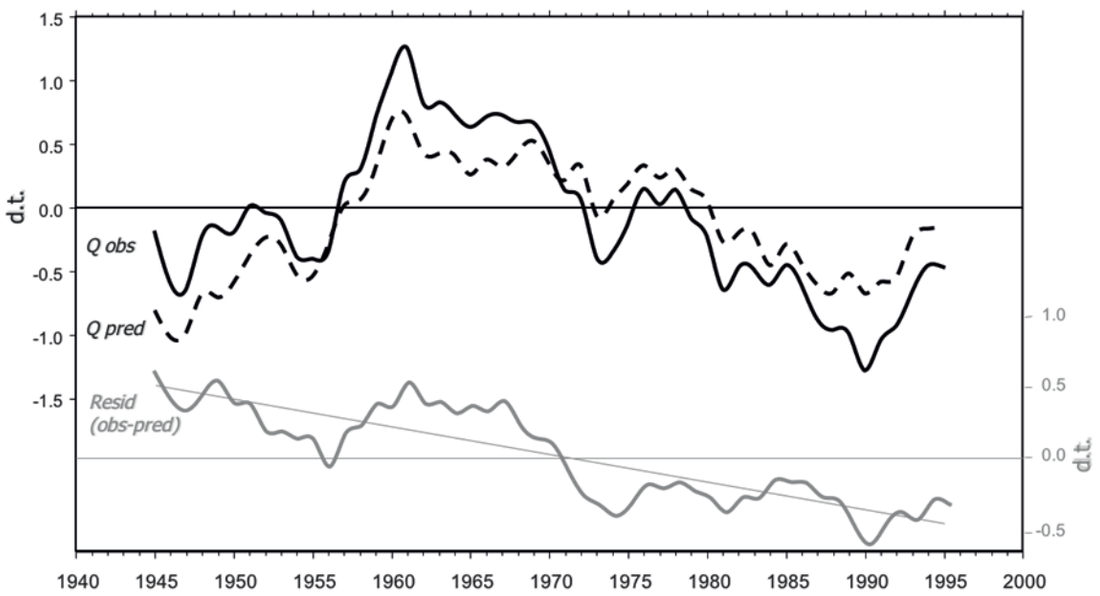


Figure 2.6.2. Évolution des contributions annuelles des rivières des Pyrénées centrales espagnols (Q obs) et des débits théoriques à partir des seules données climatiques (Q pred). La résiduelle (Resid), ou différence entre débits prévus et observés, montre une évolution à la baisse des débits qui n'est pas expliquée par la variabilité climatique, et qui s'attribue à l'augmentation de l'évapotranspiration due aux changements d'utilisation et de végétation. Source : adaptation de Beguería et al., 2003.

2.6.2. Changements des régimes d'écoulement mensuel

Les changements de régime d'écoulement mensuel ont également été étudiés. En général, l'augmentation des températures provoquerait une moindre fréquence des épisodes de neige et une augmentation des précipitations de pluies. Les températures plus élevées entraîneraient une augmentation des précipitations hivernales qui a déjà été constatée dans certaines études. Par exemple, López-Moreno (2005) a rapporté une baisse de l'accumulation hivernale de neige dans les Pyrénées espagnoles dans la période 1950-1999. La principale conséquence pour les débits est une augmentation des flux hivernaux, accompagnée d'une apparition plus précoce de la fusion printanière. Par contre, les débits d'été accusent les baisses les plus importantes. Cette tendance se confirme dans d'autres études s'appuyant sur des données observées, telles que celles de García-Ruiz *et al.,* (2001) ou Stahl *et al.,* (2010). Pour le Golfe de Biscaye, Zabaleta *et al.,* (2017) ont enregistré une tendance, au moins depuis 1955, à la baisse de débits en automne, saison qui affiche le plus clairement cette tendance, ce qui implique une prolongation de la période estivale.L'analyse des tendances des séries de débit dans les Pyrénées françaises a été orientée vers l'étude des débits d'étiage. L'étude de Giuntoli et Renard (2010) décrit des tendances négatives généralisées des débits en période d'étiage pour la période 1968-2008, et le rapport Acclimaterra (Le Treut, 2013) identifie également des tendances négatives des débits d'étiage, sur le bassin de l'Adour.En utilisant des modèles de simulation et des scénarios de climat futur, on obtient une augmentation de ces tendances, avec une réduction importante de l'accumulation de neige, qui dans le dernier quart du XXe siècle pourrait atteindre 78 % en dessous de 1500 m d'altitude (López-Moreno *et al.,* 2009). Les conséquences sur le régime d'écoulement des rivières pourraient êtretrès importantes au printemps, où on pourrait subir une baisse significative des débits et une apparition précoce, dans certains cas, du pic de fusion nivale. Les étiages pourraient s'accentuer, tandis que les débits d'hiver se maintiendraient dans une situation similaire à l'actuelle. L'effet combiné du changement climatique et de l'occupation future du sol accentuerait ces changements.

Sur le versant français des Pyrénées, Boé *et al.,* (2009) ont utilisé un ensemble de scénarios climatiques avec un modèle de simulation hydrologique et décrivent une évolution similaire du régime annuel dans les rivières Ariège et Garonne (Figure 2.6.4). En comparant la période 2046-2065 à la période de référence 1970-1999, ils trouvent des réductions générales du débit qui sont plus marquées au printemps et au début de l'été en raison de l'effet combiné des précipitations réduites, de l'évapotranspiration plus forte et de la réduction du manteau nival. Au contraire, les débits d'hiver montrent peu de variation avec la période de référence (Garonne), ou même augmentent (Ariège), en raison d'une plus grande fréquence des épisodes de pluie par rapport à ceux de neige. La simulation de Caballero *et al.,* (2007) estime à environ 50 % la réduction de la précipitation sous forme de neige dans le bassin Adour-Garonne pour l'horizon 2050-2060, par rapport à la période de référence 1985-1995. Les conséquences en sont l'augmentation des débits d'hiver et une précocité du pic de printemps, avec des réductions des débits d'environ 11 % en été.

2.6.3 Modifications pour les eaux souterraines et les sources

Les impacts du changement climatique sur les ressources en eau souterraine et leur évolution future peuvent être plus complexes à étudier que pour les eaux superficielles, du fait de la grande variabilité des contextes dans lesquels elles se trouvent (Martín-Vide, 2016). En effet, leur comportement par rapport au climat dépend du type de formations géologiques (aquifères) dans lesquelles elles s'écoulent, de leur degré de confinement (un aquifère dans lequel l'eau fluctue librement se comportera différemment d'un aquifère dans lequel l'eau se trouve sous pression, captive sous une formation peu perméable), de leurs interactions hydrauliques avec les cours d'eau qui s'écoulent à proximité et avec les aquifères voisins (ou avec l'eau de mer dans le cas des aquifères côtiers) et de l'importance de l'exploitation par pompage qui s'y exerce (Green *et al.,* 2011).Les zones de haute montagne sont très sensibles à tout changement du bilan hydrologique et, par conséquent, de la recharge et du fonctionnement des aquifères. Pour évaluer correctement la recharge dans les zones de haute montagne, il faut prendre en compte une série de caractéristiques spécifiques telles que les reliefs abrupts et les grandes altitudes, ou la présence d'importants gradients géographiques de température et leurs conséquences sur la végétation, les sols et les précipitations. En outre, ces zones se caractérisent par la présence de sources à différentes altitudes. Enfin, tant la recharge comme la décharge sont souvent contrôlées ou conditionnées par la dynamique nivale. La connaissance et compréhension de ces processus est entravée par la difficulté d'accès en haute montagne qui rend l'acquisition de données compliquée.Comme nous l'avons vu précédemment, l'augmentation globale de la température peut se traduire par une baisse de la précipitation sous forme de neige et une apparition plus précoce dans l'année de la période de fusion.

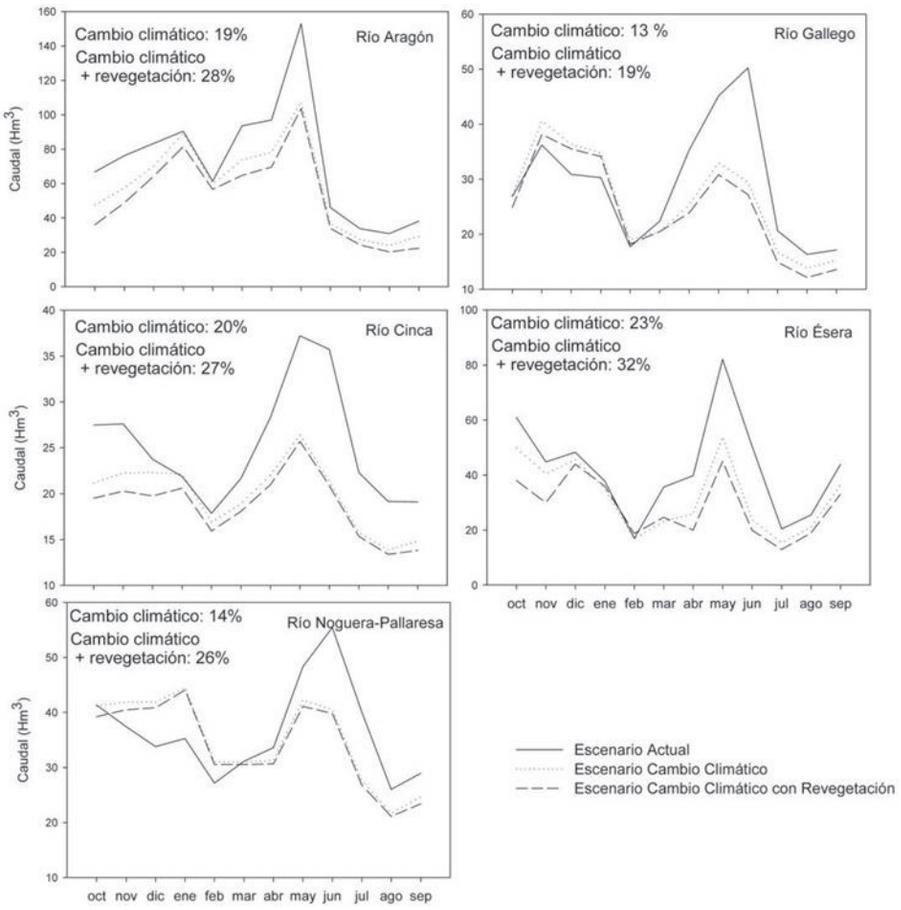


Figura 2.6.3 Variaciones en el régimen de algunos ríos de los Pirineos en el año 2050 con respecto al régimen medio del periodo 1970-2000, para escenarios de cambio climático y de cambio climático con revegetación. (Fuente: adaptado de López-Moreno et al., 2014.)

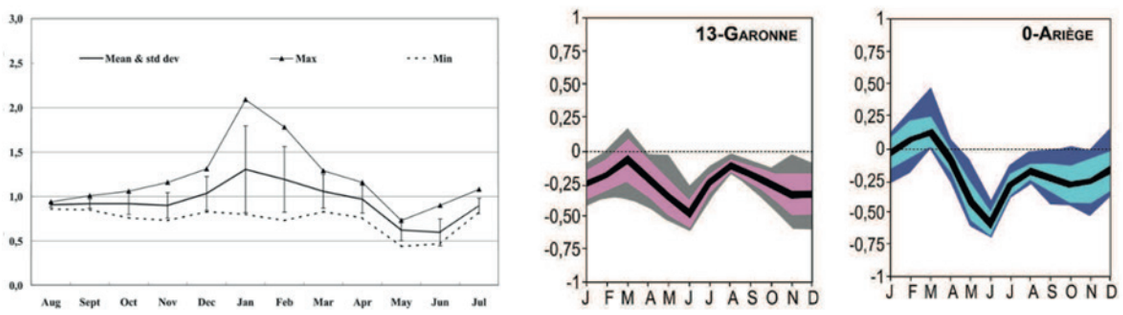


Figura 2.6.4. Variación relativa del régimen de los ríos Garonne en Foix (2055-2065 con respecto a 1985-1995); Garonne en Lamagistére y Ariège en Foix (2046-2065 con respecto a 1970-1999). (Fuente: Caballero et al., 2007; Boé et al., 2009.)

Face à cette situation, il est probable que les pics d'écoulement, tant superficiel que souterrain, migrent vers le début de l'année, ce qui peut entraîner des pénuries d'eau dans les zones dépourvues de capacité de stockage suffisante (Barnett *et al.,* 2005). Dans les régions dominées par la neige, la couverture neigeuse empêche en général la recharge en hiver, alors qu'au printemps le dégel permet de recharger les aquifères (Kuusisto, 1984 ; Rutulis, 1989 ; Van der Kamp et Maathuis, 1991). En raison du contact potentiellement direct entre les eaux souterraines et la surface du sol, les aquifères de surface et peu profonds pourraient être particulièrement sensibles aux changements climatiques (Winter, 1999; Healy et Cook, 2002; Sophocleus, 2002; Dingman 2002; Lee *et al.,* 2006).

On prévoit ainsi que dans les régions dominées par la neige, des hivers futurs plus chauds entraîneraient des changements (migration vers le début de l'année (Veijalainen 2008).et da recharge des eaux souterraines (Jyrkama et Sykes, 2007; Sutinen *et al.,* 2007). De manière générale, l'eau souterraine contenue dans un système alluvial (en forte interaction avec les cours d'eau) ou dans un système carbonaté karstique (ou les écoulements dans les conduits karstiques peuvent être très rapides) répondra plus rapidement à un changement du climat que lorsqu'elle s'écoule dans des aquifères sédimentaires (alternance de formations sableuses plus ou moins indurées, comme les grès et argileuses) ou dans des roches cristallines (granites ou schistes). La réponse des eaux souterraines au changement climatique peut cependant être renforcée ou, au contraire, modérée, par l'occupation du sol ou son exploitation par pompage. Ainsi, par exemple, Kim et Jackson (2012) montrent que le reboisement provoque une diminution de la recharge des aquifères, phénomène qui peut ainsi accroître l'effet négatif sur la recharge d'un climat plus chaud et de la probable réduction des précipitations futures. Cette complexité implique qu'il est généralement difficile de quantifier précisément la quantité d'eau qui est contenue dans un aquifère.Il apparaît donc difficile d'évaluer de manière fiable l'évolution de la ressource contenue dans les aquifères pyrénéens au cours des dernières décennies. Indépendamment de la complexité des systèmes, cela est aussi dû à l'existence d'un réseau piezométrique insuffisant et à ce que, généralement, il se réduit à des séries de données avec une longueur inférieure à quinze ans.

Le rapport Acclimaterra (Le Treut, 2013) souligne le manque de connaissances sur l'impact du changement climatique sur les ressources en eau dans le bassin Adour-Garonne. De manière similaire, et pour ce qui est des systèmes hydrogéologiques de la partie centrale des Pyrénées françaises, aucune tendance n'a été dégagée par les études réalisées jusqu'à présent (AEAG, 2011).Pour cette raison, la plupart des études existantes portent sur la caractérisation de l'impact des changements du climat sur la recharge, au moyen de modèles de simulation. Une éventuelle diminution de la pluviométrie en quantité et saisonnalité et la modification de sa répartition entre précipitation solide et liquide, ont potentiellement une forte influence sur la recharge des aquifères. De même, l'augmentation de l'évapotranspiration à cause du changement climatique (augmentation de la demande atmosphérique d'humidité) ou des changementd'occupation du sol (végétalisation), ont un impact important sur le bilan hydrologique et donc sur la recharge des aquifères. Cela est particulièrement vrai pour les aquifères libres, qui sont sensibles aux changements du bilan hydrologique. De plus, les projections pourraient être affectées, elles aussi, par des changements futurs e termes d'intensité des précipitations, dont l'impact sur la recharge des aquifères est encore mal connu.En France, le projet RExHyss (Habets *et al.,* 2013) estimé à 30 % la diminution de la recharge annuelle des systèmes hydrogéologiques des bassins de la Seine et la Somme.

Cette diminution est due en grande partie à la diminution projetée de la précipitation hivernale, calculée à 12 % en moyenne vers la fin du XXIe siècle (moyenne d'un ensemble de modèles climatiques couplés). Pour le versant français des Pyrénées, Caballero *et al*., (2016) ont estimé l'impact du changement des précipitations sur la recharge des aquifères libres dans tout le bassin de l'Adour-Garonne. Ils ont utilisé les projections correspondant aux scénarios RCP 2.6 et 8.2 sur un ensemble de cinq modèles climatiques, régionalisés par deux méthodes différentes et appliquées à deux méthodes différentes de calcul du bilan hydrique, afin d'explorer le degré d'incertitude des résultats. Ces études ont montré que, pour la région pyrénéenne (départements des Pyrénées-Atlantiques, Hautes Pyrénées, et Haute-Garonne et Ariège) la recharge des aquifères pourrait diminuer en moyenne de 10% en 2050. En Espagne, Candela *et al.,* (2012) ont étudié les incidences du changement climatique sur la recharge des aquifères du bassin de la rivière Siurana, affluent de l'Èbre en Catalogne. Pour cela, ils ont utilisé le modèle hydrogéologique Visual Balan (Samper *et al.,* 2005), forcé avec un ensemble de sorties de modèles couplés et sous les scénarios SRES A2 et B1. Ils ont estimé ainsi une diminution de la recharge de 5 à 15 % pour l'année 2050. Ils ont également indiqué que cette tendance pourrait même être encore plus forte si au changement climatique s'ajoutaient les effets de la possible évolution future de l'occupation du sol, liée à une diminution des surfaces cultivées, une augmentation de la couverture forestière et une expansion de la

culture de la vigne. Ortuño *et al.,* (2009), ont utilisé les mêmes modèles hydrogéologiques et scénarios pour analyser divers bassins de Catalogne et ont souligné la difficulté de quantifier les impacts futurs sur la recharge des aquifères, en soulignant la variabilité existant entre différents aquifères et différents scénarios climatiques. Malgré tout, ils ont évalué une diminution moyenne de la recharge d'environ 25 % pour la période 2017-2100, pour le scénario climatique A2, et 19 % pour le scénario B2.Une étude technique de la Confédération Hydrographique de l'Èbre, (CHE, 2005) a estimé, pour les horizons de 2010-2040, 2040-2070 et 2070-2100, a) des baisses moyennes de 12 %, 21 % et 19 % pour le débit total; b) 17 %, 25 % et 19 % pour l'écoulement de surface; c) 9 %, 18 % et 18 % pour le flux hypodermique et d) 13 % 23 % et 20 % pour le flux souterrain. Ces résultats sont fondés sur la mise en œuvre du modèle hydrologique distribué GIS-BALAN, forcé avec des données climatiques des projections du modèle de circulation générale CGCM3 et les scénarios A1B, A2, B1 du Panel Intergouvernemental sur le Changement Climatique (IPCC) et du scénario COMMIT du CCCma. La paramétrisation de GIS-BALAN a été réalisée en utilisant des séries de données de débit et des niveaux piezométriques des stations de jaugeage et piezomètres de la Confédération Hydrographique de l'Èbre, pendant la période comprise entre 1970 et 2000.Pour finir, les changements affectant les systèmes hydrogéologiques peuvent aussi se traduire par des évolutions en termes de débit des sources et secteurs de drainage des aquifères, dont il existe un nombre très important dans les deux versants des Pyrénées, tant dans les systèmes karstiques, cristallins, sédimentaires, qu'alluviaux.

Les débits des sources, ainsi que leur évolution saisonnière, dépendent fortement du fonctionnement de l'aquifère qui les sous-tend, et pour cette raison il n'est pas possible de faire des généralisations. De nouveau, ce seront les résurgences associées à des aquifères libres qui seront les plus affectées par des changements du bilan hydrologique dans les secteurs ou se fait la recharge. Les sources qui présentent la plus grande vulnérabilité face aux changements climatiques sont celles qui se caractérisent actuellement par des fonctionnements saisonniers avec de faibles débits en périodes de basses eaux. Des observations effectuées sur certaines sources de la chaîne des Pyrénées montrent que ces dernières peuvent présenter des épisodes de tarissement au cours de certaines années sèches. Ces épisodes pourraient alors se multiplier dans les années à venir pour les systèmes qui présentent ce type de source et qui se caractérisent par une faible fonction capacitive et des temps de résidence très courts.

2.6.4 Modifications des caractéristiques physico-chimiques des masses d'eau

La qualité des eaux des rivières, entendue comme la concentration de différents composés naturellement présents ou artificiels –p. ex. des polluants–, dépend des différentes sources de pollution mais aussi du débit. Les contaminants peuvent provenir tant de sources diffuses (par exemple les écoulements de résidus agricoles ou d'éleveurs) comme ponctuelles (rejets d'eaux insuffisamment traitées). Mais c'est le débit qui est le principal moteur du changement dans les paramètres du métabolisme de la communauté biologique et des paramètres physico-chimiques de l'eau, en particulier pour de petites échelles temporelles et spatiales comme c'est le cas dans les rivières de montagne (Hunt *et al.,* 2012 ; Marcarelli *et al.,* 2010).

C'est précisément à ces petites échelles que la présence de contaminants joue un rôle déterminant pour la qualité de l'eau. Comme on l'a vu dans les paragraphes ci-dessus, le changement climatique et les changements d'occupation du sol (revégétalisation) ont affecté les débits des cours d'eau, et continueront de les affecter dans le futur, ce qui aura des conséquences sur la qualité de l'eau. D'un côté, les sécheresses et les périodes d'étiage plus longues ont un effet direct en réduisant le facteur de dilution des polluants qui arrivent aux rivières, donnant lieu à une augmentation de la concentration de polluants et par conséquent à une détérioration de la qualité de l'eau. D'un autre côté, bien que pouvant limiter la présence des polluants dans l'eau par dilution, les inondations peuvent favoriser leur transmission à partir des bassins fortement peuplés (sources diffuses) et peuvent aussi remobiliser les polluants retenus dans les sédiments (Petrovic *et al.,* 2011). Le reste des facteurs qui influent sur la dynamique des flux de substances polluantes dérivent des activités humaines (réservoirs, barrages, mini-centrales, prélèvements d'eau, etc.) qui toutes sont très présentes dans les rivières Pyrénéennes. En outre, les phénomènes extrêmes liés au changement climatique ont un impact sur les mécanismes de transfert thermique entre l'air et l'eau (Val *et al.*, 2017). La réduction des débits dans les cours d'eau entraîne souvent une détérioration de la qualité chimique de l'eau, en augmentant la concentration des polluants résultant des activités humaines dans les bassins (Petrovic *et al.,* 2011). La combinaison de débits réduits et de la présence de substances toxiques qui affectent les communautés biologiques aquatiques et finit par provoquer des problèmes structurels et fonctionnels dans les écosystèmes fluviaux (Val *et al.,* 2016a, 2016b). Cette étroite relation entre qualité (chimique et écologique) et débit a été pleinement reconnue et intégrée dans la Directive Cadre Européenne sur

l'Eau (DCE). Par exemple, dans les recommandations pour le suivi des masses d'eau, le texte insiste de façon explicite sur l'importance du « *suivi du volume et du niveau de flux dans la mesure où il est pertinent pour l'état écologique et chimique* » (DCE, art. 8).La carence de débits sur certains tronçons peut être particulièrement grave lorsque ceux-ci reçoivent les effluents des stations d'épuration des eaux usées (STEP). Dans ces cas (comme, par exemple, celui du Llobregat) les effluents peuvent parvenir à représenter presque 100 % du débit s'écoulant dans le cours d'eau (Huerta *et al.,* 2008). L'absence d'une épuration adéquate dans ces cas, provoque de sérieuses dégradations de la qualité en aval. Un autre facteur de risque est justement l'absence de STEP dans de nombreux centres de population des Pyrénées. Un dimensionnement inadéquat des stations et le type de technologie choisie, associé à la crise économique, ont fait échouer la construction de nombreuses STEP, ce qui fait que de nombreuses communes pyrénéennes rejettent leurs eaux usées sans traitement.On peut s'attendre à ce que la baisse des débits en zones de tête de bassins dans les Pyrénées, combinée avec une plus grande fréquence de phénomènes extrêmes (inondations et sécheresses), réduise le facteur de dilution des polluants présents dans les bassins, conduisant à une dégradation de la qualité physico-chimique de l'eau (Petrovic *et al.* 2011). Il ne faut pas non plus négliger la potentielle élévation de la température de l'eau résultant de l'augmentation de la température moyenne de l'air (Pérez-Zanon *et al.,* 2017). On a récemment décrit, dans des cours d'eau des Pyrénées, que les événements extrêmes liés aux changements climatiques montrent en plus un impact sur les mécanismes de transfert thermique entre l'air et l'eau (Val *et al.,* 2017). Ce découplage peut conduire à des changements dans les procédés chimiques et biologiques contrôlés par la température, qui finiraient par avoir des conséquences sur la qualité de l'eau.En fait, certains indices de cette détérioration sont déjà observables. De récentes études de séries historiques de la rivière Gallego, à Jabarrella (Huesca), montrent une forte incidence sur le métabolisme de la communauté biologique, associé à une chute des débits qui serait explicable par une plus grande concentration des polluants présents dans cette zone du fleuve (Val *et al.,* 2016b). Dans cette même zone, des études ont été faites sur l'impact de la toxicité du mercure dans des scénarios futurs d'augmentation de températures. Les résultats ont montré que l'augmentation de la température rend la communauté biologique (algues) plus sensible à la présence de mercure. Cette étude montre également que d'autres facteurs, tels que la présence de matériel particulaire ou dissous provenant du bassin et dont les dynamiques seraient également modifiées dans les années à venir, affecteraient non seulement la composition de l'eau du fleuve, mais encore moduleraient (dans les deux sens) la toxicité des polluants dans l'eau (Val *et al.,* 2015c). Par exemple, alors qu'une augmentation des solides en suspension due aux inondations réduirait la toxicité des métaux lourds, les variations de qualité du matériau dissous, comme le carbone organique, pourraient l'accroître.

Ces prévisions sont renforcées par des études antérieures basées sur des index de diatomées (Gomà *et al.,* 2005). Ces index donnent les meilleurs scores à la présence d'espèces peu tolérantes à la pollution ; ainsi, des valeurs élevées indiquent une amélioration de l'état chimique des eaux. Dans une étude de l'année 1998, on constatait déjà que pour les cours d'eau des Pyrénées orientales, la période de meilleure qualité de l'eau était celle des plus hauts débits en raison de la fusion de la neige, alors que les pires valeurs s'observaient en septembre.

2.6.5 Modifications dans la composition biologique des masses d'eau

Le changement climatique, les changements d'occupation des sols et la pollution, agissent en tant que facteurs de stress sur les écosystèmes aquatiques de montagne, en menaçant leur fonctionnement et leur bonne santé. Des gradients abrupts de conditions abiotiques en terrain de montagne génèrent une diversité de micro-habitats qui abritent une riche biodiversité. Les organismes qui colonisent ces habitats sont adaptés a des marges étroites de conditions abiotiques, ce qui les rend particulièrement sensibles au changement climatique (Elsen et Tingley, 2015; Nogués-Bravo *et al.,* 2007). Certaines espèces peuvent être utilisées comme indicateurs de dégradation environnementale. Par leur présence ou absence et leur état de santé, ils peuvent nous renseigner sur la santé du système aquatique.Les organismes amphibies et semi-aquatiques sont affectés par les variations de leur habitat dans l'eau ou sur terre. En raison de leur sensibilité, ils sont souvent considérés comme espèces indicatrices de la qualité des systèmes aquatiques. L'extinction massive d'espèces amphibies à l'échelle globale semble être liée a une combinaison complexe d'interactions entre perte d'habitat et dégradation de l'environnement, ainsi qu'à des maladies émergentes (Blaustein et Kiesecker. 2002).La propagation alarmante d'un pathogène fongique, le *Batrachochytrium dendrobatidis* (*Bd*.), à été considérée comme responsable de nombreux déclins récents (Wake et Vredenburg. 2008). Des épidémies de *Bd*. ont été observées dans plusieurs contextes bioclimatiques et les régions de montagne en sont particulièrement affectées. Le *Bd*. se propage par zoospores aquatiques, en infectant la peau de son hôte amphibien. L'infection peut conduire, à terme, à la maladie chytridiomycosis

et causer la mort de l'hôte.Le *Bd*. est aussi présent dans les Pyrénées et a causé des extinctions locales de populations d'amphibiens. Les intensités d'infection par *Bd*. observées sur des amphibiens varient spatialement avec des zones d'occurrence maximale dans la partie centrale ouest, dans ou à proximité du Parc National des Pyrénées.

Pour les efforts de conservation d'espèces, ainsi que pour le suivi de l'état de santé des écosystèmes, il est important de comprendre quelles conditions environnementales régissent la propagation des agents pathogènes. Température et présence d'eau figurent parmi les facteurs les plus cruciaux qui contrôlent la croissance et survie du pathogène. La croissance optimale de *Bd*. en culture a été observée entre 17 et 25 °C et ses zoospores ne tolèrent pas la déshydratation (Piotrowski, Annis, et Longcore, 2004). Les températures supérieures à cette plage représentent une limitation physiologique pour le pathogène. Par contre, les températures inférieures apparaissent liées au déclenchement des épidémies de la maladie. Ceci peut s'expliquer par une variation de stratégie du *Bd*., qui produit plus de zoospores en milieu plus froid (Woodhams *et al.,* 2008). Par ailleurs, les taux d'infection plus élevés ont été associés à des conditions climatiques humides ; Murray *et al.,* 2011). Les amphibiens qui habitent des étangs de séchage saisonnier ont démontré être moins affectés par des maladies (Scheele *et al.,* 2015).

En montagne, les changements des conditions hydro-climatiques se superposent aux changements d'occupation des terres et du sol. Ces changements sont probablement ceux qui contrôlent les processus d'apparition de *Bd.* dans les Pyrénées. Pour explorer l'habitat abiotique du pathogène, il faut analyser les données climatiques et hydrologiques, ainsi que les propriétés physicochimiques de cet habitat. Le projet SUDOE V - "P3 - Population, Pollution et Pathogènes" a pour but d'étudier l'état de santé d'écosystèmes aquatiques des Pyrénées et de trois autres zones de montagnes (USA, Chine, Oman). Le projet inclut la collecte d'échantillons de qualité de l'eau, du microbiome et de sédiments de lacs de montagne le long des gradients d'altitude. La modélisation hydrologique avec le modèle *Soil and water assessment tool* (SWAT) va etre utilisée pour aider à caractériser les dynamiques des écosystèmes aquatiques en conditions abiotiques, dans le contexte du changement climatique et connaître son impact possible sur la santé des écosystèmes.Pour caractériser les dynamiques

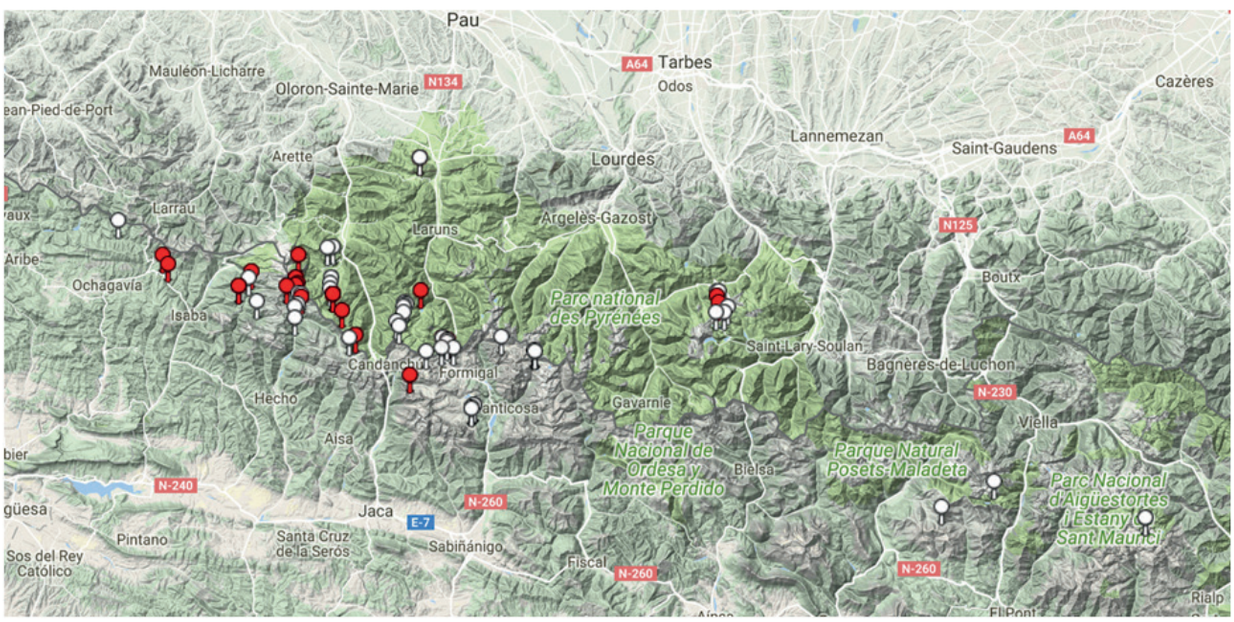


Figure 2.6.6. Prévalence de Batrachochytrium dendrobatidis (Bd) dans les Pyrénées Centrales: points rouges = Bd-positif, points blancs = Bd-négatif. Source : www.bd-maps.net

hydrologiques dans les bassins versants, il faut disposer de données distribuées spatialement sur la quantité et qualité de l'eau. Comme il y a peu de données hydrologiques sur les environnements de haute montagne tels que les Pyrénées, la modélisation est un outil performant pour explorer l'équilibre hydrique et les processus hydrologiques à l'échelle régionale. P3 collaborera avec des experts de AGUAMOD pour simuler les conditions hydrologiques dans les sites d'étude, en utilisant, par exemple, le modèle hydrologique SWAT (outil d'évaluation du sol et de l'eau). AGUAMOD est une plateforme de recherche crée pour assister à la gestion des ressources hydriques. Elle est financée par le programme INTERREG V, de la Coopération territoriale d'Europe du sud-ouest (SUDOE V), qui aide au développement régional en cofinançant des projets transnationaux par la voie du Fonds Européen pour le Développement Économique Régional (FEDER). SWAT est un modèle physique semi-distribué qui permet la simulation à l'échelle régionale de l'équilibre hydrique et et de la qualité de l'eau. SWAT peut aider à caractériser des dynamiques en conditions abiotiques d'écosystèmes aquatiques dans le contexte du changement climatique. La distribution d'agents pathogènes répondra aux variations de conditions dans les Pyrénées, avec de possibles impacts sur la santé des écosystèmes.

Comme conséquence des changements climatiques, il a été constaté une redistribution généralisée de différents types d'eaux vers des altitudes plus élevées (Hari *et al.,* 2006). À mesure que les fleuves et rivières deviennent plus chauds, les poissons d'eaux chaudes déplacent les poissons d'eaux plus froides de leur habitat (Matthew, 2016). A titre d'exemple, pour les rivières des zones montagneuses d'Amérique du Nord, l'on a rapporté des dates plus précoces de migrations de populations de salmonidés en réponse à des températures plus chaudes de l'eau (Kovach, 2012).Dans les lacs de montagne, les caractéristiques physiques de l'environnement sont très influencées par les effets du changement climatique (Thompson *et al.,* 2009). Par exemple, si la période pendant laquelle le lac est gelé est plus courte, cela augmente la productivité du lac. Ceci est du au prolongement de la durée de la période pendant laquelle la photosynthèse est possible, en plus du fait qu'une température de l'eau plus élevée peut éventuellement faciliter cette plus grande productivité (Mendoza, 2013).Mendoza (2013) a décrit comment les communautés de macro-invertébrés des lacs de montagne dans les Pyrénées répondent au changement global. Les réponses au changement climatique d'une part et à la perte et fragmentation des habitats et espèces envahissantes, d'autre part, peuvent également subir les effets de leur interaction mutuelle.

2.6.6 Conclusions et recommandations pour l'adaptation

Le terme Gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) dénote « un développement et gestion coordonnés des ressources en eau, des terres et autres ressources naturelles, dans le but de maximiser le bien-être économique et social » (Agarwall *et al.,* 2000). En dépit du succès relatif de ce concept parmi la communauté scientifique, il existe peu d'exemples de son application pratique à la gestion des ressources en eau. Toutefois, il est évident que pour relever les défis du changement climatique par rapport à la ressource eau, il faut adopter une vision intégrée de la gestion du territoire, qui remette en question la distribution territoriale de l'utilisation de l'eau. Les zones de tête de bassin génèrent la plus grande partie des ressources en eau utilisées en aval dans les plaines et les régions côtières en déficit d'eau et à haute densité de population. Par conséquent, la mise en œuvre d'actions de gestion de l'eau en tête de bassin peut représenter une option d'adaptation effective du point de vue des environnements situés en aval et souffrant de pénuries d'eau. Par exemple, une option de gestion forestière comme l'éclaircissage, peut améliorer l'infiltration des eaux souterraines et l'écoulement de surface, augmentant ainsi la production d'eau bleue[36] à l'échelle du bassin tout en permettant d'optimiser la productivité de l'eau verte[37] forestière. De plus, les actions de ce type ont un effet direct et mesurable sur les communautés pyrénéennes, car elles sont créatrices d'emploi et d'activité économique.

(36) Le terme "eau bleue" englobe l'eau douce de surface (rivières, lacs et barrages) et souterraine (contenue dans les aquifères), qui représentent la part de la ressource en eau qui peut être exploitée pour l'alimentation en eau de n'importe quel usage.

(37) Le terme "eau verte" représente le reste de la ressource en eau et désigne la part de l'eau qui précipite et qui est stockée in situ, essentiellemetn dans le sol, qui peut être ensuite évaporée directement vers l'atmosphère ou bien utilisée par la végétation (cultivée ou naturelle) au travers du processus de transpiration, pour satisfaire ses besoins physiologiques de croissance.

ENCADRÉ 2.6.1. STRATÉGIES NATIONALES ET RÉGIONALES D'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE EN RELATION AVEC LES RESSOURCES EN EAU

Au niveau national, la France et l'Espagne ont été les premiers pays de l'UE à développer leurs respectives Stratégies d'adaptation au Changement climatique. Le Plan national d'adaptation au changement climatique espagnol de 2007, reconnaît les zones de montagne comme les zones les plus vulnérables au changement climatique. Ce même plan prévoit une série d'objectifs pour l'évaluation de l'impact des changements climatiques et le développement de mesures d'adaptation dans les zones de montagne:

i) Intégration des évaluations sectorielles ou territoriales en contexte de montagne, y compris celle de la cartographie des impacts du changement climatique ;

ii) Développement de réseaux de suivi du changement climatique, y compris celui des indicateurs nécessaires à la caractérisation de l'état qualitatif et quantitatif des ressources en eau de surface et souterraine ;

iii) Suivi et caractérisation de l'impact du changement climatique sur le bilan hydrologique.Le Plan national d'adaptation au changement climatique français de 2006, définit comme objectif principal celui de présenter des mesures opérationnelles concrètes pour affronter et tirer parti des nouvelles conditions climatiques, en identifiant certaines d'entre elles, telles que l'augmentation des températures, des vagues de chaleur et des sécheresses plus fréquentes et intenses, etc. Le Plan identifie les actions d'adaptation territoriales comme indispensables et complémentaires aux actions visant à l'atténuation du changement climatique, telles que les politiques de réduction des émissions à effet de serre.

Au niveau régional, il existe également des initiatives importantes. Ainsi, la Stratégie catalane d'adaptation au changement climatique, de 2013, réalise déjà une évaluation des effets observés et attendus des changements climatiques sur différents secteurs socioéconomiques et environnementaux, en identifiant et promouvant des mesures concrètes d'adaptation. De même, la stratégie aragonaise de changement climatique et d'énergies propres planifie des stratégies d'atténuation et d'adaptation au changement climatique, en harmonie avec la stratégie espagnole. Le Plan basque de lutte contre le changement climatique propose, pour l'année 2020, la consolidation d'un modèle socioéconomique qui ne dépende pas du carbone et la réduction au minimum de la vulnérabilité face au changement climatique. La Stratégie face au changement climatique de Navarre identifie également les objectifs et les actions concrètes pour améliorer l'adaptation de la société navaraise au changement climatique, en fixant le même horizon 2020. Le Plan Climat de la région Languedoc-Roussillon de 2009, propose des mesures concrètes d'adaptation qui mobilisent toutes les compétences de la région. La région Midi-Pyrénées a également développé un Plan Régional Climat, Air et Énergie, qui adapte la stratégie nationale aux spécificités de la région. Le Plan Régional Climat, Air et Énergie d'Aquitaine de 2012, établit le cadre d'adaptation pour cette région et réussit même à constituer un comité d'experts pour renforcer les politiques publiques avec le savoir scientifique, spécialement adapté aux conditions de la région.

C'est précisément en ce qui concerne la gestion des ressources en eau que l'Union européenne a largement reconnu la nécessité de garantir un approvisionnement suffisant en quantité et en qualité. La directive-cadre dans le domaine de l'eau (2000/60/EC) est le document central sur la gestion des ressources en eau en termes de protection des systèmes hydrologiques. Cette directive s'est traduite, par exemple, dans les plans de gestion de bassin développés par les différents organismes de bassin, en respectant et en développant les principes de la directive-cadre européenne. Un autre document européen (COM/2007/414) aborde les défis résultant de la pénurie d'eau et des sécheresses dans l'Union européenne, qui souligne l'importance de promouvoir des mesures de gestion efficace des ressources en eau. La directive sur la qualité de l'environnement dans le domaine de la gestion hydraulique (2008/105/EC) décrit les seuils de concentration de différentes substances polluantes dans les plans d'eau.Au niveau national, les différents organismes gestionnaires de l'eau ont adapté le cadre général de la directive européenne à leurs bassins respectifs, en développant des plans de gestion des ressources en eau pour différents scénarios futurs.La gestion de l'eau dans le territoire pyrénéen doit aussi faire face à des carences de connaissances. Bien qu'il existe sur le territoire pyrénéen divers acteurs ayant la responsabilité de la surveillance et la gestion des ressources en eau (organismes gestionnaires de bassins et autres) et qu'il existe plusieurs réseaux de surveillance et des études, il n'existe aucune évaluation qui intègre la totalité du Massif Pyrénéen. L'absence d'études à caractère transfrontalier est particulièrement grave puisque le Massif est en interaction avec la dynamique atmosphérique, ce qui rend les processus différents de chaque côté du Massif. Ceci peut se détecter, par exemple, dans les divergences existant entre quelques simulations du climat futur effectuées dans l'un ou l'autre des versants des Pyrénées, dans lesquelles on prévoit une altération de la trajectoire des bourrasques associées au front polaire de signe opposé, avec des conséquences opposées aussi dans le forçage du système hydrologique. Il existe donc une nécessité d'aborder l'étude du cycle hydrologique des Pyrénées dans son ensemble.

3. L'impact du changement climatique sur les secteurs socioéconomiques

3.1 Tourisme

Coordinateurs: Idoia Arauzo (CTP-OPCC), Juan Terrádez (CTP-OPCC)
Auteurs: Juan Terrádez (CTP-OPCC), Idoia Arauzo (CTP-OPCC).
Co-auteurs: Marc Pons (CEMNA-IEA), David Saurí (UB), Ibai Rico (IPE-CSIC), Jeremie Fosse (eco-union).

3.1.1 Réduction de l'attrait touristique hivernal des stations de ski

Situation actuelle: le tourisme d'hiver est la principale source de revenus et le moteur du développement local dans plusieurs régions des Pyrénées (OMT, 2015). Cependant, au cours des dernières années, ce secteur de l'industrie touristique a été identifié comme extrêmement vulnérable aux effets du changement climatique (Pons *et al.,* 2015 ; AEE. 2017). La hausse significative des températures moyennes, maximales et minimales hivernales enregistrée de part et d'autre du Massif au cours du siècle dernier (OPCC, 2013) et la sensibilité élevée de la neige à la hausse des températures ont entraîné une diminution hivernale de la proportion des précipitations sous forme de neige et une augmentation de l'énergie disponible pour la fusion de la neige (Rood *et al.,* 2008). En conséquence, le nombre de jours avec une accumulation de neige suffisante pour pouvoir développer normalement les différentes modalités de ski alpin diminue. Cela s'accompagne d'une migration vers des altitudes supérieures de la ligne d'accumulation de la neige (Minder, 2010 ; López-Moreno *et al.,* 2013). Une étude récente sur l'évolution du manteau neigeux et du nombre de jours skiables dans les stations de ski des Pyrénées a révélé que, sur la période comprise entre 1960 et 2010, le nombre de jours par an avec une épaisseur de la couche de neige de 0 à 30 cm et de 30 à 100 cm a considérablement diminué dans toutes les stations de ski. Cela est d'autant plus vrai dans les stations à basse altitude (respectivement 5-70% et 42-100%) et à moyenne altitude (respectivement 4-20% et 20-65%) (Gilaberte-Búrdalo *et al.,* 2017). La date d'ouverture des stations de ski a aussi été décalée progressivement (selon la disponibilité de neige naturelle), avec des retards allant de 5 à 55 jours dans les stations à basse altitude et de 5 à 30 jours dans les stations à altitudes

RÉSUMÉ

Le secteur touristique dans le Massif des Pyrénées se caractérise en ce qu'il est un des moteurs économiques de ses territoires. En Aragon, le tourisme de neige représente 7% du PIB et les recettes générées par les skieurs avoisinent les 170 millions d'euros par saison (Association touristique espagnole des stations de ski et de montagne, ATUDEM, 2016). Dans le cas de l'Andorre, il est estimé que le poids du tourisme de neige représente environ 15% du PIB, avec un impact direct, indirect et induit de l'ordre de 450 millions d'euros par saison (Observatoire de la durabilité de l'Andorre, OBSA, 2014). Le climat est un facteur clé pour le tourisme de montagne. Les facteurs climatiques et les conditions météorologiques sont considérés comme décisifs dans la perception de l'attrait touristique des différentes destinations, déterminant en conséquence les choix des touristes (Eurostat, 2015). Concrètement, l'effet du changement climatique sur le secteur touristique en ce qui concerne le choix de la destination concerne deux aspects importants. D'une part, il peut avoir des effets directs sur les touristes, liés à la modification des conditions de confort thermique. D'autre part, il peut aussi être décisif pour les conditions nécessaires à la pratique de certaines activités (par ex. couverture et épaisseurs de neige suffisantes pour la pratique du ski). Enfin, il peut engendrer des perturbations environnementales avec des effets contextuels négatifs. En particulier, des aspects comme la présence ou non de certaines espèces de faune et de flore emblématique, la qualité des écosystèmes, l'état des formations naturelles iconographiques et de l'environnement en général sont aussi susceptibles d'être affectés par le changement climatique (Perels *et al.,* 2015), ce qui pourrait entraîner une perte d'intérêt touristique. Pour de nombreux touristes, les conditions climatiques du lieu de destination peuvent déterminer la planification du voyage. Aussi s'efforcent-ils toujours de trouver les conditions idéales pour réaliser les activités prévues sur place. En ce sens, il est fort probable que la variabilité climatique accrue prévue pour les décennies à venir, outre la hausse des températures moyennes, conduise à des changements dans le choix des destinations touristiques actuelles, avec des répercussions positives et négatives dans la dynamique des flux touristiques sur les deux versants du Massif.

moyennes. Ce décalage entraîne des répercussions économiques dans la mesure où il se traduit par une réduction des recettes annuelles : le pont du 8 décembre, les dernières semaines de décembre et début janvier sont une période d'affluence touristique particulière pour la pratique des sports d'hiver. Vu que le retard de l'ouverture des stations de ski correspond à la saison de forte demande touristique, les stations de ski sont systématiquement obligées d'avoir recours à l'enneigement artificiel pour rester opérationnelles, avec d'importantes répercussions économiques en raison de la dépense énergétique, sans compter les énormes frais de maintenance associés aux équipements d'enneigement artificiel (Steiger et Stötter, 2013). Des études analogues aussi bien dans d'autres zones montagneuses méditerranéennes (Lopez-Moreno, Goyette *et al.,* 2011 ; Lopez-Moreno, Vicente-Serrano *et al.,* 2011 ; Franch *et al.,* 2016) que dans les Alpes (Endler et Matzarakis, 2011 ; Beniston *et al.,* 2013) révèlent des données similaires à celles obtenues pour les Pyrénées.Concernant d'autres aspects socio-économiques, force est de constater que la demande en eau à des fins de production de neige, dans un contexte de diminution de la disponibilité de l'eau à cause du changement climatique et aux changements d'utilisation du sol, pourrait devenir un motif de conflit entre les secteurs exigeants en eau, notamment dans certains sous-bassins des Pyrénées. C'est le cas des sous-bassins pyrénéens de l'Adour et de la Garonne, où la demande en eau pour la production de neige a été pendant plusieurs années comparée quasiment à la demande à des fins hydroélectriques et industrielles (Clarimont *et al.,* 2008). Outre le fait de mettre en péril la rentabilité économique des stations de ski, la production de neige artificielle à grande échelle entraîne une série d'externalités environnementales qui doivent aussi être prises en compte, en particulier dans un scénario futur d'aggravation de la pénurie des ressources hydriques (Steiger et Abegg, 2013). Par ailleurs, la hausse des températures hivernales affectera également la capacité à produire de la neige artificielle de manière efficace, conduisant d'une part à l'augmentation des coûts pour sa production et, d'autre part, à la diminution du nombre de jours aptes à la production artificielle de neige (Steiger et Abegg, 2013 ; Pons *et al.,* 2015). Parallèlement aux effets socio-économiques, il convient de remarquer qu'une hausse considérable de la production de neige artificielle pourrait entraîner quelques externalités environnementales graves au niveau de l'environnement. En particulier, la production massive de neige artificielle pourrait avoir des effets négatifs sur la végétation, mais également sur le potentiel érosif des versants. Par ailleurs, elle pourrait aussi accroître le risque d'altération de la qualité de l'eau rejetée dans le milieu en raison de la présence potentielle d'additifs.

