Le Pic du Midi d'Ossau, vu du col du Pourtalet (© T. Auly, Université de Bordeaux 3).

Chapitre 7 :

La montagne

Coordination : Frank D'Amico
Rédacteurs : Agnès Bardonnet, Frank D'Amico, Sylvain Delzon, Richard Michalet, Vincent Vles
Contributeurs : Matthieu Berroneau, Gérard Largier, Yoan Le Bagousse Pinguet, Jean-Paul Maalouf, Anne Sota, Blaise Touzard, Jean-Paul Urcun

Montagne sous influence climatique océanique, la partie des Pyrénées située sur le territoire administratif de la région Aquitaine se démarque du reste des Pyrénées. Avec une altitude moyenne inférieure à celle des pics pyrénéens en région Midi-Pyrénées, la montagne aquitaine possède plusieurs caractères remarquables, construits sur deux entités montagneuses aux identités physiques et humaines fortes : la montagne basque (culminant à 2 017 m au Pic d'Orhy) et la montagne béarnaise (« flirtant » avec les 3 000 m au Pic Palas affichant 2 974 m – **Figure 1***).*

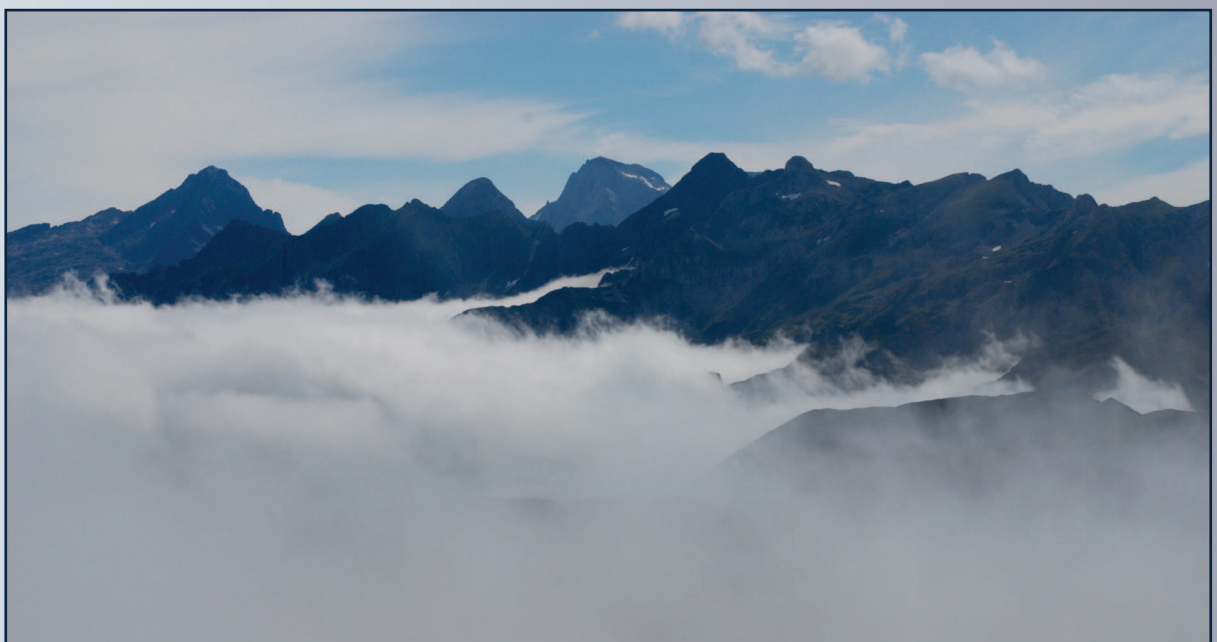


Figure 1 : *La haute vallée d'Ossau sous la mer de nuage tandis que le Pic Palas (2974 m, à gauche) et le Pic Balaïtous (3144 m, au centre) émergent. Le glacier du Balaïtous, comme les autres glaciers des Pyrénées françaises, subit un retrait généralisé de sa surface glaciaire ; à ce rythme, et dans l'hypothèse d'un maintien ou d'une accentuation des bouleversements observés, tous pourraient avoir totalement disparu en 2050 (cliché F. D'Amico).*

Fruits d'une histoire longue et complexe, mêlant facteurs locaux et changements historiques globaux, les activités humaines des hautes terres du Pays Basque et du Haut-Béarn mais aussi les biocénoses qui s'y imbriquent font du milieu montagnard aquitain un ensemble d'anthroposystèmes et d'écosystèmes (on parle alors de « socio-écosystèmes ») importants pour notre région. Hot-spots reconnus de biodiversité et d'endémisme, ils délivrent également des services uniques. Le paysage montagnard n'a jamais été figé. Il continue de se transformer en permanence sous les forces à la fois d'évolutions naturelles et d'une pression anthropique associée au changement climatique global. La déprise agricole, le développement urbain et touristique, sont à l'origine de transformations rapides des paysages et

de changements dans la biodiversité. Les variations amorcées du régime des pluies, les changements des températures estivales et les modifications du manteau neigeux auront des conséquences sur la biodiversité dont nous avons hérité, sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes et au final sur l'usage du milieu montagnard par les hommes (agropastoralisme, hydroélectricité, tourisme...). Ces signes pourraient aller en s'amplifiant, avec des inconvénients redoutés ou redoutables mais aussi des avantages possibles. Pour dissocier les possibilités des certitudes et décrire les effets actuels et futurs du changement climatique dans nos montagnes, ce chapitre emprunte à la démarche scientifique pluridisciplinaire les outils de mesure et d'analyse disponibles à l'échelle de l'Aquitaine et commente plusieurs évolutions documentées.

Introduction

Le milieu montagnard, en tant que mosaïque de « socio-écosystèmes », recouvre un ensemble d'anthroposystèmes et d'écosystèmes extrêmement exposés au changement climatique [1][2]. Fruits d'une histoire longue et complexe, mêlant facteurs locaux et changements historiques globaux, les activités humaines qui s'y trouvent et les biocénoses qui s'y développent sont uniques. *Hot-spots* reconnus de biodiversité et d'endémisme, ils délivrent également des services uniques. Implicitement, du fait des gradients élevés de température, ce milieu agit comme un ensemble de refuges climatiques d'autant plus importants que les zones montagneuses pourraient connaître un réchauffement plus prononcé que les zones de plaine [3].