Projections futures: Concernant la situation future, les principaux modèles climatiques s'accordent à prévoir une aggravation de la situation actuelle pour le milieu et la fin de ce siècle.

Avec des hausses moyennes des températures dans les Pyrénées allant jusqu'à +2ºC d'ici 2070 et allant jusqu'à +4ºC d'ici 2100 (López-Moreno *et al.,* 2008 ; ENSEMBLES, 2012 ; EURO-CORDEX, 2014), il est fort probable que l'épaisseur du manteau neigeux et la surface de la couverture neigeuse continuent de diminuer de plus en plus dans les prochaines décennies et, en conséquence, que les surfaces skiables se réduisent à leur tour, de même que le nombre de jours de ski par saison. Si ces prévisions se réalisaient, non seulement elles provoqueraient d'importantes perturbations du cycle hydrologique et des écosystèmes des Pyrénées, mais elles impliqueraient de sérieux défis pour le secteur touristique hivernal (SCAMPEI, 2012 ; Steger *et al.,* 2013 ; Kovats *et al.,* 2014 ; Pons *et al.,* 2014 ; EEA, 2017).Dans le contexte d'une étude de Pons *et al.,* (2015), la vulnérabilité future des stations de ski des Pyrénées a été estimée en analysant l'impact du changement climatique sur la capacité future à fonctionner des stations de ski des deux versants du Massif (Figure 3.1.1)).

Cette étude a évalué la capacité future à fonctionner des principales stations de ski des Pyrénées sous deux scénarios de hausse des températures moyennes (+2ºC, hausse prévue d'ici 2051-2070 de la température moyenne hivernale et +4ºC d'ici 2071-2100) et dans l'hypothèse de l'emploi ou non de canons à neige artificielle et traitement des pistes. Les scénarios proposés se réfèrent uniquement à la variation prévue des températures, car il s'agit de la variable dans les projections climatiques qui a le plus d'influence sur les modélisations de l'évolution du manteau neigeux (Pons et al., 2015). Selon les critères utilisés dans cette étude, aujourd'hui sur une saison moyenne de ski, 93% des stations des Pyrénées sont capables de fonctionner normalement sans l'emploi de neige artificielle. Ce pourcentage s'élèverait jusqu'à 98% avec l'emploi de canons producteurs de neige. Cependant, dans un scénario de hausse de + 2ºC, ce pourcentage se réduirait à 44%, tandis que pour des hausses des températures moyennes de + 4ºC le pourcentage total des stations de ski ayant pleine capacité à fonctionner chuterait de façon spectaculaire à 7% seulement. Alors que le recours à des mesures d'adaptation techniques telles que la production de neige artificielle aurait un impact positif dans le premier scénario envisagé

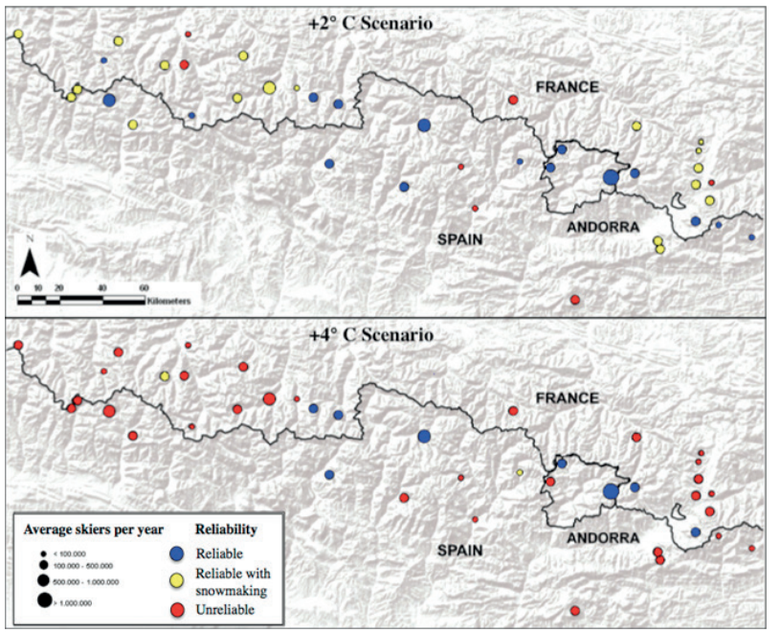


Figure 3.1.1: Évolution de la capacité à fonctionner des stations de ski des Pyrénées avec et sans production de neige artificielle, pour deux horizons temporels et scénarios futurs différents (+2ºC, pour 2051-2070, et +4ºC pour 2071-2100). La couleur des points indique les prévisions sur la capacité à fonctionner des stations selon les différents scénarios. En bleu les stations qui devraient maintenir leur capacité à fonctionner, en jaune les stations qui pourront maintenir leur capacité à fonctionner à condition de produire de la neige artificielle et en rouge les stations qui devraient avoir des difficultés à fonctionner quelques années même en produisant de la neige artificielle comme mesure d'adaptation. La taille des points est proportionnelle au nombre de skieurs par an que chacune des stations étudiées accueille. Source : Pons et al., 2015

(de 44% à 85 %), dans le scénario de + 4ºC l'effet de la production de neige artificielle serait résiduel et ne représenterait pas de hausse significative du pourcentage des stations de ski pleinement opérationnelles à cause de la diminution des jours aptes à la production de neige artificielle.

Bien que les études sur l'impact du changement climatique sur le tourisme d'hiver ne soient pas très encourageantes pour le secteur, il est important de rappeler que les stations des Pyrénées peuvent présenter des différences substantielles dans le niveau de sensibilité et de vulnérabilité au changement climatique selon les différentes caractéristiques aussi bien géographiques que topographiques et de gestion (Campos Rodrigues *et al.,* 2016 ; Navarro-Serrano et López-Moreno, 2016 ; Gilberte-Búrdalo *et al.,* 2017). À cet égard, il convient de souligner, d'une part, la forte hétérogénéité et la grande variabilité spatiale, climatique, de gestion et de contexte socio-économique et touristique conduisant à des niveaux de vulnérabilité très distincts à des distances très courtes, même dans la vallée. Cette différence de vulnérabilité nous amène à pouvoir classer les stations en trois groupes différents. Un groupe de stations considérées comme de haute vulnérabilité, où un scénario de changement climatique moyen et élevé affecterait leur activité et pour lesquelles les mesures d'adaptation techniques ne seront pas suffisantes. Un groupe de moyenne vulnérabilité où, dans un scénario moyen de changement climatique, les mesures techniques pourraient être suffisantes, mais où, dans un scénario plus intense de changement, il faudra des mesures plus structurelles ainsi qu'une transformation destinée à la désaisonnalisation des stations de ski et leur promotion comme stations de tourisme de montagne au sens large. Enfin, le groupe des stations plus résilientes qui, en raison de leurs caractéristiques géographiques et socio-économiques bénéficient d'un avantage concurrentiel par rapport aux autres (Pons *et al.,* 2014). En d'autres mots, contrairement à d'autres études (Campos Rodrigues *et al.,* 2016), ces stations ne verraient pas leur nombre de skieurs diminuer, mais pourraient attirer les skieurs des stations les plus vulnérables (Pons et al, 2014). Cette hypothèse semble cohérente avec la dynamique du nombre de skieurs enregistré par certaines stations des Pyrénées qui, aux saisons avec des conditions marginales, améliorent leurs chiffres ou varient moins qu'aux saisons avec de bonnes conditions d'enneigement. Il a été estimé que dans des conditions de fermeture d'une station ou dans des situations marginales de neige, seuls 5% des skieurs arrêtent ou arrêteraient de skier, le reste choisissant de trouver une alternative ou de skier de manière plus intense une fois que la station retrouve de meilleures conditions (Rutty *et al.,* 2015). C'est la raison pour laquelle, plutôt qu'à une contraction de tout le secteur du ski, on s'attend à une nouvelle répartition du marché entre les stations les plus vulnérables et les plus résilientes des Pyrénées (Pons *et al.,* 2014). Par conséquent, la bonne adaptation au changement climatique doit reposer sur des actions individuelles pour les différentes stations en fonction du niveau de vulnérabilité locale et de l'ampleur de l'impact attendu.

ENCADRÉ 3.2.1. ESTIMATION DES COÛTS D'ADAPTATION DES STATIONS DE SKI : UNE ÉVALUATION ÉCONOMIQUE

Les évaluations économiques relatives à l'estimation des coûts d'adaptation sont des outils de grande utilité pour aider à la prise de décisions en matière d'adaptation. Bien que les évaluations et estimations économiques dans ce domaine doivent être interprétées avec prudence compte tenu des incertitudes inhérentes à l'avenir (évolution de l'économie, émissions mondiales et variabilité climatique future), il s'agit d'études qui permettent de refléter clairement les coûts et bénéfices hypothétiques des éventuelles mesures d'adaptation.

De telles études permettent d'optimiser les mesures d'adaptation en tenant compte du rapport entre coût et bénéfice potentiels, mais également d'évaluer à l'aide d'informations objectives la faisabilité de ces options (Howden et al., 2007). Une récente étude de Campos Rodrigues et al. 2016 a réalisé une analyse des impacts du changement climatique dans des zones de tourisme d'hiver d'Espagne, en mettant l'accent sur la description des mesures d'adaptation potentielles. Concrètement, cette étude a réalisé une analyse coût-bénéfice selon plusieurs scénarios climatiques pour deux mesures d'adaptation : l'augmentation de la neige artificielle et l'élargissement des horaires d'ouverture (horaire de ski nocturne). Le tableau de la figure 3.1.2 indique les estimations de perte de recettes futures (sans mesures d'adaptation) obtenues pour trois scénarios différents de réduction du nombre de jours skiables (Scénario faible : - 10 jours, scénario moyen : - 20 jours et scénario élevé : - 30 jours).

Sistema montañoso	Estación	Escenario bajo		Escenario medio		Escenario elevado	
		Forfaits diurnos vendidos	Pérdida de ingresos (€)	Forfaits diurnos vendidos	Pérdida de ingresos (€)	Forfaits diurnos vendidos	Pérdida de ingresos (€)
PC	Baqueira Beret	731 805	–1 360 040	669 787	–2 720 081	545 753	–5 440 161
	Boí Taüll	101 608	–198 952	92 536	–397 904	74 391	–795 807
	Espot Esquí	58 072	–112 701	52 933	–225 401	42 655	–450 802
	La Molina	244 188	–473 898	222 579	–947 797	179 360	–1 895 594
	Masella	340 906	–602 908	313 413	–1 205 816	258 428	–2 411 632
	Port Ainé	96 735	–187 735	88 175	–375 470	71 053	–750 940
	Port del Comte[1]	47 357	–101 818	42 714	–203 636	33 429	–407 271
	Vall de Núria	41 729	–88 846	37 677	–177 691	29 575	–355 382
	Vallter 2000	55 470	–105 780	50 647	–211 560	41 000	–423 119
PA	Astún	179 735	–394 160	161 762	–788 320	125 815	–1 576 639
	Candanchú	173 333	–365 500	156 667	–731 000	123 333	–1 462 000
	Cerler	226 073	–438 743	206 067	–877 485	166 054	–1 754 971
	Formigal	475 928	–940 279	433 051	–1 880 557	347 299	–3 761 115
	Panticosa	75 552	–149 267	68 746	–298 534	55 133	–597 069

Figure 3.1.2. Estimation du nombre de forfaits diurnes vendus et de la perte de recettes (en euros) associée aux scénarios climatiques, pour les stations des Pyrénées Catalanes (PC) et des Pyrénées Aragonaises (PA). Source : Campos Rodrigues *et al.,* 2016..

Dans l'étude, les auteurs concluent, au vu des différents scénarios climatiques, que l'adoption des deux mesures d'adaptation testées entraînerait en tout état de cause une augmentation considérable des coûts totaux, ce qui pourrait compromettre la viabilité économique future de certaines stations. Ces coûts pourraient être compensés par l'augmentation du nombre de forfaits vendus. Dans ce cas également, le pourcentage de forfaits nécessaires pour couvrir les coûts de neige artificielle pourrait être supérieur à 10% pour plusieurs stations et même dépasser 25% selon les scénarios envisagés. Quoi qu'il en soit, le bilan économique global estimé dans cette étude (résultat de la perte due à la réduction du nombre de jours skiables, les coûts d'élargissement horaire et les bénéfices résultant de la vente de forfaits nocturnes) est négatif pour toutes les stations. Les résultats indiquent un bilan négatif agrégé compris entre 7 et 33,1 millions d'euros. Dans l'ensemble, les auteurs concluent que certaines stations des Pyrénées devront peut-être repenser le modèle économique et miser sur d'autres activités de montagne plus adaptées à de futurs scénarios climatiques. En outre, lors de l'adoption de mesures d'adaptation structurelles ou grey, il est important de tenir compte des éventuels défis émergents comme par exemple la nécessité d'impliquer les acteurs économiques régionaux dans le débat, l'éventuelle nécessité de rentabiliser le capital physique investi dans les stations ou la prise en compte de la typologie du marché du travail dans chaque station particulière pour pouvoir analyser sa capacité d'adaptation à l'éventuelle diversification du secteur.

3.1.2 Altération d'éléments iconographiques du paysage pyrénéen

Situation actuelle: un autre type d'impact que le changement climatique peut exercer sur le secteur touristique des Pyrénées est lié aux changements du paysage et en particulier à l'accélération du processus de dégradation de certains éléments iconographiques du paysage de haute montagne comme les tourbières, les glaciers et les lacs (Stewart *et al.,* 2016). Par ailleurs, les effets du réchauffement climatique sur la biodiversité du Massif, comme les changements physiologiques dans les forêts, le déplacement des communautés végétales vers des altitudes supérieures ou la réduction de la biodiversité pourraient contribuer, avec la dégradation des éléments iconographiques susmentionnés, à la réduction de l'attrait visuel des paysages pyrénéens. L'utilisation des forêts à des fins de loisirs pourrait aussi être affectée par l'augmentation du risque d'incendies forestiers (Barrio et al., 2007 ; Hystad et Keller, 2008) et par la possibilité que certains ruisseaux et rivières s'assèchent ou encore que la qualité de l'eau soit affectée par la diminution des précipitations à certaines saisons de l'année (Lopez-Moreno et al, 2010).

Outre le fait qu'elle implique une série d'impacts écologiques indirects (Finn *et al.,* 2013), l'accélération du recul des glaciers des Pyrénées représente une perte irréversible en termes de patrimoine culturel et environnemental (Houghton et al., 2001). De 1984 à 2016, on a estimé que 20 des 39 glaciers comptabilisés en 1984 ont disparu, soit une perte de surface glaciaire équivalente à 516 ha. Autrement dit, en seulement 32 ans, un peu plus de la moitié des glaciers des Pyrénées ont disparu (López-Moreno *et al.,* 2016 ; Rico *et al.,* 2016). Le recul des glaciers après les années 1980 a doublé le rythme et les taux de changement du XXe siècle, passant de 9,33 ha de pertes annuelles entre 1850 et 1984 à des pertes de 17,76 ha par an pour la période de 1984 à 2016 (Rico *et al.,* 2017). Les études de bilan de masse et les changements d'altimétrie de surface confirment le déséquilibre des glaciers pyrénéens par rapport aux conditions environnementales, avec des pertes d'épaisseur de plusieurs mètres par an (Chueca *et al.,* 2007, Del Rio *et al.,* 2014; Rico *et al.,* 2014; Moreno-Santaengracia, 2016; René, 2017).

Si les prévisions des principaux modèles climatiques se confirmaient, il est fort probable que d'ici la fin du siècle la plupart des glaciers européens disparaîtraient, ce qui signifierait la disparition quasi totale des glaciers des Pyrénées étant donné leur situation géographique plus méridionale (DelRio *et al.,* 2014; Radić *et al.,* 2014; Martí *et al.,* 2016).

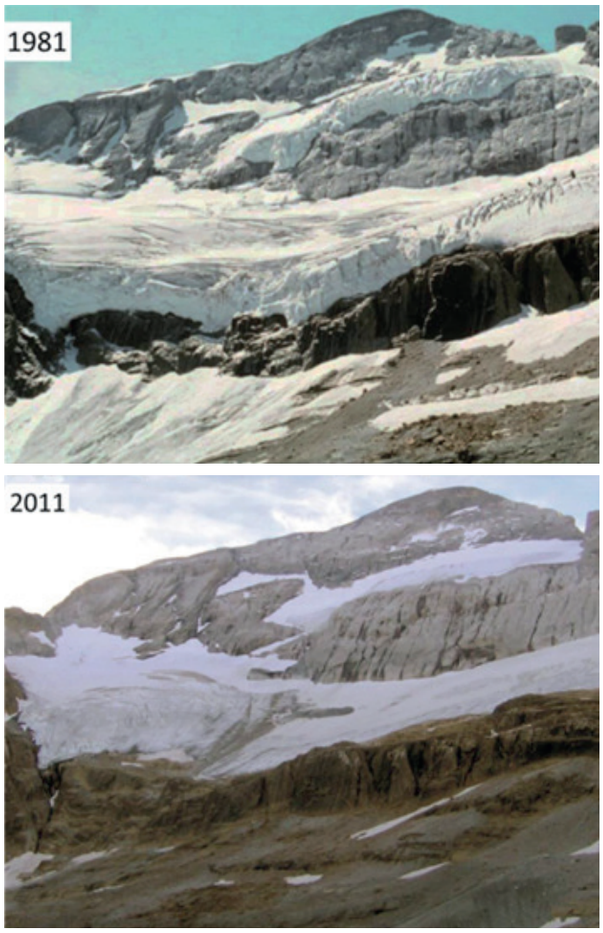


Figure 3.1.3.Image du glacier du Mont-Perdu en été 1981 (à gauche) et en été 2011 (à droite). Source : Lopez-Moreno et al., 2016

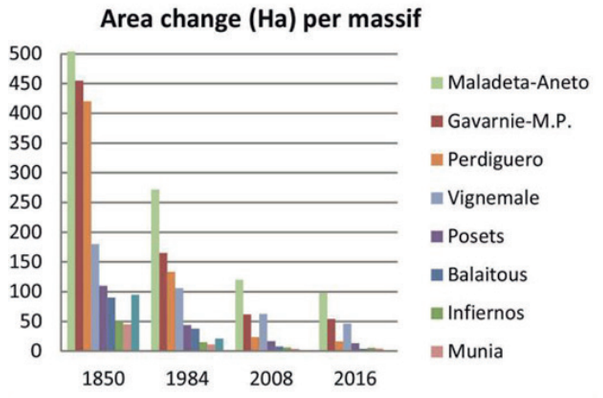


Figure 3.1.4: evolución estimada del área de los principales macizos glaciares de los Pirineos. Fuente: Rico et al., 2017

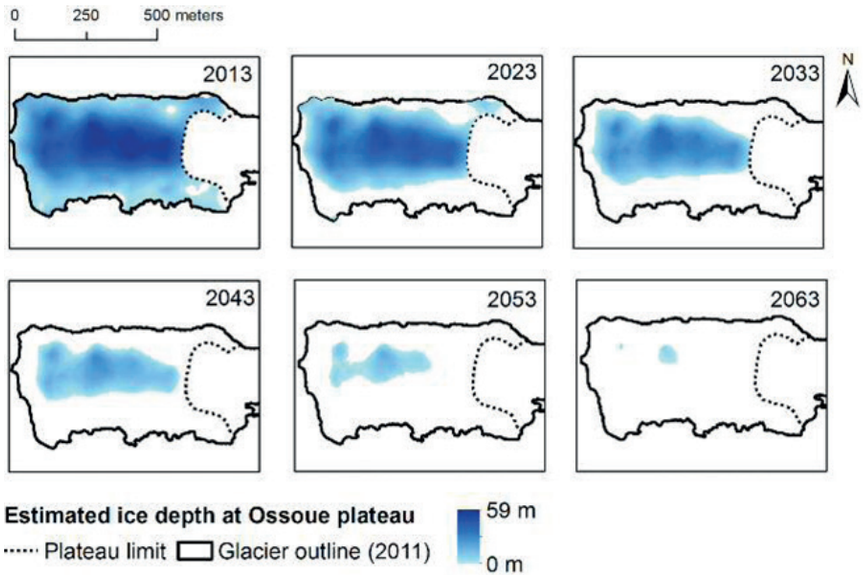


Figure 3.1.5.Estimation de l'évolution de la profondeur de la masse de glace sur le plateau d'Ossoue dans les prochaines décennies. Source : Marti et al., 2016

3.1.3 Accroissement du risque des infrastructures touristiques face aux phénomènes hydrologiques, géologiques et événements climatiques extrêmes

L'influence du changement climatique sur les risques hydrologiques et les risques associés aux événements climatiques extrêmes se présente comme un élément d'instabilité capable de causer d'importants dégâts aux infrastructures liées directement et indirectement au secteur touristique dans les Pyrénées (complexes hôteliers et appartements ruraux, refuges, installations de télécommunication, routes de montagne et sentiers touristiques) et même parfois compromettre l'intégrité des populations de ces lieux (Nogués-Bravo *et al.,* 2007). Les implications potentielles de l'accroissement des risques hydrologiques et météorologiques dans le secteur touristique sont aussi bien les dommages directs causés aux personnes que les dommages aux installations d'hébergement et d'infrastructure touristique. Parmi les phénomènes hydrologiques et géologiques potentiellement catastrophiques qui peuvent avoir un comportement très variable à cause du changement climatique figurent les inondations soudaines, ou les crues causées par la plus grande fréquence de précipitations intenses, les éboulements et glissements de terrain liés à l'augmentation des cycles de gel/dégel provoqué par la variabilité climatique accrue (Keiler *et al.,* 2010 ; Raia *et al.,* 2012) (pour plus d'informations voir le chapitre 3.4). Un autre aspect à prendre en compte est l'affectation possible de la sécurité des usagers de la montagne, découlant des risques glaciaires intensifiés par le changement climatique. En particulier, la dégradation du permafrost peut entraîner une augmentation des chutes de blocs (Rico *et al.,* 2017) ainsi que des changements du paysage dans les montagnes emblématiques telles que Vignemale ou Aneto.

3.1.4 Prolongation de la saison de tourisme de montagne

Le changement climatique pourrait également avoir des effets positifs sur le tourisme de montagne. L'allongement de la saison estivale et l'apparition de températures plus douces au printemps et en automne, alliés à la hausse des températures minimales, pourraient se traduire par un accroissement du choix des destinations touristiques de montagne au détriment d'autres destinations moins confortables en raison des températures élevées (Isoard *et al.,* 2008). Cela pourrait être un avantage concurrentiel majeur pour les Pyrénées par rapport aux régions touristiques de soleil et plage, car les touristes choisiraient de plus en plus les zones montagneuses pour leurs vacances au lieu des zones littorales, où les températures moyennes et maximales plus élevées pourraient réduire considérablement l'adéquation climatique des basses altitudes (Scott *et al.,* 2007).

ENCADRÉ 3.1.2 LES MODÈLES D'ADÉQUATION CLIMATIQUE TOURISTIQUE

Il existe plusieurs approches pour évaluer l'impact du changement climatique sur le tourisme. Les modèles d'adéquation climatique touristique (Becker, 1998 ; Mieczkowski, 1985 ; Moreno et Amelung, 2009) intègrent plusieurs paramètres météorologiques comme la température, les précipitations ou le vent pour tenter d'exprimer de manière synthétique et à l'aide d'une seule valeur l'adéquation climatique des différentes destinations selon les diverses activités touristiques. Bien que ces modèles ne soient pas exempts de limitations (ils présentent une validation empirique insuffisante concernant le comportement des touristes) et doivent donc être interprétés avec prudence, ils se présentent comme un des outils les plus utiles pour l'évaluation des effets du changement climatique sur le tourisme, car les variables climatiques nécessaires sont en général disponibles, mais aussi parce qu'ils permettent d'intégrer les variations saisonnières aux facteurs climatiques. L'indice climato-touristique[38] (ICT) est un indice qui permet d'étudier la relation entre les conditions météo-environnementales et le bien-être physique des personnes. Ainsi, il permet d'évaluer les différentes situations en termes de niveau de confort offert aux touristes et en termes d'activités réalisées dans chaque zone du territoire et à chaque saison de l'année. Par conséquent, un ITC pour le tourisme estival en zones côtières donnera des résultats différents par rapport à l'ITC calculé pour le tourisme de montagne. Dans le cadre du projet européen PESETA, Amelung et Moreno (2009) ont démontré qu'il existe en effet un bon niveau de corrélation entre cet indice et les flux touristiques en Europe.

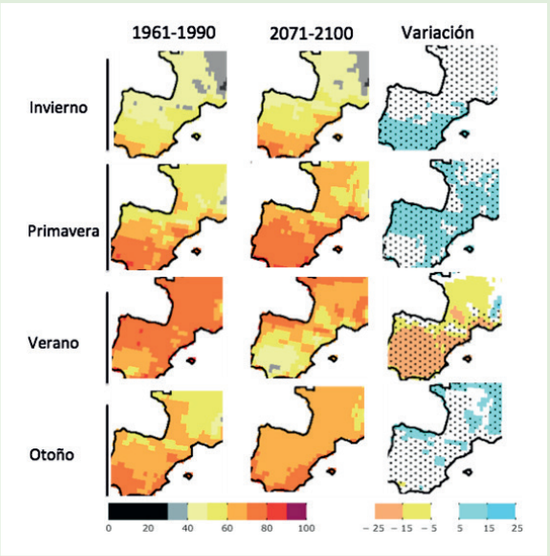


Figure 3.1.6. Valeurs de l'ICT calculées pour la période de référence (1961-1990, colonne de gauche), projections futures de l'ICT (2071-2100, colonne du milieu), et la variation de l'ICT entre les deux périodes (colonne de droite). Les conditions climatiques futures se basent sur le SRES A2 et en utilisant la moyenne des 5 modèles de projections climatiques dans le contexte du projet européen PRUDENCE. Source : Perch-Nielsen et al., 2010.

En comparant la situation de l'ITC actuel et celui projeté pour le futur (Figure 3.1.6), on observe d'une manière générale que l'adéquation est de plus en plus forte à altitudes et latitudes plus élevées. À cause du changement climatique, il est fort probable que tout au long de ce siècle la bande de « climat favorable » se déplacera vers le nord et vers des altitudes plus élevées, améliorant ainsi l'adéquation touristique des Pyrénées, notamment au printemps et en automne. La situation durant la période estivale tend à rester stable ou à enregistrer une une légère baisse de l'adéquation, néanmoins peu signficative en comparison de la situation côtière. En France comme en Espagne, les prévisions indiquent une dégradation du confort climatique dans les zones côtières, ce qui pourrait donner de nouvelles opportunités pour la pratique du tourisme de nature et de montagne (Perrels *et al.,* 2015).

(38) L 'Indice Climato-Touristique (ICT) proposé par le géographe Z. Mieczkowski est considéré comme l'indice de référence pour évaluer l'impact du changement climatique sur le tourisme. Il intègre les variables météorologiques qui sont jugées décisives pour donner entière satisfaction à une activité touristique complète.

3.1.5 Conclusions et recommandations

Le secteur touristique des Pyrénées présente une vulnérabilité élevée aux impacts du changement climatique. Ce secteur est un moteur économique important de leurs territoires. L'ampleur des impacts projettés dépendra dans une large mesure des stratégies d'adaptation prises par les différents acteurs du secteur (touristes, tour-opérateurs et autorités de gestion du secteur) et de leur capacité à mettre en œuvre une gestion adaptative. Cette partie présente de manière synthétique les principaux défis que le secteur touristique du Massif doit et devra relever, ainsi qu'un cadre général dédié aux principales recommandations pour l'adaptation du secteur touristique. Les conclusions sont présentées sous forme de liste des principaux enjeux climatiques du secteur, tandis que les recommandations d'adaptation sont présentées selon trois types d'intervention ou mesures d'adaptation : les mesures *vertes*, *grises* et *souples*.

Principaux enjeux

- Réadapter les modèles de développement touristique pour renforcer la résilience du secteur face à la diminution future du nombre de jours skiables et à la pression environnementale accrue de son activité, tout en renforçant les opportunités émergentes pour le tourisme de nature et de montagne (concept de stations de montagne) ;

- Réduire la vulnérabilité des infrastructures touristiques à l'éventuelle augmentation des événements hydrologiques, géologiques et climatiques extrêmes catastrophiques, mais aussi assurer l'intégrité physique des touristes ;

- Renforcer les stratégies et plans de gestion du milieu naturel pour réduire la vulnérabilité des écosystèmes et de la biodiversité des Pyrénées, en portant une attention particulière aux écosystèmes sensibles de haute montagne (lacs de montagne, glaciers, tourbières etc.) ;

- Assurer une gestion équilibrée des ressources en eau dans le secteur touristique, en portant une attention particulière aux bassins alimentés par l'eau de pluie ;

- Assurer l'intégrité physique des personnes face aux risques hydrométéorologiques et climatiques susceptibles d'être aggravés par le changement climatique (crues, vagues de chaleur, dégradation de la qualité de l'air et de l'eau etc.).

Recommandations

Cette partie présente un ensemble de mesures générales destinées à jeter les bases du développer des mécanismes visant à augmenter la résilience du secteur touristique face au climat futur et sa variabilité. Quoi qu'il en soit, il n'existe pas de combinaison de mesures prédéfinies efficace pour toutes les destinations touristiques des Pyrénées. Chaque réalité locale devra être prise en compte par l'intermédiaire d'une étude détaillée de sa vulnérabilité particulière et établir ses priorités avant d'élaborer et de mettre en œuvre un ensemble de mesures optimales en termes d'efficacité et d'efficience (coût/bénéfices), pour s'adapter au changement climatique.

Mesures *douces*[39]

- Décentraliser et diversifier l'offre touristique en dynamisant le tourisme de montagne et de nature, pour assurer la pérennité économique du secteur en tenant compte de l'évolution du climat (encourager la désaisonnalisation du tourisme de montagne). Il est important d'impliquer dans le processus tous les acteurs locaux ;

- Préparer des plans et des règles de gestion spécifiques pour préserver ou restaurer les caractéristiques naturelles des zones touristiques et assurer leur bon état de conservation, même dans les conditions climatiques futures ;

- Utiliser les pronostics saisonniers à court terme pour la planification d'activités de marketing à court terme (UNWTO et al., 2008) ;

- Garantir la disponibilité des données sur la demande et la consommation touristique de ressources naturelles pour assurer la pérennité environnementale du secteur ;

- Promouvoir des études sur les répercussions des

(39) Les mesures douces ou mesures non structurelles pour réduire ou pallier les effets négatifs du changement climatique. Cette catégorie de mesures est généralement représentée par les travaux de recherche destinés à combler les lacunes de connaissances ou à enrichir les bases de connaissances sur le changement climatique, ses impacts et les secteurs les plus vulnérables. Dans cette catégorie entre aussi le développement de méthodologies et systèmes spécifiques pour réduire les risques liés au changement climatique (par ex. développement d'un early warning System transfrontalier pour la gestion des vagues de chaleur dans le Massif).

impacts du changement climatique sur le secteur touristique des Pyrénées (par ex. développement et suivi d'indicateurs socio-économiques d'impact, études de perception du risque de la part des acteurs socio-économiques locaux impliqués) ;

• Adapter les dates de début et de fin de la saison de ski ;

• Introduire des mesures techniques et de gestion susceptibles d'accroître l'attrait touristique des stations de ski (par ex. ski nocturne) ;

• Promouvoir des systèmes de gestion intégrée des ressources touristiques au sein du Massif pour aider à créer les conditions qui dynamiseront les séjours des touristes moins fugaces, qui s'étendront sur tout le territoire pyrénéen et pendant toute l'année.

Mesures *vertes*[40]

• Garantir le bon état de conservation des couloirs naturels et leur adaptation aux conditions climatiques futures pour renforcer l'interconnectivité progressive des espaces naturels des Pyrénées, assurant ainsi le bon état de santé des écosystèmes de montagne ;

• Intensifier, si possible, le couvert forestier aux abords des pistes afin d'augmenter la durée du manteau neigeux à travers l'augmentation des zones de piste ombragées ;

• Encourager des mesures d'adaptation vertes pour favoriser l'entretien naturel du manteau neigeux (par ex. favoriser le bon état du manteau d'herbe sur les pentes).

Mesures *grises*[41]

• Favoriser la production de neige artificielle et les mesures de maintien de celle-ci (construction de barrières d'accumulation et de protection contre le vent) dans les stations et sur les versants où cela est faisable à moyen terme du point de vue climatique, viable économiquement et durable d'un point de vue environnemental (par ex. bonne disponibilité en eau). Il est important de ne concentrer les efforts et investissements dans ce sens que dans les stations et zones potentiellement favorables ;

• Développer dans les infrastructures touristiques en réalisation ou en rénovation des projets spécifiques pour une gestion efficace des ressources en eau et de production énergétique autosuffisante. Proposer également des itinéraires touristiques pour exploiter le potentiel de l'écotourisme responsable et sensibiliser les touristes à ces questions ;

• Mettre en œuvre des travaux de mise en sécurité des itinéraires et sentiers touristiques de montagne limitrophes situés à proximité de zones à risques d'inondation et d'éboulement.

IDÉES CLÉS

• Le changement climatique diminue le nombre de jours avec une accumulation de neige suffisante pour pouvoir développer normalement les différentes modalités de ski alpin, ainsi qu'une migration vers des niveaux plus élevés de la ligne d'accumulation de neige ;

• La réduction du manteau neigeux prévue au cours de ce siècle affectera de manière hétérogène les différentes stations de ski des Pyrénées, en fonction de leur emplacement, de leur altitude et de leurs caractéristiques de gestion ;

• L'intensification des risques naturels causés par le changement climatique pourrait avoir un impact considérable sur certaines destinations et sur les infrastructures touristiques de haute montagne ;

• Le changement climatique pourrait modifier certains éléments iconographiques du paysage des Pyrénées, affectant négativement son attractivité ainsi que son intérêt touristique ;

• L'extension de la saison estivale et la tendance vers des températures toujours plus douces au printemps et à l'automne, ainsi que la baisse des températures minimales, pourrait entraîner une fréquentation accrue des Pyrénées en tant que destination touristique, à la place d'autres destinations moins confortables à cause du stress thermique.

(40) Les mesures vertes ou basées sur les services écosystémiques : ce type de mesures comprend toutes les mesures, bonnes pratiques, études ou initiatives ayant pour principe l'utilisation des services écosystémiques rendus par les différentes ressources naturelles pour pallier les effets négatifs du changement climatique (par ex. pratiques sylvicoles conservatrices pour accroître la capacité des forêts des Pyrénées à réduire les risques hydrogéologiques).

(41) Les mesures Grises ou infrastructurelles, sont toutes celles qui basent leur action palliative sur la construction ou la mise en place d'éléments infrastructurels concrets (par ex. construction de digues dans les zones habitées à haut risque d'inondations torrentielles).

3.2 Agropastoralisme de montagne

Coordinateurs: Juan Terrádez (CTP-OPCC), Idoia Arauzo (CTP-OPCC)
Auteurs: Juan Terrádez (CTP-OPCC), Idoia Arauzo (CTP-OPCC).
Co-autores: Rosa M. Canals (UNAV, Dpto. Producción Agraria. Grupo Ecología y Medio Ambiente) María Durán (UNAV, Dpto. Producción Agraria. Grupo Ecología y Medio Ambiente), Jordi Puig (Espigall).

RESUMEN

La agricultura y la ganadería son sectores socioeconómicos clave por su elevado valor estratégico, económico y territorial en ambas vertientes de los Pirineos. Aunque su presencia es desigual en la cordillera, según los datos disponibles la agricultura emplea al 8,4% de la población activa en la vertiente francesa, y representa un potencial económico de más de 500 millones de euros €, basado principalmente en la producción agropecuaria (ACAP, 2017). En cambio este sector ocupa a un 0,4% de la población activa en Andorra y representa un total de 12,8 millones de euros del producto interior bruto del país (IEA, 2016). En las próximas décadas, el cambio climático podría influir de manera significativa en la capacidad de producción de las superficies agrícolas pirenaicas, tanto por los efectos directos del aumento de la concentración de CO_2 en la atmósfera (en positivo) como por el cambio en las condiciones climáticas y medioambientales (básicamente, en negativo). Los principales impactos del calentamiento global sobre el agroecosistema se asocian a disminuciones en la producción debido a un mayor estrés hídrico y térmico en los cultivos, la pérdida de tierras agrícolas debido al incremento de los riesgos hidrológicos, y a un incremento del riesgo de propagación de plagas. Por otro lado, las nuevas condiciones agro-climáticas podrían propiciar la expansión de algunos cultivos, de raíz mediterránea, no habituales en los Pirineos.

Los pastos de montaña son un recurso fundamental para el sector y además generan numerosos servicios ecosistémicos a la sociedad (de producción, l de mantenimiento de la biodiversidad, de paisaje, de recursos hídricos de calidad y sumideros de carbono (Bernues *et al.,* 2014).

El incremento de la concentración de CO_2 atmosférico, el consecuente incremento de la temperatura media del aire, así como los cambios en el régimen estacional de las precipitaciones y la mayor frecuencia e intensidad de los eventos climáticos extremos, afectarán a la agricultura y a la ganadería extensiva ligada al aprovechamiento de los pastos de montaña en los Pirineos, provocando impactos de diferente magnitud e incluso de diferente signo según las zonas consideradas.

3.2.1. Impacts et vulnérabilités dans le secteur agricole

La diminution de la durée des gelées et l'augmentation des températures moyennes pourraient favoriser l'expansion des cultures peu courantes dans les Pyrénées, telles que les cultures méditerranéennes ou d'origine subtropicale. Par ailleurs, les cultures sans irrigation pourraient subir une réduction de leur aire de distribution potentielle, restreinte en raison d'une plus grande variabilité du régime pluviométrique et de l'augmentation des températures moyennes et extrêmes. Par conséquent, la période comprise entre la fin du printemps et le début de l'automne aurait des taux d'évapotranspiration beaucoup plus élevés.

A. Déplacement des zones de compatibilité climatique de certaines cultures

La modification des conditions climatiques entraînera très probablement le déplacement des zones potentiellement favorables à la bonne croissance de certaines cultures (Mereu *et al.,* 2008). Pour certaines espèces cultivées, l'aire de répartition potentielle[42] pourrait être réduite, comme dans le cas du maïs (Iglesias et Rosenzweig, 2009 ; Donatelli *et al.,* 2012).. Grâce à la hausse des températures moyennes et à la baisse du nombre de jours avec gelées, d'autres cultures comme la vigne ou l'olivier pourraient en bénéficier (Ponti *et al.,* 2014), et étendre leur aire de répartition potentielle aux terrains à plus haute latitude et altitude (Arblaster, 2007 ; Donatelli *et al.,* 2012 ; Tanasijevic *et al.,* 2014). En ce qui concerne les Pyrénées et en particulier pour la culture de l'olivier, on estime une réduction

(42) La répartition potentielle d'une espèce est une expression utilisée dans les modèles prédictifs. Elle désigne les lieux où une espèce donnée peut être potentiellement présente car les conditions climatiques et environnementales nécessaires sont réunis pour son bon développement.

considérable des zones non favorables à sa culture et une extension de la surface potentiellement favorable et acceptable (Moriondo *et al.,* 2008 ; Tanasijevic *et al.,* 2014). Concrètement, il est prévu que des zones

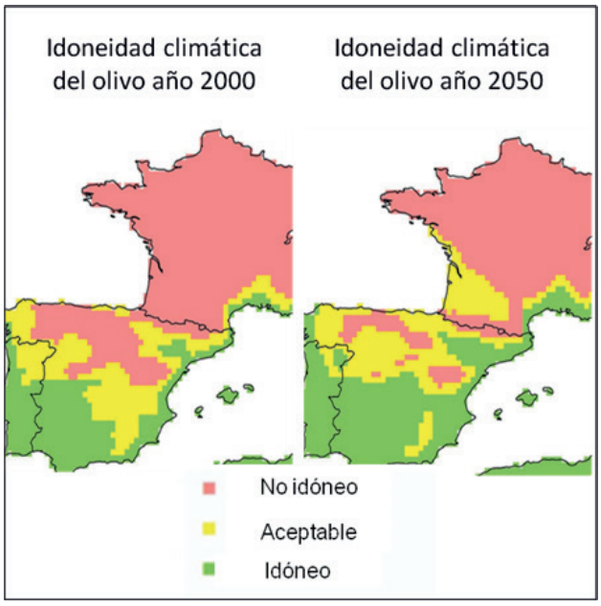


Figure 3.2.1. Estimation de l'évolution de la compatibilité climatique pour la culture de l'olivier sur la période 2000-2050, en utilisant le modèle ECHAM5 et le scénario d'émission A1B. Source : Tanasijevic *et al.,* 2014

actuellement non favorables le soient à l'avenir. Il ne faut cependant pas oublier que les événements climatiques extrêmes de plus en plus fréquents, comme les gelées tardives, pourraient inverser une partie des effets positifs susmentionnés, car ils influeraient sur les plantes dans un état de développement avancé et plus vulnérable aux gelées (Tranka *et al.,* 2015). Pour cette raison, les nouvelles cultures de type méditerranéen devraient être situées dans des zones très favorables et en utilisant des variétés à cycle court et tardif.

B. Changements sur les rendements des cultures

Le changement climatique a des effets positifs et négatifs sur les rendements des cultures. Les effets positifs les plus importants sont l'effet fertilisant du CO_2 atmosphérique et l'allongement de la saison de croissance. Les impacts négatifs les plus importants (observés et attendus) sont les changements de la phénologie des cultures, l'augmentation des déficits en eau et le risque accru de dommages causés par les phénomènes météorologiques extrêmes.La capacité de production des cultures et des pâturages est fortement conditionnée par deux facteurs : la température et la quantité d'eau disponible dans le sol. Le changement climatique influence directement les deux variables, pouvant entraîner des effets négatifs sur la quantité et la qualité de la production finale. Outre les changements progressifs engendrés par la hausse graduelle des températures et la variabilité accrue des précipitations, les événements climatiques extrêmes (vagues de chaleur, sécheresses et précipitations intenses) peuvent entraîner des impacts ponctuels mais très significatifs sur les cultures. Au niveau européen, le changement climatique a été considéré comme un des principaux facteurs associés à la stagnation des rendements de certaines cultures céréalières essentielles, en dépit des progrès agronomiques continus (Brisson *et al.,* 2010; Olesen *et al.,* 2011; AEE, 2016).Parmi les impacts observés, on peut citer les changements agro-phénologiques[43] dans les cultures : la hausse progressive des températures moyennes provoque l'avancement d'une bonne partie du calendrier agricole, et a provoqué en particulier l'avancée de la date de floraison et de récolte de nombreuses cultures (figure 3.2.2). Même si les changements phénologiques peuvent être partiellement contrés à court terme via la mise en œuvre de pratiques de gestion agronomique (par ex. avancement de la date de semis ou choix de variétés tardives), ces mesures peuvent ne pas êtres suffisantes pour assurer les niveaux de production actuels de nombreuses cultures à moyen et long terme (Trnka *et al.,* 2014).

Selon une étude récente du Centre commun de recherche de la Commission européenne (JRC), dans l'espace correspondant au Massif pyrénéen la floraison du blé a avancé en moyenne de 0,35 ± 0,15 jours par an entre 1985 et 2014, avec des écarts significatifs en fonction de la zone spécifique concernée. Tout comme la floraison, la date de maturation ou de remplissage du grain et, par conséquent, le moment de la récolte a aussi avancé considérablement au cours des trente dernières années. Cette avancée constitue une accélération sensible du cycle végétatif des cultures. En général, un cycle végétatif accéléré se traduit par un plus faible rendement des cultures, car il implique une utilisation moins efficace de l'énergie thermique,

(43) Les changements agro-phénologiques désignent les changements dans le cycle annuel des cultures par rapport aux facteurs climatiques.