Les zones montagneuses abritent 28 % des forêts et sont parmi les écosystèmes les plus vulnérables aux changements climatiques [4][5][6]. En effet, ces écosystèmes concentrent sur de courtes distances des milieux de fortes hétérogénéités climatiques et géologiques [7]. Ainsi, en parcourant un gradient de 3 000 m d'altitude, on peut traverser autant de zones climatiques différentes qu'au long de 3 000 km de latitude, passant par exemple d'un climat tempéré à un climat subarctique. Les montagnes, avec leurs gradients altitudinaux mais aussi la diversité topographique et la diversité des expositions, apparaissent donc comme des sites particulièrement intéressants pour évaluer les effets possibles du changement climatique : les bouleversements y sont intenses et le climat est un facteur limitant pour les écosystèmes qui s'y développent [8]. La relation entre climat et croissance des forêts évolue avec l'altitude et la croissance est le plus souvent limitée par les précipitations et le déficit de pression de vapeur de l'air à basse altitude et par les températures froides aux hautes altitudes [9][10][11][12]. Ainsi la courbe de réponse de la croissance à l'altitude présente généralement un optimum correspondant à une altitude où la température n'est pas encore limitante et où le stress hydrique n'affecte pas encore la croissance [13]. Le réchauffement ou les fortes chaleurs accompagnées de sécheresse sont susceptibles de provoquer une remontée en altitude de la courbe de réponse de la croissance à l'altitude [12][14]. Par ailleurs, la limite supérieure forestière apparaît comme très sensible au changement climatique, bien que tous les résultats ne concordent pas (cf. [15]). Une des explications possibles tient au fait que tous les travaux ne prennent pas en compte, ou pas de la même façon, les variations de pressions des usages, en particulier la déprise pastorale. Par ailleurs, des avancées des dates de débourrement foliaire et des reculs de dates de coloration des feuilles ont été observés depuis les 50 dernières années [16] ; un allongement de la saison de végétation des végétaux de plusieurs jours par décades a été mis en évidence [17][18], principalement du fait de l'avancée de la phénologie printanière [19].

La biodiversité des milieux montagnards revêt des caractéristiques uniques. La plupart des espèces inféodées au milieu montagnard n'ont que peu de marge de manœuvre (on parle d'espèces sténotopes) et possèdent de ce fait des adaptations souvent originales. Le port en coussinet observé chez certaines plantes (par exemple chez *Silena acaulis*) représente une convergence adaptative en réponse aux conditions de vie extrêmes qui règnent en montagne et caractérise une adaptation à la dessiccation et à la déperdition calorique. Chez les insectes de montagne, plusieurs espèces ont tout bonnement perdu leurs ailes, devenues un handicap à haute altitude, dans un environnement exposé au vent **(Figure 2)**.

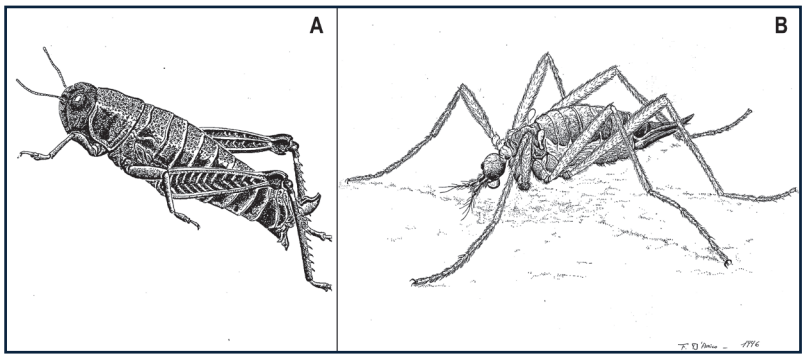


Figure 2 : *L'aptérisme (perte de l'aptitude au vol) est particulièrement éloquent chez certains criquets endémiques (ex. Cophopodisma pyrenea 1-A) ou des Diptères comme la mouche des neiges Chionea pyrenea 1-B dont la première mention vient d'être signalée en Aquitaine – D'Amico & Ooesterbroek (2013 ; Dessins originaux : F. D'Amico).*

Les impacts les plus notoires du changement climatique sur la biodiversité sont la contraction et/ou le déplacement de l'aire de distribution de plusieurs espèces – comme dans d'autres écosystèmes de plaine, mais de façon exacerbée – et une augmentation de leur probabilité d'extinction à basse comme à haute altitude [20][21][22][23]. Le changement climatique pourrait modifier l'étagement altitudinal de certaines espèces par une migration en altitude et par une possible exclusion des espèces sommitales. Ce déplacement *a priori* logique des aires de distribution vers des altitudes plus élevées a été appelé l'effet « *Escalator* » [24][25]. Pour tempérer ces propos, certains auteurs suspectent l'existence pour certaines espèces de tendances inattendues voire contrintuitives comme le déplacement vers des altitudes inférieures de leur aire [26] en raison notamment d'un relâchement de la compétition, lui-même expliqué par le déplacement d'autres espèces vers le haut des montagnes. Il faut réaliser que les effets du changement climatique sur les espèces – végétales notamment – sont variables selon les massifs montagneux étudiés en Europe [27] et que plusieurs effets subtils, insoupçonnés, sont révélés progressivement. Il en va ainsi des modifications du rythme d'invasions d'espèces [28] et de l'évolution des taux d'attaque des insectes ravageurs [29]. De façon assez générale toutefois, sur les massifs montagneux étudiés, les espèces végétales à affinité thermique froide déclinent tandis que les espèces à affinité thermique chaude deviennent plus abondantes, un phénomène appelé *thermophilisation* [28].

Pour éclairer les effets actuels et futurs du changement climatique dans les montagnes basques et béarnaises, ce chapitre propose des éléments basés sur la démarche scientifique pluridisciplinaire. Tour à tour, ce sont les effets possibles du changement climatique sur les activités économiques, la biodiversité et les écosystèmes de montagne qui sont examinés. Compte tenu du rôle prépondérant du manteau neigeux sur les activités économiques (tourisme hivernal, agriculture, pastoralisme…) et sur la disponibilité en eau (cf. chapitre 8 également), les perspectives d'une modification de sa persistance et de son épaisseur sont discutés en premier, avec au passage une digression sur la disparition annoncée des glaciers proches, puisqu'aucun n'existe aujourd'hui sur le territoire aquitain.