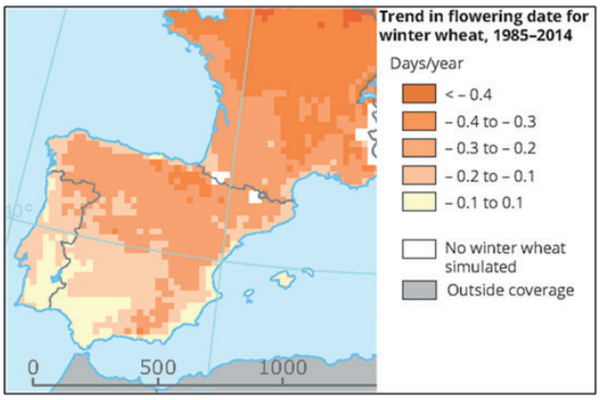


Figure 3.2.2. Tendance de la date de floraison du blé d'hiver au cours de la période 1985-2014, exprimée en nombre de jours d'avancée par année. Source : AEE 2016 de MARS/STAT database.

du rayonnement solaire et des ressources en eau disponibles. Dans le cas du secteur viticole, l'avancée de la floraison et de la récolte pourrait conduire à des baisses significatives de la production dans certains secteurs (Ponti *et al.,* 2015). Fraga *et al.,* 2016 ont estimé que les dates de floraison et vendanges dans les régions pré-pyrénéennes de part et d'autre de la chaîne, pourraient avancer respectivement de 30 ± 10 jours et 40 ± 10 jours en 2040-70 par rapport à la période 1980-2005. Un des effets négatifs observés au cours des dernières des dernières décennies est dû à la simultanéité des états de maturation précoce et la fréquence accrue des événements climatiques extrêmes comme les vagues de chaleur et les pluies intenses pendant les mois d'été.

Dans ces circonstances, le raisin peut s'abîmer car le fruit absorbe et perd beaucoup d'eau en peu de temps. Cet effet continu de surhydratation et d'assèchement dû à l'excès ponctuel de chaleur et d'eau entraîne souvent le déchirement de la peau du fruit, provoquant la pourriture du raisin mûr avant sa récolte (Lareboullet *et al.,* 2013). Certes, à des hausses modérées des températures, la productivité de la vigne pourrait augmenter mais aussi altérer la qualité de la récolte et les propriétés du produit fini (vin à teneur en alcool plus élevée). Au fur et à mesure que les effets du changement climatique s'intensifieront, il est probable que le secteur doive modifier progressivement ses techniques de production, voire changer les variétés cultivées par d'autres plus adaptées aux nouvelles conditions agro-climatiques. Cela pose des problèmes potentiels pour la production avec appellation d'origine contrôlée liée aux lieux et aux variétés spécifiques des Pyrénées. Un aspect essentiel pour la bonne croissance des cultures est le rapport entre disponibilité et demande en eau. La demande en eau des cultures se définit comme l'eau nécessaire pendant la saison de croissance pour que les cultures se développent correctement. Celle-ci varie fortement entre les différents types de culture et selon le moment de la saison de croissance. La variabilité croissante du régime des précipitations ainsi que la fréquence et l'intensité accrues des sécheresses entraînent des déséquilibres entre la demande croissante en eau des cultures et la diminution progressive de la disponibilité en eau dans le sol, engendrant ce que l'on définit en termes agronomiques comme déficit hydrique des cultures (Felten *et al.,* 2011).En ce qui concerne l'impact des événements climatiques extrêmes, ceux-ci peuvent causer des dommages importants aux cultures et engendrer des pertes considérables dans la production. À cause des vagues de chaleur estivales des années 2003 et 2010, on estime que les pertes de récoltes sur céréales ont atteint 20% de la récolte totale dans les régions européennes affectées. Dans de nombreux cas, les périodes les plus chaudes correspondent à des périodes de sécheresse, provoquant un effet synergique négatif. Durant la saison de culture 2004/2005, on a estimé que la production de céréales dans la péninsule Ibérique a chuté en moyenne d'environ 40% par rapport à la moyenne d'autres années (GIEC, 2014).

Enfin, parmi les impacts attendus, bien qu'il n'existe pas de projections spécifiques pour le Massif sur l'évolution de l'agro-phénologie, il est très probable que la période végétative de nombreuses cultures s'accélère progressivement avec la hausse des températures (Savé *et al.,* 2012 ; Ponti *et al.,* 2015), portant atteinte à leur rendement et à la qualité finale des fruits et du grain (Olesen *et al.,* 2012 ; Ferrise *et al.,* 2013 ; Funes *et al.,* 2015 ; Fraga *et al.,* 2016). En ce qui concerne l'évolution projetée du déficit en eau des cultures, le changement attendu du régime saisonnier des précipitations, la fréquence et l'intensité accrue des sécheresses et des vagues de chaleur, associés à l'augmentation des taux d'évapotranspiration potentielle (García-Ruiz, 2011), entraîneront sans doute une plus grande variabilité interannuelle de la disponibilité des ressources en eau. Cela se traduira par une hausse des situations de déficit hydrique dans certaines régions et zones de culture du Massif (Figure 3.2.3).

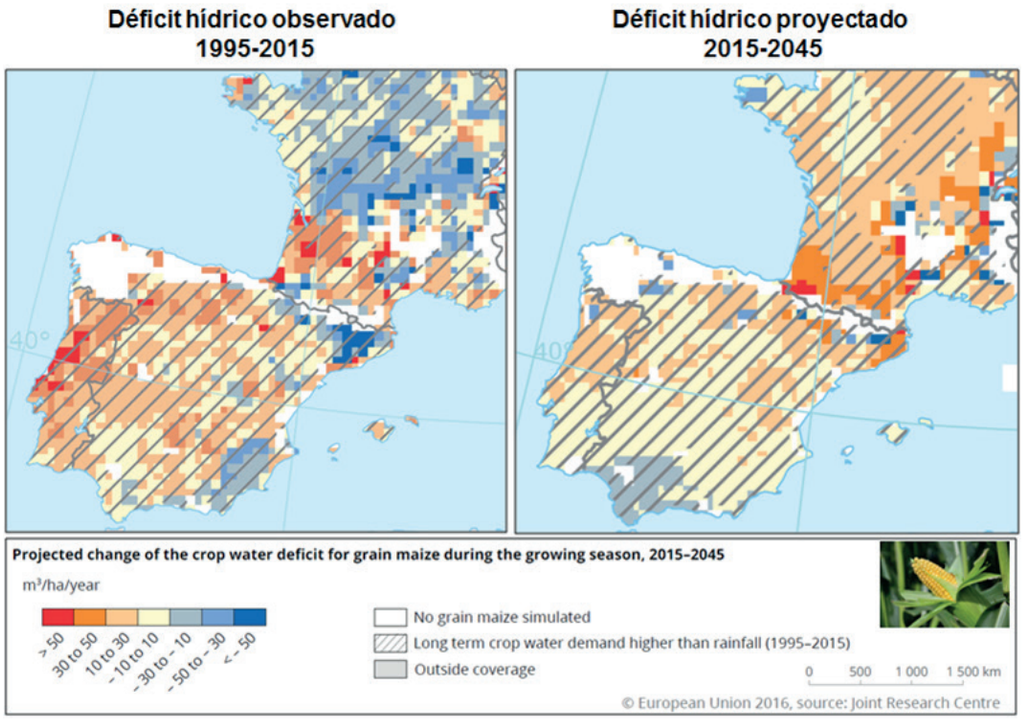


Figure 3.2.3. Estimation du déficit hydrique observé (à gauche) et projeté (à droite) pour la culture du maïs selon le modèle climatique de circulation globale MIROC. Les simulations ont été réalisées en utilisant le modèle agro-climatique WOFOST pour le scénario d'émissions RCP 8.5. La couleur rouge indique une augmentation du déficit hydrique et la couleur bleue indique une réduction du déficit. Les zones où la demande en eau des cultures dépasse régulièrement la disponibilité en eau sont hachurées sur la carte. Source : JRC, 2016.

Le déficit hydrique croissant aura un impact direct sur la productivité et la qualité des cultures pluviales, et indirect sur les cultures irriguées du fait d'une augmentation des besoins d'irrigation (ciscar *et al.,* 2013). Ce déséquilibre entre disponibilité et demande en eau à certaines périodes de l'année pourrait accroître le risque de conflits potentiels entre les secteurs exigeants en eau. Selon les modèles utilisés par le JRC, le déficit hydrique pour la culture du maïs sera particulièrement élevé dans la partie nord-est et sud-ouest du Massif. Toutefois, la valeur de cette hausse variera considérablement selon les cultures, les régions et les versants du Massif. Il sera donc nécessaire d'effectuer des études plus détaillées et plus fermes pour concevoir et mettre en œuvre les mesures d'adaptation les plus pertinentes dans chaque cas. Enfin, la hausse éventuelle des risques naturels induits ou intensifiés par le changement climatique (éboulements, glissements de terrain, crues, etc.) pourrait affecter négativement les terres agricoles situées en zones de moyenne montagne, à travers l'intensification des phénomènes érosifs et de perte en terres agricoles. En outre, la plus grande incidence et extension des incendies forestiers projetés pour les décennies à venir (Giannakopoulos *et al.,* 2009) pourrait accroître temporairement la surface de sol dépourvu de couverture végétale et, par là même, l'exposition des couches superficielles à l'érosion hydrique. Par ailleurs, une atmosphère plus chaude pourrait accélérer le processus de minéralisation de la matière organique du sol[44].Cela pourrait entraîner des effets à la fois positifs et négatifs. D'une part,

(44) La minéralisation peut se définir comme le processus de transformation de la matière organique du sol (MOS) en matière inorganique. Un sol riche en matière organique présente une meilleure structure et, entre autres avantages, il est plus résistant aux processus érosifs. Un sol pauvre en matière organique est généralement plus vulnérable aux processus érosifs.

l'accroissement de la minéralisation impliquerait une plus grande disponibilité de nutriments pour la croissance des plantes (tels que l'azote et le phosphore) mais signifierait également la perte de carbone fixe dans les structures plus ou moins stables du sol. Cette réduction du carbone organique dans les sols implique une réduction de ses fonctions de puits de carbone (fixation du carbone atmosphérique dans le sol) ainsi qu'une fragilisation de sa structure, affaiblissant les agrégats organo-minéraux responsables de la fertilité du sol. Suite à cet affaiblissement, les sols pourraient devenir plus vulnérables aux processus d'érosion physique et voir leur capacité à stocker de l'eau pour les cultures réduite. En ce sens, les pluies torrentielles plus fréquentes pourraient intensifier les phénomènes de perte de sol, en particulier dans les sols arables à végétation rare et pauvres en matière organique, déjà vulnérables à l'érosion hydrique (Olesen *et al.,* 2007 ; Jones *et al.,* 2012 ; Panagos *et al.,* 2015).

La saison de croissance thermique est un indicateur agro-écologique qui reflète dans quels lieux et à quel moment les différentes cultures peuvent être potentiellement cultivées, en supposant qu'elles bénéficient de sols adaptés, disposent d'eau suffisante et de rayonnement solaire. L'allongement de la saison de croissance reflète la durée de la période pendant laquelle la température dépasse un certain seuil à partir duquel les cultures peuvent pousser correctement. La durée de la saison sans gelée est considérée comme la période la plus propice à la croissance de la plupart des plantes et cultures. De son calendrier dépendent les moments clés du cycle de vie des différentes cultures comme la floraison ou la période de remplissage du fruit. Au cours des dernières décennies, la période comprise entre les dernières gelées de printemps et les premières gelées d'automne s'est prolongée, se traduisant par une augmentation du nombre de jours sans gelée dans toute l'Europe (Brázdil *et al.,* 2011). En ce qui concerne les Pyrénées, il a été estimé que le nombre de jours avec gelées a diminué d'environ -0,4 ± 0,2 jour par décennie sur la période comprise entre 1985 et 2014 (ESPON project, 2013 ; AEE, 2016). Dans les zones de culture des Pyrénées, où les basses températures et les variations thermiques sont le principal facteur limitant, la hausse des températures minimales durant la saison hivernale et au début du printemps pourrait entraîner une augmentation de la production des cultures plus sensibles au froid. Cependant, les dégâts pourraient être encore plus importants pour certaines cultures, car les températures minimales élevées pourraient bloquer le développement des mécanismes de protection naturelle des plantes contre le froid (Maracchi, 2004). Sans ces outils naturels, les gelées tardives ponctuelles, de plus en plus fréquentes, pourraient engendrer des pertes importantes, en particulier dans les cultures précoces.

En ce qui concerne l'effet de la concentration élevée de CO_2 dans l'atmosphère, il a été prouvé expérimentalement qu'une hausse de la concentration de dioxyde de carbone stimule la croissance et la production des cultures. Plus la concentration de CO_2 est importante, plus le taux de photosynthèse est élevé, et plus la capacité de la plante à pousser et à fixer le carbone atmosphérique est importante[45] (Ainsworth et Long, 2005). Néanmoins, cette augmentation ne serait pas linéaire. Toutes les cultures ne réagiraient pas non plus de la même manière, leur comportement variant en fonction du type de métabolisme. Les cultures à métabolisme de type C3[46] (grain, riz, luzerne, soja et la plupart des plantes à fruits), répondent mieux à l'augmentation de la concentration de CO_2 que les plantes à métabolisme de type C4[47] (maïs, millet, sorgho, etc.) puisque ces dernières bénéficient déjà d'un processus de photosynthèse très efficace et se révèlent donc moins sensibles à l'augmentation de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère (Long *et al.,* 2006 ; Yano *et al.,* 2007).

Certains auteurs ont estimé qu'en moyenne et en l'absence de facteurs de stress biotique et abiotique, pour des concentrations de CO_2 dans l'atmosphère de 550 ppm (403,64 ppm en novembre 2017), la productivité des cultures pourrait atteindre des

(45) La conductance stomatique est un paramètre de proportionnalité qui relie le flux d'eau transpiré à travers les stomates avec le la force motrice de ceux-ci.

(46) Les plantes au métabolisme C3 procèdent efficacement à la photosynthèse à des températures modérées (efficacité maximale à 20 ° C). Les stomates étant ouverts pendant la journée, une température excessive entraîne une augmentation de la transpiration des plantes. On les appelle plantes C3 car le premier composé organique produit par la photosynthèse est une chaîne carbonée avec trois atomes de carbone, 3-phosphoglyceraldehyde ou glyceraldehyde 3-phosphate

(47) Les plantes C4 sont définies comme des espèces caractéristiques des climats tropicaux et subtropicaux, telles que le maïs ou le sorgho.qui utilisent un moyen différent et plus efficace que les usines C3 pour fixer le carbone atmosphérique, étant plus efficace l'utilisation de l'eau dansla phase de fixation du carbone.

hausses de 10 à 20% pour les plantes C3 et de 0 à 10% pour les plantes C4 (Gifford, 2004 ; Long *et al.,* 2004). D'autres auteurs suggèrent que dans le cas du blé, l'effet fertilisant de la hausse de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère pourrait même désamorcer les effets négatifs induits par le stress hydrique dans un futur (Manderscheid et Weigel, 2007). En réalité, quel que soit le type de plante (C3 ou C4), la hausse des concentrations de CO_2 induit la fermeture partielle des stomates des feuilles, réduisant ainsi la consommation d'eau par transpiration, sans aucune incidence sur le processus de photosynthèse et donc sur le taux de productivité (Bernacchi *et al.,* 2007 ; Kruijt *et al.,* 2018). Il convient toutefois de souligner que l'effet fertilisant potentiel de l'augmentation de la concentration de CO_2 sera fortement limité et conditionné, non seulement par une moindre disponibilité en eau, mais par d'autres facteurs limitants directement liés au changement climatique tels que la moindre présence et disponibilité de carbone organique dans le sol, la fréquence et l'intensité accrues des événements climatiques extrêmes et la propagation accrue des parasites et autres organismes nuisibles.

D'autre part, l'assimilation de fortes concentrations de CO_2 par la majorité des cultures suscite des changements dans leur composition à travers la modification de la teneur (ratio) carbone-azote du grain, avec des effets majoritairement négatifs sur leur productivité et leur qualité (Makoswski *et al.,* 2015). Compte tenu des multiples facteurs en jeu et de la complexité des interactions possibles entre eux, il sera nécessaire de favoriser le développement d'études portant sur la conception et la mise en œuvre de modèles dynamiques de simulation pour obtenir une évaluation plus exhaustive des hypothétiques effets positifs de la concentration élevée de CO_2 sur les différentes cultures d'intérêt dans les Pyrénées.

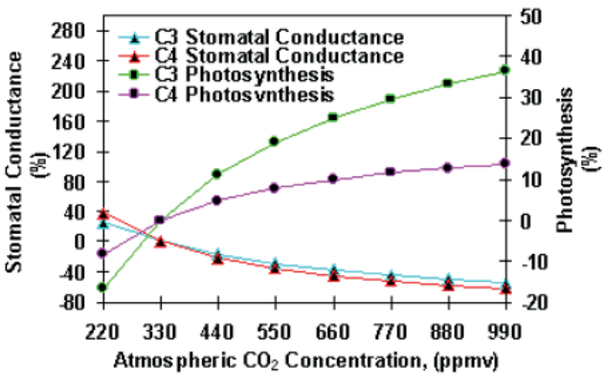


Figure 3.2.4. Courbe d'augmentation de l'efficacité photosynthétique et de diminution de la conductance stomatique chez les plantes à métabolisme C3 et C4, en fonction de la concentration de CO2 dans l'air. Source : AVEMAC project ; JRC, 2012.

C. Risque d'expansion de ravageurs dans les cultures

Les interactions entre les plantes et leurs ennemis naturels sont influencées par les conditions environnementales et les températures. L'éventuelle modification des aires de répartition de certaines cultures, combiné au changement prévu dans les conditions d'humidité du sol et des températures moyennes, pourrait favoriser une variation des modèles de répartition et de propagation des maladies végétales actuelles dans les principales cultures des Pyrénées, ainsi qu'un risque accru d'expansion des nouvelles maladies végétales (Bellocchi *et al.,* 2010 ; Luck *et al*., 2011).Les principaux mécanismes à travers lesquels le changement climatique influence la dissémination et l'apparition de nouveaux ravageurs sont essentiellement au nombre de trois.

Premièrement, les nouvelles conditions climatiques et environnementales pourraient faciliter le développement de quelques organismes nuisibles à certaines périodes de l'année où leur développement était auparavant limité par les basses températures. Les températures minimales de plus en plus élevées expliqueraient alors que certains organismes considérés comme ravageurs des cultures connaissent un nombre de cycles de reproduction plus élevé, augmentant ainsi l'incidence sur les cultures (Coakley *et al.,* 1995). En particulier, les insectes sont des individus ectothermiques[48], qui réagissent rapidement aux changements de température. En conséquence, la distribution, le développement et la reproduction des différentes espèces d'insectes sont étroitement liés aux températures. Dans les régions boréales et alpines de l'Europe, le multivoltinisme[49] a déjà été décrit chez les insectes en raison du changement climatique. Cela affecte le rendement de certaines cultures et provoque une grave défoliation dans les peuplements forestiers. Un exemple caractéristique de

(48) Les organismes ectothermiques sont des organismes dont la température est contrôlée principalement par une source de chaleur externe et sa capacité de générer de la chaleur métabolique est insignifiant. Des exemples typiques d'animaux ectothermiques sont les amphibiens, la plupart des poissons et invertébrés. Actuellement, le terme thermoformage est utilisé pour désigner ces organismes.
(49) Le phénomène du multivoltisme fait référence aux espèces qui terminent plus d'un cycle de vie au cours d'une année.

ENCADRÉ 3.2.1 ÉTUDE SUR L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DU SECTEUR AGRICOLE DES HAUTES PYRÉNÉES ET DU VAL D'ARAN : UNE ESTIMATION ÉCONOMIQUE

L'étude Adaptation au changement climatique du secteur agricole des Hautes Pyrénées et du Val d'Aran : risques et opportunités analyse les conséquences du changement climatique sur l'agriculture de ce territoire à partir d'une modélisation climatique de mise en place de cultures, en comparant le scénario actuel avec un scénario futur (2030-2050).

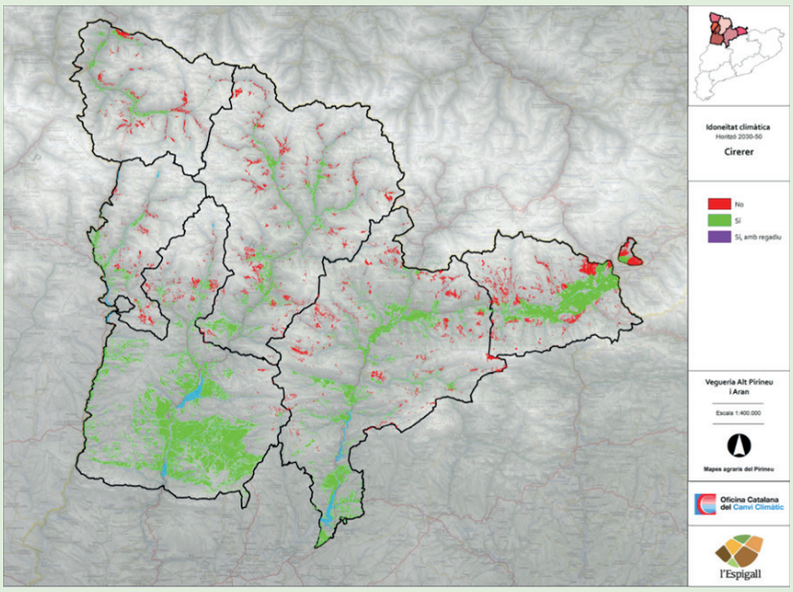


Figure 3.8.5. Carte de l'adéquation climatique projetée pour la culture du cerisier dans les Hautes-Pyrénées et l'Aran pour la période 2030-50, en fonction de l'adéquation climatique actuelle. Source: OCCC, 2017

L'étude conclut que le changement climatique fera pénétrer le climat méditerranéen sec dans les vallées aujourd'hui fraîches de cette région des Pyrénées. La rigueur des hivers s'atténuera et les jours de gelée diminueront, tandis que les étés seront plus longs, plus chauds et plus secs. Par conséquent, les cultures de type méditerranéen (vigne, olivier, céréales, etc.) et certains arbres fruitiers peu exigeants en eau seront les plus favorisés, tandis que d'autres cultures traditionnelles des terres arides pyrénéennes, comme la pomme de terre, seront en forte régression. En revanche, les nouvelles cultures mises en place, comme le pommier ou le poirier, sont destinées à se faire une place dans les zones irriguées et à concurrencer le fourrage, le maraîchage et/ou d'autres produits pouvant avoir plus de valeur ajoutée.Dans l'étude, il a été estimé que les recettes brutes du secteur agricole dans cette région des Pyrénées, actuellement de 84,3 M€ par an, pourrait se contracter de - 8,9% à l'horizon 2030-50. Les auteurs affirment que les stratégies pour limiter de tels impacts devraient porter sur les zones non irriguées, car leur résilience face à la sécheresse est bien plus limitée. Les auteurs proposent un changement d'orientation de la production, à savoir un passage de l'agriculture actuelle destinée à l'alimentation animale à une agriculture pour l'alimentation humaine. Concrètement, ils proposent comme principale ligne d'action d'augmenter la surface des pâturages extensifs dans les prairies alpines et les zones non agricoles des vallées. Cela permettrait de réduire la pression actuelle sur le sol agricole et d'inverser à la fois la tendance actuelle d'avancée des forêts en zones de pâturage et la perte de biodiversité associée. Cette augmentation des pâturages extensifs représenterait la libération de 26 103 ha de surface agricole, qui pourraient être destinés à des cultures pour l'alimentation humaine compte tenu de leur rendement économique maximum et de leur consommation d'eau minimum. Concrètement, les auteurs proposent l'intégration de 10 cultures pour la consommation humaine dans les zones libérées, en les plaçant selon des critères d'adéquation climatique présente et future (pommier, poirier, cerisier, haricot vert, vigne, olivier, seigle, épeautre, pomme de terre et haricot sec). En adoptant cette solution, les auteurs estiment que les recettes brutes du secteur agricole dans le scénario futur pourraient atteindre 181,1 M€ par an contre 84,3 M€ aujourd'hui ou 76,7 M€ prévus pour le même scénario futur sans action. Cette étude a été publiée par l'Office Catalan du Changement Climatique, dans le cadre du projet Life MEDACC avec la collaboration du bureau l'Espigall.

ce cas est le Colletotrichum coccodes. Ce champignon affecte gravement la culture de la pomme de terre (anthrachnose de la pomme de terre). Dans plusieurs régions d'Europe, dont le sud de la France et le nord de l'Espagne, il provoque des dégâts aussi importants que le Rhizoctone brun, un autre champignon à l'origine du pourrissement de la pomme de terre (Manici et Caputo, 2009 ; Garibaldi et Guillino, 2010).Deuxièmement, les nouvelles conditions climatiques pourraient créer des zones climatiquement idéales pour l'expansion de nouveaux organismes nuisibles introduits accidentellement depuis des régions plus chaudes, et qui pourraient s'étendre rapidement par manque de concurrence et de prédateurs naturels. C'est le cas du *Sclerotium rolfsii* (ou *Athelia rolfsii*), un champignon caractéristique des zones tropicales qui a été introduit en Europe il y a quelques années. En Espagne, il affecte sérieusement de nombreuses cultures de pomme de terre et de maïs (Tanmoy *et al.,* 2016). Enfin, la fréquence et l'intensité accrues des états de stress abiotique induits par les événements climatiques extrêmes pourraient accroître les niveaux de sensibilité des cultures à l'attaque des organismes pathogènes. C'est le cas du M. phaseolina, un champignon qui affecte les principales cultures horticoles et dont les effets négatifs sur les cultures de fraise n'ont cessé de croître dans le sud de la péninsule au cours des dernières décennies (Garibaldi *et al.,* 2009 ; Husaini *et al.,* 2016 ; de los Santos *et al.,* 2016). Selon une étude récente, le changement climatique, associé à d'autres facteurs comme le commerce mondial et les techniques actuelles de gestion agronomique des sols, pourrait provoquer une expansion considérable de ce champignon dans les cultures horticoles, particulièrement marquée sur le versant sud des Pyrénées centrales (figure 3.2.6).

Cependant, d'autres pathogènes comme l'oïdium de la vigne pourraient être limités par la hausse des températures (GIEC, 2014).

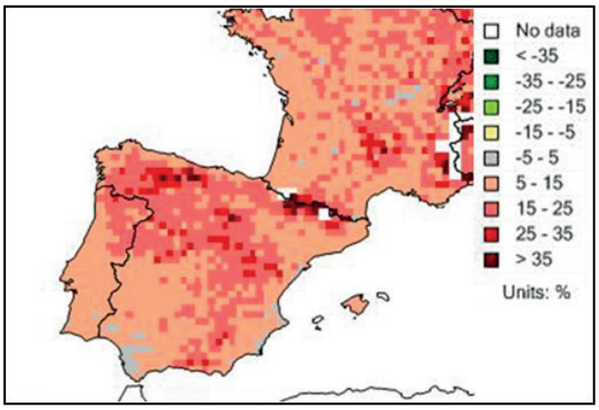


Figure 3.2.6. Estimation de la différence de croissance relative (en %) du *M. phaseolina* en 2030 par rapport aux conditions climatiques de 2012. La couleur rouge foncé indique la hausse maximale de la croissance relative. Source : Manigi *et al.,* 2012.

3.2.2. Alpages naturels: impacts et vulnérabilités

Les pâturages de haute montagne sont, outre une ressource essentielle pour le secteur agricole, des agrosystèmes à haute biodiversité, valeur paysagère et culturelle (Arranz., 2013 ; Leip et al., 2015).Le changement climatique et en particulier l'augmentation des températures moyenne et des phénomènes extrêmes, ont des répercussions à la fois sur la productivité et la composition des alpages naturels des Pyrénées.

A. Changements dans la production et la qualité des pâturages

La productivité des pâturages pyrénéens de haute montagne est limitée davantage par les basses températures que par la rareté de l'eau (Sebastia., 2007). De ce fait, il faut s'attendre à ce que la hausse des températures moyennes, associée à l'effet fertilisant[50] de la concentration élevée de CO_2 atmosphérique, entraîne une hausse de la productivité des alpages et les taux de minéralisation du N organique du sol[51] (Anderson, 2008), à condition que les sécheresses au printemps et en été ne soient pas trop sévères (Nettier *et al.,* 2010 ; Climfourel, 2011). Dans l'ensemble, on peut supposer que si la concentration de CO_2 doublait dans l'atmosphère, les pâturages de montagne augmenteraient leur productivité de 20-30% environ, à condition que l'azote disponible et la disponibilité en eau ne soient pas limitants (AEE, 2016).

Cependant, il est fort probable que la fréquence et l'intensité accrues des sécheresses, ainsi que

(50) En laboratoire, l'augmentation de la concentration de CO_2 augmente la vitesse du processus de photosynthèse dans de nombreux plantes, et donc la vitesse à laquelle elles absorbent le CO_2 pour ça fixation. Cet effet est appelé fertilisation au CO_2.

(51) L'azote disponible pour la croissance des plantes est limité dans les sols de montagne, même si sa teneur en azote organique est élevée. Les températures plus élevées favorisent des taux de minéralisation plus élevés en N en raison de l'activité accrue de la faune microbienne du sol.

d'autres phénomènes climatiques extrêmes comme les pluies intenses et les vagues de chaleur prévues pour les décennies à venir, aient un impact négatif sur les pâturages, annulant même l'effet fertilisant de la concentration élevée de CO_2 et de la hausse des températures (Pico-Cochard *et al.,* 2015).Il a été démontré qu'après des sécheresses très intenses pendant la saison estivale, la repousse automnale est très altérée (Zwicke *et al.,* 2013). Il en est déduit que la production automnale des pâturages dépendra dans une large mesure de l'intensité et de la fréquence des sécheresses estivales.

Néanmoins, on peut supposer que l'ampleur, et même le caractère favorable ou défavorable de ces effets présenteront une grande variabilité à la fois spatiale et temporelle. En ce sens, il est fort probable que les effets négatifs prédomineront sur la croissance des pâturages pendant la saison estivale et dans les régions du Massif à influence méditerranéenne, tandis que les effets positifs seront plus importants en automne et au printemps, et dans les régions à influence atlantique (Climfourel, 2011).Parallèlement, l'augmentation des températures moyennes, les extrêmes climatiques et l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO_2 génèrent des changements physiques et chimiques dans les pâturages (Niderkorn *et al.,* 2014), étant susceptibles d'altérer leur performance ainsi que de modifier la qualité finale de la production animale et de ses produits dérivés (produits de viande, produits laitiers…).En particulier, il a été prouvé que l'augmentation des concentrations atmosphériques de CO_2 ont des effets négatifs sur les teneurs en azote, et donc sur les protéines, chez les plantes (Niderkorn *et al.,* 2014; Dumont *et al.,* 2015). Cependant, il est possible que, au niveau communauté, la réduction de l'azote et des protéines soit compensée, au moins en partie, par une plus grande présence de légumineuses dans les paturages herbacés multispécifiques, car cette famille botanique riche en azote pourrait être favorisée par les nouvelles conditions climatiques (Dumont *et al*., 2015). D'autre part, l'épuisement et la déshydratation de la végétation des alpages à cause du stress thermique et de l'absence de pluies pendant certaines périodes de l'année, entraînent une perte de palatabilité du fourrage qui pourrait déterminer une réduction de sa consomation chez le bétail.

B. Modifications de la composition floristique et de la diversité des alpages

En plus d'affecter la production des pâturages, les changements des conditions climatiques et environnementales pourraient modifier la répartition actuelle des différentes espèces (Cantarel *et al.,* 2013), altérant la composition des espèces caractéristiques des communautés fourragères de montagne, ou favorisant l'accélération du processus de colonisation des pâturages par des espèces végétales (García *et al.,* 2015). Au processus de colonisation des alpages (expansion des arbustes tels que le Buis - *Buxus sempervirens* dans les Pyrénées centrales) s'ajoutent les effets du processus de boisement naturel (expansion des arbres au-dessus de la limite supra-forestier), très évident dans tout le Massif et qui peut avoir des implications au niveau du risque d'incendie, des changements sur l'albédo ainsi que sur la durée du manteau neigeux ou sur certaines conditions microclimatiques (pour plus d'informations, voir le chapitre 2.4 Forêts).

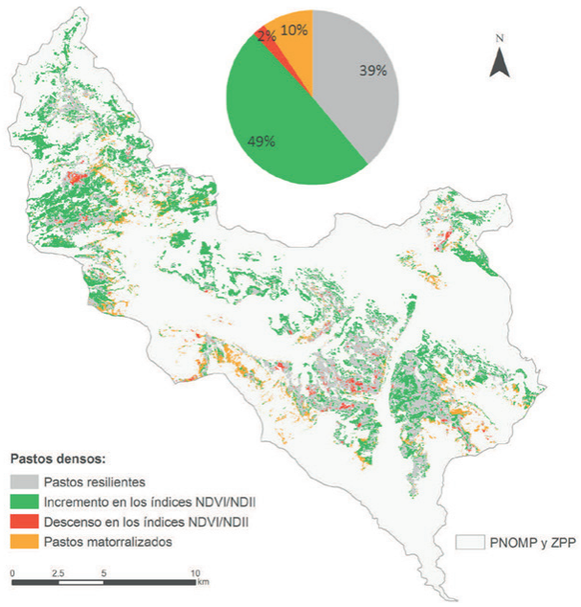


Figure 3.2.7. Estimation de la colonisation des pâturages du Parc national d'Ordesa et du Mont-Perdu par des espèces végétales entre les années 1980 et 2000. L'augmentation des indices montre un accroissement de biomasse et de verdure des pâturages ; la baisse des indices révèle la dégradation du pâturage. Source : García et al., 2015.

En outre, l'expansion de certaines espèces herbacées indigènes, principalement des graminées vivaces telles que Brachypodium pinnatum dans les Pyrénées occidentales (Canals et al., 2014; 2017), très compétitive face aux nouvelles conditions environnementales, dégrade également les pâturages à tarvers la perte de diversité floristique induite par son expansion. La réduction de la diversité floristique implique une moindre résilience de la communauté végétale, et donc une moindre capacité d'adaptation aux nouvelles

conditions climatiques et environnementales. Le changement climatique représente un facteur de stress ajouté capable d'agir en synergie avec les changements d'usage du sol, la tendance actuelle de dégradation des agro-écosystèmes et l'abandon progressif de l'agriculture extensive de haute montagne (Busqué et al., 2016). Dans ce contexte, l'importance des interactions existantes entre le climat, les usages du sol et la gestion des pâturages est vitale. Des actions simples d'adaptation dans la gestion des pâturages comme la modification du calendrier de pâturage ou de la saison de coupe du fourrage, pourraient compenser, au moins temporairement, une partie des effets négatifs potentiels du changement climatique, et même bénéficier des impacts positifs à coût nul.

3.2.3. Secteur de l'élevage extensif: impacts et vulnérabilités

La production animale est elle aussi affectée par le changement climatique à la fois directement et indirectement. D'une part, les changements de température et d'humidité ont une influence directe sur l'état sanitaire et le rendement animal. D'autre part, les températures élevées et les phénomènes climatiques extrêmes peuvent affecter indirectement la production animale, à travers la diminution de la disponibilité et de la qualité des pâturages. De plus, les nouvelles conditions climatiques pourraient favoriser une propagation et une prévalence accrues des maladies animales (Heffernan *et al.,* 2012 ; Gauly *et al.,* 2013), y compris celles transmises par vecteurs (Estrada-Peña *et al.,* 2012).

A. Réduction de la production animale et de son bien-être

La capacité des animaux à rester en bonne santé dépend directement des caractéristiques climatiques du milieu où ils vivent (Lacetera *et al.,* 2013). Pour chaque espèce, il existe une plage de température ambiante optimale, définie comme la zone de neutralité thermique[52]. Lorsque la température ambiante dépasse la zone de neutralité, les animaux réagissent en activant une série de mécanismes physiologiques qui se traduisent par l'augmentation de la fréquence respiratoire, de la transpiration et de la consommation d'eau pour compenser la hausse de la température corporelle (Bernabucci *et al.,* 2010). Lorsqu'ils sont soumis à un stress thermique, les animaux réduisent par ailleurs leur consommation d'aliments et leur activité métabolique, affectant directement leur état de nutrition et leur performance reproductive (Roy et Prakash, 2007 ; Mader, 2007), mais aussi en général leur santé et leur état de bien-être. Si les conditions de stress thermique se prolongent dans le temps, même le risque de mort augmente (Nardone *et al.,* 2010). Le

ENCADRÉ 3.2.2. LE PROJET «ALPAGES SENTINELLES ALPINS» : UN RÉSEAU D'ACTEURS POUR PRÉSERVER LA BIODIVERSITÉ ET LA SANTÉ DES PÂTURAGES DE HAUTE MONTAGNE FACE AUX ENJEUX DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

À la suite des vagues de chaleur successives et de la préoccupation croissante sur les impacts du changement climatique dans les pâturages de haute montagne, le Parc National des Écrins, situé dans les Alpes françaises, a décidé de réunir sa Commission d'Agriculture pour aborder la problématique. Consciente de la multifonctionnalité de ces écosystèmes à haute valeur paysagère, écologique et culturelle, mais aussi de l'intérêt commun de limiter les effets négatifs du changement climatique sur ces écosystèmes, elle a créé un groupe de travail transversal impliquant les éleveurs locaux, les gestionnaires d'espaces protégés, les gérants d'exploitations agricoles, les autorités des communes intéressées et la communauté scientifique.

Compte tenu de la position privilégiée du Parc National des Écrins pour le développement et le suivi ultérieur d'initiatives de conception et mise en place d'actions pour l'adaptation, les acteurs impliqués ont créé collectivement le réseau -Alpages sentinelles- . Le programme, cofinancé par des fonds FEDER, a pour objectif de mieux comprendre la dynamique future des espaces agro-pastoraux d'altitude dans un contexte de changement climatique en milieux agricoles de haute montagne et d'anticiper ainsi les éventuels effets négatifs. Parmi les actions spécifiques encouragées par l'initiative figurent :

- la création d'un réseau d'observation de l'évolution climatique dans les différentes parcelles étudiées
- la définition de protocoles robustes et communs pour évaluer les effets du changement climatique sur les pâturages d'altitude
- la création et dynamisation d'un espace de dialogue continu entre les acteurs impliqués

Lancé en 2011, le programme a été étendu à d'autres espaces protégés (Parcs nationaux de la Vanoise et de Mercantour, Parcs naturels régionaux du Vercors, de la Chartreuse, du Luberon et du Ventoux). Le réseau compte aujourd'hui une trentaine d'alpages sentinelles, en lien avec 37 exploitations agricoles sur 7 territoires alpins. L'initiative est coordonnée par l'IRSTEA et associe des partenaires scientifiques, des gestionnaires d'espaces protégés, des bergers et des représentants de la profession agricole. En 2018, grâce à la coopération entre les acteurs et les territoires, il sera publié un guide méthodologique pour évaluer l'exposition et la sensibilité des pâturages de montagne aux risques climatiques, ainsi qu'un ensemble de fiches techniques pour la « gestion à l'épreuve du climat » des agro-écosystèmes d'altitude..

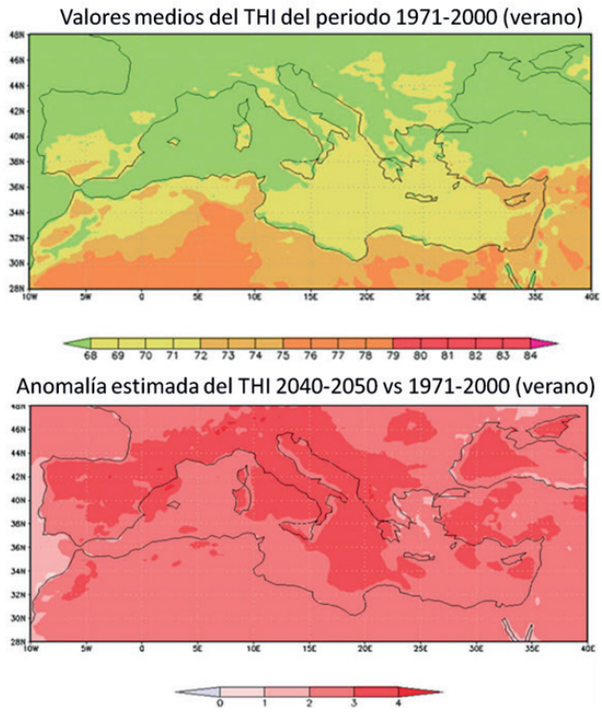


Figure 3.2.8. Valeurs moyennes de l'indice THI durant la période comprise entre 1971-2000 (en haut) et anomalie estimée de la valeur de THI pour la décennie 2040-2050 (en bas). Source : Segnalini *et al.,* 2012.

THI[53] (Temperature Humidity Index en anglais) est un indicateur du stress thermique qui combine des valeurs de température et d'humidité de l'air. Au cours des dernières décennies, cet indice a augmenté sa valeur dans toute l'Europe, entraînant des impacts négatifs sur l'élevage (Vitali *et al.,* 2008).

Il est fort probable qu'à l'avenir les situations de stress thermique pour l'élevage soient plus fréquentes et plus intensesdans les Pyrénées (Segnalini *et al.,* 2012).

En l'absence de mesures d'adaptation appropriées, le changement climatique pourrait affecter négativement la rentabilité des exploitations d'élevage du Massif, en particulier des exploitations intensives situées dans les vallées de moyenne montagne, et durant les mois d'été (Beltrano *et al.*, 2009).

B. Nouvelles zoonoses et propagation des maladies du bétail

Par ailleurs, le changement climatique est considéré aussi comme un des facteurs impliqués dans la propagation et la transmission accrues d'organismes pathogènes et de leurs vecteurs de propagation, en synchronisation avec la plus grande mobilité des biens et personnes (Patz et Olson, 2006). En réalité, la plupart des insectes vecteurs de maladies, et notamment ceux du phylum des arthropodes, sont très sensibles aux facteurs climatiques comme la température et l'humidité, ceux-ci se révélant décisifs pour déterminer leur présence, densité et comportement. En conséquence, il est fort probable que la hausse prévue des températures moyennes étendra aussi l'aire de répartition de certains vecteurs de maladies déjà présents sur le territoire du Massif, où les conditions climatiques se sont adaptées à leurs cycles biologiques, et qu'elle facilitera en même temps l'importation, la mise en place et l'expansion de nouveaux organismes pathogènes (Iriso Calle *et al.,* 2017). En outre, on pourrait assister également à une diminution de la durée du cycle de développement des vecteurs indigènes et à l'extension de la saison idéale pour la transmission des agents pathogènes. Un exemple frappant est l'expansion vers des latitudes plus élevées de l'incidence de la maladie de la langue bleue[54] aux cheptels. Il s'agit d'une maladie virale transmise par un insecte vecteur du genre Culicoïdes (un moucheron considéré comme le principal vecteur de transmission de la maladie) qui agit comme réservoir et transmetteur du virus. Jusqu'aux dernières décennies, l'Europe était exempte de ce virus. En 1998,

(52) La zone de neutralité thermique du bétail est la plage de températures dans lesquelles l'animal ne lutte ni contre le froid ni contre la chaleur, par conséquent l'énergie disponible pour la croissance est maximale.

(53) LeTHI est un indicateur utilisé depuis le début des années 90 pour mesurer l'effet combiné de la température de l'air et l'humidité relative sur l'état sanitaire de l'élevage. Il permet de calculer de manière simple et intuitive les niveaux de risque de l'élevage dus au stress thermique, selon l'évolution des conditions environnementales. Lorsque la valeur du THI dépasse 72 unités, l'élevage ovin commence à manifester un stress dû à la chaleur et son taux de productivité commence à changer. Lorsque la valeur du THI dépasse 78, la production laitière est sérieusement affectée. Lorsque le THI s'élève au-delà de 82, il y a un risque de pertes très importantes de la production car l'élevage montre alors des signes de stress grave et peut finalement mourir.

(54) La fièvre catarrhale ovine (FCO), ou maladie de la langue bleue, est une maladie virale contagieuse, transmise par des moucherons piqueurs du genre Culicoides (famille des Ceratopogonidae), touchant les ruminants sauvages ou d'élevages, principalement les moutons, moins souvent les chèvres, les bovidés, les cervidés, les dromadaires et les antilopes.

une épidémie a introduit le virus à partir du continent africain sur le continent européen (FAO, 2006). À travers son vecteur, le virus s'est répandu progressivement vers des latitudes plus élevées. De fait, les cas d'infection par ce virus sont de plus en plus fréquents sur le versant nord du Massif (Jacquet *et al.,* 2016). Et sa propagation augmentera vraisemblablement à l'avenir (Bonizzoni *et al.,* 2013). Son expansion est associée à des facteurs climatiques, principalement à l'allongement de la durée de vie de la mouche vectrice, du fait des hivers plus chauds et des changements du régime des vents qui les transportent (Jacquet *et al.,* 2016). Ces conditions sont en partie induites par le changement climatique (Mardulyn *et al.,* 2013). Un autre exemple significatif concerne la tique du bétail. Les tiques sont des vecteurs transmetteurs de bactéries, protozoaires et virus à l'origine de maladies comme la borréliose de Lyme, la fièvre boutonneuse méditerranéenne, le virus de la fièvre hémorragique de Crimée-Congo et le virus de l'encéphalite. Les tiques passent la majeure partie de leur cycle de vie dans l'environnement et, de ce fait, leur développement, survie et dynamique de population dépend d'un ensemble de facteurs. Le changement climatique influe sur ces conditions à travers son impact sur les températures moyennes et minimales, les modifications du cycle hydrologique (Randolph *et al.,* 2008) et le changement dans la répartition de ses principaux hôtes (Léger *et al.,* 2013 ; Williams *et al.,* 2015). En conséquence, il y a de fortes chances pour que le changement climatique entraîne des changements dans la répartition et la densité des populations d'insectes vecteurs comme les tiques, ainsi que dans le risque de transmission des pathogènes aux hôtes. Toutefois, il ne faut pas oublier que la réponse de ces arthropodes ne dépendra pas seulement de l'évolution des facteurs climatiques, mais aussi en grande partie d'autres facteurs non climatiques comme l'évolution des populations des principaux hôtes dans les Pyrénées (grands vertébrés principalement), les modifications et la fragmentation du paysage pour n'en citer que quelques-uns.À la lumière des principales recherches et en dépit des incertitudes inhérentes aux projections climatiques futures, les considérations sur la vulnérabilité du secteur agricole face au changement climatique devraient être prises en compte dans la planification des investissements et dans les outils de financement actuels du secteur (par ex. Fonds européen agricole pour le développement rural), afin d'augmenter sa résilience aux enjeux climatiques, et que ceux-ci ne constituent pas une pression ajoutée aux divers enjeux de nature socio-économique auxquels le secteur est confronté aujourd'hui. En réalité, bien que le changement climatique se positionne comme un grand enjeu pour le secteur, les facteurs et obstacles socio-économiques rencontrés par l'agropastoralisme des Pyrénées (mondialisation, fluctuation des prix, abandon de l'activité, manque de renouvellement générationnel, dépendance des subventions, coûts plus élevés de production et des investissements nécessaires, etc.) resteront vraisemblablement à l'avenir la principale source de vulnérabilité (Leclère *et al.,* 2013 ; Busqué *et al.,* 2016). C'est pourquoi, pour veiller à ce que les éventuelles mesures d'adaptation de l'agropastoralisme soient efficaces et effectives, il sera nécessaire que leur conception et leur élaboration soient réalisées sous l'angle de scénarios futurs de changement global, où le changement climatique se positionne comme un stress ajouté susceptible d'aggraver l'ampleur des défis actuels.