Face à l'absence significative d'informations pour les perspectives d'évolution de la majorité des espèces animales et végétales présentes en Aquitaine, faute de suivis solidement structurés sur le long terme, les effets documentés sur la biodiversité se focalisent ici sur : 1) les poissons dans l'espace montagnard Aquitain, avec une mise au point plus précise sur le Saumon et l'Anguille bien étudiés par le laboratoire Ecobiop (INRA – Université de Pau et Pays de l'Adour), 2) les oiseaux de montagne et les changements observés dans le calendrier de la migration, tels qu'ils sont étudiés par différents chercheurs en Aquitaine et dans le cadre les travaux à long terme de l'Observatoire Régional de la Migration des Oiseaux (Programme d'étude de la migration en Aquitaine coordonné par la LPO Aquitaine avec Organbidexka Col Libre), 3) certaines espèces vulnérables, indicatrices et/ou emblématiques comme le Desman des Pyrénées suivi de près dans le cadre d'un Plan National d'Actions pour cette espèce, avec l'appui de différentes équipes de recherche des régions Aquitaine, Midi-Pyrénées et Languedoc-Roussillon, et 4) le suivi programmé des espèces végétales des combes à neige, pour le compte de l'OPCC, par le CENMA et le CBNMP.

Les connaissances disponibles sur les impacts observés et attendus du changement climatique à l'échelle des écosystèmes sont déroulées pour les forêts de la vallée d'Ossau et les écosystèmes prairiaux de la haute vallée d'Aspe, étudiées notamment par les laboratoires Biogeco et Epoc (Université de Bordeaux I, INRA et CNRS).

Pour préparer les mutations, le chapitre se termine par une liste de solutions possibles de moyens de mitigation adaptées aux écosystèmes et espèces de montagne face au changement climatique. Il s'agit de pistes de réflexions à partager avec les décideurs et acteurs œuvrant aux différentes échelles géographiques et décisionnelles.

I- Contexte

Culminant à 2 974 mètres, le pic Palas est le point culminant de la région Aquitaine **(Figure 1)**. Il est séparé du pic de Balaïtous (3 144 m) à l'est et du pic d'Arriel (2 824 m) à l'ouest par de petits cirques auparavant occupés par des glaciers. Située sur la ligne de partage des eaux, la crête des pics d'Arriel-Palas-Balaïtous a servi de tracé pour la frontière franco-espagnole. En allant vers la côte Atlantique, plus à l'est, l'altitude des principaux pics s'abaisse progressivement (Pic d'Anie 2 504 m) pour ne dépasser au Pays Basque l'altitude du Pic d'Orhy à 2 017 m.

L'agriculture, le pastoralisme et l'hydroélectricité localement, activités inscrites au cœur des territoires de montagne aquitaine, y ont façonné les paysages actuels en permettant le maintien d'activité et donc de tissu social en zone rurale. Dans l'espace montagnard Aquitain, Gaves et Nives désignent ces torrents et rivières tumultueuses dont la montagne accouche respectivement dans le Béarn et au Pays Basque. Les montagnes basques étant moins hautes et escarpées que celles du Béarn, les Nives coulent sur des pentes moins fortes, et étant plus à l'Ouest, les distances à parcourir pour les poissons diadromes cherchant à rejoindre des habitats montagnards sont plus courtes. Gaves et Nives constituent des milieux fragiles et réputés pour la pêche ; ils abritent encore une faune diversifiée où coexistent différentes espèces endémiques ou d'intérêt patrimonial élevé : Grenouille des Pyrénées, Desman des Pyrénées, Saumon atlantique, Anguille (cf. *infra*). L'activité hydroélectrique y est très développée en répondant à d'importants besoins de développement énergétique certes, mais aussi sociaux. Son développement dans le cadre du changement climatique doit donc se faire de façon durable, dans une logique de partage de la ressource ; il peut être envisagé pour des besoins d'alimentation en eau potable, pour les activités agro-pastorales et industrielles, pour les besoins en neige de culture des stations de ski, ainsi que pour le maintien des services écosystémiques, dans le respect de la biodiversité héritée.

Par la diversité de ses paysages, et sa situation frontalière avec la montagne aragonaise et basque espagnole, la montagne Aquitaine est une destination touristique prisée. En matière de tourisme, la neige constitue sans aucun doute une des principales ressources valorisées par les activités touristiques et la plus vulnérable au changement climatique **(Figure 3)**.

L'exemple des retombées économiques du piémont pyrénéen est révélateur d'une tendance générale : pour le Haut Béarn tout entier (Piémont Oloronais, vallées d'Ossau, d'Aspe, de Barétous et de Josbaig), le tourisme représente 76 millions d'euros de recettes, 1 300 emplois, 2 millions de nuitées. La vallée d'Ossau compte pour 58 % dans cette activité. En chiffre d'affaires, l'activité ski est le moteur économique principal de l'économie, même si depuis 2003 le nombre de journées ski a baissé de plus de 18 %. Le chiffre d'affaire généré par les activités touristiques confondues est estimé à 30 millions d'€ en Ossau, principale destination ski, auxquels s'ajoutent les diverses taxes locales. Quatre-vingts pour cent de l'activité économique de la commune des Eaux-Bonnes sont liés au tourisme (sports d'hiver, tourisme estival, activités thermales) et seulement 10 % liés à l'hydroélectricité, 10 % à l'agriculture (deux secteurs en fort déclin). Ici comme souvent ailleurs en Pyrénées, le tourisme permet de maintenir une économie et une démographie stables : 500 à 600 emplois, dont 2/3 de saisonniers (hivernaux principalement) vivent

Figure 3 : *Le cirque d'Aneü, en haute vallée d'Ossau, le 28 novembre 2009 (cliché : F. D'Amico).*

des activités touristiques sur la seule commune des Eaux-Bonnes (Gourette). Outre les activités proposées dans les stations de ski alpin d'Arette-La Pierre-Saint-Martin, de Gourette, d'Artouste-Fabrèges, ou sur les espaces nordiques du Somport-Candanchu, d'Issarbe, d'Iraty, la neige permet la pratique de nombreuses autres activités et structure l'offre touristique. Les activités plus importantes sont sans aucun doute le ski nordique et la randonnée en raquettes, mais de nombreux guides et accompagnateurs de moyenne montagne proposent des produits touristiques dérivés de ces activités d'hiver **(Figure 3)**.

En matière de biodiversité, la montagne aquitaine constitue également un espace préservé car en grande partie inscrit dans le territoire du Parc National des Pyrénées et au sein du réseau Natura 2000. Rappelons que les espaces protégés ont été désignés de longue date par l'État antérieurement aux préoccupations du changement climatique : le Parc National des Pyrénées a été créé en 1967 et la constitution du réseau Natura 2000 s'est faite en application des Directives Européennes « Oiseaux » et « Habitat » de 1979 et 1992 respectivement. Une question légitime est de savoir en quoi et comment les espaces protégés (ceux d'Aquitaine en l'occurrence) peuvent contribuer dès aujourd'hui à la préservation de la biodiversité et des espaces montagnards.

L'intérêt des zones de conservation dans le contexte du changement climatique

Face au changement climatique, les espaces protégés nationaux (e.g. Parcs Nationaux, Réserves Naturelles…) sont plus à même de préserver la biodiversité (à l'exception des Amphibiens dans l'hypothèse du scénario A1F1) que les zones ne bénéficiant pas de mesure particulière [30]. La raison est probablement que ces espaces protégés nationaux se trouvent le plus souvent dans les zones de montagne, souvent considérées comme des refuges climatiques soumis malgré tout à d'intenses changements. D'ici 2080, 58 % (valeur médiane) des espèces de plantes et de vertébrés étudiés [à savoir 1883 espèces européennes : 1298 plantes, 136 mammifères, 343 oiseaux nicheurs, 42 amphibiens et 64 reptiles] devraient perdre des conditions favorables de niche climatique au sein des espaces protégés existants. Ce chiffre s'élève à 63 % pour les sites du réseau Natura 2000. Les espèces présentes dans les sites du réseau Natura 2000 apparaissent comme plus vulnérables parce qu'il y a une proportion plus grande de zones non montagneuses et que les pertes de niche climatique favorable y sont proportionnellement plus grandes aussi [31][32]. Les proportions varient toutefois selon le groupe taxonomique et le scénario. Il y a plus d'espèces « perdantes » que « gagnantes » chez les oiseaux et les mammifères quel que soit le scénario. Chez les amphibiens, seulement les scénarios climatiques extrêmes (A1F1, A2) apparaissent comme défavorables. Les reptiles se trouveraient gagnants (plus forte proportion

d'espèces « gagnantes » : 67 %) quel que soit le scénario, ce qui n'est pas une surprise puisque les reptiles sont des organismes ectothermes qui trouvent une amélioration de leur condition de vie quand un réchauffement survient en région tempérée. Ectothermes également, le cas des amphibiens est différent puisque ces organismes ont besoin d'humidité ambiante alors que les projections faites pour le Sud-Ouest de l'Europe sous les scénarios A1F1 et A2 font état d'une aridité croissante [33] avec des nuances locales ou régionales à prendre cependant en compte puisque le régime des précipitations dans la partie nord et nord-ouest des Pyrénées devrait rester inchangé ou pourrait même s'intensifier sous l'hypothèse des scénarios SRES B2 et SRES A2 [34].

Pour l'ensemble de l'Europe, une comparaison par massif montagneux suggère que c'est dans les Alpes, les Pyrénées et les Carpathes qu'il y aurait proportionnellement le plus d'espèces « gagnantes », un phénomène à associer au processus de thermophilisation.

À côté de l'exploitation forestière et de l'hydroélectricité, d'histoire plus récente, le pastoralisme est resté une activité traditionnelle prépondérante dans les montagnes béarnaises et dans les montagnes basques. Les communautés herbacées de pelouses et prairies, utilisées par les ovins, bovins et équins, y présentent un triple intérêt : biologique (par leur contribution à la biodiversité montagnarde), culturel (par leur contribution à la qualité des paysages traditionnels qu'elles constituent) et socio-économique (par les services qu'elles apportent aux sociétés humaines, notamment comme herbage pour les herbivores). Les communautés herbacées à forte diversité sont particulièrement développées en Europe sur les roches calcaires où la sécheresse du sol, liée au caractère filtrant des calcaires, et la faible disponibilité en nutriments qui l'accompagne, limitent fortement la productivité et donc la compétition. En général ces communautés à maigre herbage sont pâturées par des ovins et/ou faiblement fauchées. Cependant l'importance de la déprise agricole affectant l'Europe depuis plus d'une centaine d'années représente une menace certaine pour ces écosystèmes de grand intérêt patrimonial. En Aquitaine ces communautés ne sont bien représentées que dans les Pyrénées et sur les bordures du Massif Central (Dordogne et Lot-et-Garonne).

Parmi les autres particularités de notre territoire de montagne, il faut insister sur le fait qu'avec une altitude moyenne inférieure aux Pyrénées en région Midi-Pyrénées, l'Aquitaine, dans ses confins sud, constitue un point de convergence majeur le long des routes migratoires d'oiseaux en Europe occidentale. Le col d'Organbidexka, au Pays Basque (43°02'19.06"N, 1°00'21.68"W ; altitude 1 283 mètres) constitue la voie de passage la plus importante pour les rapaces, les cigognes, les grues et les palombes.

Observatoire pyrénéen du changement climatique (http://www.opcc-ctp.org)

OPCC OBSERVATOIRE PYRÉNÉEN DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Lancé par la Communauté de Travail des Pyrénées qui a souhaité organiser les structures administratives et scientifiques du Massif autour de la compréhension et de la lutte face au changement climatique, l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique a pour mission de devenir un outil opérationnel d'information et d'aide à la décision pour une meilleure appropriation territoriale du phénomène et pour une meilleure adaptation. Dans l'objectif de suivre et de comprendre les évolutions du climat à l'échelle des Pyrénées et anticiper ses effets, différents outils seront mis en place afin de permettre un suivi spécifique d'indicateurs du changement climatique dans les domaines du climat, la forêt, la biodiversité, l'eau, et l'enneigement. Sur cette base, des premières pistes de recommandations afin d'accompagner l'adaptation des secteurs socio-économiques et des espaces naturels les plus vulnérables seront proposées.