3.2.4. Conclusions et recommandations

La productivité des systèmes agricoles est critiquement dépendante de plusieurs facteurs, y compris les conditions climatiques. En général, les effets du changement climatique sur la productivité agricole peuvent se résumer comme le résultat des interactions entre l'augmentation de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère, la variation de la durée de la saison de croissance, les changements dans la disponibilité des ressources en eau, et la propagation ou la prolifération des ravageurs et maladies. Bien qu'il existe peu d'études spécifiques concernant les effets du changement climatique sur l'agropastoralisme de montagne dans les Pyrénées, les premières approches semblent s'accorder sur une éventuelle hausse du rendement des pâturages du fait de la prolongation de la saison de croissance, car en altitude la température se révèle être le facteur majoritairement limitant. Toutefois, il est à prévoir que le changement climatique affecte négativement la productivité de nombreuses cultures, ainsi que la production animale. Lles effets négatifs du changement climatique ou les difficultés intensifiées par celui-ci, comme la dissémination accrue des ravageurs et organismes pathogènes, la fréquence et l'intensité accrues des événements climatiques extrêmes, la diminution progressive de la qualité des cultures, fourrage et produits dérivés ; pourraient constituer de sérieux enjeux pour le secteur dans les années à venir.

Si les stratégies d'adaptation à court terme pourront reposer sur l'utilisation de pratiques agricoles relativement simples liées à des changements de dates de semis ou de variétés cultivées, cela pourrait ne pas être suffisant à long terme. En ce sens, il est essentiel de combler les lacunes dans nos connaissances des impacts du changement climatique sur les principales cultures et agro-écosystèmes de montagne. Il sera primordial également de soutenir les agriculteurs et éleveurs dans le processus d'adaptation afin d'augmenter la résilience du tissu agropastoral du Massif face aux enjeux climatiques. Ci-dessous sont

présentés de manière synthétique et non exhaustive les principaux enjeux que doit et devra relever le secteur agricole du Massif dans les décennies à venir, ainsi que quelques recommandations pour leur processus d'adaptation. Les recommandations sont présentées selon trois types de mesure d'adaptation : les mesures vertes, grises et souples.

Principaux enjeux

• Réduire les incertitudes sur les principaux risques, les éventuels effets négatifs et les futures pressions sur les écosystèmes agropastoraux des Pyrénées.

• Accroître la résilience des systèmes agropastoraux de montagne face aux pressions du changement climatique.

• Renforcer la gestion conservatoire des sols pour augmenter leur fertilité naturelle, et maximiser leur rôle de puits de carbone.

• Favoriser les mesures de gestion du secteur qui garantissent une exploitation durable des ressources en eau dans le cadre d'une gestion intégrale de la ressource.

• Renforcer les systèmes de surveillance des organismes pathogènes et nouvelles maladies du bétail et des cultures.

• Limiter l'abandon du secteur et encourager sa diversification et sa modernisation en tenant compte des enjeux du changement global dans la perspective du changement climatique.

Recommendations

Cette partie réunit un ensemble de mesures générales destinées à jeter les bases pour le développement de mécanismes visant à augmenter la résilience de l'agropastoralisme face au climat futur et à sa variabilité. Quoi qu'il en soit, il n'existe pas de combinaison efficace de mesures prédéfinies et valables pour tous les systèmes agropastoraux des Pyrénées. La grande hétérogénéité spatiale et microclimatique, ainsi que la diversité élevée des situations et schémas socio-économiques du secteur dans le Massif, imposent la réalisation d'une étude de vulnérabilité spécifique pour chaque réalité locale. C'est uniquement après cette étape qu' un processus d'identification des priorités d'adaptation pourra être mené. Celui-ci permettra d'élaborer un ensemble de mesures d'adaptation réalisables et optimales en termes d'efficacité et d'efficience (coût/bénéfices) pour s'adapter au changement climatique.

Mesures douce[55]

• Créer des groupes de travail pluridisciplinaires, transfrontaliers et stables à long terme, composés des représentants de tous les groupes d'intérêt (éleveurs, propriétaires d'exploitations, autorités locales, scientifiques, etc.) qui orienteront le débat sur les effets du changement climatique dans le secteur au travers de modèles participatifs d'observation.

• Promouvoir des projets sur les modèles agro-systémiques qui intègrent les projections climatiques régionalisées sur la variabilité climatique future, afin d'évaluer les impacts potentiels du changement climatique sur la production agricole, animale et pastorale d'altitude (qualité des produits finis, évolution des surfaces adaptées à chaque culture, etc.) : développer des modèles dynamiques de simulation des différentes cultures qui permettront de décrire l'interception du rayonnement solaire par les feuilles, la production de biomasse (partie aérienne et racines), les bilans d'eau et d'azote, et lde rendement.

• Renforcer et, au besoin, réorienter de façon proactive les plans existants de suivi et surveillance des ravageurs et autres organismes pathogènes, de manière intégrée et d'après les projections climatiques et leurs conséquences. Surveiller l'éventuelle expansion de vecteurs et d'organismes pathogènes en tenant compte des changements potentiels des courants d'air, intensifier la surveillance et le contrôle sur l'introduction anthropique de nouveaux organismes nuisibles potentiellement dangereux, qui peuvent voir leur expansion ou naturalisation favorisée du fait du

(55) Les mesures Soft ou mesures non structurelles pour réduire ou pallier les effets négatifs du changement climatique. Cette catégorie de mesures est généralement représentée par les travaux de recherche destinés à combler les lacunes de connaissances ou à enrichir les bases de connaissances sur le changement climatique, ses impacts et les secteurs les plus vulnérables. Dans cette catégorie entre aussi le développement de méthodologies et systèmes spécifiques pour réduire les risques liés au changement climatique (par ex. développement d'un early warning System transfrontalier pour la gestion des vagues de chaleur dans le Massif).

changement climatique. Développer des modèles qui simulent le comportement de différents agents pathogènes par rapport au climat, la capacité d'adaptation au biotope et la dynamique saisonnière des différents processus.

• Favoriser l'introduction de nouvelles techniques agricoles pour adapter le secteur au changement climatique et réduire au maximum les dégâts des événements climatique extrêmes aux cultures et aux animaux, en accord avec les objectifs d'atténuation et de gestion durable des ressources en eau : promouvoir des techniques de gestion du risque de pénurie d'eau, diversifier les cultures de montagne grâce à l'introduction de nouvelles variétés plus résilientes à la sécheresse ou à des cultures alternatives, adapter les périodes de semis en réponse aux nouvelles conditions climatiques et environnementales et évaluer la relocalisation éventuelle de certaines cultures selon l'évolution des zones d'adéquation climatique.

• Dans le secteur de l'élevage, favoriser la réduction de la charge animale (élevage extensif) et les changements nécessaires dans la gestion du pâturage (transhumance aux saisons de plus grande chaleur et sécheresse). De même, aider à la supplémentation et à l'adaptation des installations pour les rendre adaptées au climat (systèmes d'isolation et de ventilation naturelle contre les vagues de chaleur).

• Définir des mesures d'intervention pour aider les agriculteurs à s'adapter au changement climatique : prestation de services d'assistance technique et d'adaptation aux mécanismes d'assurance existants.

Mesures vertes[56]

• Favoriser la mise en place de systèmes efficaces de gestion des déchets agricoles afin de réutiliser tous les nutriments naturels disponibles et de réduire les intrants venant de l'extérieur du système.

• Favoriser la gestion conservatoire du sol, qui permettra de renforcer sa fertilité naturelle, sa capacité à agir comme puits de carbone, sa capacité naturelle de rétention d'eau, ainsi que ses fonctions de protection de la biodiversité de montagne et de protection contre les phénomènes érosifs.

Mesures grises[57]

• Versement de primes à la modernisation des exploitations par l'amélioration des systèmes de ventilation / climatisation dans les étables, en favorisant autant que possible l'utilisation des sources renouvelables (attention portée à la dépense énergétique et aux émissions de gaz à effet de serre).

• Utiliser des techniques d'ombrage comme les filets d'ombrage : effets importants sur le rayonnement solaire, mais aucun sur la température et l'humidité (intervention à bas coût).

• Promouvoir des techniques et des mesures de gestion plus efficaces d'irrigation (sous-irrigation, irrigation goutte-à-goutte et temps d'irrigation adaptés).

(56)Les mesures vertes ou basées sur les services écosystémiques: ce type de mesures comprend toutes les mesures, bonnes pratiques, études ou initiatives ayant pour principe l'utilisation des services écosystémiques rendus par les différentes ressources naturelles pour pallier les effets négatifs du changement climatique (par ex. pratiques sylvicoles conservatrices pour accroître la capacité des forêts des Pyrénées à réduire les risques hydrogéologiques).

(57) Les Mesures grises ou infrastructurelles, sont toutes celles qui basent leur action palliative sur la construction ou la mise en place d'éléments infrastructurels concrets (par ex. construction de digues dans les zones habitées à haut risque d'inondations torrentielles).

IDÉES CLÉS

• La réduction de la période de gelée et l'augmentation des températures moyennes pourraient favoriser l'expansion des cultures non habituelles dans les Pyrénées, telles que les cultures méditerranéennes ou d'origine subtropicale.

• Les cultures exigentes en eau pourraient subir une réduction de leur aire de répartition potentielle ainsi que de leur rendement en raison d'une plus grande variabilité du régime des pluies et à cause des températures extrêmes.

• La modification des zones de distribution potentielle de certaines cultures et l'accroissement de leur sensibilité en raison des contraintes climatiques, peuvent entraîner des modifications de leur aire de répartition, une plus grande propagation des maladies et ravageurs actuels des cultures, ainsi qu'accroître le risque d'expansion de nouvelles maladies.

• La hausse des températures moyennes et les phénomènes climatiques extrêmes plus intenses et fréquents ont des répercussions sur la productivité et la composition des alpages naturels des Pyrénées.

• Le changement climatique peut avoir un impact négatif sur la production animale à travers la réduction de la disponibilité du fourrage et des ressources en eau de qualité, par la propagation des maladies et de leurs vecteurs, ainsi que par le stress thermique.

• Le changement climatique représente un facteur de stress supplémentaire capable d'agir en synergie avec l'évolution de l'occupation et l'usage du sol, la tendance actuelle à la dégradation des agro-écosystèmes et l'abandon progressif de l'agriculture extensive de haute montagne.

3.3 Énergie

Coordinateurs: Juan Terrádez (CTP-OPCC), Idoia Arauzo (CTP-OPCC).
Auteurs: Juan Terrádez (CTP-OPCC), Idoia Arauzo (CTP-OPCC).
Co-auteurs: Jeremie Fosse (eco-union), Marta García París (CEO Ecoserveis).

RÉSUMÉ

L'énergie joue un rôle essentiel dans la vie moderne. En outre, le secteur est le responsable d'une grande partie des émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine (Edehofer et al., 2014). Il s'agit en même temps, d'un secteur vulnérable aux effets du changement climatique, aussi bien du point de vue de l'approvisionnement énergétique (effets sur la production d'énergie) que de celui de la demande. En ce qui concerne la production d'énergies renouvelables, il est probable que le changement climatique ait des effets négatifs sur la production hydroélectrique, thermoélectrique et éolienne dans les Pyrénées, tandis que les effets sur la production d'énergie photothermique[58] et photovoltaïque[59] pourraient s'avérer positifs dans certaines zones.

Il est très probable que les changements attendus en termes de quantité et de distribution spatiale et temporelle des précipitations, leur influence sur la diminutions des débits des principaux cours d'eau et leur répercussion directe sur la capacité d'accumulation dans les barrages et les déversoirs réduisent la capacité de production hydroélectrique des centrales mini-hydrauliques en montagne et, dans une moindre mesure, des centrales hydrauliques de plus grande envergure dans la vallée. À ceci, il faut ajouter que les réserves d'eau sous forme de neige et de glace sont de plus en plus rares et éphémères. Les températures, de plus en plus élevées, avancent la date de fusion des neiges et de glace dans les Pyrénées, qui autrefois apportaient une réserve d'eau plus constante et exploitable en été. En outre, la réduction des débits minimums des cours d'eau et leur réchauffement imposeront probablement des limitations à la capacité de génération d'énergie thermoélectrique en raison de la perte d'efficience des systèmes de réfrigération des centrales thermoélectriques, notamment pendant les périodes d'été. Les températures moyennes les plus élevées, et notamment les maximales estivales, pourraient avoir un impact négatif sur le rendement du cycle thermodynamique, en diminuant l'efficience des centrales, quoique dans une moindre mesure. Les effets positifs escomptés se feront sentir probablement par le biais d'une augmentation du potentiel de production de certaines énergies renouvelables. En particulier, la capacité de production d'énergie solaire photovoltaïque et photothermique pourrait augmenter en raison d'un plus grand niveau d'ensoleillement, dû à la diminution de la couche nuageuse.Par contre, le changement de régime et la diminution de la vitesse des vents projetté pour les prochaines décennies dans les Pyrénées, pourraient avoir une influence négative sur la capacité de production d'énergie éolienne dans certaines zones du Massif. L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes climatiques extrêmes qui est attendue pourrait également représenter un danger pour les systèmes de production énergétique en raison d'une plus grande exposition des infrastructures de stockage, de transmission et de distribution d'électricité aux risques climatiques. En ce qui concerne l'augmentation de la demande d'énergie dans le Massif, on peut s'attendre à un scénario de demande caractérisé par une augmentation significative de la demande énergétique estivale, en réponse aux besoins croissants d'énergie pour la climatisation des logements, suite aux étés de plus en plus chauds et aux vagues de chaleur de plus en plus fréquentes. Cette augmentation de la demande estivale pourrait être compensée, quoiqu'en partie seulement, par la diminution de la demande électrique hivernale pour les chauffages, suite aux hivers de plus en plus doux.

3.3.1 Diminution de la capacité de production d'énergie hydroélectrique

Le secteur énergétique dans les Pyrénées se caractérise par l'importance du secteur hydroélectrique sur les deux versants du Massif. Les bassins

(58) Les systèmes photothermiques convertissent le rayonnement solaire en chaleur et le transforment en fluide de travail. La chaleur est ensuite utilisée pour chauffer des bâtiments, arroser ou déplacer des turbines afin de générer de l'électricité.
(59) L'énergie solaire photovoltaïque est une source d'énergie qui produit de l'électricité à partir de sources renouvelables, obtenues directement du rayonnement solaire au moyen d'un dispositif à semi-conducteur appelé cellule photovoltaïque ou par dépôt de métaux sur un substrat appelé cellule solaire à film mince.

hydrographiques de l'Èbre, de la Garonne et les bassins intérieurs de la Catalogne ont une grande importance du point de vue énergétique, aussi bien à l'échelle régionale que nationale. Pour le bassin hydrographique Èbre-Pyrénées, l'énergie potentielle hydroélectrique installée est d'environ 1080 GW/h (REE, 2017) et représente plus de 50% de l'énergie potentielle installée sur tout le territoire pyrénéen (IAEST, 2016). En ce qui concerne le versant français, en Occitanie, 49 % du potentiel énergétique régional installé correspond à l'énergie hydroélectrique (Bilan électrique 2016), tandis qu'en Nouvelle-Aquitaine il se trouve autour de 15% (RTE Nouvelle-Aquitaine, 2016). Par ailleurs, en Andorre la situation est singulière, du fait que la totalité de son territoire se trouve dans une zone montagneuse et que son système énergétique se caractérise par l'importation de la plupart de l'énergie qu'elle consomme.

Impacts constatés:

La quantité de l'énergie électrique générée par les centrales hydroélectriques dépend en partie de l'énergie potentielle installée, mais surtout de la disponibilité de ressources hydriques accumulées dans les barrages[60], dans le cas des centrales de lac et des variations des débits des cours d'eau dans le cas des centrales au fil de l'eau[61]. L'approvisionnement en eau dépend en grande partie de la saisonnalité du cycle hydrologique et, concrètement, du régime des précipitations et du calendrier du cycle de fonte des neiges. Le changement climatique est en train de modifier aussi bien le régime des précipitations que le calendrier de fonte (Lopez-Moreno *et al.,* 2013), avec des effets considérables sur la capacité d'accumulation des barrages et sur le débit des principaux fleuves (Moran-Tejeda *et al.,* 2017).

Au cours des dernières décennies et suite à la fusion précoce de la neige en raison des hautes températures, le pic de débit printanier des cours d'eau pyrénéens arrive plus tôt, ce qui produit une augmentation des débits hivernaux et une diminution des débits estivaux (Morán-Tejeda *et al.,* 2017). Ceci provoque aussi une plus grande variabilité interannuelle de la production d'énergie hydroélectrique. Aux conséquences de la plus grande variabilité des précipitations et aux changements du calendrier de la fonte des neiges, il faut ajouter une plus grande fréquence et intensité des périodes de sécheresses, qui en 2003, 2005, 2007 et 2012 ont déjà provoqué d'importantes diminutions de la production d'énergie hydroélectrique, aussi bien dans le bassin de l'Èbre que dans celui de la Haute-Garonne (Van Vliet *et al.,* 2016).

Impacts prévus:

Il est fort probable que la plus grande variabilité climatique qui est attendue pour les prochaines décennies ait des effets négatifs sur la capacité de production hydroélectrique dans le Massif. La réduction des débits superficiels des cours d'eau et les changements saisonniers de la disponibilité des ressources hydriques projettées par les modèles climatiques laissent prévoir une plus grande disponibilité d'eau pendant les mois hivernaux, assortie d'une baisse très accusée de la disponibilité hydrique pendant la saison estivale (Bangahs *et al.,* 2013; Michelle *et al.,* 2013; Morán-Tejeda *et al.,* 2017). Par ailleurs, si les températures moyennes continuent d'augmenter, les réserves en eau sous forme de neige baisseront encore plus (Lopez-Moreno *et al.,* 2013). Le phénomène du fonte va non seulement diminuer considérablement en importance, mais il va aussi très probablement arriver plus tôt, ce qui fera que les pics de dégel auront lieu à des périodes de l'année où les barrages et les déversoirs se trouvent déjà à la limite de leur capacité maximale (Beniston *et al.,* 2013). Par contre, les ressources en eau apportées par la fonte des neiges, typiques du printemps, se feront de plus en plus rares. Ainsi, les réserves en eau accumulées pour la saison estivale diminueront, moment de l'année où se produit une plus grande demande d'énergie pour la réfrigération et où l'agriculture et l'élevage ont aussi besoin d'eau (Finger *et al.,* 2012). Si ces projections se confirment, la capacité de production d'énergie hydroélectrique dans les Pyrénées pourrait diminuer de 10% en moyenne et atteindre une réduction de 35% pendant la saison estivale en 2070 par rapport à l'époque actuelle (Rojas *et al.,* 2012; Van Vliet *et al.,* 2016), valeurs qui rejoignent celles estimées à échelle plus fine, pour le versant sud des Pyrénées orientales (Bangash *et al.,* 2013). Cependant, une estimation quantitative précise de l'importance de ces changements échelle plus fine

(60) Les centrales de lac sont le type de centrale hydroélectrique le plus fréquent. Elles utilisent un barrage pour stocker l'eau et graduent le débit au fur et à mesure qu'il passe dans la turbine. Si les réserves disponibles sont suffisantes, il est possible de générer de l'énergie toute l'année.
(61) Les centrales au fil de l'eau, aussi appelées «à débit d'eau permanent», utilisent une partie du flux du cours d'eau pour générer de l'énergie électrique. Elles sont continuellement en activité car, ne disposant pas de barrage, elles n'ont pas la capacité de stocker l'eau. Limitées par la capacité installée, elles turbinent l'eau disponible à l'instant. Dans ces cas les turbines peuvent être à axe vertical, lorsque le fleuve présente un dénivelé important, ou à axe horizontal, si le dénivelé est faible.

est indiscutablement compliquée. En fait, il existe des incertitudes importantes associées à l'estimation de la variabilité climatique future par rapport au comportement des précipitations, dans un système aussi complexe du point de vue climatique et aussi hétérogène du point de vue orographique, que les Pyrénées. Ces caractéristiques font que l'estimation des valeurs relatives aux épisodes des précipitations courtes et spécialement intenses soit particulièrement difficile pour les Pyrénées. Or, il s'agit d'estimations fondamentales pour comprendre la génération de crues et calculer les apports en eau totaux pour les systèmes hydroélectriques.

3.3.2 Diminution de l'efficience dans la production d'énergie thermoélectrique[62]

La génération d'énergie thermoélectrique pourrait aussi être touchée par le changement climatique suite à la réduction des ressources en eau disponibles pour la réfrigération des centrales et à la diminution de l'efficience du cycle thermodynamique provoqué par les hautes températures (Wilbanks *et al.,* 2007).

Impacts constatés et prévus:

L'augmentation de la température atmosphérique pourrait entraîner une réduction de l'efficience du processus de transformation thermoélectrique [63] L'augmentation de la température de l'eau utilisée pour la réfrigération des centrales pourrait ralentir le processus de refroidissement et entraîner une diminution de la capacité de production, notamment pendant la saison estivale et les périodes où le débit se trouve à son niveau le plus bas (Eskeland *et al,* 2008).

De plus, l'augmentation de la température des cours d'eau, avec la réduction escomptée des débits pendant la saison estivale (Van Vliet, 2016; Morán-Tejeda *et al.,* 2017) pourrait entraîner des restrictions potentielles dues au non -respect des directives européennes en matière de débits minimums (le débit écologique minimum[64] établi par la Directive Cadre sur l'Eau 2000/60/CE), en imposant des limitations au prélèvement d'eau pour la réfrigération et la production thermoélectrique.Enfin, l'augmentation de la température atmosphérique entraîne une réduction de l'efficience du processus de transformation thermoélectrique, suite à la diminution de la densité de l'approvisionnement d'air qui alimente les turbines (Hewer *et al.,* 2006).

3.3.3 Changement climatique et énergies renouvelables

Le changement climatique peut avoir des conséquences sur la capacité de génération de certaines énergies renouvelables, largement répandues dans les Pyrénées, comme l'énergie solaire photovoltaïque et photothermique, ou l'énergie éolienne. Les changements de comportement de certaines variables clé comme la vitesse et la distribution des vents, le degré de nébulosité ou la capacité de transmission de l'atmosphère, peut avoir des effets significatifs sur la capacité de production de ces énergies, dont l'importance et le sens peuvent être différents, selon la source d'énergie et le lieu considérés.

Impacts constatés et prévus:

D'après les principales études réalisées jusqu'ici, le secteur photovoltaïque et photothermique pourraient être légèrement avantagés à l'avenir en raison du changement climatique (Bartók et al., 2010; Crock et al., 2011; Jerez et al., 2015; Wild et al., 2015; Vliet et al., 2016). La probable modification du contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère, ainsi que la variation de l'indice de nébulosité et des caractéristiques des nuages, pourraient avoir des effets directs sur la capacité de transmission du rayonnement solaire par l'atmosphère. Dans le sud ouest européen, y compris la cordillère des Pyrénées, on prévoit une augmentation de l'irradiation solaire moyenne au cours des prochaines décennies (Bartók et al., 2010; Gaetini et al., 2014; Jerez et al., 2015) qui pourrait osciller entre 5-10% en été et en automne et entre -2% et + 8% en hiver et au printemps (Pašičko, 2010). D'après Jerez et al., (2015) et Gaetani et al., (2014) ceci pourrait supposer une augmentation de la capacité potentielle de production d'énergie photovoltaïque de jusqu'à 10 ± 3 % pour la période 2070-2099, par rapport à la période de référence 1970-1999.

(62) On appelle énergie thermoélectrique l'énergie qui résulte de la libération d'eau au moyen d'un combustible pour actionner un alternateur et produire de l'énergie électrique.

(63) Processus qui consiste à utiliser un combustible pour transformer l'eau en vapeur, afin d'activer les turbines qui produiront de l'énergie.

(64) L'expression débit écologique, par rapport à un fleuve ou à n'importe quel cours d'eau, peut être définie comme l'eau nécessaire pour préserver les valeurs écologiques autour de celui-ci, comme les habitats naturels, qui abritent une richesse de flore et de faune, les fonctions environnementales comme la dilution de polluants, l'amortissement des extrêmes climatologiques et hydrologiques, ou la préservation du paysage.

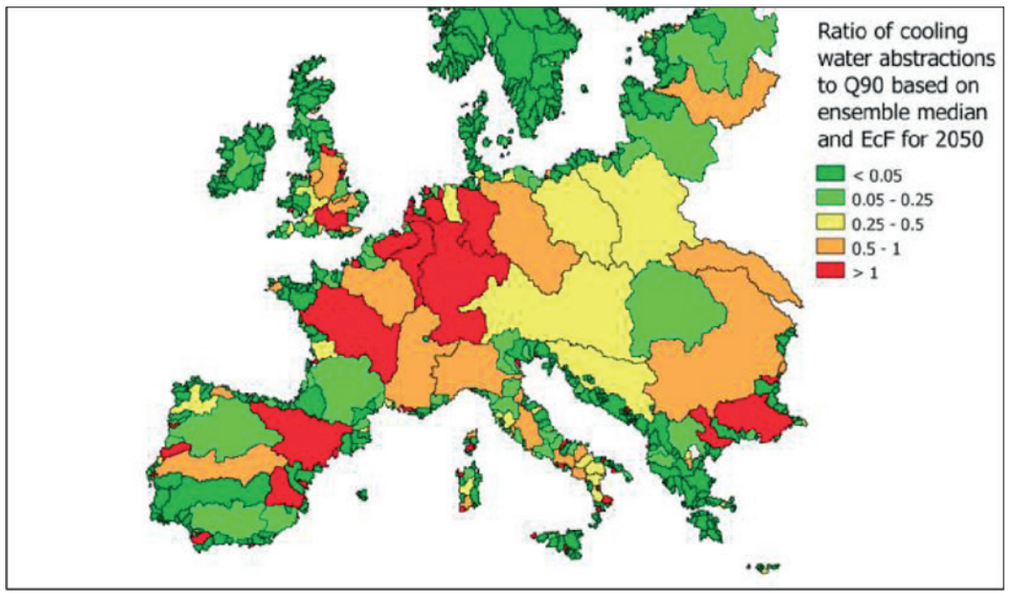
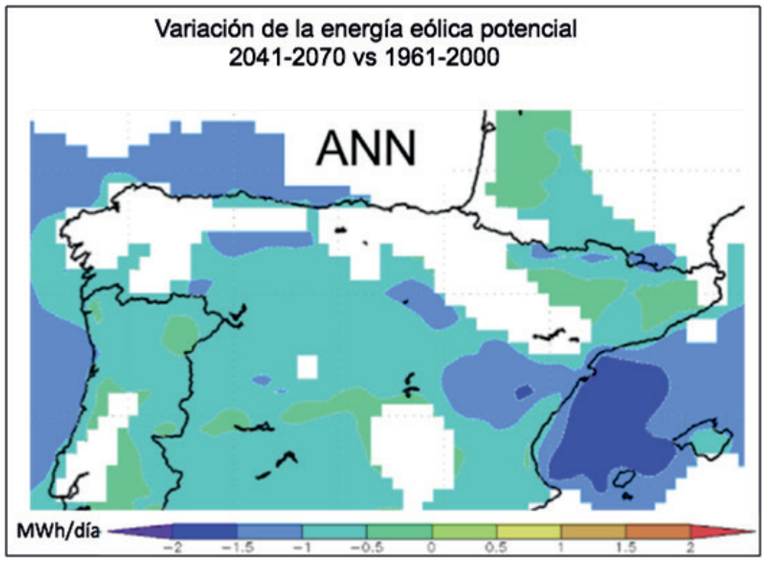


Figure 3.3.2. Estimation de l'impact du changement climatique sur l'efficience des processus de réfrigération des centrales thermoélectriques en 2050, d'après le scénario d'émission A1B, sans mesures d'adaptation. Les valeurs indiquées dans la légende se rapportent à l'intensité éventuelle de l'impact, par rapport à la moyenne européenne. Source : projet ClimWatAdapt, 201

Une autre étude réalisée à l'échelle mondiale montre que pour la période 2051-2080, le potentiel de production d'énergie photothermique pourrait augmenter jusqu'à 10% par rapport à 2010, tandis que la production photovoltaïque augmenterait dans une moindre mesure, avec des croissances d'environ 3,5% (Crook et al., 2011), légèrement inférieures aux estimations de Jerez et al., (2015) et Gaetani et al., (2014). Cependant, il faut prendre en compte que la hausse des températures moyennes pourrait aussi avoir une influence négative sur l'efficience des cellules photovoltaïques. Concrètement, il a été estimé que les cellules de silice cristalline réduisent leur efficience d'environ 0,4-0,5% pour 1ºC d'augmentation de la température moyenne (Pašičko, 2010). Si l'on tient compte d'une augmentation de la température moyenne de 1.5ºC pour la période 2050-2070 (prévisions des scénarios les plus optimistes), l'impact sur l'efficience des cellules photovoltaïques, indépendamment des éventuels progrès technologiques émergents, pourrait supposer une réduction de 0,75% de l'efficience par rapport à l'actuelle.

En ce qui concerne la génération d'énergie éolienne, les études les plus récentes sont d'accord pour dire que le changement climatique aura un impact négatif sur le potentiel de production d'énergie éolienne dans les Pyrénées (Santos et al., 2014; Gonçalves-Ageitos et al., 2015; Tobin et al., 2015). Les changements de circulation générale des vents et la réduction de la vitesse quotidienne des vents en surface attendus (jusqu'à -9% plus lents) pourraient réduire le potentiel de production d'énergie éolienne d'environ -1 ± 0,5 MWh/jour au cours des prochaines décennies par rapport aux valeurs actuelles.

On estime que ladite réduction sera beaucoup plus importante pendant l'époque estivale et automnale que pendant les mois d'hiver et de printemps, saisons au cours desquelles le potentiel éolien pourrait même augmenter relativement dans certaines zones (Santos *et al.,* 2014). Les zones les plus touchées par cette diminution seraient les Pyrénées centrales et orientales, tandis que sur le versant atlantique de la cordillère, non seulement on ne s'attend pas à des variations importantes, mais selon certains modèles, le potentiel éolien pourrait augmenter légèrement (Gonçalves-Ageitos *et al.,* 2015).



Fihure 3.3.3. variation estimée de l'énergie éolienne potentielle annuelle pour les trente années 2041-2070 par rapport aux valeurs moyennes de la période 1961-2000, en utilisant le modèle COSMO-CLM et le scénario d'émissions A1B. Source : Santos et al., 2014. © Renewable Energy.

3.3.4 Variation saisonnière de la demande énergétique

L'acclimatation des foyers et d'autres espaces est responsable de la consommation d'une fraction considérable de l'énergie utilisée en Europe (EEA. 2016). Les besoins de chauffage et de réfrigération sont essentiellement tributaires des conditions météo-climatiques et notamment des températures. Les principales études réalisées en la matière (PESTA II, ClimateCost, POLES, ESNSEMBLES) sont d'accord pour dire que la demande saisonnière d'énergie en Europe a subi des fluctuations considérables au cours des dernières décennies en raison du changement climatique et qu'elle continuera de le faire dans les années à venir.

Impacts constatés et prévus:

Environ un tiers de la demande énergétique destinée au chauffage des foyers européens est approvisionnée à travers l'électricité (Mideksa et Kallbekken, 2010). Par contre, la demande énergétique pour le refroidissement par le biais de climatiseurs est exclusivement couverte par l'électricité. Au cours des dernières décennies, les hivers de plus en plus doux et les étés de plus en plus chauds et affectés par des vagues de chaleur ont entraîné des changements dans la structure de la demande énergétique pour le chauffage et la réfrigération des foyers et des établissements. Pour évaluer le suivi de la demande énergétique relative aux besoins de chauffage et de réfrigération, la plupart des études utilisent un indicateur appelé CDD[65] (degré-jour de réfrigération, sigle anglais de Cooling Degree Days) et HDD[66] (degré-jour de chauffage, sigle anglais de Heating Degree Day). Les deux indicateurs font allusion à la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer ou réfrigérer les maisons jusqu'à l'obtention d'une température de confort déterminée. Entre 1981 et 2014 il y a eu une

(65) Le degré-jour de chauffage (HDD) est une moyenne conçue pour calculer la demande d'énergie nécessaire pour chauffer un édifice. HDD est une fonction directe de la température de l'air extérieur. On considère que la demande de chauffage pour un édifice donné dans un lieu spécifique est directement proportionnée au nombre de HDD de cet endroit.
(66) Le degré de refroidissement (CDD) est une mesure analogue au HDD qui reflète la quantité d'énergie utilisée pour refroidir un foyer ou un établissement. La valeur de base du HDD et du CDD est définie comme la température à laquelle on n'a pas besoin de réfrigération ni de chauffage (Schaeffer et al, 2012).

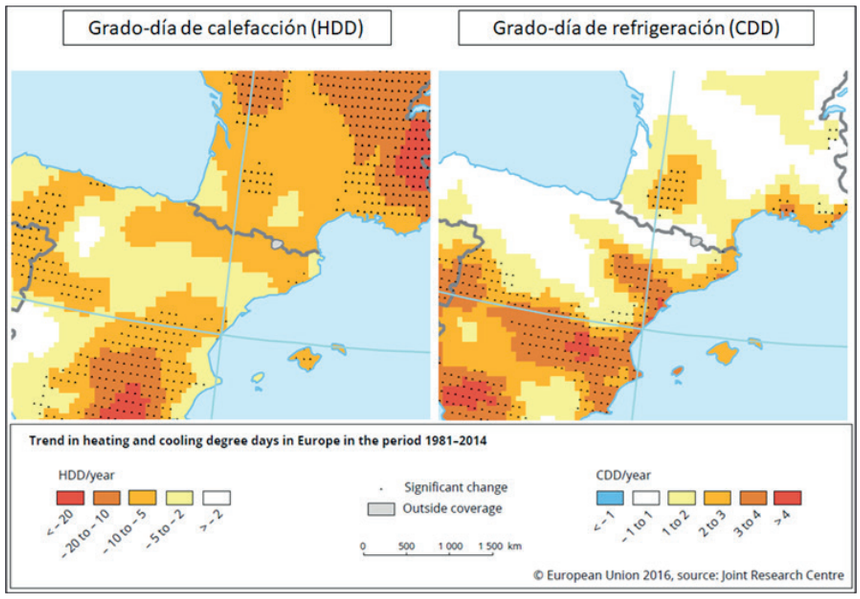


Figure 3.3.4. Évolution des indicateurs HDD (gauche) et CDD (droite) pendant la période comprise entre 1981 et 2014 dans les Pyrénées. Source JRC. 2016

réduction de la valeur de l'indicateur qui oscille entre -8 ± 2 HDD/ an, en raison des hivers plus doux (figure 3.3.4). Par contre, pendant la même période on a enregistré une augmentation de +2 ± 1 du CDD /an, en raison des étés de plus en plus chauds (EEA. 2016).

Selon les projections de l'évolution de ces deux indicateurs, réalisées dans le contexte du projet européen ENSEMBLES, pour la fin du siècle, on s'attend à une réduction légèrement plus grande des besoins énergétiques pour le chauffage des foyers pendant la saison hivernale et à une augmentation des besoins énergétiques pour le refroidissement dans les secteurs civil, industriel et tertiaire. Il faut signaler que l'augmentation de la demande énergétique pour subvenir aux besoins croissants de la réfrigération (pics de demande) aura probablement lieu à des moments de l'année critiques pour la génération de l'énergie hydroélectrique et avec des possibles limitations de l'usage des ressources hydriques pour la réfrigération des centrales thermoélectriques (Foster et Lilliestam, 2009). À cela, il faut ajouter les effets que produisent les situations climatiques extrêmes, de plus en plus fréquentes et intenses, sur la demande et l'offre énergétique. Concrètement, il est très probable que pendant la saison estivale les pics de demande énergétique ne cessent d'augmenter afin de répondre aux étés caniculaires, et que, par la même occasion, la production d'énergie diminue en raison d'une moindre disponibilité des ressources hydriques pour la production hydroélectrique.

3.3.5 Augmentation du risque de dommages sur les infrastructures énergétiques

La plus grande fréquence et intensité des phénomènes météorologiques extrêmes pourrait supposer un danger pour l'intégrité des systèmes de production d'énergie du point de vue des infrastructures de stockage, de transmission, de transformation et de distribution d'électricité dans les Pyrénées (Sathaye *et al.,* 2011; Muriel *et al.,* 2016).

Impacts constatés et prévus:

De nombreuses infrastructures qui conforment les systèmes de transmission et de transformation d'énergie sur les deux versants des Pyrénées sont particulièrement exposées aux risques climatiques et aux risques naturels provoqués ou aggravés par ceux-ci. D'une part, les infrastructures énergétiques se caractérisent par une durée de vie relativement longue (20 à 80 ans), c'est pourquoi elles sont particulièrement exposées à ces risques à long terme. D'autre part, une grande partie du réseau se situe dans des zones du territoire vulnérables face aux inondations, avec des dénivelés importants, souvent

instables ou touchées par des mouvements de masses et d'éboulements fréquents de roches, typiques des milieux montagneux. De plus, suite au changement du régime des précipitations, il pourrait y avoir un plus grand nombre de périodes de pluie courtes mais exceptionnellement intenses, circonstance qui entraînerait de nombreux risques géologiques et hydrologiques. D'autres évènements climatiques extrêmes qui seront probablement de plus en plus fréquents à l'avenir, comme des vents violents ou des tempêtes, peuvent entraîner la chute d'arbres et de poteaux téléphoniques et provoquer des dommages sur les réseaux de distribution et donc interrompre temporairement la distribution d'électricité. Finalement, pendant les vagues de chaleur, les hautes températures pourraient provoquer des pannes des transformateurs d'énergie électrique et altérer temporairement l'approvisionnement de l'énergie électrique (Karl *et al.,* 2009 y Sathaye *et al.,* 2011). Étant donné qu'il n'existe pas, à ce jour, d'études quantitatives sur ces effets dans les Pyrénées, il serait pertinent d'évaluer avec plus de rigueur les niveaux de risque des infrastructures énergétiques provoqués ou induits par le changement climatique. Une analyse plus profonde et quantitative permettrait d'évaluer si cet aspect du changement climatique demande l'adoption de mesures spécifiques pour éviter ou limiter les dommages potentiels. Cependant, et comme mesure préventive à court et à moyen terme, il est important d'adapter les designs et les conditions d'opération des infrastructures énergétiques de nouvelle construction, pour les rendre plus résilientes face aux risques climatiques, selon les expériences d'autres zones de montagne.

3.3.6 Conclusions et recommandations

e secteur énergétique est particulièrement vulnérable face aux effets du changement climatique. Il est probable que le changement climatique modifie le comportement de l'offre et la demande au cours des prochaines décennies. La diminution de la capacité de production d'énergie hydraulique et thermoélectrique en raison des implications du changement climatique pourrait supposer la réduction de l'offre énergétique au cours des périodes critiques de pic de la demande énergétique. Dans ce sens, au cours des étés de plus en plus chauds et caractérisés par des vagues de chaleur plus intenses et fréquentes, il y aura des changements dans le schéma de la demande énergétique, car le pic de demande se produira, de plus en plus, à ce moment-là. Cette désynchronisation entre les périodes de plus forte demande et les périodes de moindre capacité de production d'énergie pourrait aboutir à d'éventuels conflits entre différents secteurs socioéconomiques par rapport aux ressources hydriques, notamment en été, en raison d'un scénario dont la pénurie est en augmentation. En fait, il est prévisible qu'en raison de l'impact du changement climatique sur les ressources hydriques, on ne puisse pas subvenir aux besoins hydriques du secteur agricole, énergétique et environnemental. C'est pourquoi l'implémentation de mesures transversales d'adaptation se présente comme un élément fondamental pour garantir la résilience de ces secteurs face aux défis climatiques.

Principaux défis

- Optimiser la production énergétique et l'utilisation des ressources en eau pour la production d'énergie hydroélectrique et thermoélectrique ;
- Adapter la gestion du secteur énergétique aux éventuelles variations de la demande ;
- Approfondir les connaissances sur les potentielles limitations du système énergétique actuel face aux défis climatiques ;
- Identifier les éventuelles possibilités émergentes ;
- Promouvoir des mesures et des campagnes d'épargne énergétique
- Garantir l'adaptation progressive des infrastructures électriques et hydrauliques à la dynamique future de la demande ;s
- Identifier les nœuds du réseau de distribution énergétique situés dans les territoires de montagne les plus critiques par rapport aux risques climatiques, hydrologiques et géologiques ;
- Garantir une bonne capacité de réponse et de récupération du réseau de distribution face aux évènements climatiques extrêmes ;
- Promouvoir la transition vers un modèle de génération d'énergie distribuée pour remplacer le modèle de production centralisée actuelle.

Dans cette section, on énumère une série de recommandations d'adaptation destinées à favoriser le processus de design et de développement de mécanismes pour accroître la résilience du secteur énergétique face au climat de demain et à sa variabilité. Il faut mentionner qu'il n'existe pas une combinaison de mesures préétablies efficace, et que, en fonction du système de production énergétique considéré, ainsi que de la localisation géographique spécifique des infrastructures de production, de transport et d'accumulation, certaines actions seront plus prioritaires que d'autres. Il faut également mettre en exergue le caractère

particulièrement transversal du système énergétique, aussi bien pour ce qui est de l'évaluation détaillée des effets projettés que de la définition d'éventuelles mesures d'adaptation. Cette transversalité est spécialement visible dans le domaine des ressources en eau et dans les aspects relatifs aux politiques et aux objectifs de mitigation. Il est indispensable de prendre en compte tous ces aspects afin de pouvoir établir des priorités avant de formuler et d'implanter un ensemble de mesures optimales en termes d'efficacité et d'efficience (coût/bénéfices) pour augmenter la résilience du secteur face au changement climatique dans la zone pyrénéenne.

Mesures *douce*[67]

- Intégrer les considérations sur l'évolution des variables climatiques et leurs implications sur la demande énergétique annuelle dans les systèmes actuels de pronostic de crises et de pics de demande ;

- Promouvoir et encourager la création de systèmes efficients de construction et de climatisation passive, capables de faire face à l'augmentation des températures et de répondre aux demandes de confort thermique à bas coût ou à coût « 0 » (Ex.: augmenter le système d'incitation pour améliorer l'efficience énergétique des édifices rénovés et des constructions nouvelles) ;

- Consolider de nouvelles approches de modélisation par rapport aux projections hydroclimatiques en intégrant, dans la mesure du possible, les processus naturels et anthropiques importants au niveau du bassin ;

- Intégrer systématiquement les données relatives au débit écologique défini par la Directive Cadre de l'Eau (2000/60/CE) dans les plans et les actions de gestion des barrages, afin de garantir les besoins fonctionnels des écosystèmes fluviaux y compris dans un scénario d'aggravation des débits minimums ;

- Promouvoir des études afin d'évaluer la sensibilité envers le changement climatique des principales sources d'énergie renouvelable (Ex.: réduire les incertitudes sur les impacts futurss du changement climatique sur la production d'énergie hydroélectrique, thermoélectrique et éolienne) à un niveau de détail suffisant pour poivoir orienter les actions et les investissements sur le terrain.

Mesures *vertes*[68]

- Développer des systèmes de production énergétique alternatifs, en utilisant les ressources à l'échelle locale (Ex.: chaudières de biomasse ou pellets).

Mesures *grises*[69]

- Favoriser la transition vers un modèle de génération énergétique décentralisé ;

- Promouvoir les techniques et les matériaux de construction efficients d'un point de vue thermique et les systèmes de climatisation passive (Ex.: double ou triple vitrage extérieur, refroidissement par des systèmes de réfrigération passifs, utilisation de « toits verts », etc...) ;

- Récupérer, là où c'est faisable, la capacité d'accumulation des barrages et des déversoirs les plus critiques, pour favoriser la planification et la gestion pluriannuelle des ressources hydriques à travers l'adoption d'actions visant à optimiser l'accumulation malgré la variabilité des apports ;

- Augmenter l'interconnectivité des infrastructures hydrauliques de plus grande taille afin d'accroître la résilience du système (Intégration de réseaux

(67) Les mesures Soft ou mesures non structurelles pour réduire les effets négatifs du changement climatique. Cette catégorie de mesures est typiquement représentée par les études de recherche visant à couvrir des lacunes de connaissance ou à enrichir les bases de connaissance sur le changement climatique, ses effets et les secteurs les plus vulnérables. Cette catégorie comprend aussi le développement de méthodologies et de systèmes spécifiques pour réduire les risques inhérents au changement climatique (ex. Développement d'un Early Warning System transfrontalier pour la gestion des vagues de chaleur dans le Massif).

(68) Les mesures vertes ou basées sur les services écosystémiques : cette typologie de mesures inclut toutes les mesures de bonnes pratiques, études, ou initiatives ayant comme principe l'usage des services écosystémiques obtenus à travers les différentes ressources naturelles pour réduire les effets négatifs du changement climatique (Ex.: actions sylviculturelles de conservation pour augmenter la capacité des forêts des Pyrénées afin de réduire les risques hydrogéologiques).

(69) Les Mesures Grey ou infrastructurelles sont toutes celles qui basent leur action palliative sur la construction ou l'implantation d'éléments infrastructurels concrets (Ex.: construction de digues dans les zones habitées à haut risque d'inondations torrentielles).

de distribution et introduction de mécanismes pour l'échange et le transfert temporaire de concessions) ;

• Implémenter une stratégie d'intervention pour le maintien régulier, la sécurisation des infrastructures spécialement vulnérables face aux évènements climatiques extrêmes et les risques qui y sont inhérents (Ex.: infrastructures énergétiques situées dans des zones susceptibles d'inondations, de glissements de terrain ou de crues) ;

• Promouvoir la création d'un réseau électrique intelligent transpyrénéen ou « smartgrid », afin de favoriser l'interconnectivité des sites de production de petite taille et des sources renouvelables, qu'elles soient photovoltaïques, éoliennes ou hydroélectriques.

IDÉES CLÉS

• Il est prévisible que le changement climatique affecte négativement la disponibilité d'eau pour la production hydroélectrique dans les Pyrénées ;

• La réduction du débit minimum des cours d'eau, associée à l'augmentation de la température de l'eau, imposera très probablement des limites à la capacité de production d'énergie thermoélectrique ;

• La capacité de production d'énergie solaire photovoltaïque et photothermique pourrait être favorisée par un degré d'insolation plus élevé, lié à la diminution de la couche nuageuse ;

• Le changement du régime des vents et la diminution de la vitesse moyenne des vents prévue pour les prochaines décennies dans certaines zones des Pyrénées, pourraient avoir un impact négatif sur la capacité de production d'énergie éolienne ;

• L'augmentation prévue de la fréquence et de l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes pourrait constituer une menace pour les systèmes de production et de distribution d'énergie ;

• Le réchauffement de la planète pourrait entraîner une augmentation de la demande énergétique estivale pour le refroidissement des maisons, qui pourrait être compensée, quoique partiellement, par la diminution de la demande électricité hivernale pour rechauffement.

3.4 Risques naturels

Coordinateur: Yvan Caballero BRGM
Auteurs: Séverine Bernardie y Nina Graveline (BRGM); María del Carmen Llasat (Univ. Barcelona); C. Bouisset, Sylvie Clarimont e Isabelle Degrémont (Univ. Pau); Santiago Begueria (CSIC), Juan Ignacio Lopez-Moreno (CSIC), Vincent Jomelli (CNRS), Enrique Serrano (UVA), Yvan Caballero (BRGM).