Dans une des actions en cours, « Évolutions Climatiques et Forêt de Montagne », dans le cadre des axes « Forêt » et « Risques Naturels » le Groupement transfrontalier FORESPIR et son réseau (ONF-RTM, CNPF, Centre Tecnològic Forestal de Catalunya, Generalitat de Catalunya et Sociedad de Desarrollo Medioambiental de Aragón) mettra en place le suivi des indicateurs d'impact du changement climatique sur le rôle de protection des forêts de montagne et sur les incidences qu'il aura sur les écosystèmes forestiers Pyrénéens. Les partenaires prévoient de travailler sur un réseau de zones de référence réparties sur le Massif, dont une sera située sur le département des Pyrénées-Atlantiques (Aquitaine). Ces zones, de la taille d'un bassin versant, serviront à analyser les différentes techniques sylvicoles de protection contre les risques naturels et à mettre en œuvre des outils et des méthodes de suivi des indicateurs du Changement Climatique et, enfin, à procéder aux relevés et mesures. L'ensemble des travaux réalisés dans le cadre de cette action permettra notamment la définition de critères et de recommandations pour une gestion adaptée des forêts de montagne face aux évolutions climatiques et en fonction des différents contextes géographiques, socio-économiques, écologiques et forestiers.

II- Impacts observés et attendus du changement climatique

Impacts sur l'enneigement

La neige est l'un des éléments les plus sensibles aux changements climatiques. Au niveau quantitatif, la réduction de la hauteur de neige pourrait être de 50 à 100 % dans la plupart des montagnes de l'Europe d'ici la fin du XXIe siècle [35]. Les études du Centre d'Étude de la Neige de Météo France montrent clairement une érosion du manteau neigeux en montagne depuis 1961 [36] et ce phénomène va considérablement se renforcer dans les Alpes et les Pyrénées, en particulier au-dessous de 2000 mètres d'altitude. À 1 500 mètres (altitude moyenne de l'ensemble des domaines skiables en Aquitaine), la saison enneigée passerait de trois à deux mois dans les Pyrénées, la hauteur de neige ne serait plus que d'une vingtaine de centimètres. Sur le terrain, on voit déjà se profiler des difficultés pour nombre de stations de moyenne altitude : certaines observations d'exploitants de stations d'altitude sont alarmantes sur la réalité déjà prégnante de ce phénomène [37]. L'épaisseur de la couche est un facteur majeur limitant, la durée de l'enneigement en est un autre, bien plus grave. D'après Météo France, les stations de moyenne altitude des Pyrénées-Atlantiques ne devraient plus avoir qu'entre 70 et 80 jours d'enneigement à cette altitude dans l'hypothèse basse d'un réchauffement de +1,8 °C en moyenne.

Le cas des glaciers proches : Vignemale, Balaitous et Infiernos

Bien que n'étant pas situés sur le territoire Aquitain, ces glaciers tout proches méritent quelques lignes. En effet, ils contribuent (cas du Vignemale et du Balaïtous – **Figure 1**) au régime hydrologique des cours d'eau qui traversent l'Aquitaine. Pour les glaciers des Pyrénées françaises[1], depuis 1850 qui marque la fin d'une période de « mini-glaciation » appelée Petit Age Glaciaire (1550-1850), un retrait généralisé des surfaces glaciaires est observé ; à ce rythme, et dans l'hypothèse d'un maintien ou d'une accentuation des bouleversements observés, ils pourraient même avoir totalement disparu en 2050. Côté espagnol, les glaciers les plus proches sont les deux glaciers du massif des Infiernos (Central Infiernos et Oriental Infiernos) dont les superficies actuelles sont respectivement de 5,83 ha et de 1,13 ha, ce qui représente 64,3 % et 14,4 % de leur extension mesurée en 1981 [38].

Impacts sur l'activité touristique

L'impact du changement climatique sur l'activité touristique est attendu essentiellement sur l'activité des stations de ski, moteur économique des vallées des Pyrénées occidentales. Pour ce qui est de l'enneigement, on constate en effet sur le long terme une lente mais permanente diminution de l'épaisseur moyenne de la couche et une montée en altitude de la limite pluie-neige. Les domaines skiables ont toujours subi les aléas de l'enneigement naturel, problèmes que ne compense qu'en partie la production de neige de culture. Or dans les Pyrénées l'évolution de la fréquentation et des pratiques est fortement tributaire des conditions climatiques : d'une année à l'autre, on peut enregistrer des variations de près de 2 millions de journées/skieurs. Dans les Alpes, cet aléa caractéristique de la neige est moins marqué et le poids dominant des très grandes stations, bien enneigées et positionnées dans le marché mondial, les rendent moins tributaires d'un marché de proximité.

La Compagnie des Alpes place le seuil minimal à un enneigement minimal de 100 jours pas an pour assurer un domaine viable économiquement, et un retour sur investissement suffisant de l'équipement d'un domaine skiable.

1. L'association « Moraine », créée en 2001, a pour objectif d'étudier les glaciers des pyrénées françaises et leur environnement proche en vue de les connaître et de suivre annuellement leur évolution (http://asso.moraine.free.fr).

Figure 4 : *Quand l'enneigement naturel fait défaut, le recours à la « neige de culture » concerne des superficies de plus en plus importantes sur la majorité des domaines skiables pour compenser les aléas climatiques, comme l'illustre cette photo prise au cœur de l'hiver (14 janvier 2007) du domaine skiable de Gourette (1350-2350 m). Toutefois, cela ne saurait amortir totalement l'impact du réchauffement (cliché : F. D'Amico).*