RÉSUMÉ

Ce chapitre présente les principaux éléments de connaissance actuellement disponibles sur l'influence potentielle du changement climatique sur l'aléa associé aux principaux risques naturels que l'on peut rencontrer dans les Pyrénées. Il apparaît ainsi que dans le futur, le territoire Pyrénéen pourrait faire face à une augmentation des températures minimales et maximales, des vagues de chaleur et des épisodes de sécheresse; à l'accroissement de la fréquence d'occurrence des épisodes de pluie intenses et de l'intensité des épisodes de grêle; à l'élévation du risque associé aux crues et aux inondations, même s'il n'y a pas de signal clair sur l'évolution future de leur fréquence d'occurrence et de leur intensité; et à la fragilisation de la stabilité des versants et des roches, dans des proportions très mal connues mais qui pourrait résulter de la combinaison de l'évolution future des précipitations, des températures (incendies) et de la probable fonte ou dégradation du permafrost. Le chapitre conclut par une réflexion sur les stratégies d'adaptation qui peuvent être envisagées pour faire face à cette évolution inquiétante et recommande un certain nombre de mesures qui peuvent être développées pour s'y adapter.

L'Europe est en train de faire face à un nombre croissant de désastres naturels, aggravés par les effets combinés de changements dans ses systèmes physiques, technologiques, humains et sociaux. Parmi les désastres causés par des phénomènes naturels qui ont eu lieu en Europe depuis 1980, près de 90% des événements et 80% des pertes économiques sont dus à des aléas hydrométéorologiques ou climatiques (EEA, 2010). Les conditions du changement climatique global, telles que décrites dans le Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat des Nations Unies, mèneront à ce que les impacts des aléas naturels sur les systèmes naturels et humains augmentent et se produisent sur toute la planète. L'Europe verra probablement un accroissement progressif et fort du risque climatique global, avec un gradient spatial important vers les régions du sud-ouest (Forzieri *et al.,* 2016).

Ce chapitre présente, de manière synthétique, les principaux éléments de connaissance actuellement disponibles sur l'influence potentielle du changement climatique sur l'aléa associé aux principaux risques naturels que l'on peut rencontrer dans les Pyrénées. L'importance du risque que représente un type de phénomène naturel donné (tempête, sécheresse, crues, glissement de terrain...) sur un territoire, dépend de l'association de l'aléa du phénomène (qui qualifie son occurrence et son intensité) et de la vulnérabilité du territoire sur lequel le phénomène naturel a lieu (qui est d'autant plus importante que le territoire est peuplé et urbanisé). Dans ce chapitre, nous n'aborderons pas la notion de vulnérabilité; nous nous concentrerons plutôt sur une présentation de l'état des connaissances actuelles sur l'aléa des principaux phénomènes naturels décrits sur le territoire pyrénéen et de leur évolution future. Quatre types de phénomènes naturels sont considérés ici: 1) les événements météorologiques extrêmes, 2) les crues et les inondations, 3) les glissements de terrain et les chutes de blocs et 4) la dégradation du permafrost et 5) les avalanches. En conclusion, des suggestions sont présentées, comme possibles actions d'adaptation à entreprendre.

3.4.1 Augmentation des événements météorologiques extrêmes

Évolution actuelle

Le suivi et l'analyse de l'évolution des événements extrêmes (pluies torrentielles, sécheresses, vagues de chaleur…) est une activité complexe du fait de la rareté et de la soudaineté de leurs occurrences, de la sensibilité des variables que l'on cherche à observer, des changements de méthodes et du matériel de mesure qui ont servi à les documenter, mais aussi du fait de la difficulté de s'accorder sur la manière de les définir. De façon générale, c'est l'évolution des températures extrêmes qui est la mieux documentée, les autres variables météorologiques étant souvent affectées par des lacunes (le matériel d'observation pouvant être détruit lors d'une tempête, par exemple) et pas toujours cohérentes en fonction des régions. Le GIEC, dans sa dernière publication sur la question (Hartmann *et al.,* 2013), propose une illustration générale (Figure 3.4.1) des évolutions observées depuis le milieu du 20ème siècle..Des études réalisées en se concentrant

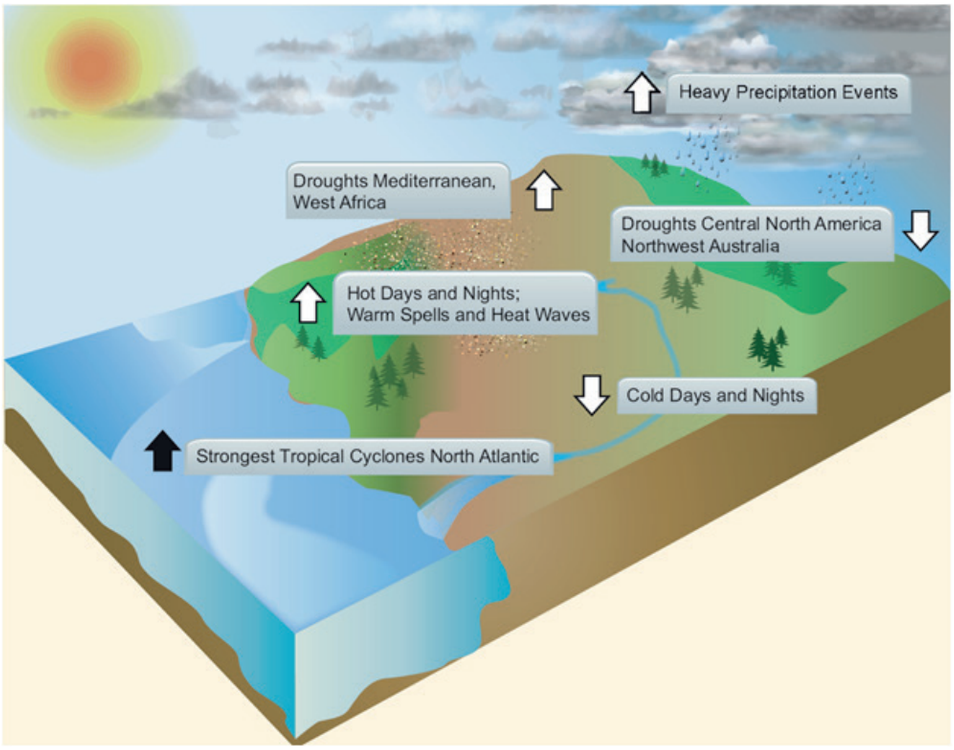


Figure 3.4.1. Évolution des fréquences (ou de l'intensité) de différents types d'événements extrêmes (l'évolution à la hausse ou à la baisse est indiquée par le sens de la flèche), depuis le milieu du 20ème siècle . Source: extrait de Hartmann et al., 2013.

sur la grêle ont montré qu'à l'échelle de la France, c'est probablement sur les massifs montagneux et notamment sur les Pyrénées, que les épisodes de grêle sont les plus fréquents et les plus intenses, sous l'effet des flux d'air humide en provenance d'Espagne à certaines périodes ou de fronts d'air froid en provenance de l'Atlantique à d'autres. L'observation des épisodes de grêle au cours des 40 dernières années conclut à une augmentation de l'intensité des épisodes, en corrélation avec l'augmentation des températures printanières, bien qu'aucune tendance n'ait été décelée sur leur fréquence d'occurrence (Berthet *et al.,* 2011).

Projections futures

À ce jour, une relation entre les changements de précipitations totales et l'évolution des événements extrêmes n'a pas été mise en évidence. Cependant, les projections faites à l'aide de modèles climatiques indiquent que les précipitations pourraient être plus intenses durant la saison des pluies, à l'échelle globale, en particulier dans les hautes latitudes et dans les régions bénéficiant des pluies de mousson (Collins *et al.,* 2013).

Dans le rapport spécial du GIEC sur les événements extrêmes IPCC (2012), il est projeté une évolution vers plus d'épisodes de pluie intenses et moins de pluies peu intenses. De même, cette évolution pourrait potentiellement provoquer une accumulation d'énergie plus importante et générer des tempêtes plus violentes, même si cela n'a été documenté que sur le territoire des États-Unis. A l'échelle saisonnière, l'augmentation de l'évapotranspiration liée au réchauffement pourrait provoquer des périodes de sécheresse plus fréquentes et plus longues, en particulier dans les régions semi-arides comme le bassin méditerranéen. En plus de ces sécheresses qualifiées de « météorologiques », des sécheresses dites « agricoles » peuvent aussi avoir lieu plus fréquemment dans les régions où le contenu en eau du sol sera en forte diminution. A nouveau, ce phénomène risque de toucher particulièrement le bassin méditerranéen (Collins *et al.,* 2013).Outre aux sécheresses qualifiées de «météorologiques», les sécheresses «agronomiques» pourraient également être plus fréquentes à l'avenir (voir chapitre 3.3 Agropastoralisme), en particulier dans les régions où la teneur en eau du sol est actuellement faible.

ENCUADRÉ 3.4.1. SOLUTIONS POUR LIMITER L'IMPACT DES SÉCHERESSES EN VILLE

Plusieurs villes ont commencé à mettre en œuvre des solutions qui reposent sur la création d'îlots de fraîcheur pour lutter contre l'élévation de la température[70]. À Orléans, des toitures végétalisées, le développement d'espaces verts, la réduction des surfaces imperméabilisées, le maintien ou la création de milieux naturels en plantant préférentiellement des espèces locales, la gestion et le renouvellement du patrimoine arboré, permettent à la ville de s'afficher comme « ville-jardin ». À Stuttgart en Allemagne, une réglementation de construction contraignante a été adoptée. Elle encourage le recours à des solutions basées sur la nature et qui permet à la ville d'atteindre 60% de sa superficie couverte par des zones végétalisées. Les 1900 m² de toitures végétalisées de l'Hôtel de Ville de Chicago, réalisées en accord avec le Plan d'Action Climatique de Chicago, ont contribué à réduire l'écoulement des eaux pluviales en cas d'orage et à réduire l'effet d'îlot urbain de chaleur autour du site (UNEP, 2014).

3.4.2 Augmentation de la fréquence des crues et des inondations

Évolution actuelle

Les synthèses des travaux sur la question des crues proposées dans le cadre du GIEC n'ont, à l'heure actuelle, pas détecté de tendance d'évolution des crues statistiquement solide à l'échelle globale. Le seul signal solide concerne l'évolution, au printemps, dans les régions où le manteau neigeux est important, et où les écoulements sont fortement influencés par la fonte des neiges (Hartmann *et al.,* 2013). Dans son rapport SREX (IPCC, 2012), l'IPCC a manifesté qu'il est également nécessaire de considérer les changements de vulnerabilité, d'exposition, et même d'activités menées dans le bassin. Plus récemment, le rapport du GIEC du RE5, (IPCC, 2014) signale que les tendances à la hausse des impacts d'inondations observées étaient plutôt dues à ces changements, qu'à une conséquence directe du changement climatique, rejoignant ainsi les conclusions de Hall *et al.,* (2014). Mediero et al., (2014), dans leur analyse des décharges annuelles maximales en bassins bien calibrés et relativement grands en Europe, trouvent plus de tendances négatives que positives, pour la période 1959-2009. Pour ce qui est spécifiquement des inondations en tête de bassins, dans des bassins beaucoup plus petits et généralement non-calibrés, il existe très peu de données, ce pourquoi il n'est pas possible d'étendre ces conclusions à l'échelle locale. López-Moreno *et al.,* (2006) et Renard *et al.,* (2008) trouvent des tendances négatives dans les pics de décharge dans les Pyrénées Centrales pour les périodes respectives 1955-1995 et 1968-2000, mais qui pourraient en grande partie être justifiées par l'augmentation de la couverture forestière et les changements d'usages des sols. Bulygina *et al.,* (2009, 2011) ont démontré que, dans les petits bassins, l'augmentation de la couverture forestière peut mener à une réduction de près de 10% du débit moyen des crues.

Dans les Pyrénées, les inondations sont principalement causées par des pluies très intenses, comme réponse rapide sous forme d'inondations-éclair ("flash-floods"). Ce n'est que rarement que le dégel joue un rôle important, comme le montre l'épisode de la Garonne, où le dégel a causé des inondations catastrophiques qui ont affecté la Catalogne, l'Aragon, l'Andorre et le Midi-Pyrénées (Agence de l'Eau Adour-Garonne, 2014; Llasat *et al.,* 2017). On a pu constater une augmentation de fréquence des crues de printemps, vers le milieu du 19ème siècle, à la fin du petit âge glaciaire (Llasat *et al.,* 2005). Néanmoins, les inondations se produisent plutôt en automne, avec des crues exceptionnelles en octobre 1940 (plus de 860 mm de pluie) et en novembre 1982 (plus de 600 mm de pluie) (Llasat *et al.,* 2017), et aussi en 1999 (nord de la Catalogne, épisode qui a fait le plus grand nombre de victimes de ces dernières années dans le Sud de la France, Boudou, (2016)). Aucune tendance n'a pu être détectée pour ces inondations catastrophiques (Llasat *et al.,* 2013). Par ailleurs, on a pu constater des inondations « exceptionnelles », plus fréquentes, mais qui font moins de dégâts, liées à l'augmentation de la vulnérabilité et de l'exposition, des zones côtières en particulier (Llasat *et al.,* 2013). Par exemple, entre 1981 et 2015, il y eut 77 inondations en Catalogne, dont 23% ont été catastrophiques et 51% « exceptionnelles », avec un total de 100 victimes mortelles (Llasat *et al,.* 2017). De même, il y eut 97 épisodes catastrophiques entre 1981 y 2010, dans les régions d'Occitanie et de la Nouvelle Aquitaine, avec un total de 94 décès. En Andorre, des inondations extraordinaires eurent lieu en 1907, octobre 1937 et novembre 1982, ces dernières causèrent des déces. Une légère augmentation significative (0,4 épisodes/décennie) des crues d'été

(70) http://uicn.fr/solutions-fondees-sur-la-nature/

(juillet-août-septembre) a été enregistrée dans les Pyrénées catalanes. Ces données montrent la nécessité d'analyser les variations saisonnières sur la base de séries pluviométriques à haute résolution temporelle, ce qui pour le moment est limité par le manque d'observations in situ. Álvarez-Rodriguez *et al.,* (2016), montrent que de 1950 à nos jours il y a eu très peu de changements dans la distribution des stations d'altitude en Espagne, avec moins d'une dizaine de stations au-dessus de 1400 m. Au cours des dernières décennies, certains services régionaux ont installé de nouvelles stations au-delà de ces niveaux, mais avec un objectif principalement nivologique et de prédiction d'avalanches.

Projections futures

Il est difficile d'établir de projections futures de risques d'inondations, au vu des incertitudes concernant les projections de pluies intenses, les changements à venir dans l'usage des sols, etc., (Hall *et al.,* 2014). Les rapports de l'IPPC (2012, 2014) se limitent à projeter une élévation de la fréquence des précipitations intenses (pour une période de retour de 20 ans) dans le sud de l'Europe.Néanmoins, c'est avec un haut niveau de confiance qu'ils identifient comme un défi futur l'augmentation des pertes économiques et humaines suite à des inondations fluviales et côtières, au vu de la croissance de l'urbanisation, l'élévation du niveau de la mer, l'érosion côtière et les pics de débits en Europe. Dans le cas des Pyrénées, ceci pourrait affecter surtout les régions périphériques côtières. Par contre, dans la zone pyrénéenne proprement dite, la désertion rurale en constante croissance et l'augmentation de la couverture forestière fait que les problèmes se posent seulement en zones touristiques (occupations à haut risque des berges de rivières ou torrents, comme par exemple dans le cas de la Garonne en juin 2013 (Llasat *et al.,* 2017), ou de Biescas, en août 1996 (García Ruiz *et al.,* 2004). Pour ce qui est des projections futures d'inondations, les travaux de Rojas *et al.,* (2012), ne détectent aucun signal significatif dans les régions de la Méditerranée Occidentale. Dumas *et al.,* (2013) projettent une augmentation de la fréquence des inondations, avec une période retour de

ENCUADRÉ 3.5.2. SOLUTIONS POUR LIMITER LES RISQUES D'INONDATION

Face au risque d'inondation, des stratégies qui consistent à construire des infrastructures de protection (telles que des bassins de rétention couplés à des systèmes automatisés de gestion) ont été développées dans un premier temps. Plus récemment, plusieurs territoires ont mis en place des approches basées sur l'aménagement qui visent à gérer le phénomène en amont[71]. Par exemple, le département de la Seine-Saint-Denis a ainsi redonné de la place aux écosystèmes naturels sur son territoire, aujourd'hui urbanisé à 93%. Ces écosystèmes aident à la régulation des inondations, et améliorent aussi l'infiltration des écoulements. Un programme franco-suisse de restauration du Rhône a permis de réduire l'exposition au risque d'inondation des populations par l'intermédiaire de la remise en eau de certains bras morts du fleuve, et aussi par la modification de la structure de certains affluents. En 2002, le Fonds mondial pour la nature (WWF) a lancé un programme visant à reconnecter des lacs grâce à la réouverture saisonnière des vannes et à faciliter la gestion durable de ces lacs en supprimant ou en modifiant les infrastructures, augmentant ainsi le stockage des eaux de crue (PNUE, 2014). En Suisse, il y a quelques années seulement, la rivière Aïre proche de Genève, passait par un canal droit en béton. Les périodes de fortes pluies dépassaient souvent ses berges, causant un risque d'inondation pour certains quartiers de la ville. Un projet de protection contre les inondations, accompagné de l'amélioration écologique du cours d'eau, a été lancé en 2002. Une longue partie du lit de la rivière a été élargie, ralentissant ainsi le débit; cela a eu pour effet la dissipation des crêtes de crue dans les tronçons inférieurs. Depuis 2011, la loi suisse sur la protection des eaux a prescrit un espace minimum pour les cours d'eau et les rivières. Les bandes tampons le long des berges qui existent déjà aujourd'hui doivent être agrandies, notamment le long des grands cours d'eau. Pour cela, environ 20 000 ha de terres sont nécessaires dans toute la Suisse, principalement dans les zones agricoles. Ces terres ne seront pas perdues pour l'agriculture, car il est toujours possible de s'en servir comme de vastes pâturages pour l'élevage du bétail et la production de foin (FBA, 2017a)

(71) http://uicn.fr/solutions-fondees-sur-la-nature/

100 ans, pour le Rhône. Quant au taux de précipitations annuel maximal en 24 heures, Turco *et al.,* (2016) trouvent un changement dans la région pyrénéenne pour la période 2070-2100 par rapport à celle de 1971-2000, compris entre -5% et +5%, qui serait clairement négatif au printemps et en été.

3.4.3 Accroissement des glissements de terrain et des chutes de blocs

Évolution actuelle et future du nombre et du type de glissements de terrain

Certaines études ont été menées sur l'analyse des enregistrements historiques de la présence de glissements de terrain (Seneritvane *et al.,* 2012). Elles présentent une ample variété de résultats, en raison d'effets locaux, d'incertitudes et d'effets indéterminés. Entre autres, plusieurs ont montré que l'élévation de la température de l'air a eu comme conséquence une augmentation de l'activité des glissements de terrain, en particulier des chutes de blocs, des avalanches de roches et glace et des coulées de débris (Ravanel and Deline, 2011, 2015; Stoffel and Beniston, 2006; Paranunzio *et al.,* 2016; Huggel *et al.,* 2012, 2013). Des changements au niveau global auraient des impacts dans le monde entier, mais leurs effets devraient être encore plus importants dans les zones particulièrement vulnérables, comme cela pourrait être le cas des régions de montagne. En effet, dans ces régions, une variété de secteurs socioéconomiques (par exemple: tourisme, exploitation forestière, agropastoralisme, ressources de l'écosystème...) a souffert de changements considérables au cours des deux derniers siècles. De plus, le changement climatique en cours dans les montagnes peut entraîner de futures modifications des modèles de température et de précipitations; ce qui peut conduire à des changements de l'équilibre entre neige, glace, et pluie, qui, à terme, aura comme résultat d'en changer la quantité et la saisonnalité. Par conséquent, les processus naturels contrôlés par des déclencheurs hydrométéorologiques, et parmi eux les glissements de terrain, ajouteront, dans un futur climat, des nouvelles pressions environnementales tant sur les systèmes sociaux que naturels.Comme le signale le rapport IPCC 2014, « les épisodes de précipitations extrêmes sur la plupart des terres émergées des latitudes moyennes et sur les régions tropicales humides deviendront très probablement plus intenses et plus fréquents ». Cette évolution affectera sans doute les glissements de terrain dans certaines régions (Seneviratne *et al.,* 2012). Jomelli (2012), Stoffel *et al.,* (2014) et Wood *et al.,* (2016) indiquent que là où la fréquence et / ou l'intensité des pluies d'orage vont augmenter, les glissements de terrain peu profonds, y compris les éboulements, les coulées de débris et les avalanches de débris, devraient également augmenter. Néanmoins, on ne peut pas trouver de corrélation entre intensité des précipitations et déclenchement de chutes de blocs dans plusieurs évènements documentés en Andorre (Copons, 2004).

Plus spécifiquement, les glissements de terrain peuvent être sensibles aux changements climatiques selon six facteurs climatiques (Crozier, 2010): précipitations totales, intensité des précipitations, température de l'air, vitesse et durée du vent, changements dans les systèmes météorologiques et variabilité météorologique. Ces facteurs peuvent affecter différents processus, et pourraient donc affecter la fréquence des glissements de terrain. Par exemple, une augmentation de l'intensité des précipitations peut impliquer une évolution de la nappe phréatique susceptible d'affaiblir la stabilité du sol. L'augmentation de la température et la diminution des précipitations peuvent impliquer une augmentation des feux de forêt, ce qui entraîne également une réduction de la stabilité des pentes en raison de l'absence de la résistance mécanique due aux racines. Dans les régions de haute montagne, une augmentation de la température peut entraîner le dégel du permafrost et un affaiblissement de la solidité des roches en raison de la diminution des glaciers, et conduire à une augmentation de la rupture de pente des talus rocheux. Des modifications de la vitesse et de la durée du vent peuvent impliquer quelques changements dans l'évapotranspiration, et par conséquent dans l'humidité du sol. De plus, dans les zones de montagne, les coulées de débris constituent une menace sérieuse car elles endommagent périodiquement des infrastructures critiques et perturbent les réseaux de transport avec des conséquences socioéconomiques régionales. (Utasse *et al.,* 2016).

Situation à l'échelle des Pyrénées

A l'échelle des Pyrénées, des travaux ont permis d'analyser les conditions géomorphologiques et climatiques permettant d'expliquer l'occurrence de glissements de terrain (Lorente *et al.,* 2002), mais peu de travaux ont été réalisés jusqu'ici sur la question de l'évolution future de ces phénomènes dans le contexte de changement climatique. L'élévation de la fréquence et de l'intensité des évènements climatiques extrêmes devrait augmenter l'exposition des infrastructures et habitations aux risques d'inondation, d'avalanche et de glissement de terrain (ONERC, 2009). L'augmentation des risques de feux de forêts du fait de l'élévation des températures moyennes pourrait ainsi avoir pour conséquence un accroissement de processus gravitaires tels que l'érosion des sols, les glissements et coulées de boue, causés par la réduction du maintien mécanique

ENCADRÉ 3.4.3. LE PROJET SAMCO : ADAPTATION POUR FAIRE FACE AUX RISQUES DE MONTAGNE DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENT GLOBAL

A l'échelle locale, une analyse de l'évolution des glissements de terrain dus au changement climatique a été réalisée sur le territoire de la commune de Cauterets, dans le cadre du projet SAMCO. Ce type d'analyse peut être considéré comme une stratégie d'adaptation visant à protéger la population et les infrastructures des futurs glissements de terrain causés par le changement climatique. Deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre ont été analysés (RCP 4.5 et 8.5., modèle ALADIN-Climat) tirés du portail DRIAS (http://www.drias-climat.fr). Les projections montrent une tendance à l'augmentation des évènements extrêmes de précipitations à court et à long terme. Pour les points les plus élevés, le modèle montre une augmentation des précipitations cumulatives. Pour les points les plus bas, le modèle indique une légère augmentation à court terme et une faible diminution à long terme. Pour les températures, les projections indiquent une hausse significative de la température à court terme (+ 1,5 ° C) et à long terme (+ 4 ° C), ce qui entraînera des changements dans l'équilibre entre la neige et les précipitations. L'analyse des risques de glissements de terrain a été réalisée avec le logiciel ALICE (Bailis et al., 2011, Sedan et al., 2013). Ce modèle est basé sur une analyse de stabilité de pente 2D, pour laquelle les principales caractéristiques physiques des sols et des surfaces sont quantifiées et prend également en compte l'effet de la fluctuation quotidienne de la nappe phréatique, calculée à l'aide du modèle GARDENIA (Nicolle et al., 2014). Une augmentation significative du niveau moyen de la nappe phréatique est prévue pour les périodes futures, en particulier entre 2071 et 2100 avec le pire scénario (RCP8.5). La figure 3.4.1 montre la probabilité moyenne du Facteur de Sécurité <1 au cours de la période 1981-2010, en considérant un glissement rotationnel du terrain, d'une longueur de 25 m, et d'une profondeur comprise entre 1 et 3 m. Les résultats indiquent une augmentation de la teneur en eau du sol induisant une réduction du FS dans une grande partie de la zone étudiée. Ces changements ne sont pas uniformes dans la région étudiée et sont particulièrement importants pour le pire scénario de RCP 8.5.

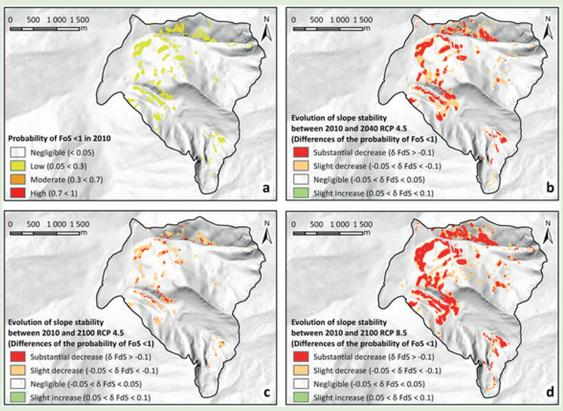


Figure 3.4.2: Évolution de la susceptibilité aux glissements de terrain en fonction du changement climatique avec deux scénarios différents: a) probabilité de FS[72] <1 en 2010, b) différences de probabilité de FS <1 entre 2010 et 2040 avec scénarios RCP 4.5, c) différences de probabilité de FS < 1 entre 2010 et 2100 avec des scénarios RCP 4.5, d) des différences de probabilité de FS <1 entre 2010 et 2100 avec des scénarios RCP 8.5.

en place des sols par le tissu racinaire, et du fait de l'intensification du ruissellement. En outre, la hausse des températures et des écoulements dans les sols pourrait aussi provoquer des instabilités dans les sols. Dans les Pyrénées, l'augmentation des glissements de terrain est associée aux pluies torrentielles et à la disparition de la végétation, ou à la substitution de la végétation autochtone par une autre ayant un enracinement plus faible. L'action humaine peut donc augmenter le risque de glissements de terrain. Par conséquent, les plans de gestion urbaine sont un outil important d'adaptation à l'augmentation de ces phénomènes.

3.4.4 Accroissement des risques liés à la dégradation du permafrost

La présence de permafrost (zone du sol ou du sous-sol qui est gelée en permanence) est liée à la congélation du sous-sol sur des épaisseurs allant de 50 cm à 8 m, sous l'effet combiné de conditions climatiques (en particulier la température, les précipitations, le vent et le rayonnement solaire), topographiques (effets « barrière » ou d'influence sur le vent) et locales (manteau neigeux, couverture végétale, disponibilité en eau et types de formations pédogéologiques en présence) (Gruber *et al.,* 2017).

(72) El factor de seguridad (FS) es un índice proporcionado por una simulación mecánica y utilizado para la caracterización de la estabilidad de taludes. Para FS < 1, la pendiente es considerada inestable; para 1 < FS < 1.2, la pendiente se considera potencialmente inestable y para FS > 1.2, la pendiente se considera estable.

Actuellement, des efforts sont en cours pour cartographier le permafrost en montagne. Allen *et al.,* (2016) ont ainsi réalisé une étude dans les montagnes Himalayennes du district de Kullu, Himachal Pradesh, qui a permis de cartographier le permafrost existant. Leurs travaux ont montré que la surface couverte par le permafrost est de même ordre de grandeur que celle couverte par les glaciers sur leur zone d'étude et que, de ce fait, les risques associés au changement climatique pour ce type de formation doivent être étudiés. Si la compréhension des processus qui contrôlent la formation de permafrost n'est pas aisée, il est évident que la fonte du permafrost induit un risque de déstabilisation lié à la subsidence du sol sous l'effet de la perte du volume occupé par la glace, ainsi que par rupture de l'équilibre mécanique qui contrôle les processus de départ des sédiments par glissement de terrain ou chutes de blocs (dans le cas de fonte des glaciers rocheux), même à faible pente (Gruber *et al.,* 2017). Ce type de risque doit être pris au sérieux en Himalaya car il peut affecter des milliers de personnes et provoquer des dégâts pouvant coûter plusieurs dizaines de millions de dollars par an, selon Kääb et al., (2005). Il est aussi important de l'étudier dans les montagnes européennes, du fait des activités récréatives et sportives qui s'y développent (Boeckli *et al.,* 2012).La majorité des travaux référencés sur ce type de risques dans les environnements de montage en Europe sont localisés dans les Alpes. Ravanel et Delile (2011), puis Krautblatter et al., (2012) ont référencé une série d'événements de chute de blocs potentiellement liés à la fonte ou la dégradation du permafrost. Bodin *et al.,* (2016) étudient la dégradation d'un glacier rocheux et le déclenchement de laves torrentielles associées. Keiler and Fuchs (2016) présentent une analyse rétrospective dans les Alpes autrichiennes sur le lien entre fonte de permafrost et exposition au risque. Magnin *et al.,* (2017) ont étudié l'évolution de l'état du permafrost sur le massif du Mont-Blanc, depuis le petit âge de glace (1300-1850) jusqu'à nos jours, puis proposé une projection jusqu'en 2100, concluant à une fréquence accrue de grands écroulements futurs dans les environnements glaciaires.Dans les Pyrénées, le permafrost s'observe sur des extensions réduites et dans les secteurs de plus haute altitude (globalement au-dessus de 2 700 m). Il peut être observé directement sur le terrain, mais aussi indirectement grâce à des indicateurs comme les glaciers rocheux (Serrano *et al.,* 2009 et 2010 et González García, 2014). Serrano *et al.,* (2009) ont proposé une cartographie du permafrost qui combine les observations ponctuelles avec la topographie, la radiation solaire et la température de l'air sur le massif pyrénéen. On y voit les secteurs où la formation de permafrost est rendue possible ou probable par les conditions locales ainsi mises en évidence, dont l'altitude (toujours supérieure à 2 000 m) dépend de l'orientation des massifs en question (le permafrost est plus bas sur les parois orientées vers le nord que vers le sud). Sur la face nord-ouest du Vignemale, au droit duquel un accroissement des chutes de blocs a été observé au cours des dernières années, un système d'observation de l'évolution du permafrost a été installé pour comprendre l'influence du climat local sur les phénomènes de dégradation et dégel (Rico *et al.,* 2017).

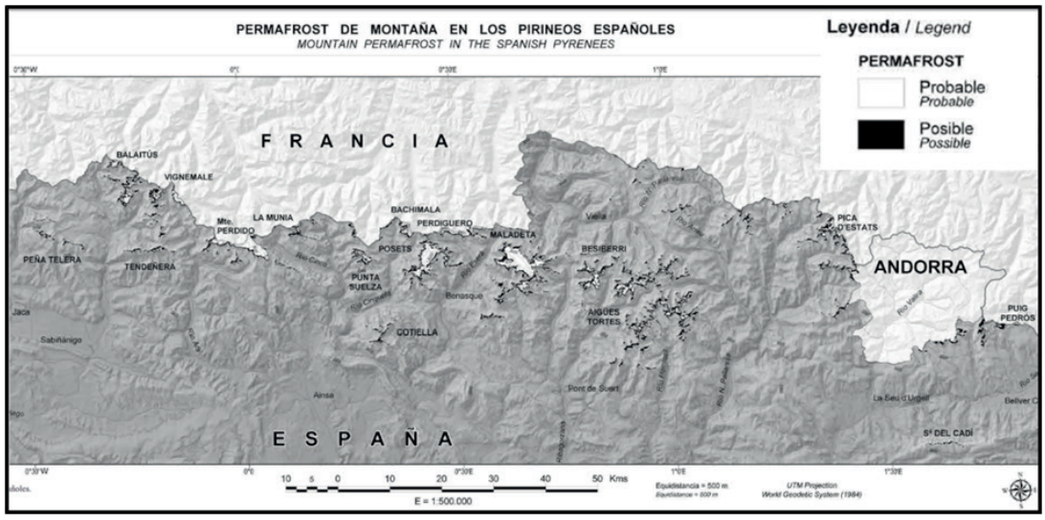


Figure 3.4.3: Présence possible et probable du permafrost dans les Pyrénées espagnoles (modifié de Serrano *et al.,* 2009).

3.4.5 Avalanches

Les avalanches peuvent caractétiser de petits glissements affectant à peine les skieurs, jusqu'aux phénomènes catastrophiques qui mettent en danger des communautés montagnardes ou des itinéraires de circulation (EAWS, 2016). Le départ d'une avalanche est le résultat d'une interaction complexe entre terrain, enneigement et conditions météorologiques, qui peuvent conduire au glissement de neige sèche ou humide (EEA, 2017a). EEA (2017a) rapporte que "*l'activité d'avalanches de neige sèche et humide a augmenté entre 1952 et 2013, surtout au milieu de l'hiver et à haute altitude*". On peut trouver des données d'observations historiques et des statistiques de long-terme sur les décès causés par des avalanches dans presque tous les pays alpins. La majorité des décès dûs aux avalanches se produisent sur des terrains non aménagés (principalement des accidents de loisir), très peu étant signalés en terrains aménagés (urbanisations et circuits de transport) (EEA, 2017a). Dans les Alpes, les avalanches peuvent atteindre une moyenne de 100 personnes chaque hiver. En Catalogne, on rapporte une moyenne d'un à deux décès par avalanche depuis 1987, avec une tendance à la diminution qui peut être dûe à l'augmentation de l'utilisation d'équipements élémentaires de sécurité personnelle pour les activités de montagne (Martin-Vide, 2016). La dendrogéomorphologie a été utilisée pour dater et reconstruire des événements d'avalanches de neige importantes qui ont eu lieu au cours des quatre dernières décades. Elle a montré que l'hiver 1995–1996 a été le plus remarquable en ce qui concerne l'occurrence d'avalanches de grande taille dans les Pyrénées-Orientales (Muntan *et al.,* 2009). Néanmoins, pour cette région, une augmentation statistique des cas d'avalanches majeures a été rapporté par García-Sellés *et al.,* (2010) et surtout de phénomènes mobilisant de la neige humide (Oller *et al.,* 2015). Castebrunet et al., (2014) projettent une diminution de l'activité en termes d'avalanches dans les Alpes Occidentales à basse altitude au printemps, suite à l'augmentation des températures et une augmentation au-dessus des 2 500 métres en hiver, à cause de la possible aurmentation de la fréquence des fortes précipitations. Dans la zone pyrénnéenne de ski de la région française de Nouvelle Aquitaine, la durée de la période d'enneigement pourrait se réduire de 3 à 2 mois et ne pas dépasser une hauteur de 20 cm vers la fin du XXIème siècle (Le Treut, 2013). Pour le même horizon temporel, la fréquence de phénomènes de fortes chutes de neige pourrait diminuer en-dessous de 2 000 m et augmenter au-dessus de cette altitude, d'après Lopez-Moreno *et al.,* (2011).Pour ce qui est de l'activité d'avalanches dans les Alpes, une diminution générale est projetée pour la variabilité moyenne (20–30 %) et interannuelle. Néanmoins, l'évolution future dépendra des changements dans les caractéristiques du manteau neigeux et de leurs relations avec les avalanches. Comme le rapporte EEA (2017a) "*La relation entre fréquence et magnitude des avalanches et le changement climatique est incertaine. En général, l'on assume que les changements possibles de fréquence et magnitude des avalanches sont liés aux changements de l'enneigement, avec une possible réduction des risques d'avalanche à basses et moyennes altitudes (suite à l'augmentation des températures en hiver), bien que des phénomènes plus fréquents de précipitation forte puissent contrecarrer cette tendance (PLANALP, 2016)*". Pour la plannification de l'adaptation, les observations des avalanches de neige (telles que séries temporelles dendrogéomorphologiques, enquêtes de population et exploitation de données historiques) et les modèles statistiques-dynamiques peuvent être utilisés avec une confiance raisonnable pour la prévision des distances de propagation des avalanches à hautes périodes de retour (Schläppy *et al.,* 2017a). Néanmoins, l'incertitude du changement climatique futur exige une gestion des risques active, ainsi qu'une combinaison de mesures de protection permanentes et temporaires (EEA, 2017a).

3.4.6. Concevoir une stratégie d'adaptation aux risques naturels futurs

La capacité d'adaptation caractérise la capacité d'ajustement d'un territoire à des changements climatiques (qui incluent la variabilité climatique et les phénomènes extrêmes) afin d'atténuer les dommages potentiels, de tirer parti des opportunités ou de faire face aux conséquences. Pour s'adapter aux aléas futurs associés aux risques naturels, il apparaît nécessaire d'appliquer des mesures de réduction du risque associé à l'aléa actuel, accompagnées de mesures visant à s'adapter à l'impact du climat sur l'évolution future de ce risque. Si les aléas existants sont généralement bien identifiés dans les documents de planification, leur évolution future est encore rarement prise en compte. Certains projets[73] étudient les interactions entre processus environnementaux et sociaux dans les territoires pyrénéens dans le contexte

(73) Le programme CESAR - Changement Environnemental et Stratégies d'Adaptation en Région et le programme en cours RiTTA – Risques et transformations territoriales en Aquitaine ont été financés par le Conseil Régional de Nouvelle Aquitaine.

de transformations territoriales et de changement climatique. Les Pyrénées ont subi des transformations territoriales importantes (déclin démographique, recul de l'activité agropastorale, développement touristique). Cela pose la question de la façon dont les sociétés locales vivent ces changements, et du lien qu'elles établissent avec les risques naturels et le changement climatique. Les résultats préliminaires d'une enquête dans les vallées béarnaises d'Aspe et d'Ossau, montrent que les changements environnementaux sont des faits établis pour la majorité des personnes interrogées (élus, habitants), qu'elles traduisent par des indices tels que: raccourcissement de la période d'enneigement, augmentation d'épisodes d'orages ou de sécheresse ou encore présence d'espèces animales et végétales à des altitudes jugées inhabituelles. Cependant, relier changement climatique et risques naturels ne va pas de soi pour les élus interrogés.

En effet, ils font la plupart du temps écho aux incertitudes scientifiques. Ainsi, la question de l'adaptation demeure marginale dans les Plans de Prévention des Risques naturels prévisibles (PPR) montagnards, qui, de plus, sont souvent contestés (notamment sur les limites des zonages et la méthodologie employée) par les communes et les riverains concernés. Ceci étant, les communes de montagne sont souvent peu peuplées et disposent donc de peu de moyens, humains et / ou financiers. Les élus indiquent par ailleurs que la fonction de conseil et d'expertise des services de l'État auprès des communes leur semble diminuer, ce qui limite leur capacité à faire face au changement climatique. Néanmoins, il est intéressant de remarquer qu'en Andorre, les situations extrêmes sont prises en compte dans les documents de planification, tels que zonification officielle des risques d'écoulement de débris, où le pire scénario de changement climatique est pris comme référence (Hürlimann *et al.,* 2006). En France, le Plan National d'Adaptation au Changement Climatique de la France (MEDDTL, 2011), considère que la politique de gestion des risques naturels menée jusque là fournit un cadre approprié à la prise en compte de leur évolution future, à condition d'en renforcer certains aspects et d'anticiper dès à présent les perturbations à venir. Ce plan propose une trentaine de mesures de portée nationale, et, d'après le CGEDD (2015), près de la moitié auraient déjà été mises en œuvre. Cependant, ce plan ne couvre pas les actions territoriales d'adaptation qui relèvent des schémas régionaux du climat, de l'air et de l'énergie (SRCAE) et des plans climat-énergie territoriaux (PCET). En Espagne, le premier plan national d'adaptation au changement climatique, adopté en 2006, ciblait la réalisation de scénarios climatiques régionaux et d'actions de dissémination de connaissance sur 15 thèmes, parmi lesquels la montagne. Le second programme a poursuivi ce travail pendant la période 2009-2012 en renforçant les dispositifs de suivi et les indicateurs. Un troisième programme a été adopté pour la période 2014-2020 afin de mobiliser l'ensemble des instruments financiers de l'Union européenne.

ENCUADRÉ 3.4.4. GUIDE D'ACCOMPAGNEMENT : « CLIMAT : RÉUSSIR LE CHANGEMENT[74] »

Les membres du Groupe de réflexion et d'action pour l'adaptation aux effets du changement climatique (GRAACC), animé par Rhône-Alpes Environnement Énergie ont publié un document présentant les principales étapes de la mise en œuvre d'un projet territorial intégrant l'adaptation pour les régions alpines. Ce guide, publié en 2 volets, adopte la position des élus et des techniciens des collectivités qui souhaitent développer une démarche d'adaptation de leur territoire aux effets du changement climatique.Dans le cadre du 2ème volet, à la suite d'une explication synthétique des impacts attendus du changement climatique sur la région Rhône-Alpes essentiellement tirés de l'étude MEDCIE (2008), les principales opportunités et menaces y sont identifiées pour la région Rhône-Alpes, ainsi que les réflexions mises en œuvre pour s'y adapter. Ensuite, une démarche de construction de ces stratégies est documentée de manière détaillée, allant même jusqu'à proposer des modèles de cahier des charges pour les prestataires qui seraient chargés de caractériser la vulnérabilité du territoire au changement climatique. Enfin, la définition de la stratégie d'adaptation est discutée en rappelant les principes de base et en pointant les éléments essentiels à sa mise en œuvre.

3.4.7 Conclusions et recomendations

Principaux défis

Les éléments de connaissance actuellement disponibles sur l'influence potentielle du changement climatique sur les aléas associés aux principaux risques naturels que l'on peut rencontrer dans les Pyrénées ont

(74) http://orecc.auvergnerhonealpes.fr/fr/publications/outils-et-methodes/guide-climat-reussir-le-changement.html

été présentés dans ce chapitre. Il apparaît ainsi qu'à un horizon temporel difficile à déterminer avec précision (entre 2030 et la fin du siècle), le territoire Pyrénéen pourrait faire face aux évolutions suivantes: Augmentation des températures minimales et maximales, des vagues de chaleur et des épisodes de sécheresse, qui seront potentiellement plus longs et plus intenses ;Augmentation de l'occurrence de pluies intenses et de l'intensité des épisodes de grêle ;Augmentation des aléas associés aux crues et inondations. Le signal est encore incertain et lié à la probable augmentation de la vulnérabilité des populations et des infrastructures, notamment dans les zones touristiques côtières et en bordure des cours d'eau ;Fragilisation mal connue de la stabilité des versants qui pourrait résulter de l'évolution future et combinée des précipitations, des températures, et de la fonte ou dégradation du permafrost.Ces évolutions futures restent affectées d'une incertitude importante, notamment du fait du rôle parfois prépondérant de l'évolution future des politiques d'urbanisation et de tourisme, d'occupation et d'usage des sols, de localisation et d'exposition des infrastructures. Face à l'évolution potentielle future de ces aléas, les stratégies en place dans les Pyrénées intègrent rarement la notion d'adaptation. Ceci pourrait s'expliquer, d'une part, par un manque de connaissances sur les phénomènes considérés et, d'autre part, par le fait que les mesures visant à s'adapter à un contexte climatique futur sont généralement intégrées à d'autres mesures mises en place avec d'autres finalités (protection des populations, sécurisation de la production alimentaire, maintien ou renforcement de l'activité économique et industrielle en zone de montagne,…)

Recomendations

Il est recommandé de concevoir une démarche d'adaptation à l'échelle de gestion des enjeux concernés par le type de risque naturel considéré (OPCC, 2013). À ces échelles locales, la démarche doit évidemment être adossée à la caractérisation de la vulnérabilité actuelle du territoire (importance et localisation des populations et des infrastructures exposées) au risque naturel considéré et son évolution future (Fuchs *et al.,* 2017). Le projet ClimateAdapt fournit un catalogue d'exemples[75] de mesures d'adaptation dont certaines concernent les événements extrêmes et les crues / inondations, même si aucune ne s'applique au contexte de montagne.

La Commission européenne recommande que les mesures qui sont prises soient soumises à un test « climate check » qui permette de garantir une capacité d'adaptation suffisante des mesures aux futures conditions climatiques. Elle promeut aussi le concept de « prise de décision robuste » (robust decision making, (Lempert et al., 2003)) qui considère qu'une décision est robuste si elle a de bonnes performances quel que soit le futur possible et les incertitudes. Les mesures robustes peuvent être: 1) les mesures « sans regret » (qui apportent des bénéfices dans tous les cas (et souvent à court terme), 2) les mesures à marges de sécurité (qui peuvent être démantelées ou étendues sans perte de l'investissement initial, comme par exemple la construction d'une digue avec une technique facilement démontable), 3) les mesures réversibles et flexibles (telles que la mise en œuvre de systèmes d'alerte qui peuvent être adaptés en fonction des retours d'expérience sur les conséquences des événements observés, 4) les mesures douces (décrites ci-dessous), et 5) des mesures permettant de réduire l'horizon temporel (privilégier les infrastructures à durées de vie courtes). D'une façon générale, un plan d'adaptation considérant une mesure unique serait moins robuste qu'un plan intégrant une diversité de mesures. Cependant, cette diversification peut aussi se traduire par l'augmentation du coût des mesures, et donc du coût total de mise en œuvre du plan.

Mesures *soft* [76]

Des mesures non structurelles (« soft ») qui exploitent des pratiques et des politiques d'information, de diffusion et d'éducation, en évitant les constructions physiques. Au titre de ces mesures, le PNACC (MEDDTL, 2011) préconise d'améliorer la connaissance de l'impact du changement climatique sur les risques naturels et, en particulier, de répertorier les mesures de prévention d'inondations existantes et de développer les cartographies des risques naturels et les outils d'aide à la décision, en intégrant les projections climatiques. Il est également préconisé de remplacer les valeurs de référence climatiques des normes actuelles ou les périodes de retour des événements, actuellement basées sur des statistiques trentenaires, par des valeurs simulées en contexte de climat futur, à l'aide d'outils de modélisation (CGET, 2015). Les systèmes de surveillance des différents risques naturels doivent être

(75) http://climate-adapt.eea.europa.eu/knowledge/tools/sat

(76) Les mesures douces ou mesures non structurelles pour réduire les effets négatifs du changement climatique. Cette catégorie de mesures est typiquement représentée par les études de recherche visant à couvrir des lacunes de connaissance ou à enrichir les bases de connaissance sur le changement climatique, ses effets et les secteurs les plus vulnérables. Cette catégorie comprend aussi le développement de méthodologies et de systèmes spécifiques pour réduire les risques inhérents au changement climatique (ex. Développement d'un Early Warning System transfrontalier pour la gestion des vagues de chaleur dans le Massif).

maintenus, étendus ou optimisés, pour mieux surveiller les secteurs de haute altitude ou difficiles d'accès, plus à même d'expliquer certains phénomènes naturels (inondations, mouvements de terrain) et qui seront plus fortement affectés par l'élévation de la température (environnements péri-nivo-glaciaires). Ils doivent aussi permettre d'acquérir des données à plus grande résolution temporelle et précision (suivi en continu et en temps-réel) et des données sur les compartiments physiques dans lesquels les processus ont lieu (exemple: la température et l'humidité dans les sols). De même, les systèmes d'alerte précoce (early-warning systems) qui se basent souvent sur des valeurs seuil obtenues par modélisation, doivent aussi intégrer les projections climatiques. Les opérateurs de ces systèmes de vigilance et d'alerte doivent systématiser le retour d'expérience pour améliorer les procédures suite aux événements survenus. Les territoires devront pouvoir avoir recours à des services climatiques leur fournissant des informations à la fois synthétiques et détaillées sur leur situation future (CGET, 2015). Enfin, la distribution future de la population et des infrastructures sur un territoire doit elle aussi être orientée de manière à limiter leur exposition aux risques naturels. Concernant les activités de loisir en montagne, il serait nécessaire d'afficher des cartes des risques actuels et futurs (précipitations extrêmes, crues et inondations, glissements de terrain et chutes de blocs, avalanches et phénomènes liés à la dégradation de la cryosphère), sur les lieux touristiques pour une meilleure prévention des populations qui les pratiquent. Il serait aussi utile de constituer, localement, des inventaires des structures essentielles d'utilité publique présentant une vulnérabilité. Ceci suppose de développer la culture du risque et de la déployer à tous les niveaux de gestion: collectivités, quartiers et zones d'activités industrielles et commerciales, entreprises et bassins d'emploi, milieu scolaire (ONERC, 2007). Cette culture du risque doit intégrer les incertitudes sur les évolutions futures, pour s'y préparer, si possible, en appliquant les approches de décision robuste.

Mesures vertes[77]

Les mesures vertes (solutions-basées sur la-nature, SBNs) sont définies comme des solutions qui « sont inspirées et soutenues par la nature, sont rentables, fournissent simultanément des avantages environnementaux, sociaux et économiques et aident à renforcer la résilience » (UE, 2015). A l'heure actuelle, ces mesures sont encore peu nombreuses pour les risques naturels et encore moins pour les environnements de montagne. Le projet européen PHUSICOS, qui a débuté en 2018, mettra à profit la base de connaissances multidisciplinaire de son partenariat pour collecter, développer et maintenir les SBN dans le but de réduire les risques hydrométéorologiques dans les régions rurales continentales / de montagne. Ce projet devrait donc contribuer à proposer des mesures vertes adaptées au contexte Pyrénéen dans la mesure où quelques uns de ces cas d'étude se trouveront dans les Pyrénées françaises et espagnoles. Quelques mesures déjà mises en œuvre dans des contextes variés peuvent cependant être étudiées. Les forêts peuvent stabiliser les formations superficielles susceptibles de générer des inondations et des mouvements de terrain torrentiels (par exemple: réduction des phénomènes torrentiels et des coulées de débris par reboisement dans les Apennins centraux d'Italie (Gariano et Guzzetti (2016)).

En matière de lutte contre les inondations, le PNUE (2014) recommande d'augmenter la capacité de stockage des eaux (bassins hydrographiques et zones urbaines) et de renforcer la débitance des canaux (et réduire la vitesse des inondations), le boisement / reboisement et la conservation des forêts, les tampons riverains, et la construction de voies de contournement des inondations. L'AEE (2017a) recommande de permettre les débordements le long de certaines parties d'une rivière, dans le but de réduire la hauteur totale des inondations, ou d'éloigner les digues du voisinage du chenal. Pour le contrôle des eaux pluviales urbaines, le PNUE recommande également: les toits végétalisés, les espaces verts (permettant la biorétention et l'infiltration), la collecte de l'eau et les chaussées perméables (ces deux derniers consistent en éléments construits ou « gris » qui interagissent avec les caractéristiques naturelles et visent à améliorer leurs services liés à l'écosystème de l'eau). Le portail internet de la Direction générale Environnement de l'UE[78] présente les bénéfices de quelques unes de ces mesures.

(77) Les mesures vertes ou basées sur les services écosystémiques : ce type de mesures comprend toutes les mesures, bonnes pratiques, études ou initiatives ayant pour principe l'utilisation des services écosystémiques rendus par les différentes ressources naturelles pour pallier les effets négatifs du changement climatique (par ex. pratiques sylvicoles conservatrices pour accroître la capacité des forêts des Pyrénées à réduire les risques hydrogéologiques).

(78) http://nwrm.eu/measures-catalogue

Medidas grises[79]

Les solutions d'infrastructure grises pour protéger contre les risques naturels sont attrayantes car elles peuvent offrir des impacts immédiats et très visibles. Cependant, elles présentent également des inconvénients importants, car elles demandent beaucoup de capital pour les construire, pour les exploiter, pour les entretenir, et pour les remplacer; elles peuvent dévier le risque amplifié vers d'autres endroits non préparés, ou peuvent conduire à la dégradation des écosystèmes (par exemple, en déconnectant les rivières des plaines d'inondation) (PNUE, 2014). Les mesures structurelles impliquent la construction de défenses physiques (murs, déflecteurs, drainages, bassins de rétention), qui sont conçues en tenant compte du type et de l'ampleur du danger attendu et d'une période de référence pour l'événement dangereux prévu. Les infrastructures défensives existantes, qu'elles soient simples (un mur de contention, un barrage de retenue, un drainage) ou multiples (un système de barrières / digues de rétention, un ensemble de drainages dans une pente, un ensemble de barrages de retenue dans un bassin versant) peuvent demander des modifications pour s'adapter aux futures conditions climatiques projetées (Gariano et Guzzetti (2016)). Il conviendra par exemple de surélever des digues, d'élargir les surfaces d'expansion de crues, ou de créer des bassins de rétention plus grands, ou encore d'adapter les canalisations des grandes communes aux plus fortes précipitations.

Des mesures intermédiaires, comme le nettoyage des caniveaux et des fossés, peuvent aussi être entreprises. Le plus souvent, la période de retour, ou la fréquence attendue de l'événement, est déterminée en supposant une série temporelle stationnaire d'événements (comme un registre de glissements de terrain ou de crues) ou de déclencheurs (comme un registre des précipitations ou de fonte des neiges). Dans le cadre d'un climat en transformation, l'hypothèse stationnaire peut ne pas être valide; par exemple, Gariano et Guzzetti (2016) recommandent d'adopter une approche de résolution de problèmes pragmatique, s'appuyant sur l'expérience (archives historiques), les informations existantes et nouvelles (monitoring) et les moyens modernes de modélisation et de calcul incluant l'incertitude inhérente aux scénarios climatiques futurs. Enfin des mesures d'incitation économique peuvent aussi être mises en œuvre pour limiter l'implantation d'infrastructures et de populations dans les zones à risque – par exemple, en reliant les primes d'assurance à l'exposition au risque. Un rapport de 2017 de l'AEE (EEAb, 2017) fournit divers exemples de financement d'actions d'adaptation fondées sur la nature / l'écosystème et d'autres actions d'adaptation, y compris des financements conventionnels et novateurs tels que le financement participatif et les obligations vertes.

IDÉES CLÉS

Les éléments de connaissance actuellement disponibles sur l'influence potentielle du changement climatique sur les aléas associés aux principaux risques naturels que l'on peut rencontrer dans les Pyrénées ont été présentés dans ce chapitre. Il apparaît ainsi qu'à un horizon temporel difficile à déterminer avec précision (entre 2030 et la fin du siècle), le territoire Pyrénéen pourrait faire face aux évolutions suivantes :

- Augmentation des températures minimales et maximales, des vagues de chaleur et des épisodes de sécheresse, qui seront potentiellement plus longs et plus intenses ;
- Augmentation de l'occurrence de pluies intenses et de l'intensité des épisodes de grêle ;
- Augmentation des aléas associés aux crues et inondations. Le signal est encore incertain et lié à la probable augmentation de la vulnérabilité des populations et des infrastructures, notamment dans les zones touristiques côtières et en bordure des cours d'eau ;
- Fragilisation mal connue de la stabilité des versants qui pourrait résulter de l'évolution future et combinée des précipitations, des températures, et de la fonte ou dégradation du permafrost ;

Ces évolutions futures restent affectées d'une incertitude importante, notamment du fait du rôle parfois prépondérant de l'évolution future des politiques d'urbanisation et de tourisme, d'occupation et d'usage des sols, de localisation et d'exposition des infrastructures. Face à l'évolution potentielle future de ces aléas, les stratégies en place dans les Pyrénées intègrent rarement la notion d'adaptation. Ceci pourrait s'expliquer, d'une part, par un manque de connaissances sur les phénomènes considérés et, d'autre part, par le fait que les mesures visant à s'adapter à un contexte climatique futur sont généralement intégrées à d'autres mesures mises en place avec d'autres finalités (protection des populations, sécurisation de la production alimentaire, maintien ou renforcement de l'activité économique et industrielle en zone de montagne,…) (OPCC, 2013).

(79) Les mesures Grises ou infrastructurelles, sont toutes celles qui basent leur action palliative sur la construction ou la mise en place d'éléments infrastructurels concrets (par ex. construction de digues dans les zones habitées à haut risque d'inondations torrentielles).

Bibliographie

1 Le climat et la variabilité climatique dans les Pyrénées

1.1 Le climat de la période glaciaire et la déglaciation

- Bartolomé, M., Moreno, A., Sancho, C., Stoll, H.M., Cacho, I., Sp€otl, C., Belmonte, A., Edwards, R.L., Cheng, H., Hellstrom, J.C., 2015. Hydrological change in Southern Europe responding to increasing North Atlantic overturning during Greenland Stadial 1. PNAS. http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1503990112.
- Cisneros, M., Cacho, I., Frigola, J., Canals, M., Masqué, P., Martrat, B., Casado, M., Grimalt, J.O., Pena, L.D., Margaritelli, G., Lirer, F., 2016. Sea surface temperature variability in the central-western Mediterranean Sea during the last 2700 years: a multi-proxy and multi-record approach. Clim. Past 12, 849–869.
- CLIVAR Report: Pérez, Fiz F.; Boscolo, Roberta (eds.). 2010. Climate in Spain: past, present and future. Regional climate change assessment report. [Madrid] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Ministerio de Ciencia e Innovacion (MICINN), 83 pp.
- Corella, J.P., Valero-Garcés, B.L., Vicente- Serrano, S.M., Brauer, A., Benito, G., 2016. Three millennia of heavy rainfalls in Western Mediterranean: frequency, seasonality and atmospheric drivers. Scientific Reports 6. 38206; doi: 10.1038/srep38206
- Delmas, M., Calvet, M., Gunnell, Y., Braucher, R., Bourlès, D. 2011. Palaeogeography and 10Be exposure age chronology of Middle and Late Pleistocene glacier systems in the northern Pyrenees: implications for reconstructing regional palaeoclimates. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 305, 109-122. Doi: 10.1016/j.palaeo.2011.02.025.
- García-Ruiz, J.M., Martí-Bono, C., Peña-Monné, J.L., Sancho, C., Rhodes, E.J., Valero-Garcés, B., González-Samperiz, P., Moreno, A. 2013. Glacial and fluvial deposits in the Aragón Valley, Central-Western Pyrenees: Chronology of the Pyrenean late Pleistocene glaciers- Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography 95, 15-32. Doi: 10.1111/j.1468-0459.2012.00478.x.
- Giralt, S., Moreno, A., Cacho, I., Valero-Garcés, B.L. 2017. A comprehensive overview of the last 2,000 years Iberian Peninsula climate history, CLIVAR Exchanges No. 73, 5-10.
- González-Sampériz, P., Valero-Garcés, B.L., Moreno, A., Jalut, G., García-Ruiz, J.M., Martí-Bono, C., Delgado-Huertas, A., Navas, A., Otto, T., Dedoubat, J.J. 2006. Climate variability in the Spaincish Pyrenees during the last 30,000 yr revealed by the El Portalet sequence. Quaternary Research 66, 38-52. Doi : 10.1016/j.qres.2006.02.004.
- González-Sampériz, P.; Aranbarri, J.; Pérez-Sanz, A.; Gil-Romera, G.; Moreno, A.; Leunda, M.; Sevilla-Callejo, M.; Corella, J.P.; Morellón, M.; Oliva, B.; Valero-Garcés, B. 2017. Environmental and climate change in the southern Central Pyrenees since the Last Glacial Maximum: A view from the lake records. 2017. Catena 149, 668 – 688.
- Leunda, M. González-Sampériz , P., Gil-Romera, G. Aranbarri J., Moreno, A., Oliva-Urcia, B., Sevilla-Callejo M., y Valero-Garcés, B. 2017. The Late-Glacial and Holocene Marboré Lake sequence (2612 m a.s.l., Central Pyrenees, Spain): Testing high altitude sites sensitivity to millennial scale vegetation and climate variability Global and Planetary Change 157: 214-231
- Lewis, C.J., McDonald, E.V., Sancho, C., Peña, J.L., Rhodes, E.J. 2009. Climatic implications of correlated Upper Pleistocene glacial and fluvial deposits on the Cinca and Gállego Rivers (NE Spain) based on OSL dating and soil stratigraphy. Global and Planetary Change 61, 300-312. Doi: 10.1016/j.gloplacha.2009.01.001.
- López Moreno, J.I. (2000). Los glaciares del alto valle del Gállego (Pirineo Central) desde la Pequeña Edad del Hielo. Implicaciones en la evolución de la temperatura. Geoforma Ediciones, Logroño, 77 pp.
- Millet L., D. Rius,, D. Galop, O. Heiri, S.J. Brooks 2012. Chironomid-based reconstruction of Lateglacial summer temperatures from the Ech palaeolake record (French western Pyrenees). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 315–316: 86–99
- Morellón, M., Pérez-Sanz, A., Corella, J.P., Büntgen, U., Catalán, J., González-Sampériz, P., González-Trueba, J.J., López-Sáez, J.A., Moreno, A., Pla-Rabes, S., Saz-Sánchez, M.Á., Scussolini, P., Serrano, E., Steinhilber, F., Stefanova, V., Vegas-Vilarrúbia, T., Valero-Garcés, B., 2012. A multi-proxy perspective on millennium-long climate variability in the Southern Pyrenees. Clim. Past 8, 683–700.
- Moreno, A., Pérez, A., Frigola, J., Nieto-Moreno, V., Rodrigo-Gámiz, M., Martrat, B., González-Sampériz, P., Morellón, M., Martín-Puertas, C., Corella, J.P., Belmonte, Á., Sancho, C., Cacho, I., Herrera, G., Canals, M., Grimalt, J.O., Jiménez-Espejo, F., Martínez-Ruiz, F., Vegas-Vilarrúbia, T., Valero-Garcés, B.L., 2012. The Medieval Climate Anomaly in the Iberian Peninsula reconstructed from marine and lake records. Quaternary Science Reviews 43, 16–32.
- Oliva, M., J. Ruiz-Fernández, M. Barriendos, G. Benito, J.M. Cuadrat, F. Domínguez-Castro, J.M. García-Ruiz, S. Giralt, A. Gómez-Ortiz, A. Hernández, O. López-Costas, J.I. López-Moreno, J.A. López-Sáez, A. Martínez-Cortizas, A. Moreno, M. Prohom, M.A. Saz,E. Serrano, E. Tejedor, R. Trigo, B. Valero-Garcés, S.M. Vicente-Serrano. 2018. The Little Ice Age in Iberian mountains. Earth-Science Reviews 177 (2018) 175–208.
- Palacios, D., García-Ruiz, J.M., Andrés, N., Schimmelpfennig, I., Campos, N., Leanni, L., ASTER Team 2017. Deglaciation in

the central Pyrenees during the Pleistoceme-Holocene transition: Timing and geomorphological significance. Quaternary Science Reviews 162, 111-127. Doi: 10.1016/j.quascirev.2017.03.007.
- Pallàs, R., Rodés, A., Braucher, R., Bourlès, D., Delmas, M., Calvet, M., Gunnell, Y. 2010. Small, isolated glacial catchments as priority targets for cosmogenic surface exposure dating of Pleistocene climate fluctuations, southeastern Pyrenees. Geology 38, 891-894. Doi: 20.1130/G31164.1.
- Pla, S., Catalan, J., 2011. Deciphering chrysophyte responses to climate seasonality. J Paleolimnol 46, 139-150
- Rius, D., Vannière, B. and Galop, D. 2012. Holocene history of fire, vegetation and land use from the central Pyrenees (France). Quaternary Research 77: 54-64.

1.2 Le climat actuel

1.3 Projections de changement climatique dans les Pyrénées

- Balseinte, R. 1966. Climats montagnards et stations climatiques d´altitud en France. Ministère de l´Éducation Nationale et CNRS. Paris
- Bartolomé, M., Moreno, A., Sancho, C., Stoll, H.M., Cacho, I., Spötl,C., Belmonte, A., Edwards, R.L., Cheng, H., Hellstrom, J.C., 2015. Hydrological change in Southern Europe responding to increasing North Atlantic overturning during Greenland Stadial 1. PNAS. http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1503990112.
- Böhm, R., Auer, I., Schöner, W., Ganekind, M., Gruber, C., Jurkovic, C., Orlik, A. and Ungersböck, M. 2009. Eine neue Webseite mit instrumentellen Qualitäts Klimadaten für den Grossraum Alpen zurück bis 1760. Wiener Mitteilungen Band 216: Hochwässer: Bmessung, Risikoanalyse und Vorhersage.
- Bordonau, J.; Serrat, D. y Vilaplana, J.M. (1992): Las fases glaciares cuaternarias en los Pirineos. In: Cearreta, A. y Ugarte, F.M. (eds.): The Late Quaternay in the Western Pyrenean Region. Servicio Editorial Universidad del País Vasco, Bilbao, pp. 303-312.
- Brunet, M., Casado M. J., Castro, M., Galán, M. P., López, J. A., Martín, J. M., Torres, L. 2008. Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España. Ministerio de Medio Ambiente Medio Rural y Marino. 158 pp.
- Brunet, M., Jones, P., Sigró, J., Saladié, O., Aguilar, E., Moberg, A., Della- Marta, P.M., Lister, D., Whalter, A. ans López, D. 2007. Temporal and spatial temperature variability and change over Spain during 1850-2005. Journal of Geophysical Research, 112: D12117.
- Bücher, A. and Dessens J. 1991. Secular trend of surface temperature at an elevated observatory in the Pyrenees. J. Clim. 4: 859–868.
- Buisan, S.; Saz, M.A.; López-Moreno, J.I., 2015. Spatial and temporal variability of winter snow and precipitation days in the western and central Spanish Pyrenees. International Journal of Climatology 35: 259-274.
- Cisneros, M., Cacho, I., Frigola, J., Canals, M., Masqué, P., Martrat, B., Casado, M., Grimalt, J.O., Pena, L.D., Margaritelli, G., Lirer, F., 2016. Sea surface temperature variability in the central-western Mediterranean Sea during the last 2700 years: a multi-proxy and multi-record approach. Clim. Past 12, 849–869. doi:10.5194/cp-12-849-2016
- CLIVAR Report: Pérez, Fiz F.; Boscolo, Roberta (eds.). 2010. Climate in Spain: past, present and future. Regional climate change assessment report. [Madrid] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Ministerio de Ciencia e Innovacion (MICINN), 83 pp.
- Copons, R., Bordonau, J. 1997: El registro glaciar correspondiente a la Pequeña Edad del Hielo en la Península Ibérica. En: Ibañez, J.J., Valero Garcés, B.L. i Machado, C. (Eds.): El paisaje mediterráneo a través del espacio y del tiempo. Implicaciones en la desertificación. Geoforma ediciones, Logroño, p. 295-310.
- Corella, J.P., Valero-Garcés, B.L., Vicente- Serrano, S.M., Brauer, A., Benito, G., 2016. Three millennia of heavy rainfalls in Western Mediterranean: frequency, seasonality and atmospheric drivers. Scientific Reports 6. doi:10.1038/srep38206
- Creus, J. 1983. El clima del alto Aragón occidental. Instituto de Estudios Pirenaicos, 109. 421 pp.
- Cuadrat, J.M., Serrano, R., Saz, M.A., Tejedor, E., Prohom, M., Cunillera, J., Esteban, P., Soubeyroux, J.M., Deaux, N. 2013. Creación de una base de datos homogeneizada de temperaturas para los Pirineos (1950-2010). Geographicalia, 64: 63-74.
- Deaux, A.; Soubeyroux, J.M.; Cuadrat, JM.; Cunillera, J.; Prohom, M. 2014. Homogénéisation transfrontalière des températures sur le massif des Pyrénées. Rev. Climatologie, vol 24 pp: 67-78.
- Delmas, M., Calvet, M., Gunnell, Y., Braucher, R., Bourlès, D. 2011. Palaeogeography and 10Be exposure age chronology of Middle and Late Pleistocene glacier systems in the northern Pyrenees: implications for reconstructing regional palaeoclimates. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 305, 109-122. Doi: 10.1016/j.palaeo.2011.02.025.
- Durand, Y., Giraud, G., Goetz, D., Malou, M. and Payen, V. 2012. Modeled snow cover in Pyrenees mountains and cross-comparisons between remote-sensed and land-based observation data. Proceedings, 2012 International Snow Science Workshop, Anchorage.
- El-Kenawy, A., López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., 2011. Recent changes in daily temperature extremes in Northeastern Spain: 1960-2006. Natural Hazards and Earth System Sciences 11: 1-21.

- Espejo, F., Ferraz, J. y Palomo, M. 2008. Tendencias recientes en las series de temperatura del Pirineo Central y Occidental. IV Congreso International de la AEC, serie A (6): 99-108.
- Esteban, P., Jones P.D., Martin-Vide, J. and Mases, M. 2005. Atmospheric circulation patterns related to heavy snowfall days in Andorra. Pyrenees. Int J Climatol 25:319–329.
- Esteban, P., Prohom, M. y Aguilar, E. 2012. Tendencias recientes e índices de cambio climático de la temperatura y la precipitación en Andorra. Pirineos (1935–2008). Pirineos 167: 87–106.
- García-Ruiz J.M., López-Moreno, J.I. Serrano-Vicente S., Beguería, S. and Lasanta, T., 2011. Mediterranean water resources in a global change scenario. Earth Science Reviews 105 (3-4): 121-139.
- García-Ruiz, J.M., Martí-Bono, C., Peña-Monné, J.L., Sancho, C., Rhodes, E.J., Valero-Garcés, B., González-Samperiz, P., Moreno, A. 2013. Glacial and fluvial deposits in the Aragón Valley, Central-Western Pyrenees: Chronology of the Pyrenean late Pleistocene glaciers- Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography 95, 15-32. Doi: 10.1111/j.1468-0459.2012.00478.x.
- García-Ruiz, J.M.; Palacios, D.; González-Sampériz, P.; de Andrés, N.; Moreno, A.; Valero-Garcés, B.; Gómez-Villar, A. 2016. Mountain glacier evolution in the Iberian Peninsula during the Younger Dryas. Quarternary Science Reviews; vol: 138: 16 – 30
- Gascoin, S., Hagolle, O., Huc, M., Jarla, L., Dejoux, J.F., Szczypta, C., Marti, R. and Sánchez, R. 2015. A snow cover climatology for the Pyrenees from MODIS snow products. Hydrol. Earth Syst. Sci., 19: 2337–2351.
- Gilaberte, M., López-Martín, F., Pino-Otín, M. R., and López-Moreno, J. I. 2014. Impacts of climate change on ski industry. Environmental Science and Policy, 44: 51-61.
- Giralt, S., Moreno, A., Cacho, I., Valero-Garcés, B.L. 2017. A comprehensive overview of the last 2,000 years Iberian Peninsula climate history, CLIVAR Exchanges No. 73, 5-10.
- González-Sampériz, P., Valero-Garcés, B.L., Moreno, A., Jalut, G., García-Ruiz, J.M., Martí-Bono, C., Delgado-Huertas, A., Navas, A., Otto, T., Dedoubat, J.J. 2006. Climate variability in the Spanish Pyrenees during the last 30,000 yr revealed by the El Portalet sequence. Quaternary Research 66, 38-52. Doi : 10.1016/j.qres.2006.02.004.
- González-Sampériz, P.; Aranbarri, J.; Pérez-Sanz, A.; Gil-Romera, G.; Moreno, A.; Leunda, M.; Sevilla-Callejo, M.; Corella, J.P.; Morellón, M.; Oliva, B.; Valero-Garcés, B. 2017. Environmental and climate change in the southern Central Pyrenees since the Last Glacial Maximum: A view from the lake records. 2017. Catena 149, 668 – 688.
- Gottardi F. 2009. Estimation statistique et réanalyse des précipitations en montagne. Utilisation d'ébauches par types de temps et assimilation de données d'enneigement. Application aux grands massifs montagneux français. Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, 261 p.
- Gutiérrez, J.M., Maraun, D., Widman, M., Huth, R., Hertig, E., Benestad, Pagé, C. 2017. An intercomparison of a large ensemble of statistical downscaling methods over Europe: Results from the VALUE perfect predictor cross-validation experiment. Int. J. Climatol. (en prensa).
- IPCC: Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Leunda, M. González-Sampériz , P., Gil-Romera, G. Aranbarri J., Moreno, A., Oliva-Urcia, B., Sevilla-Callejo M., y Valero-Garcés, B. 2017. The Late-Glacial and Holocene Marboré Lake sequence (2612 m a.s.l., Central Pyrenees, Spain): Testing high altitude sites sensitivity to millennial scale vegetation and climate variability. Global and Planetary Change 157: 214-231
- Lewis, C.J., McDonald, E.V., Sancho, C., Peña, J.L., Rhodes, E.J. 2009. Climatic implications of correlated Upper Pleistocene glacial and fluvial deposits on the Cinca and Gállego Rivers (NE Spain) based on OSL dating and soil stratigraphy. Global and Planetary Change 61, 300-312. Doi: 10.1016/j.gloplacha.2009.01.001.
- López Moreno, J.I. 2000. Los glaciares del alto valle del Gállego (Pirineo Central) desde la Pequeña Edad del Hielo. Implicaciones en la evolución de la temperatura. Geoforma Ediciones, Logroño, 77 pp.
- López Moreno, J.I., Goyette, S. and Beniston, M. 2008. Climate change predictionover complex areas: spatial variability of uncertainties andprediction over the Pyrenees from a set of regional climate models. Int. J. Climatol. 28 (11): 1535–1550.
- López Moreno, J.I., Goyette, S., Vicente Serrano, S. and Beniston, M. 2011. Effects of climate change on the intensity and frequency of heavy snowfall events in the Pyrenees. Climatic Change, 105 (3-4): 489-508.
- López-Moreno, J.I. 2005. Recent variations of snowpack depth in the Central Spanish Pyrenees. Artic, Antartic, and Alpine Research, 37 (2): 253-260.
- López-Moreno, J.I. and Serrano-Vicente, S.M. 2006. Atmospheric circulation influence on the interannual variability of snowpack in the Spanish Pyrenees during the second half of the twentieth century. Nordic Hydrology 38 (1):38-44.
- López-Moreno, J.I. and Vicente-Serrano, S.M. 2007. Atmospheric circulation influence on the interannual variability of snowpack in the Spanish Pyrenees during the second half of the twentieth century. Nord. Hydrol. 38 (1): 38–44.
- López-Moreno, J.I., Goyete, S., Beniston, M. 2009. Impact of climate change on snowpack in the Pyrenees: Horizontal spatial variability and vertical gradients. Journal of Hydrology 374 (3-4), 384-396.

- López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano S.M., Morán-Tejeda E., Lorenzo J., Kenawy, A. and Beniston, M. 2011. NAO effects on combined temperature and precipitation winter modes in the Mediterranean mountains: Observed relationships and projections for the 21st century. Global and Planetary Change 77: 72-66.
- Maris, M., Giraud, G., Durand, Y., Navarre, J. P. and Mérindol, L., 2009. Results of 50 years of climate reanalyses in the French Pyrenees (1958-2008) using the SAFRAN and CROCUS models. Davos: International Snow Science Workshop, Proceedings.
- Mestre, O., Domonkos, P., Picard, F., Auer, I., Robin, S., Lebarbier, E., Böhm, R., Aguilar, E., Guijarro, J., Vertachnik, G., Klancar, M., Gubuisson, B. and Stepanek, P. 2013. HOMER: a homogenization software – methods and applications. Quart. Jour. of the Hungarian Meteorological Service 117: 47-67.
- Millet L., D. Rius, D. Galop, O. Heiri, S.J. Brooks 2012. Chironomid-based reconstruction of Lateglacial summer temperatures from the Ech palaeolake record (French western Pyrenees). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 315–316: 86–99
- Miquel C., 2012. Étude préliminaire sur les changements climatiques dans le massif des Pyrénées. Caractérisation et effets prévisibles sur la ressource en eau. Mémoire présenté pour l'obtention du titre d'Ingénieur, Polytech' Montpellier. Université de Montpellier II, 152 p.
- Morellón, M., Pérez-Sanz, A., Corella, J.P., Büntgen, U., Catalán, J., González-Sampériz, P., González-Trueba, J.J., López-Sáez, J.A., Moreno, A., Pla-Rabes, S., Saz-Sánchez, M.Á., Scussolini, P., Serrano, E., Steinhilber, F., Stefanova, V., Vegas-Vilarrúbia, T., Valero-Garcés, B., 2012. A multi-proxy perspective on millennium-long climate variability in the Southern Pyrenees. Clim. Past 8, 683–700. doi:10.5194/cp-8-683-2012
- Moreno, A., Pérez, A., Frigola, J., Nieto-Moreno, V., Rodrigo-Gámiz, M., Martrat, B., González-Sampériz, P., Morellón, M., Martín-Puertas, C., Corella, J.P., Belmonte, Á., Sancho, C., Cacho, I., Herrera, G., Canals, M., Grimalt, J.O., Jiménez-Espejo, F., Martínez-Ruiz, F., Vegas-Vilarrúbia, T., Valero-Garcés, B.L., 2012. The Medieval Climate Anomaly in the Iberian Peninsula reconstructed from marine and lake records. Quaternary Science Reviews 43, 16–32.
- Oliva, M., J. Ruiz-Fernández, M. Barriendos, G. Benito, J.M. Cuadrat, F. Domínguez-Castro, J.M. García-Ruiz, S. Giralt, A. Gómez-Ortiz, A. Hernández, O. López-Costas, J.I. López-Moreno, J.A. López-Sáez, A. Martínez-Cortizas, A. Moreno, M. Prohom, M.A. Saz,E. Serrano, E. Tejedor, R. Trigo, B. Valero-Garcés, S.M. Vicente-Serrano. 2018. The Little Ice Age in Iberian mountains. Earth-Science Reviews 177 (2018) 175–208.
- Palacios, D., García-Ruiz, J.M., Andrés, N., Schimmelpfennig, I., Campos, N., Leanni, L., ASTER Team 2017. Deglaciation in the central Pyrenees during the Pleistoceme-Holocene transition: Timing and geomorphological significance. Quaternary Science Reviews 162, 111-127. Doi: 10.1016/j.quascirev.2017.03.007.
- Pallàs, R., Rodés, A., Braucher, R., Bourlès, D., Delmas, M., Calvet, M., Gunnell, Y. 2010. Small, isolated glacial catchments as priority targets for cosmogenic surface exposure dating of Pleistocene climate fluctuations, southeastern Pyrenees. Geology 38, 891-894. Doi: 20.1130/G31164.1.
- Peral, C., Navascués, B. y Ramos, P. 2017. Serie de precipitación diaria en rejilla con fines climáticos. Nota técnica de AEMET, nº 24. http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/NT_24_AEMET/NT_24_AEMET.pdf.
- Pérez-Zanón, N., Sigró, J. and Ashcroft, L. 2017. Temperature and precipitation regional climate series over the central Pyrenees during 1910–2013. Int J Climatol 37:1922-1937.
- Pla, S., Catalan, J., 2011. Deciphering chrysophyte responses to climate seasonality. J Paleolimnol 46, 139. doi:10.1007/s10933-011-9529-6
- Pons, M. López-Moreno, J.I., Rosas-Casals, M. and Comas, J. 2015. The vulnerability of Pyrenean ski resorts to climate-induced changes in the snowpack. Climatic change, 131 (4): 591-605.
- Pons, M., Johnson, A., Rosas-Casals, M., Sureda, B. and Jover, E. 2012. Modeling climate change effects on winter ski tourism in Andorra. Clim. Res. 54(3): 197–207.
- Renssen H, Seppä H, Crosta X, et al. (2012) Global characterization of the Holocene Thermal Maximum. Quat Sci Rev 48:7–19. doi: 10.1016/j.quascirev.2012.05.022.
- Rius, D., Vannière, B. and Galop, D. 2012. Holocene history of fire, vegetation and land use from the central Pyrenees (France). Quaternary Research 77: 54-64.
- Soubeyroux J.-M., Jourdain S., Grimal D., Espejo F., Esteban P., Merz T., 2011. Approche transfrontalière pour l'inventaire et la valorisation des données climatologiques sur le Massif des Pyrénées. Colloque SHF « Eaux en montagne », Lyon, 7 p.
- Soubeyroux, J.M., Jourdain S., Grimal, D., Espejo, F., Esteban, P. et Merz T. 2011. Approche transfrontalière pour l'inventaire et la valorisation des données climatologiques sur le Massif des Pyrénées. Colloque SHF « Eaux en montagne », Lyon, 7 p.
- Spagnoli, B., Planton, S., Mestre, O., Déqué, M. and Moisselin, J. M., 2002. Detecting climate change at a regional scale: the case of France. Geophys. Res. Lett., 29-10: 91-94.
- Verfaillie et al., 2017. The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models, GMD, 10, 4257-4283. doi : 10.5194/gmd-10-4257-2017.
- Verfaillie, D., Lafaysse, M., Déqué, M., Eckert, N., Lejeune, Y. y Morin, S., 2018. Multi-components ensembles of future

meteorological and natural snow conditions in the Northern French Alps, The Cryosphere, https://doi.org/10.5194/tc-2017-267
- Vicente-Serrano, S.M. y López-Moreno, J. 2008. The nonstationary influence of the North Atlantic Oscillation on European precipitation. Journal of Geophysical Research Atmosphere. 113, D20120.
- Vicente-Serrano, S.M.; López-Moreno, J. y Beguería, S. 2007. La precipitación en el Pirineo español: diversidad espacial en las tendencias y escenarios futuros. Pirineos, 162: 43-69.

2 L'impact du CC dans les secteurs biophysiques

2.1 El cambio climático durante el Holoceno

- Beguería, S., López-Moreno, J.I., Lorente, A., Seeger, M., García-Ruiz, J.M. 2003. Assessing the effect of climate oscillations and land-use changes on streamflow in the Central Spanish Pyrenees. Ambio 32: 283-286.
- Benito, G., Thorndycraft, V.R., Rico, M., Sánchez-Moya, Y., Sopeña, A., 2008. Palaeoflood and floodplain records from Spain: evidence for long-term climate variability and environmental changes. Geomorphology 101, 68-77.
- Camarero, J.J., García-Ruiz, J.M., Sangüesa-Barreda, G., Galván, J.D., Alla, A.Q., Sanjuán, Y., Beguería, S., Gutiérrez, E. Arctic, Antarctic, and Alpine Research 47 (4): 773-783.
- Corella J.P. B.L. Valero-Garcés, F. Wang, A. Martínez-Cortizas, C.A. Cuevas, A. Saiz-Lopez., 2017.7 00 years reconstruction of mercury and lead atmospheric deposition in the Pyrenees (NE Spain) Atmospheric Environment 155: 97-107
- Corella, J.P., Stefanova, V., El Anjoumi, A., Rico, E., Giralt, S., Moreno, A., Plata-Montero, A., Valero-Garcés, B.L., 2013. A 2500-year multi-proxy reconstruction of climate change and human activities in northern Spain: The Lake Arreo record. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 386, 555–568.
- Corella, J.P., Valero-Garcés, B.L., Vicente- Serrano, S.M., Brauer, A., Benito, G., 2016. Three millennia of heavy rainfalls in Western Mediterranean: frequency, seasonality and atmospheric drivers. Scientific Reports 6, 38206; doi: 10.1038/srep38206
- Galop, D., Rius D., Cugny, C. & Mazier, F. 2013. A history of long-term Human – Environment interactions in the French Pyrenees inferred from pollen data. In Lozny L.R. (ed). Continuity and Change in cultural adaptation to mountain environemts. Studies in Human Ecology and Adaptation 7. Springer, p : 19-30.
- Gil-Romera G., González-Sampériz P. Lasheras-Álvarez L., Miguel Sevilla-Callejo M., Moreno A. Valero-Garcés B., López-Merino, L., Carrión, J., Pérez Sanz A., Aranbarri J., García-Prieto Fronce, E. 2014. Biomass-modulated fire dynamics during the last glacial-interglacial transition at the Central Pyrenees (Spain). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 402 : 113 - 124
- García-Ruiz, J.M., López-Moreno, J.I., Lasanta, T., Vicente-Serrano, S.M., González-Sampériz, P., Valero-Garcés, B.L., Sanjuán, Y., Beguería, S., Nadal-Romero, E., Lana-Renault, N., Gómez-Villar, A. 2015. Los efectos geoecológicos del Cambio Global en el Pirineo Central español: Una revisión a distintas escalas espaciales y temporales. Pirineos 170, e012. doi: http://dx.doi.org/10.3989/Pirineos.2015.
- García-Ruiz, J.M., Palacios, D., De Andrés, N., Valero-Garcés, B.L., López-Moreno, J.I., Sanjuán, Y. 2014. Holocene and 'Little Ice Age' glacial activity in the Marboré Cirque, Monte Perdido Massif, Central Spanish Pyrenees. The Holocene 24: 1439-1452.
- García-Ruiz, J.M.; Palacios, D.; González-Sampériz, P.; de Andrés, N.; Moreno, A.; Valero-Garcés, B.; Gómez-Villar, A. 2016. Mountain glacier evolution in the Iberian Peninsula during the Younger Dryas. Quaternary Science Reviews, 138: 16–30
- Giralt, S., Moreno, A., Cacho, I. & Valero-Garcés, B.L. 2017. A comprehensive overview of the last 2,000 years Iberian Peninsula climate history, CLIVAR Exchanges No. 73, 5-10
- González-Sampériz, P.; Aranbarri, J.; Pérez-Sanz, A.; Gil-Romera, G.; Moreno, A.; Leunda, M.; Sevilla-Callejo, M.; Corella, J.P.; Morellón, M.; Oliva, B.; Valero-Garcés, B. 2017. Environmental and climate change in the southern Central Pyrenees since the Last Glacial Maximum: A view from the lake records. Catena 149 : 668-688.
- Leunda, M., González-Sampériz, P.; Gil-Romera, G.; Aranbarri, J.; Moreno, A.; Oliva-Urcia, B.; Sevilla, M.; Valero-Garcés, B.L. 2017. The Late-Glacial and Holocene Marboré Lake sequence (2612 m a.s.l., Central Pyrenees, Spain): Testing high altitude sites sensitivity to millennial scale vegetation and climate variability. Global and Planetary Change 157: 214-231 (http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.08.008)
- López-Moreno, J. I., Revuelto, J., Rico, I., Chueca-Cía, J., Julián, A., Serreta, A., Serrano, E., Vicente-Serrano, S. M., Azorín-Molina, C., Alonso-González, E., and García-Ruiz, J.M., 2016 : Thining of the Monte Perdido Glacier in the Spanish Pyrenees since 1981. The Cryosphere 10, 681-694.
- Mayewski PA, Rohling EE, Stager JC et al. 2004. Holocene climate variability. Quaternary Research 62: 243–255.
- Montserrat, J. 1992. Evolución glaciar y postglaciar del clima y la vegetación en la vertiente sur del Pirineo: Estudio palinológico. Instituto Pirenaico de Ecología, Zaragoza, 147 pp.
- Morellón, M., Pérez-Sanz, A., Corella, J.P., Büntgen, U., Catalán, J., González-Sampériz, P., González-Trueba, J.J., López-Sáez, J.A., Moreno, A., Pla-Rabes, S., Saz-Sánchez, M.Á., Scussolini, P., Serrano, E., Steinhilber, F., Stefanova, V., Vegas-Vilarrúbia, T.,

Valero-Garcés, B., 2012. A multi-proxy perspective on millennium-long climate variability in the Southern Pyrenees. Clim. Past 8, 683-700.

- Morellón. M. Valero-Garcés, B., Vegas-Villarubia, T., González-Sampériz, P-, Romero, O., Delgado-Huertas, A., Mata, P., Moreno, A., Rico, Mayte, Corella, J.P. 2009. Lateglacial and Holocene palaeohydrology in the western Mediterranean region: The Lake Estanya record (NE Spain). Quaternary Science Review, 28 : 2582-2599
- Oliva-Urcia, B; Leunda, M., Moreno, A.; Valero-Garcés, B.,González-Sampériz, P., Gil-Romera, G., Mata, M. P., HORDA Group. 2018. Last deglaciation and Holocene environmental change at high altitude in the Pyrenees: the geochemical and paleomagnetic record from Marboré Lake (N Spain). Journal of Paleolimnology https://doi.org/10.1007/s10933-017-0013-9
- Oliva, M., J. Ruiz-Fernández, M. Barriendos, G. Benito, J.M. Cuadrat, F. Domínguez-Castro, J.M. García-Ruiz, S. Giralt, A. Gómez-Ortiz, A. Hernández, O. López-Costas, J.I. López-Moreno, J.A. López-Sáez, A. Martínez-Cortizas, A. Moreno, M. Prohom, M.A. Saz,E. Serrano, E. Tejedor, R. Trigo, B. Valero-Garcés, S.M. Vicente-Serrano. 2018. The Little Ice Age in Iberian mountains. Earth-Science Reviews 177: 175-208
- Pérez-Sanz, A., P. González-Sampériz , A. Moreno, B. Valero-Garcés, G. Gil-Romera, M. Rieradevall, P. Tarrats, L. Lasheras-Álvarez, M. Morellón, A. Belmonte, C. Sancho, M. Sevilla-Callejo, A. Navas. 2013. Holocene climate variability, vegetation dynamics and fire regimen in the Central Pyrenees: the Basa de la Mora sequence (NE Spain). Quaternary Science Reviews 73: 149-179
- Pla, S., Catalan, J., 2011. Deciphering chrysophyte responses to climate seasonality. J Paleolimnol 46, 139-150.
- Rius, D., Vannière, B. and Galop, D. 2012. Holocene history of fire, vegetation and land use from the central Pyrenees (France). Quaternary Research 77: 54-64
- Vicente-Serrano S.M. y Juan I. López-Moreno 2008: The nonstationary influence of the North Atlantic Oscillation on European precipitation. Journal of Geophysical Research-Atmosphere. 113, D20120, doi:10.1029/2008JD010382.
- Biodiversidad de montaña: fauna.
- Alexander, Jake & Chalmandrier, Loïc & Lenoir, Jonathan & Burgess, Treena & Essl, Franz & Haider, Sylvia & Kueffer, Christoph & Mcdougall, Keith & Milbau, Ann & Nuñez, Martín & Pauchard, Anibal & Rabitsch, Wolfgang & Rew, Lisa & Sanders, Nathan & Pellissier, Loïc. (2017). Lags in the response of mountain plant communities to climate change. Global Change Biology. 24.10.1111/gcb.13976.
- Araújo, M. B., Alagador, D., Cabeza, M., Nogués-Bravo, D., & Thuiller, W. (2011). Climate change threatens European conservation areas. Ecology letters, 14(5), 484-492.
- Barrett, R. T. (2014). Has climate change resulted in a mismatch between the spring arrival of the Common Cuckoo Cuculus canorus and its hosts in North Norway?.
- Benadi, G., Hovestadt, T., Poethke, H. J., & Blüthgen, N. (2014). Specialization and phenological synchrony of plant–pollinator interactions along an altitudinal gradient. Journal of Animal Ecology, 83(3), 639-650.
- Bichet, C., Ferrandiz-Rovira, M., Claramunt, B., Figueroa, I. et al. Multiple geographic origins and high genetic differentiation of the Alpine marmots reintroduced in the Pyrenees. (2016) Conservation Genetics. DOI: 10.1007/s10592-016-0851-4
- Briedis, M., Beran, V., Hahn, S., & Adamík, P. (2016). Annual cycle and migration strategies of a habitat specialist, the Tawny Pipit Anthus campestris, revealed by geolocators. Journal of Ornithology, 157(2), 619-626.
- Buisan, S. T., Saz, M. A., & López-Moreno, J. I. (2015). Spatial and temporal variability of winter snow and precipitation days in the western and central Spanish Pyrenees. International Journal of Climatology, 35(2), 259-274.
- Capdevila-Argüelles L., B. Zilletti y V.A. Suárez Álvarez (2011). Cambio climático y especies exóticas invasoras en España. Diagnóstico preliminar y bases de conocimiento sobre impacto y vulnerabilidad. Documento de síntesis. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid, 17 pág.
- Caruso, N. M., Sears, M. W., Adams, D. C., & Lips, K. R. (2014). Widespread rapid reductions in body size of adult salamanders in response to climate change. Global Change Biology, 20(6), 1751-1759.
- Catalan, J., Ninot, J. M., & Aniz, M. M. (2017). The High Mountain Conservation in a Changing World. In High Mountain Conservation in a Changing World (pp. 3-36). Springer, Cham.
- Charmantier, A., & Gienapp, P. (2014). Climate change and timing of avian breeding and migration: evolutionary versus plastic changes. Evolutionary Applications, 7(1), 15-28.
- Cubas, J., Martín-Esquivel, J. L., Nogales, M., Irl, S. D., Hernández-Hernández, R., López-Darias, M., ... & González-Mancebo, J. M. (2017). Contrasting effects of invasive rabbits on endemic plants driving vegetation change in a subtropical alpine insular environment. Biological Invasions, 1-15.
- Dastansara, N., Vaissi, S., Mosavi, J., & Sharifi, M. (2017). Impacts of temperature on growth, development and survival of larval Bufo (Pseudepidalea) viridis (Amphibia: Anura): implications of climate change. Zoology and Ecology, 1-7.
- de Pous, P., Montori, A., Amat, F., & Sanuy, D. (2016). Range contraction and loss of genetic variation of the Pyrenean endemic newt Calotriton asper due to climate change. Regional environmental change, 16(4), 995-1009.
- Flousek, J., Telenský, T., Hanzelka, J., & Reif, J. (2015). Population trends of Central European montane birds provide evidence for adverse impacts of climate change on high-altitude species. PloS one, 10(10), e0139465.