Si l'enneigement naturel fait défaut, l'enneigement artificiel ne saurait amortir totalement l'impact du réchauffement **(Figure 4)**. Le recours aux enneigeurs couvre des superficies de plus en plus importantes (désormais la presque totalité des pistes des grandes stations) sur la majorité des domaines skiables pour compenser les aléas climatiques [39] et préparer la sous-couche neigeuse. Toutefois, cette technologie ne permet pas de lutter indéfiniment contre la diminution de l'enneigement, elle ne remplace pas, pour les skieurs, l'attrait du cadre merveilleux de la montagne totalement immaculée [41] et surtout elle est coûteuse en énergie et en eau, rompant les équilibres des micro-bassins versants de montagne [42]. Les prélèvements sur les torrents peuvent naturellement impacter les écoulements naturels, la vie aquatique et, par voie de conséquence, les réseaux alimentaires associés [43]. Le nivellement des pistes de ski modifie la perméabilité des sols. La neige de culture représente un agent supplémentaire d'érosion non négligeable [44]. Enfin, en période des restrictions budgétaires publiques, le coût de la production de neige de culture pose de manière toujours plus délicate la question du remboursement de la dette des collectivités qui ont investi [45]. Si, au-dessus de 2 500 mètres, les différents scénarios de Météo France montrent au contraire l'évolution probable de précipitations plus abondantes, cette augmentation n'est pas jugée suffisante par les climatologues pour compenser la fonte liée à la hausse des températures. Déjà aujourd'hui, le produit neige, indispensable au bon fonctionnement de toute station de sports d'hiver, est des plus incertains en dessous de 2000 mètres, à l'exemple des saisons sans neige du début des années 1990, de la saison 2006-2007, 2007-2008 ou encore de l'ouverture de la saison 2009-2010 [37]. Dans ces cas « d'accidents climatiques » (*sic*) dans les stations de sports d'hiver de la chaîne pyrénéenne, les baisses du chiffre d'affaires ont été en moyenne de 36 % par rapport à la saison précédente, les pratiquants des sports de glisse ont été beaucoup moins nombreux et les annulations des séjours en hausse [46].

Par ailleurs, les recherches montrent que si la quête de la diversification touristique est un objectif consensuel, d'une part cette orientation n'est pas dotée de crédits incitant l'innovation et à la recherche d'autres modèles mieux adaptés à la fois aux traditions des vallées et aux marchés et, d'autre part, les

Figure 5 : *D'ici à la fin du XXIe siècle, à 1 500 mètres (altitude moyenne de l'ensemble des domaines skiables en Aquitaine), la saison enneigée passerait de trois à deux mois dans les Pyrénées, la hauteur de neige ne serait plus que d'une vingtaine de centimètres. La pertinence des ouvrages de protection hivernaux, l'effort et le coût d'entretien hivernal du réseau routier seraient différents : (A) fosse de réception d'avalanche, (B) ouvrage paravalanche et (C) panneau de signalisation sur la route d'accès au col du Pourtalet, en vallée d'Ossau (cliché : F. D'Amico).*

enquêtes de terrain montrent que les acteurs et opérateurs sont très nombreux à penser que « sans le ski, tout est fini » [41] [45]. La réelle nécessité de diversification des activités n'a pas encore fait l'objet d'une vraie prise de conscience locale : l'accent est toujours mis sur les prouesses technologiques (remontées mécaniques, restaurants d'altitude, enneigement artificiel…), les collectivités continuent d'investir dans un équipement lourd, onéreux pour la collectivité, peu économe de la ressource énergétique, peu soucieux du cycle local de l'eau et on produit de la « neige de culture » sur des pistes qui apparaissent de plus en plus anachroniques. Tant sur le plan technique qu'en termes de représentations et de pratiques, le changement climatique est encore fort peu pris en compte dans la prospective territoriale à long terme de la montagne touristique aquitaine **(Figure 5)**.

Pour la majorité des acteurs rencontrés, le changement climatique est un fait, envisagé comme marginal, lié à la cyclicité naturelle plutôt qu'humaine et le nombre de ceux qui nient – sans le dire ainsi – semble supérieur à celui de ceux qui s'accordent sur son existence. Malgré un système d'observation spécifique (l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique, cf. *supra*) qui produit des données et des simulations futures de grande qualité. La pratique des sports d'hiver est toujours envisagée à long terme comme la poursuite de sa forme actuelle, les projets d'anticipation des effets négatifs des changements à venir restent rares. Dans ce changement global, les stations de ski alpin constituent sans aucun doute la ressource économique la plus vulnérable. La performance des exploitants de remontées ne suffit déjà plus à assurer, à elle seule, le renouvellement des équipements (le dépassement du « grand équilibre » financier des exploitations est rare dans les Pyrénées) ; en outre, le coût moyen de la journée-skieur croît plus vite que son prix de vente et le coût de l'énergie resserra encore ce ciseau des prix. Les capacités de réinvestissement sont modestes dans le massif, le risque d'obsolescence de l'outil de production est élevé et s'accroît. Ce modèle économique hivernal reste donc tributaire de soutiens publics dont la pérennité est loin d'être garantie. La concurrence entre stations est croissante, dans un contexte de marché européen mature et d'une offre très fournie. Les territoires pyrénéens tout entiers, c'est-à-dire les vallées solidaires de leurs stations, auraient intérêt à élaborer une stratégie à moyen et long terme pour entamer d'urgence leur transition énergétique : il s'agit surtout ne pas rester enfermé dans une posture ne soutenant que le vieux modèle économique des « trente glorieuses » fondé sur le « tout ski alpin », un modèle mis à mal.

Impacts sur la biodiversité

À l'échelle des Pyrénées, et à plus forte raison pour l'Aquitaine, il semble qu'aucune analyse ne permette pour l'instant des estimations quantitatives de risque d'extinction pour les espèces confrontées au changement climatique. De telles estimations restent hors de portée encore compte tenu des capacités actuelles de modélisation et de la nature des données disponibles ou collectables. On dispose de peu de données mesurées sur le long terme pour quantifier les effets du changement climatique sur la biodiversité de la montagne aquitaine et il faut le plus souvent s'appuyer sur certains outils d'aide et se fier aux projections qui en découlent, en dépit du fait qu'elles sont en général faites à l'échelle européenne et dans le meilleur des cas *transférables à des échelles compatibles avec l'objet de l'ouvrage.*