- García-González, R., Aldezabal, A., Laskurain, N. A., Margalida, A., & Novoa, C. (2016). Factors affecting diet variation in the Pyrenean rock ptarmigan (Lagopus muta pyrenaica): Conservation implications. PloS one, 11(2), e0148614.
- Garcia, R. A., Cabeza, M., Rahbek, C., & Araújo, M. B. (2014). Multiple dimensions of climate change and their implications for biodiversity. Science, 344(6183), 1247579.
- Green, D. M. (2017). Amphibian breeding phenology trends under climate change: Predicting the past to forecast the future. Global change biology, 23(2), 646-656.
- Gordo, O., & Sanz, J. J. (2005). Phenology and climate change: a long-term study in a Mediterranean locality. Oecologia, 146(3), 484-495.
- Herrera, J. M., Ploquin, E. F., Rodríguez-Pérez, J., & Obeso, J. R. (2014). Determining habitat suitability for bumblebees in a mountain system: a baseline approach for testing the impact of climate change on the occurrence and abundance of species. Journal of biogeography, 41(4), 700-712.
- Kolářová, E., Matiu, M., Menzel, A., Nekovář, J., Lumpe, P., & Adamík, P. (2017). Changes in spring arrival dates and temperature sensitivity of migratory birds over two centuries. International journal of biometeorology, 61(7), 1279-1289.
- Kourkgy, C., Garel, M., Appolinaire, J., Loison, A., & Toïgo, C. (2016). Onset of autumn shapes the timing of birth in Pyrenean chamois more than onset of spring. Journal of Animal Ecology, 85(2), 581-590.
- McCarty, J. P., Wolfenbarger, L. L., & Wilson, J. A. (2017). Biological impacts of climate change. eLS.
- Martínez-Freiría, F. (2015). Assessing climate change vulnerability for the Iberian viper Vipera seoanei. Basic and Applied Herpetology, 29, 61-80.
- Miller-Struttmann, N. E., Geib, J. C., Franklin, J. D., Kevan, P. G., Holdo, R. M., Ebert-May, D., ... & Galen, C. (2015). Functional mismatch in a bumble bee pollination mutualism under climate change. Science, 349(6255), 1541-1544.
- Møller, A.P.,Rubolini,D.&Lehikoinen,E. 2008.Populations ofmigratorybirdspeciesthatdidnotshowa phenologicalresponsetoclimatechangearedeclining. Proc. NatlAcad.Sci.USA 105: 16195–16200.
- Morán-Tejeda, E., López-Moreno, J. I., & Sanmiguel-Vallelado, A. (2017). Changes in climate, snow and water resources in the Spanish Pyrenees: observations and projections in a warming climate. In High Mountain Conservation in a Changing World(pp. 305-323). Springer, Cham.
- Morueta-Holme, N., Fløjgaard, C., & Svenning, J. C. (2010). Climate change risks and conservation implications for a threatened small-range mammal species. PloS one, 5(4), e10360.
- Novoa, C., Astruc, G., Desmet, J. F., & Besnard, A. (2016). No short-term effects of climate change on the breeding of Rock Ptarmigan in the French Alps and Pyrenees. Journal of Ornithology, 157(3), 797-810.
- Ornosa, C., Torres, F., & De la Rua, P. (2017). Updated list of bumblebees (Hymenoptera: Apidae) from the Spanish Pyrenees with notes on their decline and conservation status. Zootaxa, 4237(1), 41-77.
- Pacifici, M., Foden, W. B., Visconti, P., Watson, J. E., Butchart, S. H., Kovacs, K. M., ... & Corlett, R. T. (2015). Assessing species vulnerability to climate change. Nature Climate Change, 5(3), 215.
- Palomo, I. (2017). Climate change impacts on ecosystem services in high mountain areas: A literature review. Mountain Research and Development, 37(2), 179-187.
- Panuccio, M., Martín, B., Morganti, M., Onrubia, A., & Ferrer, M. (2017). Long-term changes in autumn migration dates at the Strait of Gibraltar reflect population trends of soaring birds. Ibis, 159(1), 55-65.
- Parmesan C. (2006) Ecological and evolutionary responses to recent climate change. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics 37: 637–669. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100
- Pauchard, A., Milbau, A., Albihn, A., Alexander, J., Burgess, T., Daehler, C., ... & Haider, S. (2016). Non-native and native organisms moving into high elevation and high latitude ecosystems in an era of climate change: new challenges for ecology and conservation. Biological invasions, 18(2), 345-353.
- Petitpierre, B., McDougall, K., Seipel, T., Broennimann, O., Guisan, A., & Kueffer, C. (2016). Will climate change increase the risk of plant invasions into mountains?. Ecological Applications, 26(2), 530-544.
- Phillimore, A.B., Hadfield, J.D., Jones, O.R., Smithers, R.J. (2010). Differences in spawning date between populations of common frog reveal local adaptation. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 107, 8292-8297.
- Piracés, V. J., López-Flores, R., & Pérez-Collazos, E. (2015). Estudio poblacional y biométrico del tritón pirenaico en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. Lucas Mallada. Revista de Ciencias, (17), 177-195.
- Pound, J.A., Bustamante, M.R., Coloma, L.A., Consuegra, J.A., Fogden, M.P.L., Foster, P.N., La Marca, E., Masters, K.L.,Merino-Viteri, A., Puschendorf, R., Ron, S.R., Sanchez-Azofeifa, G.A., Still, C.J., Young, B.E. (2006). Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming, Nature, 439, 161-167.
- Prodon, R., Geniez, P., Cheylan, M., Devers, F., Chuine, I., & Besnard, A. (2017). A reversal of the shift towards earlier spring phenology in several Mediterranean reptiles and amphibians during the 1998-2013 warming slowdown. Global change biology.
- Pysek, P., Genovesi, P., Pergl, J., Monaco, A., & Wild, J. (2013). Plant invasions of protected areas in Europe: An old continent

facing new problems. In L. C.
- Rasmont, P., Franzén, M., Lecocq, T., Harpke, A., Roberts, S. P., Biesmeijer, J. C., ... & Gonseth, Y. (2015). Climatic risk and distribution atlas of European bumblebees (pp. 236-p). Sofia: Pensoft.
- Romo, H., García-Barros, E., Márquez, A. L., Moreno, J. C., & Real, R. (2014). Effects of climate change on the distribution of ecologically interacting species: butterflies and their main food plants in Spain. Ecography, 37(11), 1063-1072.
- Rousselet, J., Zhao, R., Argal, D., Simonato, M., Battisti, A., Roques, A., & Kerdelhué, C. (2010). The role of topography in structuring the demographic history of the pine processionary moth, Thaumetopoea pityocampa (Lepidoptera: Notodontidae). Journal of biogeography, 37(8), 1478-1490
- Sánchez-Fernández, D., Rizzo, V., Cieslak, A., Faille, A., Fresneda, J., & Ribera, I. (2016). Thermal niche estimators and the capability of poor dispersal species to cope with climate change. Scientific reports, 6, 23381.
- Schmitt, T., Habel, J. C., Rödder, D., & Louy, D. (2014). Effects of recent and past climatic shifts on the genetic structure of the high mountain Yellow-spotted ringlet butterfly Erebia manto (Lepidoptera, Satyrinae): a conservation problem. Global change biology, 20(7), 2045-2061.
- Schweiger, O., Settele, J., Kudrna, O., Klotz, S., & Kühn, I. (2008). Climate change can cause spatial mismatch of trophically interacting species. Ecology, 89(12), 3472-3479.
- Settele, J., Kudrna, O., Harpke, A., Kühn, I., Van Swaay, C., Verovnik, R., ... & Kühn, E. (2008). Climatic risk atlas of European butterflies (p. 710). Sofia-Moscow: Pensoft.
- Singer, M. C., & Parmesan, C. (2010). Phenological asynchrony between herbivorous insects and their hosts: signal of climate change or pre-existing adaptive strategy?. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences, 365(1555), 3161-3176.
- Thuiller W, Albert C, Araujo MB, Berry PM, Cabeza M, Guisan A, Hickler T, Midgley GF, Paterson J, Schurr FM, Sykes MT, Zimmermann NE (2008) Predicting global change impacts on plant species' distributions: future challenges. Perspect Plant Ecol Evol Syst 9:137–152.doi:10.1016/j.ppees.2007.09.004
- Thuiller W, Lavergne S, Roquet C, Boulangeat I, Lafourcade B, Arau´jo MB (2011) Consequences of climate change on the tree of life in Europe. Nature 470:531–534. doi:10.1038/nature09705
- Toïgo, M., Barraquand, F., Barnagaud, J. Y., Piou, D., & Jactel, H. (2017). Geographical variation in climatic drivers of the pine processionary moth population dynamics. Forest Ecology and Management, 404, 141-155.
- Vitasse, Y., Signarbieux, C., & Fu, Y. H. (2018). Global warming leads to more uniform spring phenology across elevations. Proceedings of the National Academy of Sciences, 115(5), 1004-1008.
- Walther, G. R. (2010). Community and ecosystem responses to recent climate change. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 365(1549), 2019-2024.
- Willisch, C. S., Bieri, K., Struch, M., Franceschina, R., Schnidrig-Petrig, R., & Ingold, P. (2013). Climate effects on demographic parameters in an unhunted population of Alpine chamois (Rupicapra rupicapra). Journal of mammalogy, 94(1), 173-182.
- Wilson, R. J., Gutiérrez, D., Gutiérrez, J., Martínez, D., Agudo, R., & Monserrat, V. J. (2005). Changes to the elevational limits and extent of species ranges associated with climate change. Ecology Letters, 8(11), 1138-1146.

2.3 Biodiversité de montagne: flore

- Adler P.B. et al., 2011. Productivity is a poor predictor of plant species richness. Science 333, 1750-1753.
- Araújo M.B. et al., 2011. Climate change threatens European conservation areas. Ecology Letters 14, 484- 492.
- Baudière A. & Gauquelin T., 2005. Évolution actuelle de la végétation des milieux supraforestiers oriento-pyrénéens. Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse, 141-2 :5-14.
- Baron J.S. et al., 2009. Options for national parks and reserves for adapting to climate change. Environmental Management 44, 1033-1042.
- Beniston M. et al., 1996. The Impacts of Climate Change on Mountain Regions. In Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Chapter 5, Cambridge University Press, 191-213.
- Bergamini A. et al., 2009. An elevational shift of cryophilous bryophytes in the last century – an effect of climate war-ming? Diversity and Distributions 15, 871-879.
- Bodin J. et al., 2013. Shifts of forest species along an elevational gradient in Southeast France: climate change or stand maturation? Journal of vegetation science, 24 (2), 269–283
- Bodin J., 2010. Observed changes in mountain vegetation of the Alps during the XXth century: role of climate and land-use changes. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré (Nancy 1), Vandoeuvre-lès-Nancy, FRA, Gottfried Wilhelm Leibniz University of Hanover, DEU. 210 p.
- Bonhote J. & Vernet J.L., 1988. La « mémoire des charbonnières". Essai de reconstitution des milieux forestiers dans une vallée marquée par la métallurgie (Aston, Haute-Ariège). Revue forestière française,.40 (3) :197-212.

- Braun-Blanquet, 1948. La végétation alpine des Pyrénées orientales. Etude de phytosociologie comparée, Ed. Instituto español de edafologia, ecologia y fisiologia vegetal, Barcelone. 306 p.
- Brooker R.W., 2006. Plant–plant interactions and environmental change. New Phytologist 171, 271-284.
- Callaway R.M. et al., 2002. Positive interactions among alpine plants increase with stress. Nature 417, 844- 848.
- Colwell R.K. et al., 2008. Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in the wet tropics. Science 322, 258-261.
- Corriol G. & Mikolajczak A., 2014. Contribution au Prodrome des végétations de France : les Salicetea herbaceae Braun-Blanq. 1948. J. Bot. Soc. bot. France, 68 : 15-49.
- Estiarte & Peñuelas 2015, Alteration of the phenology of leaf senescence and fall in winter deciduous species by climate change: effects on nutrient proficiency. Glob Chang Biol. 21(3):1005-17
- Eynard M., 1978. Contribution à l'étude écologique de deux groupements végétaux à Salix herbacea des environs du col de l'Iseran. Trav. Sci. Parc Nat. Vanoise 9 : 25-51.
- Gallien L. et al., 2016. Is There Any Evidence for Rapid, Genetically-Based, Climatic Niche Expansion in the Invasive Common Ragweed? PLoS ONE 11(4): e0152867. doi:10.1371/journal.pone.0152867
- Galop D & Jalut G., 1994. Differential human impact and vegetation history in two adjacent valleys in the Ariege's basin, southern France, from 3000 BP to the present. Vegetation History and Archeobotany, 3, 225-244.
- Gonin P. (coord.), Fady B., Musch B., Métailié J.-P., Galop D., de Munnik N., Cunill R., Poublanc S., Abbe J.-L., Corriol G., Sajdak G., Delarue A., Valette P., Drenou Ch. : 2014 - Caractérisation génétique et origine du Sapin pectiné (Abies alba Mill.) de Ste Croix Volvestre (Ariège) et du massif pyrénéen. – PNR Pyrénées Ariégeoises, IDF, mai 2014, 160 p.
- Gottfried M. et al., 2102. Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. Nature Climate Change. DOI: 10.1038/NCLIMATE1329
- Grabherr, 2003. Alpine vegetation dynamics and climate change - a synthesis of long-term studies and observation. In : Nagy L., Grabherr G., Körner C., Thompson DBA (eds), Alpine Biodiversity in Europe. Springer, Berlin, pp. 399-409.
- Grime J.P. et al., 2000. The response of two contrasting limestone grasslands to simulated climate change. Science 5480, 762-765.
- Grime J.P., 1973. Competitive exclusion in herbaceous vegetation. Nature 242, 344-347.
- Harsch M.A. et al., 2009. Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. Ecology Letters 12, 1040-1049.
- Heegaard et Vand-vik, 2004. Climate change affects the outcomeof competitive interactions – an application of principal response curves.Oecologia 139 : 459-466.
- Holzapfel A.M. & Vinebrooke R.D., 2005. Environmental warming increases invasion potential of alpine lake communities by imported species. Global Change Biology 11, 2009-2015.
- Jolly W.M. et al., 2005. Divergent vegetation growth responses to the 2003 heat wave in the Swiss Alps. Geophysical Research Letters 32 L18409.
- Jump A.S. et al., 2006. Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of Fagus sylvatica. Global Change Biology 12, 2163-2174.
- Komac B. & Olicard L., 2014. Monitoring protocol for vegetation in the Pyrenees snowfields. Mountain Research Initiative News, 8, 16-17.
- Komac B., Esteban P., Trapero L. & Caritg R., 2016. Modelization of the Current and Future Habitat Suitability of Rhododendron ferrugineum Using Potential Snow Accumulation. PLoS ONE 11(1):e0147324. doi:10.1371/journal.pone.0147324.
- Le Bagousse-Pinguet Y.,Maalouf J.P., Touzard B. & Michalet R., 2014. Importance, but not intensity of plant interactions relates to species diversity under the interplay of stress and disturbance. Oikos, 123: 777–785.
- Le Treut H. (dir.), 2013, Les impacts du changement climatique en Aquitaine. Un état des lieux scientifique. Presses Universitaires de Bordeaux, LGPA Éditions, Pessac, 369 p.
- Lefèvre F. & Collin E. (coord.), 2012. La Commission des resources génétiques forestières (CRGF): regards sur 20 ans d'actions et nouveaux enjeux. Rendez-vous techniques de l'Office national des forêts, 36-37: 9-56.
- Lenoir J. et al., 2010. Going against the flow: potential mechanisms for unexpected downslope range shifts in a warming climate. Ecography 33, 295-303.
- Linderholm H.W., 2006. Growing season changes in the last century. Agricultural and Forest Meteorology 137, 1-14.
- Lluent A., Anadon-Rosell A., Ninot J. M., Grau O. & Carrillo E., 2013, Phenology and seed setting success of snowbed plant species in contrasting snowmelt regimes in the Central Pyrenees, Flora, 208 : 220– 231.
- Mäkinen H. et al., 2002. Radial growth variation of Norway spruce (Picea abies (L.) Karst.) across latitudinal and altitudinal gradients in central and northern Europe. Forest Ecology and Management 171, 243-259.
- Malaval, S., Dupin, B. & Dantin, G., 2015. Conservation et restauration de la flore dans un contexte anthropisé, quelles solutions ? in : Rey, F., Dutoit, T., Cote, F., Lescourret, F. Sciences Eaux § Territoires, 16, 70-74.

- Marcora P. et al., 2008. The performance of Polylepis australis trees along their entire altitudinal range: implications of climate change for their conservation. Diversity and Distributions 14, 630-636.
- Martín-Vide J. (coord. cient.), 2016. Tercer informe sobre el canvi climàtic a catalunya (TICCC). Generalitat de Catalunya i Institut d'Estudis Catalans, 626 p.
- McCain C.M. & Colwell R.K., 2011. Assessing the threat to montane biodiversity from discordant shifts in temperature and precipitation in a changing climate. Ecology Letters 14, 1236-1245.
- Menzel A. et al., 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. Global Change Biology 12, 1969-1976.
- Menzel A. & Fabian P., 1999. Growing season extended in Europe, Nature 397, 659.
- Michalet R. et al., 2006. Do biotic interactions shape both sides of humped-back models of species richness in plant communities? Ecology Letters 9, 767-773.
- Michalet R., Vitasse Y. & Delzon S., 2015. Rôle des interactions plante-plante dans la réponse des forêts au changement climatique : l'exemple des forêts de chêne sessile et de hêtre dans les Pyrénées occidentales. Innovations Agronomiques 47 (2015), 97-108.
- Moncorps S. (dir.), 2014. Panorama des services écologiques fournis par les écosystèmes français, étude de cas : les écosystèmes montagnards d'Aquitaine. UICN France, Paris, 40 p.
- Moncorps S. (dir.), 2015. Changement climatique et risques naturels dans les montagnes tempérées. UICN France, Paris, 40 p.
- Pauchard A. et al., 2016. Non-native and native organisms moving into high elevation and high latitude ecosystems in an era of climate change: new challenges for ecology and conservation. Biol Invasions, 18 (2), 345–353
- Pauli H. et al., 2004. The GLORIA Field Manual—Multi-Summit Approach (Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg,
- Pauli H. et al., 2012. Recent Plant Diversity Changes on Europe's Mountain Summits. Science, 336, 353-355.
- Peñuelas et al., 2013. Evidence of current impact of climate change on life: a walk from genes to the biosphere». Global Change Biology, 19, 2303-2338.
- Rivas-Ubach A., Sardans J., Pérez-Trujillo M., Estiarte M. & Peñuelas J., 2012. Strong relationship between elemental stoichiometry and metabolome in plants, Proceedings of the National Academy of Sciences, 109 (11) 4181-4186.
- Savva Y. et al., 2006. Interannual growth response of Norway spruce to climate along an altitudinal gradient in the Tatra Mountains, Poland. Trees - Structure and Function 20, 735-746.
- Theurillat J.-P. & Guisan A., 2001. Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps: A review. Climatic change 50, 77-109.
- Thomas C.D., 2010. Climate, climate change and range boundaries. Diversity and Distributions 16, 488-495.
- UICN, 2012, Catégories et Critères de la Liste rouge de l'UICN : Version 3.1, Deuxième édition. Gland, Suisse et Cambridge, Royaume-Uni : UICN. vi + 32pp., Originalement publié en tant que IUCN Red List Categories and Criteria: Version 3.1, Second edition. (Gland, Switzerland and Cambridge, UK: IUCN, 2012).
- Valadon A., 2009. Effets des interventions sylvicoles sur la diversité génétique des arbres forestiers: analyse bibliographique. Office national des forêts, Paris. Les dossiers forestiers, 21, 157 p.
- Villar L. & Dendaletche C., 1994. . Pyrenees. France, Spain and Andorra. In Davis S.D., Heywood V. H.& Hamilton A.C. (eds.), Centres of Plants Diversity. a Guide and Strategy for their Conservation, Infonnation Press, Oxford, 1: 61-64.
- Vitasse Y. et al., 2009. Leaf phenology sensitivity to temperature in European trees: do within-species populations exhibit similar responses? Agricultural and Forest Meteorology 149, 735-744.
- Vitasse Y. et al., 2010. Quantifying plasticity of leaf phenology in response to temperature for two temperate tree species using transplant experiments. Functional Ecology 24, 1211-1218.
- Winkler M. et al., 2016. The rich sides of mountain summits – a pan-European view on aspect preferences of alpine plants. Journal of biogeography, 43 (11), 2261–2273

2.4 Forêts

- Ameztegui, A., Coll, L., Brotons, L., & Ninot J.M. (2016) Land-use legacies rather than climate change are driving the recent upward shift of the mountain treeline in the Pyrenees. Global Ecology and Biogeography 25(3): 267-273.
- Améztegui, A., Brotons, L., & Coll, L. (2010). Land-use changes as major drivers of mountain pine (Pinus uncinata Ram.) expansion in the Pyrenees. Global Ecology and Biogeography, 19, 632–641.
- Aussenac, G. (2000). Interactions between forest stands and microclimate: ecophysiological aspects and consequences for silviculture. Annals of Forest Science, 57(3), 287-301.
- BADEAU V., DUPOUEY J.L., CLUZEAU C., DRAPIER J., 2005. Aires potentielles de répartition des espècesforestières d'ici 2100. Forêt-entreprise, 162, 25-29.
- Bertrand, R., Lenoir, J., Piedallu, C., Riofrio-Dillon, G., de Ruffray, P., Vidal, C., Pierrat. J.-C., & Gégout, J.-C. (2011). Changes in

plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. Nature, 479, 517-520.
- Bontemps, J. D., Hervé, J. C., Leban, J. M., & Dhôte, J. F. (2011). Nitrogen footprint in a long-term observation of forest growth over the twentieth century. Trees, 25(2), 237-251.
- Bréda N, Huc R, Granier A, Dreyer E. (2006). Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. Annals of Forest Science 63: 625–644.
- Bréda, N., & Badeau, V. (2008). Forest tree responses to extreme drought and some biotic events: towards a selection according to hazard tolerance?. Comptes Rendus Geoscience, 340(9-10), 651-662.
- Camarero, J. J., & Gutiérrez, E. (2004). Pace and pattern of recent treeline dynamics: response of ecotones to climatic variability in the Spanish Pyrenees. Climatic change, 63(1-2), 181-200.
- Camarero JJ., Bigler C, Linares JC, Gil-Pelegrín E. (2011). Synergistic effects of past historical logging and drought on the decline of Pyrenean silver fir forests. For Ecol Manag 262:759-769
- Camarero JJ., Gazol A, Sangüesa-Barreda, G, Oliva, J, Vicente-Serrano, SM. (2015). To die or not to die: early warnings of tree dieback in response to a severe drought. Journal of Ecology 103, 44-57
- Casals P, Baiges T, Bota G, Chocarro C, de Bello F, Fanlo R, Sebastià MT, & Taüll M. (2009). Silvopastoral systems in the Northeastern Iberian Peninsula. A Multifunctional Perspective. In: Rigueiro-Rodríguez A, McAdam JH, Mosquera-Losada MR (Eds) Agroforestry in Europe: Current Status and Future Prospects. Cap. 9, pp. 161-181Springer-Berlag. ISBN 978-1-4020-8271-9.
- Charru M. (2012) La productivité forestière dans un environnement changeant : caractérisation multi-échelle de ses variations récentes à partir des données de l'inventaire forestier national (IFN) et interprétation environnementale. Mémoire de thèse, INRA, France.
- Chauvin S., Daubet B., Bertrand P. (2011) – Annexe technique de l'action « Evolutions climatiques et forêts de montagne ». Projet OPCC EFA 235/11.
- Cheaib, A. , Badeau, V. , Boe, J. , Chuine, I. , Delire, C. , Dufrêne, E. , François, C. , Gritti, E. S., Legay, M. , Pagé, C. , Thuiller, W. , Viovy, N. and Leadley, P. (2012), Climate change impacts on tree ranges: model intercomparison facilitates understanding and quantification of uncertainty. Ecology Letters, 15: 533-544
- Courbaud, B., Kunstler, G., Morin, X., & Cordonnier, T. (2010). Quel futur pour les services écosystémiques de la forêt alpine dans un contexte de changement climatique?. Journal of Alpine Research| Revue de géographie alpine, (98-4).
- Daubet, B., De Miguel Magaña, S., Maurette, A. (2007). Livre blanc des forêts pyrénéennes : Pour une gestion durable des Pyrénées. Projet INTERREG SILVAPYR. FORESPIR.
- Dobbertin, M. (2005). Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review. European Journal of Forest Research, 124(4), 319-333.
- Drénou, C., Giraud, F., Gravier, H., SABATIER, S., & Caraglio, Y. (2013). Le diagnostic architectural: un outil d'évaluation des sapinières dépérissantes.
- Ferretti, M., Nicolas, M., Bacaro, G., Brunialtia, G., Calderisi, M., Croisé, L., Frati. L., Lanier, M., Maccherini, S., Santi, E., & Ulrich, E. (2014). Plot-scale modelling to detect size, extent, and correlates of changes in tree defoliation in French high forests. Forest Ecology and management, 311, 56-69.
- Franceschini T., Charru M. et Constant T. (2012) L'estimation de la biomasse et de la productivité forestières à l'épreuve des changements environnementaux. Revue Forestière Française, Numéro1-2012, France.
- Garcia-Pausas J, Romanyà J, Montané F, Ríos A, Taull M., Rovira P, Casals P, 2017. Are soil carbon stocks in mountain grasslands compromised by land-use changes?. In Jordi Catalan, Josep Mª Ninot, Merce Aniz (Eds.) High Mountain Conservation in a Changing World. Advances in Global Change Research 62. Springer Open Chapter 9, pp. 207 -230
- González-Olabarria, J. R., Mola-Yudego, B., & Coll, L. (2015). Different factors for different causes: analysis of the spatial aggregations of fire ignitions in Catalonia (Spain). Risk analysis, 35, 1197-1209.
- Gonzalez, J. R., Palahi, M., Trasobares, A., & Pukkala, T. (2006). A fire probability model for forest stands in Catalonia (north-east Spain). Annals of Forest Science, 63, 169-176.
- Gottfried, M., Pauli, H., Futschik, A., Akhalkatsi, M., Barančok, P., Alonso, J. L. B., ... & Krajči, J. (2012). Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. Nature Climate Change, 2(2), 111.
- Goudet, M. (2015). Réseau systématique de suivi des dommages forestiers, quelques informations sur l'état sanitaire de la forêt française. Paris, France: Département de la santé des forêts.
- Gunderson, L. H. (2000). Ecological resilience—in theory and application. Annual review of ecology and systematics, 31(1), 425-439
- Jump, A. S., Hunt, J. M., & Penuelas, J. (2006). Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of Fagus sylvatica. Global Change Biology, 12(11), 2163-2174
- Kahle, H. P. (Ed.). (2008). Causes and consequences of forest growth trends in Europe: Results of the recognition project (Vol. 21). Brill
- Kullman, L. (2002). Rapid recent range-margin rise of tree and shrub species in the Swedish Scandes. Journal of ecology,

90(1), 68-77
- Lasanta, T., & Vicente-Serrano, S. M. (2007). Cambios en la cubierta vegetal en el Pirineo aragonés en los últimos 50 años. Pirineos, 162, 125-154.
- Le Treut, H. (2013) Les impacts du changement climatique en Aquitaine. Dynamiques environnementales. Presses Universitaires de Bordeaux LGPA-Editions
- Lebourgeois, F., Drénou, C., Bouvier, M., & Lemaire, J. (2015). Caractérisation de la croissance des chênaies pédonculées atlantiques dépérissantes: effets des sécheresses et relation avec l'architecture des houppiers. Revue Forestières Françaises, 4-2015, 333-351.
- Lenoir, J., Gégout, J. C., Marquet, P. A., De Ruffray, P., & Brisse, H. (2008). A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. science, 320(5884), 1768-1771.
- L. Matias 2012 Cambios en los limites de distribución de especies como consecuencia de las variaciones climáticas. Ecosistemas 21 [91-96] AEET, Asociacion española de ecología terrestre.
- Maaf, & IGN (2016). Indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines, edition 2015, Résultats. Paris, France: Maaf-IGN.
- Manion, P. D. (1981). Tree disease concepts. Prentice-Hall, Inc..
- Martínez, I., González-Taboada, F., Wiegand, T., Camarero, J. J., & Gutiérrez, E. (2012). Dispersal limitation and spatial scale affect model based projections of Pinus uncinata response to climate change in the Pyrenees. Global Change Biology, 18(5), 1714-1724.
- M.B. García, C.L. Alados1, R. Antor, J.L. Benito Alonso, J.J. Camarero, F. Carmena, P. Errea, F. Fillat, R. García-González, J.M. García-Ruiz, M. Gartzia, D. Gómez García, I. Gómez, P. González-Sampériz, E. Gutiérrez, J.J.Jiménez, J.I. López-Moreno, P. Mata, A. Moreno, P. Montserrat, P. Nuche, I. Pardo, J. Revuelto, M. Rieradevall (†),H. Sáiz, P. Tejero, S. Vicente-Serrano, E. Villagrasa, L. Villar, B. Valero-Garcés, (2016), Integrando escalas y metodos LTER para comprender la dinamica global de un espacio protegido de montaña: el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. Ecosistemas 25, [19-30]. AEET, Asociacion española de ecología terrestre.
- Montané, F., Casals, P., Taull, M., Lambert, B., & Dale, M. R. (2009). Spatial patterns of shrub cover after different fire disturbances in the Pyrenees. Annals of Forest Science, 66, 1-8.
- Moriondo, M., Good, P., Durao, R., Bindi, M., Giannakopoulos, C., & Corte-Real, J. (2006). Potential impact of climate change on fire risk in the Mediterranean area. Climate Research, 31, 85-95.
- Montané F, Rovira P, Casals P. 2007. Shrub encroachment into mesic mountain grasslands in the Iberian peninsula: Effects of plant quality and temperature on soil C and N stocks. Global Biogeochemical Cycles, 21, doi:10.1029/2006GB002853
- Nageleisen, L.-M. (2014). Quelques indicateurs de la santé des forêts françaises (1989-2014). Paris, France: Département de la santé des forêts.
- Nageleisen, L.-M., & Goudet, M. (2011). Manuel de notation des dommages forestiers (symptoms, causes, état des cimes). Paris, France: Département de la santé des forêts.
- Nageleisen, L.-M., & Taillardat, J. (2016). Histoire de la santé des forêts: surveillance sanitaire en forêt et naissance du réseau des correspondants observateurs du Département de la santé des forêts (DSF). Paris, France: Département de la santé des forêts.
- Nellemann, C., & Thomsen, M. G. (2001). Long-term changes in forest growth: potential effects of nitrogen deposition and acidification. Water, Air, and Soil Pollution, 128(3-4), 197-205
- N. Perez, A. Ferré, J.Carreras, X.Font (2011) Efectos del cambios climático sobre la distribución potencial de los hábitats subalpinos y alpinos del Pirineo Catalan y Andorrano. Actes del IX coloqui Internacional de Botanica Pirenaico-Cantabrica à Ordino, Andorra, 329-341
- ONERC (2015) L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change.
- Pardo, I., Camarero, J. J., Gutiérrez, E., & García, M. B. (2013). Uncoupled changes in tree cover and field layer vegetation at two Pyrenean treeline ecotones over 11 years. Plant Ecology & Diversity, 6(3-4), 355-364
- Pauli, H., Gottfried, M., Dullinger, S., Abdaladze, O., Akhalkatsi, M., Alonso, J. L. B., ... & Ghosn, D. (2012). Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits. Science, 336(6079), 353-355
- Peñuelas, J., & Boada, M. (2003). A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain). Global change biology, 9(2), 131-140
- Piedallu, C., Perez, V., Gégout, J. C., Lebourgeois, F., & Bertrand, R. (2009). Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l'Épicéa, du Sapin, du Hêtre et du Chêne sessile en France.
- P.Regato (2008) Adapting to Global Change, Mediterranean Forest, IUCN, Gland, Switzarland and Malaga, Spain.
- Rixen C. Wipf S. Non equilibrium in alpine plant assemblages: Shifts in Europe's summit floras. In Jordi Catalan, Josep Mª Ninot, Merce Aniz (Eds.) High Mountain Conservation in a Changing World. Advances in Global Change Research 62. Springer Open chapter 12, pp. 207 -230.
- Roux A., Dhôte J.-F. (Coordinateurs), Achat D., Bastick C., Colin A., Bailly A., Bastien J.-C., Berthelot A., Bréda N., Caurla S.,

Carnus J.-M., Gardiner B., Jactel H., Leban J.-M., Lobianco A., Loustau D., Meredieu C., Marçais B., Martel S., Moisy C., Pâques L., Picart-Deshors D., Rigolot E., Saint-André L., Schmitt B. (2017). Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique? Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050. Rapport d'étude pour le Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, INRA et IGN, 101 p. + 230 p. (annexes).

- Rouyer, E., Marty, P., & Chauvin, S. (2014). Rapport technique OPCC: Evaluation de l'impact du changement climatique sur l'évolution des écosystèmes forestiers. Toulouse, France: Observatoire Pyrénéen des Changements Climatiques.
- Ryan, M. G., Binkley, D., & Fownes, J. H. (1997). Age-related decline in forest productivity: pattern and process. In Advances in ecological research (Vol. 27, pp. 213-262). Academic Press.
- Solberg, S., Dobbertin, M., Reinds, G. J., Lange, H., Andreassen, K., Fernandez, P. G., ... & de Vries, W. (2009). Analyses of the impact of changes in atmospheric deposition and climate on forest growth in European monitoring plots: a stand growth approach. Forest Ecology and Management, 258(8), 1735-1750.
- Spiecker, H., Mielikäinen, K., Köhl, M., & Skovsgaard, J. P. (1996). Growth Trends in European Forests–Studies From 12 Countries. European Forest Institute Research Report 5
- Soubeyroux, J. M., Kitova, N., Blanchard, M., Vidal, J. P., Martin, E., & Dandin, P. (2012). Caractérisation des sècheresses des sols en France et changement climatique: Résultats et applications du projet ClimSec. La Météorologie, 78, p-21.
- Thapa, B., Holland, S. M., & Absher, J. D. (2004). The relationship between wildfires and tourist behaviors in Florida: an exploratory study.
- Villiers, T. (2016). Guide de gestion des forêts Pyrénéennes à rôle de protection. Office National des Forêts. 9200-16-GUI-SAM-058.

2.5 Écosystèmes sensibles de haute montagne: lacs et tourbières

- Arellano, L., P. Fernández, R. Fonts, N. L. Rose, U. Nickus, H. Thies, E. Stuchlík, L. Camarero, J. Catalan, and J. O. Grimalt. 2015. Increasing and decreasing trends of the atmospheric deposition of organochlorine compounds in European remote areas during the last decade. Atmos. Chem. Phys. 15:6069-6085.
- Bacardit, M. and L. Camarero. 2010. Modelling Pb, Zn and As transfer from terrestrial to aquatic ecosystems during the ice-free season in three Pyrenean catchments. Science of The Total Environment 408:5854-5861.
- Camarero, L., P. Masqué, W. Devos, I. Ani-Ragolta, J. Catalan, H. C. Moor, S. Pla, and J. A. Sanchez-Cabeza. 1998. Historical variations in lead fluxes in the Pyrenees (NE Spain) from a dated lake sediment core. Water, Air, Soil Pollut. 105:439-449.
- Camarero, L., Felip, M., Ventura, M., Bartumeus, F. & Catalan, J. (1999) The relative importance of the planktonic food web in the carbon cycle of an oligotrophic mountain lake in a poorly vegetated catchment (Redó, Pyrenees). J.Limnol., 58, 203-212.
- Camarero, L. y J. Catalán. 2012. Atmospheric phosphorus deposition may cause lakes to revert from phosphorus limitation back to nitrogen limitation. Nat Commun 3:1118.
- Camarero, L. 2017. Atmospheric Chemical Loadings in the High Mountain: Current Forcing and Legacy Pollution. Pages 325-341 in J. Catalan, J. M. Ninot, and M. Aniz, editors. High Mountain Conservation in a Changing World. Springer International Publishing.
- Catalan, J.; Barbieri, M. G.; Bartumeus, F. [et al.] (2009). Ecological thresholds in European alpine lakes. Freshwater Biology, 54, p. 2494-2517.
- Catalan, J.; Pla, S.; Rieradevall, M. [et al.] (2002) Lake Redo ecosystem response to an increasing warming in the Pyrenees during the twentieth century. Journal of Paleolimnology, 28, p. 129-145.
- Catalan et al.1993. Chemical composition of disturbed and undisturbed high mountain lakes in the Pyrenees: a reference for acidified sites. Wat.Res. 27:133-141.
- Catalan, et al 2006. High mountain lakes: extreme habitats and witnesses of environmental changes. Limnetica 25:551-584.
- Felip, M. & Catalan, J. (2000) The relationship between phytoplankton biovolume and chlorophyll in a deep oligotrophic lake: decoupling in their spatial and temporal maxima. J.Plankton Res., 22, 91-105.
- Heras, P., Infante Sánchez, M., Pontevedra-Pombal, X & Novoa-Muñoz, J.C. 2017. Mires and Peatland of Europe. Spain
- Elser, J. J., T. Andersen, J. S. Baron, A.-K. Bergstrom, M. Jansson, M. Kyle, K. R. Nydick, L. Steger, and D. O. Hessen. 2009. Shifts in Lake N:P Stoichiometry and Nutrient Limitation Driven by Atmospheric Nitrogen Deposition. Science 326:835-837.
- Le Roux, G, S.V. Hansson, S.V. y Claust. A. 2016. Inorganic Chemistry in the Mountain Critical Zone: Are the Mountain Water Towers of Contemporary Society Under Threat by Trace Contaminants?. In: Mountain Ice and Water, p: 131-148. http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-63787-1.00003-2
- Mata, M.P., Moreno, A., Oliva-Urcia, B., Valero-Garcés, B., Rico, M.T., 2013. Registro histórico de la contaminación atmosférica por Pb en el Lago de Marboré (PN de Ordesa y Monte Perdido). Macla.
- Miró, A., & Ventura, M. (2013). Historical use, fishing management and lake characteristics explain the presence of non-native trout in Pyrenean lakes: Implications for conservation. Biological Conservation, 167, 17-24.
- Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T., Silvius, M. and Stringer, L. (Eds.) 2008. Assessment on Peatlands,

Biodiversity and Climate Change: Main Report.Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands
- International, Wageningen. 206 p.
- Schneider, P. and S. J. Hook. 2010. Space observations of inland water bodies show rapid surface warming since 1985. Geophys. Res. Lett. 37:L22405.
- Sommaruga, R., B. Sattler, A. Oberleiter, A. Wille, S. Wögrath-Sommaruga, R. Psenner, M. Felip, L. Camarero, S. Pina, R. Gironés, and J. Catalan. 1999. An in situ enclosure experiment to test the solar UVB impact on plankton in a high-altitude mountain lake. II. Effects on the microbial food web. Journal of Plankton Research 21:859-876.
- Ventura, M., Camarero, L., Buchaca, T., Bartumeus, F., Livingstone, D. M. & Catalan, J. (2000). The main features of seasonal variability in the external forcing and dynamics of a deep mountain lake (Redó, Pyrenees). J.Limnol, 59, 97-108.

2.6 Cycle hydrologique et ressources en eau

- ACA - Agència Catalana de l'Aigua (2015), Pla de Gestió del Districte de Conca Fluvial de Catalunya 2016-2021. Barcelona: Generalitat de Catalunya.
- AEAG - Agence de l'eau Adour-Garonne, (2011), Changements climatiques et Eaux souterraines. Etat des connaissances sur le bassin Adour-Garonne, 122 p.
- Agarwal, A., Angeles, M.S.D., Bhatia, R., Chéret, I., Davila-Poblete, S., Falkenmark, M., Villarreal, F.G., Jønch-Clausen, T., Kadi, M.A., Kindler, J., Rees, J., Roberts, P., Rogers, P., Solanes, M., Wright, A., 2000. Integrated Water Resources Management. Technical Advisory Committee Background Papers, 4. Stockholm, Sweden, Global Water Partnership.
- Agarwal, A., Angeles, M.S.D., Bhatia, R., Chéret, I., Davila-Poblete, S., Falkenmark, M., Villarreal, F.G., Jønch-Clausen, T., Kadi, M.A., Kindler, J., Rees, J., Roberts, P., Rogers, P., Solanes, M., Wright, A., 2000. Integrated Water Resources Management. Technical Advisory Committee Background Papers, 4. Stockholm, Sweden, Global Water Partnership.
- Agència Catalana del Aigua (ACA). (2009) Aigua i canvi climàtic: Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya. Barcelona, Generalitat de Catalunya.
- Barnett, T. P., J. C. Adam, and D. P. Lettenmaier (2005), Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions, Nature, 438(11), 303-309.
- Batalla, R. J.; Gomez, C. M.; Kondolf, G. M. (2004). Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (Northeastern Spain). Journal of Hydrology, 290, p. 117–136.
- Beguería S., Campos P., Serrano R., Álvarez A. (2015) Producción, usos, renta y capital ambientales del agua en los sistemas forestales de Andalucía. En: Biodiversidad, usos del agua forestal y recolección de setas silvestres en los sistemas forestales de Andalucía (Campos P., Díaz M., eds). Memorias científicas de RECAMAN. Volumen 2. Memoria 2.2. Editorial CSIC, Madrid.
- Beguería S., Campos P., Serrano R., Álvarez A., 2015. Producción, usos, renta y capital ambientales del agua en los sistemas forestales de Andalucía. En: Biodiversidad, usos del agua forestal y recolección de setas silvestres en los sistemas forestales de Andalucía (Campos P., Díaz M., eds). Memorias científicas de RECAMAN. Volumen 2. Memoria 2.2. Editorial CSIC, Madrid.
- Beguería, S., López-Moreno, J. I., Lorente, A., Seeger, M., & García-Ruiz, J. M. (2003). Assessing the effect of climate oscillations and land-use changes on streamflow in the Central Spanish Pyrenees. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 32(4), 283-286.
- Berger, L., R. Speare, H. B. Hines, et al. 2004. Effect of Season and Temperature on Mortality in Amphibians due to Chytridiomycosis. Australian Veterinary Journal 82(7): 434–439.
- Blaustein, Andrew R., and Joseph M. Kiesecker. 2002. Complexity in Conservation: Lessons from the Global Decline of Amphibian Populations. Ecology Letters 5(4): 597–608.
- Buendia, C., Batalla, R. J., Sabater, S., Palau, A., and Marcé, R. (2016) Runoff Trends Driven by Climate and Afforestation in a Pyrenean Basin. Land Degrad. Develop., 27: 823–838. doi: 10.1002/ldr.2384.
- Buendía, C.; Bussi, G.; Tuset, J. [et al.] (2016). Effects of afforestation on runoff and sediment load in an upland Mediterranean catchment. Science of the Total Environment. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.07.005.
- Caballero, Y., S. Voirin-Morel, F. Habets, J. Noilhan, P. LeMoigne, A. Lehenaff, and A. Boone (2007), Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change, Water Resour. Res., 43, W07448, doi:10.1029/2005WR004192.
- Candela, l.; tamoh, K.; olivares, g. (2012). «Modelling impacts of climate change on water resour ces in ungauged and data-scarce watersheds. Application to the Siurana catchment (NE Spain)». Science of the Total Environment, 440, p. 253 260.
- Candela, L.; Tamoh, K.; Olivares, G. (2012). «Modelling impacts of climate change on water resources in ungauged and data-scarce watersheds. Application to the Siurana catchment (NE Spain). Science of the Total Environment, 440, p. 253-260.
- Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), 2015, The Ebro Water Management Plan. Zaragoza.
- CHE - Confederación Hidrográfica del Ebro (2005). Evaluación preliminar de la incidencia del cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca del Ebro (Clave 2005-PH-22-I). Oficina de Planificación Hidrológica, Condeferación Hidrográfica del Ebro. Zaragoza.
- de Mendoza Barberà, Guillermo. Los macro-invertebrados lacustres y el gradiente altitudinal en los Pirineos, 2013. Tesis