Différents groupes d'espèces montagnardes ont fait l'objet de suivis relativement complets à l'échelle européenne et autorisent une modélisation des changements de distribution en lien avec l'évolution du climat. Il s'agit notamment des oiseaux [47][48], des papillons [49], des libellules [50], des insectes pollinisateurs [51] considérés comme très sensibles au changement climatique et pour lesquels d'importantes bases de données existent. Parmi les projets les plus aboutis, l'Atlas climatique des papillons d'Europe a utilisé les cartes de distribution du projet[2] « *Mapping European Butterflies* ». L'ensemble des résultats porte sur 293 espèces de papillons (sur un total d'environ 450 espèces présentes en Europe). L'enveloppe climatique de chaque espèce de papillon a été modélisée en envisageant trois scénarios de climat futur : (1) scénario modéré [B1 - SEDG : Sustainable Europe Development Goal] prenant en compte une élévation attendue de température en Europe de 2,4 °C d'ici à 2080, (2) scénario intermédiaire [A2- BAMBU : Business As Might Be Usual] prenant en compte une élévation attendue de température en Europe de 3,1 °C d'ici à 2080 et (3) scénario extrême [A1F1 - GRAS : GRowth Applied Strategy] prenant en compte une élévation attendue de température en Europe de 4,1 °C d'ici à 2080. Sur la base de ces scénarios, une projection des changements attendus dans la distribution des papillons a été faite sur l'ensemble de l'Europe, en autorisant deux possibilités (possibilité totale de dispersion des individus ou absence de dispersion dans le nouvel espace climatique) et en considérant deux périodes (2021-2050 et 2051-2080). L'étude montre clairement que le changement climatique poserait un problème indéniable, mais dont l'intensité varierait selon le scénario considéré. Sous l'hypothèse la plus extrême (et sans dispersion possible), 24 % des espèces étudiées perdraient plus de 95 % de leur niche climatique actuelle en 2080 et 70 % perdraient plus de 50 % tandis que seulement 6 % apparaîtraient comme peu menacées par ce risque. Sous l'hypothèse la plus modérée (et toujours sans dispersion possible), seulement 3 % des espèces étudiées perdraient plus de 95 % de leur niche climatique actuelle en 2080 et 54 % perdraient plus de 50 % tandis que 43 % apparaîtraient comme peu menacées par ce risque.

L'application de ces connaissances à la prise en compte des impacts du changement climatique sur l'entomofaune montagnarde d'Aquitaine doit être faite de façon prudente, compte tenu des transferts délicats d'échelle. Avec ces précautions à l'esprit, la plupart des espèces pour lesquelles il existe des modèles de distribution future seraient impactées par le changement climatique d'ici à 2080 et certaines espèces emblématiques pourraient avoir disparu des Pyrénées occidentales.

	Scénarios climatiques (2080)			
Espèce	Scénarios de dispersion des individus	**Modéré** + 2,4 °C (A1)	**Intermédiaire** + 3,1 °C (B2)	**Extrême** + 4,1 °C (A1F1)
Parnassius apollo	possible	- 35,61 %	- 52,91 %	- 63,32 %
	impossible	- 54,69 %	- 66,59 %	- 75,85 %
Parnassius phoebus	possible	- 47,26 %	- 32,7 %	- 51,75 %
	impossible	- 67,83 %	- 57,95 %	- 72, 24 %
Parnassius mnemosyne	possible	- 1,92 %	- 27,84%	- 23,75 %
	impossible	- 48,45 %	- 68,82 %	- 77,12 %

Changements projetés dans l'espace climatique de 2080 pour trois espèces de Papilionidae emblématiques et vulnérables de montagne : les Apollons.

2. Projet basé sur une grille de 50 x 50 km de résolution, couplée à des modèles climatiques de distribution actuelle utilisant 22 variables dont la température, l'humidité du sol etc.

Les poissons dans l'espace montagnard Aquitain

Les études sur l'impact du changement climatique sur les poissons d'eau courante sont peu nombreuses [52]. À l'échelle mondiale, en lien avec les diminutions de débit, 15 % des rivières perdraient 20 % de leur richesse spécifique et jusqu'à 75 % à l'horizon 2070 pour les hydrosystèmes les plus impactés [53]. La distribution actuelle des espèces devrait se déplacer vers des latitudes plus nordiques, pouvant entraîner des extinctions en cas de barrière au déplacement ou d'habitat favorable trop réduit [54][55]. D'autres études à large échelle ciblent certaines catégories de poissons, comme les poissons diadromes [56] ou encore les espèces invasives [57]. L'évolution de ces communautés au cours des 15-25 dernières années dans les grands fleuves français se traduit par une augmentation de la richesse spécifique et de la proportion de poissons méridionaux et thermophiles, accompagnée d'une proportion plus élevée de petits poissons [58][59] ; cette augmentation de la richesse spécifique est sans doute transitoire, en lien avec le déséquilibre lié au changement climatique. Ces études à large échelle bien qu'intéressantes pour établir de grandes tendances sont cependant difficilement transposables à des prédictions locales, notamment en système montagnard. Décrire des scénarios d'évolution à l'échelle locale nécessite un important travail préalable de modélisation des paramètres abiotiques pour tenter d'évaluer le plus justement possible l'impact du changement climatique sur les caractéristiques hydrologique et thermique du cours d'eau. Récemment, un tel travail de modélisation sur l'évolution thermo-hydro-chimique du bassin Adour-Garonne selon 3 scénarios climatiques a conclu que c'est dans les zones de montagne que la sévérité des étiages pourrait être maximale (jusqu'à -20 % des débits actuels) et que l'enrichissement en azote pourrait être le plus important [60][61]. Cette augmentation des nitrates pourrait cependant n'apparaître qu'à partir du métarhithron, car à l'amont la pente limite le développement de l'agriculture. Malgré tout, le risque d'eutrophisation reste présent car la productivité du cours d'eau peut aussi augmenter du fait de l'augmentation de la température (qui devrait être plus sensible dans les petits cours d'eau à faible inertie thermique) et du démarrage plus précoce de la productivité primaire. Ces modifications des conditions climatiques et de l'usage des sols pourraient entraîner la perte d'une espèce en moyenne (la richesse spécifique passant de 5 à 4) sur les zones amont [62]. L'augmentation de la température induirait une remontée des espèces d'eau chaude vers l'amont des rivières, au détriment des espèces d'eau froide [62][63]. Les espèces d'eau froide comme la truite commune ou le saumon pourraient ainsi voir leur aire de distribution se restreindre du fait de la diminution des espaces où l'habitat est hydrologiquement et thermiquement favorable. Par ailleurs, quels que soient les scénarios climatiques testés, les changements sur la biodiversité seront sensiblement équivalents jusqu'à la première moitié du XXIe siècle [62]. Ce n'est qu'à partir de la deuxième moitié que des différences apparaîtraient avec une intensité des perturbations plus marquée et plus rapide dans le cas du scénario le plus pessimiste (A2).