Doctoral, Universidad de Barcelona, Dept. de Ecología. http://hdl.handle.net/2445/45523.
- Dingman SL (2002) Physical Hydrology. 2nd ed. New Jersey, Prentice-Hall.
- Elsen, Paul R., and Morgan W. Tingley. 2015. Global Mountain Topography and the Fate of Montane Species under Climate Change. Nature Climate Change 5(8): 772–776.
- Gallart F and Llorens P (2003). Catchment Management under Environmental Change: Impact of Land Cover Change on Water Resources. Water International. 28: 334-340
- Gallart, F., Llorens, P., (2003), Catchment management under environmental change: Impact of land cover change on water resources. Water International, 28(3), p. 334-340.
- Gallart, F.; Delgado, J.; Beatson, S. J. V. [et al.] (2011). Analysing the effect of global change on the historical trends in water resources in the headwaters of the Llobregat and Ter river basins (Catalonia, Spain). Physics and Chemistry of the Earth, 36, p. 655-661.
- Gallart, Francesc, and Pilar Llorens. "Catchment management under environmental change: impact of land cover change on water resources." Water International 28.3 (2003): 334-340.
- Gallart, Francesc, and Pilar Llorens. "Observations on land cover changes and water resources in the headwaters of the Ebro catchment, Iberian Peninsula." Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 29.11 (2004): 769-773.
- García Ruiz, J.M.; Beguería, S.; López-Moreno, J.I.; Lorente Grima, A.; Seeger, M. (2001) Los recursos hídricos superficiales del Pirineo aragonés y su evolución reciente. 192, Geoforma Ediciones, Logroño.
- García-Ruiz JM, López-Moreno JI, Vicente SM, Lasanta-Martínez T, Beguería S. (2011) Mediterranean water resources in a global change scenario. Earth Science Reviews, 105(3-4), 121–139.
- Giuntoli I. et Renard B. (2010). Rapport ONEMA–Cemagref: Identification des impacts hydrologiques du changement climatique: constitution d'un réseau de référence pour la surveillance des étiages.
- Gomà J, Rimet F, Cambra J, Hoffmann L, Ector L. (2005). Diatom Communities and Water Quality Assessment in Mountain Rivers of the Upper Segre Basin (La Cerdanya, Oriental Pyrenees). Hydrobiologia. 551(1): 209–225.
- Green, T. R., M. Taniguchi, H. Kooi, J. J. Gurdak, D. M. Allen, K. M. Hiscock, H. Treidel and A. Aureli (2011), Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater, J. of. Hydr., 405(3–4), 532-560, doi:10.1016/j.jhydrol.2011.05.002.
- Habets, F., Boé, J., Déqué, M., Ducharne, A., Gascoin, S., Hachour, A., Martin, E., Pagé, C., Sauquet, E., Terray, L. Thiéry, D., Oudin, L., Viennot, P. (2013), Impact of climate change on the hydrogeology of two basins in northern France, 121 (4), 771-785.
- Hari, R.E., D.M. Livingstone, R. Siber, P. Burkhardt-Holm, & H. Güttinger, 2006. Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. Global Change Biology, 12: 10-26.
- Hauer, F. R., J. S. Baron, D. H. Campbell, K. D. Fausch, S. W. Hostetler, G. H. Leavesley, P.R. Leavitt, D. M. McKnight, and J. A. Stanford (1997), Assessment of climate change and freshwater ecosystems of the Rocky Mountains, USA and Canada, Hydrol. Processes, 11, 903-924.
- Healy RW & Cook PG (2002) Using groundwater levels to estimate recharge. Hydrogeology Journal 10: 91–109.
- Huerta-Fontela M, Galceran MT, Ventura F. (2008). Stimulatory drugs of abuse in surface waters and their removal in a conventional drinking water treatment plant. Environmental Science and Technology. 42(18): 6809-16
- Hunt, R., Jardine, T., Hamilton, S., Bunn, S., Knowledge, T.R.C., Knowledge, T.R.C., (2012). Temporal and spatial variation in ecosystemmetabolism and food web carbon transfer in a wet-dry tropical river. Freshw. Biol. 57, 435–450.
- Iglesias A, Garrote L, Flores F, Moneo M. (2007). Challenges to Manage the Risk of Water Scarcity and Climate Change in the Mediterranean. Water Resources Management. 21(5): 775–788
- IHOBE-Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco (2017). Colección KLIMATEK: Vulnerabilidad hídrica: de las tendencias del pasado reciente a las del futuro. Informe elaborado por el Grupo de Procesos Hidro-Ambientales de la Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU) (www.ihobe.eus/Publicaciones).
- J. Boé, L. Terray, E. Martin, F. Habets (2009). Projected changes in components of the hydrological cycle in French river basins during the 21st century. Water Resources Research 45(8).
- J.I. López-Moreno, S.M. Vicente-Serrano, J. Zabalza, J. Revuelto, M. Gilaberte, C. Azorín-Molina, E. Morán-Tejeda, J.M. García-Ruiz, C. Tague. Respuesta hidrológica del Pirineo central al cambio ambiental proyectado para el siglo XXI. Pirineos, 169, dec. 2014. ISSN 1988-428.
- Jyrkama IM and Sykes JF (2007).The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the grand river watershed. Journal of Hydrology 338: 237–250.
- K. Stahl, H. Hisdal, J. Hannaford, L. Tallaksen, H. Van Lanen. (2010) Streamflow trends in Europe: evidence from a dataset of near-natural catchments. Hydrology and Earth System Sciences, 14, 2367–2382.
- Kim, J. H.; Jackson, R. B. (2012). A global analysis of groundwater recharge for vegetation, climate, and soils. Vadose Zone Journal, 11(1). DOI: 10.2136/vzj2011.0021RA.
- Kovach RP, Gharrett AJ, Tallmon DA. Genetic change for earlier migration timing in a pink salmon population. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences. 2012; 279(1743):3870-3878. doi:10.1098/rspb.2012.1158.
- Kuusisto E (1984) Snow accumulation and snow melt in Finland. Helsinki Finland, National Board of Waters, Publications of

the Water Research Institute 55.
- Le Treut, H. (2013) Les impacts du changement climatique en Aquitaine: un état des lieux scientifique. Pessac: Presses Universitaires de Bordeaux: LGPA-Editions, 365 p. (Dynamiques environnementales, HS 2013).
- Le Treut, H. Les impacts du changement climatique en Aquitaine: un état des lieux scientifique. Presses universitaires de Bordeaux; 2013.
- Lee LJE, Lawrence DSL and Price M (2006) Analysis of water level response to rainfall and implications for recharge pathways in the Chalk aquifer, SE England. Journal of Hydrology 330: 604–620.
- Lespinas F, Ludwig W, Heussner S (2014) Hydrological and climatic uncertainties associated with modeling the impact of climate change on water resources of small Mediterranean coastal rivers. Journal of Hydrology 511:403–422.
- Lespinas, F., Ludwig, W. & Heussner, S. (2010). Impact of recent climate change on the hydrology of coastal Mediterranean rivers in Southern France. Climatic Change 99:425, https://doi.org/10.1007/s10584-009-9668-1.
- López-Moreno, J. I. (2005). Recent variations of snowpack depth in the Central Spanish Pyrenees. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 37(2), 253-260.
- López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Moran-Tejeda, E., Zabalza, J., Lorenzo-Lacruz, J., and García-Ruiz, J. M. (2011) Impact of climate evolution and land use changes on water yield in the ebro basin, Hydrology and Earth System Sciences, 15, 311–322.
- López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Moran-Tejeda, E., Zabalza, J., Lorenzo-Lacruz, J., and García-Ruiz, J. M. (2011) Impact of climate evolution and land use changes on water yield in the ebro basin, Hydrol. Earth Syst. Sci., 15, 311-322, https://doi.org/10.5194/hess-15-311-2011.
- López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Zabalza, J., Revuelto, J., Gilaberte, M., Azorín-Molina, C., Morán-Tejeda, E., García-Ruiz, J. M. & Tague, C. (2014). Respuesta hidrológica del Pirineo central al cambio ambiental proyectado para el siglo XXI. Pirineos, 169, e004.
- López-Moreno, J.I. (2005). Recent variations of snowpack depth in the Central Spanish Pyrenees. Artic, Antartic, and Alpine Research, 37(2), 253–260.
- Lopez-Moreno, J.I., Goyette, S., Beniston, M. (2009). Impact of climate change on snowpack in the Pyrenees: Horizontal spatial variability and vertical gradients. Journal of Hydrology, 374(3–4), 384–396.
- Manzano, A. (2009a). Exemples de modelització hidrològica en règim mitjà dels rius catalans en escenaris futurs. In : Aigua i canvi climàtic: Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya. Barcelona: Generalitat de Catalunya. Agència Catalana de l'Aigua, p. 127-141
- Marcarelli, A., Van Kirk, R., Baxter, C., 2010. Predicting effects of hydrologic alteration and climate change on ecosystem metabolism in a western U.S. river. Ecol. Appl. 20, 2081–2088.
- Martin-Vide, J.M. (coord.) (2016), Tercer informe sobre el canvi climàtic a Catalunya, Barcelona, Government of Catalonia, ISBN 978-84-9965-317-4, 615 p.
- Mas-Pla, J. (2005). «Recursos hídrics, dinàmica hidrològica i canvi climàtic». A: Llebot, J. E. (ed.) Informe sobre el canvi climàtic a Catalunya. Barcelona: Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible: Institut d'Estudis Catalans, p. 485-516.
- Matthew J. Troia, Michael A. Denk, Keith B. Gido. Temperature-dependent performance as a driver of warm-water fish species replacement along the river continuum. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2016, 73:394-405, https://doi.org/10.1139/cjfas-2015-0094.
- Meaurio, M. (2017). Assessing the hydrological response from an ensemble of climate projection in the transition zone of the Atlantic region (Bay of Biscay). Evaluation of SWAT model performance in small and forested catchments (Tesis doctoral no publicada). University of the Basque Country.
- Murray, Kris A., Richard W. R. Retallick, Robert Puschendorf, et al. 2011. Assessing Spatial Patterns of Disease Risk to Biodiversity: Implications for the Management of the Amphibian Pathogen, Batrachochytrium Dendrobatidis: Spatial Patterns of Disease Risk. Journal of Applied Ecology 48(1): 163–173.
- Nogués-Bravo, D., M.B. Araújo, M.P. Errea, and J.P. Martínez-Rica. 2007. Exposure of Global Mountain Systems to Climate Warming during the 21st Century. Global Environmental Change 17(3–4): 420–428.
- Ortuño, f.; Jódar, J.; carrera, J. (2009). «Canvi climàtic i recàrrega d'aqüífers a Catalunya. A: agència catalana de l'aigua. Aigua i canvi cli- màtic. Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya. Barcelona: Generalitat de Catalunya: Agència Catalana de l'Aigua, p. 143152.
- P. Quintana-Seguí, A. Ribes, E. Martin, F. Habets, J. Boé. (2010) Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins. Journal of Hydrology, 383(1–2), 111–124.
- Pascual, D., Pla, E., Lopez-Bustins, J. A., et al. (2014). Impacts of climate change on water resources in the Mediterranean Basin. Hydrological Sciences Journal. DOI: 10.1080/02626667.2014.947290.
- Pérez-Zanón Nuria, Javier Sigró, Linden Ashcroft, (2017). Temperature and precipitation regional climate series over the central Pyrenees during 1910-2013. International Journal of Climatology; 37 (4): 1922 DOI: 10.1002/joc.4823
- Petrovic M, Ginebreda A, Acuna V, Batalla RJ, Elosegi A, Guasch H, de Alda ML, Marce R, Munoz I, Navarro-Ortega A et al.

(2011). Combined scenarios of chemical and ecological quality under water scarcity in Mediterranean rivers. Trac-Trends in Analytical Chemistry. 30(8):1269-1278
- Piotrowski, Jeffrey S., Seanna L. Annis, and Joyce E. Longcore. 2004. Physiology of Batrachochytrium Dendrobatidis, a Chytrid Pathogen of Amphibians. Mycologia 96(1): 9.
- Plan Hidrológico del Ebro 2015-2021, Confederación Hidrográfica del Ebro, Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente. Real Decreto 1/2016, de 8 de enero, BOE» núm. 16, de 19 de enero de 2016, páginas 2972 a 4301. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Rutulis, M (1989) Groundwater drought sensitivity of southern Manitoba. Canadian Water Resources Journal 4: 18–33.
- Samper, J., García Vera, M.A., Pisani, B., Alvares, D., Varela, A., y Losada, J.A. (2005). Modelos hidrológicos y Sistemas de Información Geográfica para la estimación de los recursos hídricos: aplicación de GIS-BALAN a varias cuencas Españolas. En: VII Jornadas de Zona no Saturada, ZNS'05, Coruña, 269-274.
- Scheele, B. C., D. A. Driscoll, J. Fischer, et al. 2015. Landscape Context Influences Chytrid Fungus Distribution in an Endangered European Amphibian: Chytrid Fungus in Ephemeral Pond-Breeding Amphibians. Animal Conservation 18(5): 480–488.
- Sophocleous M (2002) Interaction between groundwater and surface water: the state of the science. Hydrogeology Journal 10: 52–67.
- Sutinen R, Hänninen P & Venäläinen A (2007) Effect of mild winter events on soil water content beneath snowpack. Cold regions science and technology. DOI:10.1016/2007.05.014.
- Thompson, R., M. Ventura & L. Camarero, 2009. On the climate and weather of mountain and sub-arctic lakes in Europe and their susceptibility to future climate change. Freshwater Biology 54:2433-2451.
- Val J, Chinarro D, Rosa Pino M, Navarro E. (2016a). Global change impacts on river ecosystems: A high-resolution watershed study of Ebro river metabolism. Science of the Total Environment. 569:774-783
- Val J, Muniz S, Goma J, Navarro E. (2016c). Influence of global change-related impacts on the mercury toxicity of freshwater algal communities. Science of the Total Environment. 540:53-62
- Val J, Pino R, Chinarro D. (2017). Development of a new methodology for the creation of water temperature scenarios using frequency analysis tool. Sciences of the Total Environment, in press, DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.06.064
- Val J, Pino R, Navarro E, Chinarro D. (2016b). Addressing the local aspects of global change impacts on stream metabolism using frequency analysis tools. Science of the Total Environment. 569:798-814
- Van der Kamp G and Maathuis H (1991) Annual fluctuations of groundwater levels as a result of loading by surface moisture. Journal of Hydrology 127: 137–152.
- Veijalainen N (2008) Climate change effects on water resources and regulation in Eastern Finland. Nordic Hydrological Conference 2008.
- Viviroli D., Weingartner R. (2008) "Water Towers"—A Global View of the Hydrological Importance of Mountains. In: Wiegandt E. (ed) Mountains: Sources of Water, Sources of Knowledge. Advances in Global Change Research, vol 31. Springer, Dordrecht.
- Wake, David B., and Vance T. Vredenburg. 2008. Are We in the Midst of the Sixth Mass Extinction? A View from the World of Amphibians. Proceedings of the National Academy of Sciences 105(Supplement 1): 11466–11473.
- Winter, T. C. (1999) Relation of streams, lakes, and wetland to groundwater flow systems. Hydrogeology Journal 7: 28–45.
- Woodhams, Douglas C., Ross A. Alford, Cheryl J. Briggs, Megan Johnson, and Louise A. Rollins-Smith. 2008. Life-History Trade-Offs Influence Disease in Changing Climates: Strategies of an Amphibian Pathogen. Ecology 89(6): 1627–1639.
- Yvan Caballero, Sophie Voirin-Morel, Florence Habets, Joël Noilhan, Patrick LeMoigne, Alain Lehenaff, Aaron Boone. (2007) Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change. Water Resources Research, 43, W07448.
- Zabaleta, A., Meaurio, M., Uriarte, J.A., Morales, T., Antigüedad, I., 2017. Hydric vulnerability: recent hydrologic trends in the Bay of Biscay. 2nd International colloquium on Climate Change in mountain areas PYRADAPT 2017. Proceedings 72-76 (https://drive.google.com/file/d/1vBJ2pKzIvF-5X7E4Ij2gCxSekqkoiz-K/view).

3 Impacto del cambio climático en los sectores socioeconómicos

3.1 Turismo

- Chueca J, Julian A, Lopez-Moreno JI. 2007. Recent evolution (1981–2005) of the Maladeta glaciers, Pyrenees, Spain: extent and volume losses and their relation with climatic and topographic factors. Journal of Glaciology 53 (183): 547–557.
- Déqué, M., Martin, E., & Kitova, N. (2011). Response of the snow cover over France to climate change. Res Atmospheric Ocean Model, 41(7), 11-2.
- EEA, 2017. Climate change impacts and vulnerabilities in Europe 2016. An indicator-based report. No 1/2017
- ESPON Climate, 2011, Climate change and territorial effects on regions and local economies, Scientific Report, Institute of

Spatial Planning (IRPUD), TU Dortmund.
- Eurostat, 2015c, 'Tourism statistics at regional level-Statistics explained' (http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Tourism_statistics_at_regional_level).
- Del Rio, M., Rico, I., Serrano, E., Tejado, J.J. 2014. Applying GPR and Laser Scanner Techniques to Monitor the Ossoue Glacier (Pyrenees). JEEG, December 2014, Volume 19, Issue 4, pp. 239–248
- Franch, F. S., Villoslada, G. S., Bonet, F. V., & Sellés, C. G. (2015). Contribución al análisis nivométrico dLos Pirineos los Pirineos oriental: La Molina, periodo 1956-1996. In Clima, sociedad, riesgos y ordenación del territorio (pp. 365-376).
- Gilaberte-Búrdalo, M., López-Moreno, J. I., Morán-Tejeda, E., Jerez, S., Alonso-González, E., López-Martín, F., & Pino-Otín, M. R. (2017). Assessment of ski condition reliability in the Spanish and Andorran Pyrenees for the second half of the 20th century. Applied Geography, 79, 127-142.
- Houghton, J. T. (2001). Climate change 2001: The scientific basis: Contribution of Working Group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press.
- Keiler, M., Knight, J., & Harrison, S. (2010). Climate change and geomorphological hazards in the eastern European Alps. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 368(1919), 2461-2479.
- López-Moreno, J. I., Goyette, S., & Beniston, M. (2009). Impact of climate change on snowpack in the Pyrenees: Horizontal spatial variability and vertical gradients. Journal of Hydrology, 374(3), 384-396.
- López-Moreno JI, Pomeroy J, Revuelto J, Vicente-Serrano SM (2013) Response of snow
- processes to climate change: spatial variability in a small basin in the Spanish Pyrenees. Hydrol Process 27(18):2637–2650
- López-Moreno, J. I., Revuelto, J., Rico, I., Chueca-Cía, J., Julián, A., Serreta, A., ... & García-Ruiz, J. M. (2016). Thinning of the Monte Perdido Glacier in the Spanish Pyrenees since 1981. The Cryosphere, 10(2), 681-694.
- Nogués-Bravo, D., Araújo, M. B., Errea, M. P., & Martinez-Rica, J. P. (2007). Exposure of global mountain systems to climate warming during the 21st Century. Global Environmental Change, 17(3), 420-428
- Perrels, A., Heyndrickx, C., Prettenthaler, F., Kortschak,D., Ciari, F., Bösch, P., Kiviluoma, J., Azevedo, M., Ekholm,T., Crawford-Brown, D. and Thompson, A., 2015, Sectoraland cross-cutting multi-sector adaptation strategiesfor energy, transport and tourism, ToPDAd project, Deliverable 2.4
- Pons, M., Moreno, J. L., Esteban, P., Macià, S., Gavaldà, J., García, C., ... & Jover, E. (2014). Climate change influence on winter tourism in the Pyrenees. Experience from the NIVOPYR research project.
- Pons, M., López-Moreno, J. I., Rosas-Casals, M. and Jover, È., (2015), 'The vulnerability of Pyrenean ski resorts to climate-induced changes in the snowpack', Climatic Change 131(4), 591–605 (doi: 10.1007/s10584-015-1400-8).
- Raia, S., Alvioli, M., Rossi, M., Baum, R. L., Godt, J. W., & Guzzetti, F. (2013). Improving predictive power of physically based rainfall-induced shallow landslide models: a probabilistic approach. arXiv preprint arXiv:1305.4803.
- René, P. 2017. Les Glaciers des Pyrénées françaises Rapport d'étude 2016 - 2017. Association Moraine
- Rickards, L., Howden, M., & Crimp, S. (n.d.). Channelling the future? The use of seasonal climate forecasts in climate adaptation. Climate Change Impact and Adaptation in Agricultural Systems, 233-252. doi:10.1079/9781780642895.0233
- Rico, I., Serrano, E., López Moreno, I., Revuelto, J., Atkinson, a., De San José, J.J. 2014. El glaciar de la maladeta (Pirineos): Evolución del frente y variabilidad ambiental (2010-2013) The Maladeta Glacier (Pyrenees): Front evolution and environmental variability. XIII Reunión Nacional de Geomorfología , Cáceres , 535–538.
- Rico, I., Serrano, E., San José, J.J. & Del Río, M., 2016. Responses to Climatic Changes since the Little Ice Age on La Paul Glacier (Central Pyrenees). Krei, 13: 105-116. http://hdl.handle.net/10810/18801.
- Rico, I., Izagirre, E., Serrano, E., López-Moreno, J. I. (2017). Current glacier area in the Pyrenees: an updated assessment 2016. Pirineos, 172, e029. doi: http://dx.doi.org/10.3989/Pirineos.2017.172004
- Rico, I., F. Magnin, J.I. López-Moreno, E. Alonso, J. Revuelto & E. Serrano: First evidence of permafrost occurrence in a steep rock wall in the Pyrenees: The Vignemale North Face. VI Iberian Congress of the International Permafrost Association, June 2017 Mieres (Spain).
- Rixen, C., Teich, M., Lardelli, C., Gallati, D., Pohl, M., Pütz, M., & Bebi, P. (2011, 08). Winter Tourism and Climate Change in the Alps: An Assessment of Resource Consumption, Snow Reliability, and Future Snowmaking Potential. Mountain Research and Development, 31(3), 229-236. doi:10.1659/mrd-journal-d-10-00112.1
- Rodrigues, L. M. C., Freire-González, J., Puig, A. G., & Puig-Ventosa, I. Costes y beneficios de la adaptación al cambio climático en el sector del turismo de nieve en España1.
- Rutty, M., D. Scott, P. Johnson, E. Jover, R. Steiger, and M. Pons. (2015). Behavioural adaptation of skiers to climatic variability and change in Ontario, Canada. Journal of Outdoor Recreation and Tourism. doi: 10.1016/j.jort.2015.07.002
- Steiger, R., & Abegg, B. (2013).The sensitivity of Austrian ski areas to climate change. Tourism Planning & Development, 10(4), 480–493.
- Steiger, R., & Stötter, J. (2013, 11). Climate Change Impact Assessment of Ski Tourism in Tyrol. Tourism Geographies, 15(4), 577-600. doi:10.1080/14616688.2012.762539
- Stewart, E. J., Wilson, J., Espiner, S., Purdie, H., Lemieux, C., & Dawson, J. (2016). Implications of climate change for glacier tourism. Tourism Geographies, 18(4), 377-398.

3.2 Agropastoralisme

- AVEMAC project; JRC., 2012
- Bernues, A., Rodríguez-Ortega, T., Ripoll-Bosch, R., & Alfnes, F. (2014). Socio-cultural and economic valuation of ecosystem services provided by Mediterranean mountain agroecosystems. PloS one, 9(7), e102479.
- Dalin, P., & Nylin, S. (2012). Host-plant quality adaptively affects the diapause threshold: evidence from leaf beetles in willow plantations. Ecological Entomology, 37(6), 490-499.
- De los Santos, B., Chamorro, M., Medina-Mínguez, J. J., Capote, N., Aguado, A., & Romero, F. (2016). 12 Emerging Diseases in Strawberry Crop: Charcoal Rot and Fusarium Wilt. Strawberry: Growth, Development and Diseases, 212.
- Donatelli, M., Srivastava, A. K., Duveiller, G., & Niemeyer, S. (2012). Estimating impact assessment and adaptation strategies under climate change scenarios for crops at EU27 scale
- Donatelli, M., Srivastava, A. K., Duveiller, G., Niemeyer, S., & Fumagalli, D. (2015). Climate change impact and potential adaptation strategies under alternate realizations of climate scenarios for three major crops in Europe. Environmental Research Letters, 10(7), 075005.
- Dumont, B., Andueza, D., Niderkorn, V., Lüscher, A., Porqueddu, C., & Picon-Cochard, C. (2015). A meta-analysis of climate change effects on forage quality in grasslands: specificities of mountain and Mediterranean areas. Grass and Forage Science, 70(2), 239-254.
- Estrada-Peña, A., Ayllón, N., & De La Fuente, J. (2012). Impact of climate trends on tick-borne pathogen transmission. Frontiers in physiology, 3, 64.
- Fraga, H., García de Cortázar Atauri, I., Malheiro, A. C., & Santos, J. A. (2016). Modelling climate change impacts on viticultural yield, phenology and stress conditions in Europe. Global change biology, 22(11), 3774-3788.
- Felten, B., Duru, M., Martin, G., Sautier, M., (2011). Changement climatique en Midi- Pyrénées et conséquences sur la croissance de l'herbe. Projet Climfourel, Midi- Pyrénées , Série Les Focus PSDR3.
- Garibaldi, A., & Gullino, M. L. (2009, September). Emerging soilborne diseases of horticultural crops and new trends in their management. In VII International Symposium on Chemical and Non-Chemical Soil and Substrate Disinfestation 883 (pp. 37-47).
- García, M. B., Alados, C. L., Antor, R., Alonso, J. L. B., Camarero, J. J., Carmena, F., ... & Gartzia, M. (2016). Integrando escalas y métodos LTER para comprender la dinámica global de un espacio protegido de montaña: el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. Ecosistemas, 25(1), 19-30.
- Houghton, J. T. (2001). Climate change 2001: The scientific basis: Contribution of Working Group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press.
- Husaini, A. M., & Xu, Y. W. (2016). 14 Challenges of Climate Change to Strawberry Cultivation: Uncertainty and Beyond. Strawberry: Growth, Development and Diseases, 262.
- Iriso A, Bueno R, De las Heras E, Lucientes J, Molina R. (2017) Cambio climático en España y su influencia en las enfermedades de transmisión vectorial. Salud ambient.; 17(1):70-86.
- Jacquet, S., Huber, K., Pagès, N., Talavera, S., Burgin, L. E., Carpenter, S., ... & Lhor, Y. (2016). Range expansion of the Bluetongue vector, Culicoides imicola, in continental France likely due to rare wind-transport events. Scientific reports, 6, 27247.
- Klapwijk, M. J., Csóka, G., Hirka, A., & Björkman, C. (2013). Forest insects and climate change: long-term trends in herbivore damage. Ecology and evolution, 3(12), 4183-4196.
- Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., ... & Alewell, C. (2015). The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. Environmental Science & Policy, 54, 438-447.
- Ponti, L., Gutierrez, A. P., Ruti, P. M., & Dell'Aquila, A. (2014). Fine-scale ecological and economic assessment of climate change on olive in the Mediterranean Basin reveals winners and losers. Proceedings of the National Academy of Sciences, 111(15), 5598-5603.
- Ponti, L., Gutierrez, A. P., Ruti, P. M., & Dell'Aquila, A. (2014). Fine-scale ecological and economic assessment of climate change on olive in the Mediterranean Basin reveals winners and losers. Proceedings of the National Academy of Sciences, 111(15), 5598-5603.
- Trnka, M., Hlavinka, P., & Semenov, M. A. (2015). Adaptation options for wheat in Europe will be limited by increased adverse weather events under climate change. Journal of the Royal Society Interface, 12(112), 20150721.
- Rickards, L., Howden, M., & Crimp, S. (n.d.). Channelling the future? The use of seasonal climate forecasts in climate adaptation. Climate Change Impact and Adaptation in Agricultural Systems, 233-252. doi:10.1079/9781780642895.0233
- Stoeckli, S., Hirschi, M., Spirig, C., Calanca, P., Rotach, M. W., & Samietz, J. (2012). Impact of climate change on voltinism and prospective diapause induction of a global pest insect–Cydia pomonella (L.). PloS one, 7(4), e35723.
- Tanmoy, D., Majumdar, M. H. D., Devi, R. K. T., & Rajesh, T. (2016). Climate change impacts on plant diseases. SAARC Journal of Agriculture, 14(2), 200-209.
- Tanasijevic, L., Todorovic, M., Pereira, L. S., Pizzigalli, C., & Lionello, P. (2014). Impacts of climate change on olive crop

evapotranspiration and irrigation requirements in the Mediterranean region. Agricultural water management, 144, 54-68.
- Trnka, M., Rötter, R. P., Ruiz-Ramos, M., Kersebaum, K. C., Olesen, J. E., Žalud, Z., & Semenov, M. A. (2014). Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change. Nature Climate Change, 4(7), 637-643.
- Williams, H. W., Cross, D. E., Crump, H. L., Drost, C. J., & Thomas, C. J. (2015). Climate suitability for European ticks: assessing species distribution models against null models and projection under AR5 climate. Parasites & vectors, 8(1), 440.

3.3 Énergie

- Bangash, R. F., Passuello, A., Sanchez-Canales, M., Terrado, M., López, A., Elorza, F. J., ... & Schuhmacher, M. (2013). Ecosystem services in Mediterranean river basin: climate change impact on water provisioning and erosion control. Science of the Total Environment, 458, 246-255.
- Beniston, M., Stoffel, M., Clarvis, M. H., & Quevauviller, P. (2014). Assessing climate change impacts on the quantity of water in Alpine regions: Foreword to the adaptation and policy implications of the EU/FP7 "ACQWA" project. Environmental Science & Policy, 43, 1-4.
- Bloom, A., V. Kotroni and K. Lagouvardos (2008). "Climate change impact of wind energy availability in the Eastern Mediterranean using the regional climate model PRECIS." Natural Hazards and Earth System Sciences 8(6): 1249e1257.
- Crook, J. A., Jones, L. A., Forster, P. M., & Crook, R. (2011). Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output. Energy & Environmental Science, 4(9), 3101-3109.
- Dowling, P. (2013). The impact of climate change on the European energy system. Energy Policy, 60, 406-417.
- Flörke, M., Bärlund, I., & Kynast, E. (2012). Will climate change affect the electricity production sector? A European study. Journal of Water and Climate Change, 3(1), 44-54.
- Gaetani, M., T. Huld, E. Vignati, F. Monforti-Ferrario, A. Dosio and F. Raes (2014). "The near future availability of photovoltaic energy in Europe and Africa in climate-aerosol modeling experiments." Renewable and Sustainable Energy Reviews 38: 706e716.
- Hueging, H., Haas, R., Born, K., Jacob, D., & Pinto, J. G. (2013). Regional changes in wind energy potential over Europe using regional climate model ensemble projections. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 52(4), 903-917.
- Koch, H., Vögele, S., Hattermann, F. F., & Huang, S. (2015). The impact of climate change and variability on the generation of electrical power. Meteorologische Zeitschrift, 24, 173-188.
- López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Zabalza, J., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C., & Morán-Tejeda, E. (2013). Hydrological response to climate variability at different time scales: A study in the Ebro basin. Journal of hydrology, 477, 175-188.
- López-Moreno, J. I., Pomeroy, J. W., Revuelto, J., & Vicente-Serrano, S. M. (2013). Response of snow processes to climate change: spatial variability in a small basin in the Spanish Pyrenees. Hydrological Processes, 27(18), 2637-2650.
- Mideksa, T. K., & Kallbekken, S. (2010). The impact of climate change on the electricity market: A review. Energy Policy, 38(7), 3579-3585.
- Morán-Tejeda, E., López-Moreno, J. I., & Sanmiguel-Vallelado, A. (2017). Changes in climate, snow and water resources in the Spanish Pyrenees: observations and projections in a warming climate. In High Mountain Conservation in a Changing World (pp. 305-323). Springer, Cham.
- Pereira-Cardenal, S. J., Madsen, H., Arnbjerg-Nielsen, K., Riegels, N., Jensen, R., Mo, B., ... & Bauer-Gottwein, P. (2014). Assessing climate change impacts on the Iberian power system using a coupled water-power model. Climatic change, 126(3-4), 351-364.
- Santos, J. A., Rochinha, C., Liberato, M. L. R., Reyers, M., & Pinto, J. G. (2015). Projected changes in wind energy potentials over Iberia. Renewable Energy, 75, 68-80.
- Van Vliet, M. T., Vögele, S., & Rübbelke, D. (2013). Water constraints on European power supply under climate change: impacts on electricity prices. Environmental Research Letters, 8(3), 035010.
- Van Vliet, M. T., Sheffield, J., Wiberg, D., & Wood, E. F. (2016). Impacts of recent drought and warm years on water resources and electricity supply worldwide. Environmental Research Letters, 11(12), 124021.

3.4 Risques naturels

- Agence de l'Eau Adour-Garonne, (2014). Analyse post-crue des cours de la Garonne amont, de la Pique, des Nestes et l'amont du Gave de Pau. ftp://oai:oai@ftp.eau-adour-garonne.fr/oaidocuments/60739_GAR_PYR_32577_1_GeoDiag_AEAG-PostCrue_Rapport_2014.pdf
- CGEDD – Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable (2015), Evaluation du plan national d'adaptation au changement climatique, Rapport n° 010178-01, 203 p.

- CGET (2015), L'adaptation des territoires au changement climatique, 210 p., http://www.cget.gouv.fr/sites/cget.gouv.fr/files/atoms/files/etude_changement-climatique.pdf
- Collins, M., R. Knutti, J. Arblaster, J.-L. Dufresne, T. Fichefet, P. Friedlingstein, X. Gao, W.J. Gutowski, T. Johns, G. Krinner, M. Shongwe, C. Tebaldi, A.J. Weaver and M. Wehner, (2013): Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- DIACT (2008), Changement climatique dans le massif alpin français : état des lieux et propositions pour le Commissariat à l'Aménagement et au développement des Alpes, rapport rédigé par Philippe Langevin, Robert Mugnier et Emmanuelle Marcelpoil, 74 p., http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/etude_CADEPA_climat_cle055915.pdf
- EEA (2010), Mapping the impacts of natural hazards and technological accidents in Europe. An overview of the last decade. EEA Technical report, No 13/2010, ISSN 1725-2237;
- EEA (2017a), Climate change adaptation and disaster risk reduction in Europe. Enhancing coherence of the knowledge base, policies and practices, EEA Report No 15/2017, ISSN 1977-8449
- EEA (2017b), Financing urban adaptation to climate change, EEA Report No 2/2017, European Environment Agency.
- EU (2015), Towards an EU Research and Innovation policy agenda for Nature-Based Solutions & Re-Naturing Cities Final Report of the Horizon 2020 Expert Group on 'Nature-Based Solutions and Re-Naturing Cities, Directorate-General for Research and Innovation 2015 Climate Action, Environment, Resource Efficiency and Raw Materials EN (full version).
- Hartmann, D.L., A.M.G. Klein Tank, M. Rusticucci, L.V. Alexander, S. Brönnimann, Y. Charabi, F.J. Dentener, E.J. Dlugokencky, D.R. Easterling, A. Kaplan, B.J. Soden, P.W. Thorne, M. Wild and P.M. Zhai, (2013): Observations: Atmosphere and Surface. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC, (2012). Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaption (SREX), Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, 582 pp.
- IPCC, (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/
- Lempert, R. J., Popper, S., W., Bankes, S., C., (2003). Shaping the next one hundred years: new methods for quantitative, long-term policy analysis. Rand Corporation, 187 p., https://www.rand.org/pubs/monograph_reports/MR1626.html
- Martin-Vide, J.M. (coord.) (2016), Tercer informe sobre el canvi climàtic a Catalunya, Barcelona, Government of Catalonia, ISBN 978-84-9965-317-4, 615 p.
- MEDCIE (2008), Etude des effets du changement climatique sur le Grand Sud-Est - Etape 1, 98 p. http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/MEDCIE_RapportSynthese_040608_cle0ac9a9.pdf
- MEDDTL (2011), Plan national d'adaptation de la France aux effets du changement climatique (20112015), 187 p.
- ONERC – Observatoire National sur les Effets du Changement Climatique, (2007), Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique, 85 p., La documentation Française, ISBN : 978-2-11-00-6618-0
- ONERC, (2009), Changement Climatique : Coûts des impacts et pistes d'adaptation, Rapport au Premier ministre et au Parlement. La documentation Française.
- OPCC (2013), Etude sur l'adaptation au changement climatique dans les Pyrénées: Analyse des démarches d'adaptation dans les Pyrénées. 45 p. www.opcc-ctp.org
- Seneviratne, S. I., et al., (2012): Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [C. B. Field, et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, pp. 109–230.
- UNEP (2014), Green Infrastructure Guide for Water Management: Ecosystem-based management approaches for water-related infrastructure projects, pp. 76, ISBN: 978-92-807-3404-1

Thèse

- Boudou, M., (2015). Approche multidisciplinaire pour la caractérisation d'inondations remarquables Enseignements tirés de neuf évènements en France. PhD Theses, Université Paul Valéry – Montpellier III. 184 pp.
- Copons, R. (2004): Avaluació de la perillositat de caigudes de blocs rocosos a Andorra la Vella (Principat d'Andorra). Ph Thèses. Université de Barcelone, 244pp. +12 maps.
- González García, M. (2014). La alta montaña periglaciar en el pirineo central español: procesos, formas y condiciones ambientales. PhD Thesis, Universidad de Málaga, Málaga, 900 pp.

Publications Scientifiques

- Allen, S. K., Fiddes, J., Linsbauer, A., Randhawa, S. S., Saklani, B., and Salzmann, N. (2016) Permafrost studies in Kullu district, Himachal Pradesh, Curr. Sci., 111, 557–560, 2016
- Álvarez-Rodríguez, J., M.C. Llasat, T. Estrela, (2017). Analysis of geographic and orographic influence in Spanish monthly precipitation. International Journal of Climatology, DOI:10.1002/joc.5007
- Berthet, C., J. Dessens, J.L. Sanchez (2011), Regional and yearly variations of hail frequency and intensity in France, Atmospheric Research, 100, 391–400.
- Bodin X., Krysiecki J.M., Schoeneich P., Le Roux O., Lorier L., Echelard T., Peyron M., Walpersdorf A. (2016). The collapse of the Bérard rock glacier (Southern French Alps) in 2006. Permafrost and Periglacial Processes. DOI: 10.1002/ppp.1887
- Boeckli, L., Brenning, A., Gruber, S., et Noetzli, J. (2012) – Permafrost distribution in the European Alps: calculation and evaluation of an index map and summary statistics. The Cryosphere 6, 807–820. doi:10.5194/tc-6-807-2012
- Bulygina, N., McIntyre, N., and Wheater, H., (2009), Conditioning rainfall-runoff model parameters for ungauged catchments and land management impacts analysis, Hydrol. Earth Syst. Sci., 13, 893–904, doi:10.5194/hess-13-893-2009, 2009.
- Bulygina, N., McIntyre, N., and Wheater, H. (2011): Bayesian conditioning of a rainfall-runoff model for predicting flows in ungauged catchments and under land use changes, Water Resour. Res., 47, W02503, doi:10.1029/2010WR009240, 2011.
- Crozier,M.J., (2010). Deciphering the effect of climate change on landslide activity: a review. Geomorphology 124, 260–267. http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.04.009
- Dumas, P., Hallegatte, S., Quintana-Seguì, P., and Martin, E. (2013): The influence of climate change on flood risks in France – first estimates and uncertainty analysis, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 13, 809–821, doi:10.5194/nhess-13-809-2013, 2013.
- Forzieri G, Feyen L, Russo S, Vousdoukas M, Alfieri L, Outten S, Migliavacca M, Bianchi A, Rojas R, Cid A., (2016), Multi-hazard assessment in Europe under climate change. Climatic Change 137:105–119
- García-Ruiz, J.M., White, S., Martí-Bono, C., Valero, B., Errea, M.P., & Gómez Villar, A. (2004): La avenida del Barranco de Arás y los riesgos hidrológicos en el Pirineo Central español, in Geografia fisica de Aragon. Aspectos generals y tematicos, J.L. Peña, L.A. Longares y M. Sanchez (eds), Universidad de Zaragoza e Institucion Fernando el Catolico, Zaragoza, ISBN: 84-96214-29-X.
- Gariano, S. L. and Guzzetti, F. (2016), Landslides in a changing climate, Earth-Science Reviews, 162,227–252, http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011.
- Hall, J., Arheimer, B., Borga, M., Brázdil, R., Claps, P., Kiss, A., Kjeldsen, T. R., Kriaučiūnienė, J., Kundzewicz, Z. W., Lang, M., Llasat, M. C., MacDonald, N., McIntyre, N., Mediero, L., Merz, B., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Neuhold, C., Parajka, J., Perdigão, R. A. P., Plavcová, L., Rogger, M., Salinas, J. L., Sauquet, E., Schär, C., Szolgay, J., Viglione, A., Blöschl, G., (2014), Understanding Flood Regime Changes in Europe: A state of the art assessment. Hydrol. Earth Syst. Sci. 18, 2735-2772.
- Huggel, S., Clague, J.J., Korup, O., (2012). Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? Earth Surf. Process. Landf. 37, 77–91.http://dx.doi.org/10.1002/esp.2223.
- Huggel, C., Gruber, S., Korup, O., (2013). Landslide hazards and climate change in high mountains. In: Shroder, J., James, L.A., Harden, C.P., Clague, J.J. (Eds.), Treatise on Geomorphology of Human Disturbances, Climate Change, and Natural Hazards 13. Academic Press, San Diego CA, USA, pp. 288–301.
- Hürlimann, M.; Copons, R.; Altimir, J. (2006): Detailed debris flow hazard assessment in Andorra: A multidisciplinary approach, Geomorphology, 78, 359-372.
- Jomelli, V. (2012). Alpine debris flows. Science and Technology, 4, 162-164
- Kääb, A., Reynolds, J. M., and Haeberli,W. (2005) Glacier and permafrost hazards in high mountains, in Global Change and Mountain Regions: An Overview of Current Knowledge, 225–234, 2005.
- Keiler, M. and Fuchs, S. (2016) Vulnerability and exposure to geomorphic hazards – some insights from mountain regions, in Geomorphology and society, edited by: Meadows, M. and Lin, J.-C., Springer, Tokyo, 165–180
- Krautblatter, M., Huggel, C., Deline, P., and Hasler, A.: Research Perspectives on Unstable High-alpine Bedrock Permafrost: Measurement, Modelling and Process Understanding, Permafrost Periglac., 23, 80–88, https://doi.org/10.1002/ppp.740, 2012.
- López-Moreno, J. I., Begueria, S., and Garca-Ruiz, J. M., (2006), Trends in high flows in the central Spanish Pyrenees: response to climatic factors or to land use change?, Hydrolog. Sci. J., 51, 1039–1050, doi:10.1623/hysj.51.6.1039,
- Llasat, M.C., (1993), Les inondations de 1940 en catalogne espagnole. Les inondations semblables pendant les cinquante annees suivantes. L'aiguat del 40. Inundacions catastròfiques i polítiques de prevenció a la Mediterrània nord-occidental. Servei Geològic de Catalunya, 137-144. ISBN: 84-393-2642-4. D.L: B-29481-93. Barcelona, España.
- Llasat, M.C., M. Barriendos, Barrera, A., and 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. Special issue on Applications of palaeoflood hydrology and historical data in flood risk analysis, 313, 32-47
- Llasat, M. C., M. Llasat-Botija, O. Petrucci, A.A. Pasqua, J. Rosselló, F. Vinet, L. Boissier, (2013). Towards a database on societal impact of Mediterranean floods in the framework of the HYMEX project. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 13, 1–14

- Lorente. A., García-Ruiz. J.M., Beguería. S., Arnáez. J., (2002), Factors Explaining the Spatial Distribution of Hillslope Debris Flows. Mt. Res. Dev. 22. 32–39. doi:10.1659/0276
- Magnin, F., Josnin, J.-Y., Ravanel, L., Pergaud, J., Pohl, B., and Deline, P. (2017) Modelling rock wall permafrost degradation in the Mont Blanc massif from the LIA to the end of the 21st century, The Cryosphere, 11, 1813-1834, https://doi.org/10.5194/tc-11-1813-2017
- Mediero, L., Santillán, D., Garrote, L., and Granados, A. (2014), Detection and attribution of trends in magnitude, frequency and timing of floods in Spain, J. Hydrol., 517, 1072–1088, doi:10.1016/j.jhydrol.2014.06.040, 2014.
- Nicolle, P., R. Pushpalatha, C. Perrin, D. François, D. Thiéry, T. Mathevet, M. Le Lay, F. Besson, J.-M. Soubeyroux, C. Viel, F. Regimbeau, V. Andréassian, P. Maugis, B. Augeard, and E. Morice, (2014), Benchmarking hydrological models for low-flow simulation and forecasting on French catchments, Hydrol. Earth Syst. Sci., 18, 2829–2857, doi:10.5194/hess-18-2829-2014
- Paranunzio, R., Laio, F., Chiarle, M., Nigrelli, G., Guzzetti, F., (2016). Climate anomalies associated to the occurrence of rockfalls at high-elevation in the Italian Alps. Nat. Hazard Earth Sys. Sci. Discuss. http://dx.doi.org/10.5194/nhess-2016-100.
- Ravanel, L., and Deline, P., (2011), Climate influence on rockfalls in high-Alpine steep rockwalls: the North side of the Aiguilles de Chamonix (Mont Blanc massif) since the end of the Little Ice Age. The Holocene, 21, 357–365, http://dx.doi.org/10.1177/0959683610374887
- Ravanel, L., Deline, P., (2015). Rockfall hazard in the Mont Blanc massif increased by the current atmospheric warming. In: Lollino, G., Manconi, A., Clague, J., Shan, W., Chiarle, M. (Eds.), Engineering Geology for Society and TerritoryClimate Change and Engineering Geology 1. Springer International Publishing, pp. 425–428
- Renard, B., Lang, M., Bois, P., Dupeyrat, A., Mestre, O., Niel, H., Sauquet, E., Prudhomme, C., Parey, S., Paquet, E., Neppel, L., and Gailhard, J. (2008), Regional methods for trend detection: assessing field significance and regional consistency, Water Resour. Res., 44, W08419, doi:10.1029/2007WR006268
- Rojas, R., Feyen, L., Bianchi, A., and Dosio, A. (2012), Assessment of future flood hazard in Europe using a large ensemble of biascorrected regional climate simulations, J. Geophys. Res.-Atmos., 117, D17109, doi:10.1029/2012JD017461
- Sedan O., Desramaut N., Vandromme R., (2013) Logiciel ALICE version 7-Guide d'utilisateur, BRGM, RP-60004 (BRGM, Orléans, 2013).
- Senatore, A., Mendicino, G., Smiatek, G., Kunstmann, H., (2011). Regional climate change projections and hydrological impact analysis for a Mediterranean basin in Southern Italy. J. Hydrol. 399, 70–92. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.035.
- Serrano, E., Morales, C., González-Trueba, J., & Martín, R. (2009). Cartografía del permafrost de montaña en los Pirineos españoles. Finisterra. Revista Portuguesa de Geografia, 87, 45–54.
- Serrano, E., Agudo, C., Delaloye, R., et Gonzales-Trueba, J.J. (2010), Permafrost distribution in the Posets massif, Central Pyrenees, Norsk Geografisk Tidsskrift 55(4), 245–252, DOI: 10.1080/00291950152746603
- Stoffel, M., Beniston, M., (2006). On the incidence of debris flows from the early Little Ice Age to a future greenhouse climate: a case study from the Swiss Alps. Geophys. Res. Lett. 33, L16404. http://dx.doi.org/10.1029/2006GL026805.
- Stoffel, M., Huggel, C., (2012). Effects of climate change on mass movements in mountain environments. Prog. Phys. Geogr. 36 (3), 421–439. http://dx.doi.org/10.1177/0309133312441010
- Turco, M., M.C. Llasat, S. Herrera, J.M. Gutierrez, (2017). Bias Correction and Downscaling future RCM Precipitation Projections using a MOS-Analog Technique. Journal of Geophysic Research-Atmospheres 122, doi: 10.1002/2016JD025724.
- Utasse, M., Jomelli, V., Leone, F., Grancher, D. Brunstein, D., Virmoux, C. (2016). Institutional and functional vulnerability assessment related to impacts of debris flows on roads in the French Alps. International Journal of Disaster Risk Science, 7, 186-197.
- Wood, J.L., Harrison, S. Turkington, T. A. R., Reinhardt, L. (2016), Landslides and synoptic weather trends in the European Alps, Climatic Change,136:297–308, DOI 10.1007/s10584-016-1623-3

Comunicaciones a conferencias

- Baills A., Vandromme R., Desramaut N., Sedan O., Grandjean G, (2011) Changing patterns in climate-driven landslide hazard: an alpine test site. The Second World Landslides Forum, Oct 2011, Rome, Italy
- Llasat, M.C., Llasat-Botija, M, Cortés, M, Vinet, F., Quintana-Seguí, P., Gilabert, J., Del Moral, A., (2017). Coping with floods in a climate change framework in the Pyrenees: from the November 1982 event to the June 2013 event. 2nd International colloquium on climate change in mountain areas, PYRADAPT 2017.
- Rico, I., Magnin F, López-Moreno JI, Alonso E, Revuelto J, Serrano E. 2017. First evidence of permafrost occurrence in a steep rock wall in the Pyrenees: The Vignemale North Face. In: Ambientes Periglaciares: avances de su estudio, valoración patrimonial y riesgos asociados. Ed. Universidad de Oviedo, 282pp. Oviedo.

Collaborateurs

Comité technique et Comité exécutif de la CTP

Comité coordination et partenaires du projet OPCC2

Avec le soutien de

Ce rapport a été réalisé dans le cadre du projet OPCC2 par initiative de la Communauté du Travail des Pyrénées. Le projet OPCC2 est associé aux projets CLIMPY, FLORAPYR, REPLIM, CANOPEE et PIRAGUA. Tous ces projets sont cofinancés par le Fons Européen de Développement Régional, FEDER, à travers le programme POCTEFA 2014-2020.

Téléchargez le rapport complet et le résumé exécutif en ES, FR, CAT ou EN sur le portail d'information de l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique : https://opcc-ctp.org/