Il est très probable que les ruisseaux et rivière de tête de bassin prenant leurs sources dans les montagnes basques et béarnaises serviront de refuge aux espèces d'eau froide de grande valeur halieutique comme le saumon et la truite. L'anguille, autre espèce à forte valeur halieutique et patrimoniale et déclarée par l'UICN en danger critique d'extinction devrait, sur la zone considérée, bénéficier des évolutions climatiques [56]. Il n'existe pas dans la piscifaune de cette zone d'espèces endémiques dont le risque d'extinction serait alors très élevé. Des espèces sans grande valeur halieutique, mais importantes pour la conservation de la biodiversité comme le chabot, devraient être particulièrement touchées. Cette espèce fait partie comme le saumon, des espèces ciblées par le programme du GICC[3] et les prévisions établies dans le contexte des montagnes ardéchoises font état d'une forte réduction des effectifs sous l'effet conjugué du changement climatique et de la présence d'obstacles à la migration [64]. Dans le cas du chabot, la conjonction de ces deux facteurs est particulièrement négative car les capacités de dispersion vers l'amont de cette espèce sont faibles en présence d'obstacles. D'une manière générale, la capacité de dispersion des individus est un des principaux éléments qui permettra aux populations de se déplacer et se localiser conformément aux dimensions thermique et hydrodynamique de leur niche écologique. Les espèces étaient adaptées au contexte du réseau hydrographique et les modifications anthropiques qui ont accompagné la révolution industrielle ont fortement réduit certaines populations,

3. GICC : Programme du MEDDM sur changement global et stratégies démographiques des populations piscicoles, n° de contrat 000767, APR Thème IV « biodiversité et changement climatique ».

comme celles du saumon atlantique en réduisant drastiquement son aire de distribution du fait de l'érection des grands barrages. Le réchauffement climatique devrait encore mettre à l'épreuve la capacité des espèces à s'adapter au nouveau contexte anthropisé. Cependant, les individus ont une certaine capacité à modifier leur comportement et/ou leur physiologie selon leur environnement. Ainsi, chez la truite, la demande en oxygène des embryons peut varier largement en fonction des pontes [65]. Tous les individus n'ont pas les mêmes capacités, mais suivant l'efficacité du processus de sélection, le temps nécessaire à la capacité d'adaptation des populations pourrait excéder le temps nécessaire à la mise en place de processus évolutifs. La dispersion génétique des individus peut cependant accélérer ces processus d'adaptation en mixant à la population locale des individus provenant de populations plus au sud. Sur les 15 dernières années, la population de saumon de la Nivelle (rivière la plus chaude abritant une population de saumon) semble évoluer vers plus de flux de gènes favorisant un fonctionnement en métapopulation, et vers une augmentation de la dichotomie entre les sexes concernant l'âge à la première maturation. Le laboratoire *Ecobiop* de l'INRA a réalisé une modélisation individu-centré prenant en compte les différentes stratégies de vie et des facteurs de croissance et de survie densité-dépendants, pour prévoir les risques d'extinction de cette population sous différents scénarios ([66] – **Figure 6**).

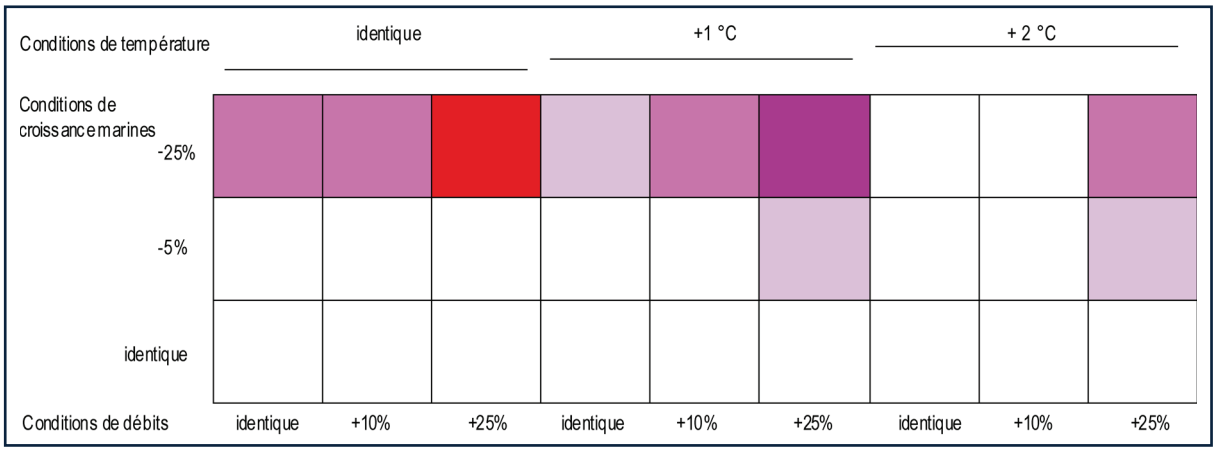


Figure 6 : *Simulation par modélisation individu-centrée des risques d'extinction de la population de saumon de la Nivelle à 50 ans (1990-2040) sous trois scénarios climatiques en combinaison (soit 27 conditions) : une augmentation linéaire sur 50 ans pour la température de 0°, +1° et +2 °C ; une variation des amplitudes de débit : nulle, de +10 % et de +25 % ; une variation des conditions de croissance marines : nulle, de -5 % et de -25 %. En blanc, probabilité d'extinction nulle ; en rose clair à rose foncé = 1%, 2%, 3% et en rouge = 19%.*

Les résultats sont contre-intuitifs car la croissance densité-dépendante contre-balance les effets potentiellement négatifs de l'augmentation des variations de débit, et des moins bonnes conditions de croissance marine. Il est aussi important pour évaluer les risques d'extinction des populations de cibler et d'étudier les phases critiques afin de mieux renseigner ce type de modèle. Ainsi, l'étude de l'impact d'une température de reproduction de 13 °C (soit 3° au-dessus de l'optimum pour la population considérée) sur la fraie du saumon a montré que les comportements de cour et de creusement étaient moins bien synchronisés et allongés, ce qui pourrait diminuer le succès de la reproduction ; malgré tout, il n'y a pas inhibition et la ponte a bien lieu [67]. La température pourrait aussi atteindre des valeurs critiques pour les géniteurs lors de la phase estivale d'attente des crues automnales pour rejoindre les zones favorables à la reproduction, notamment sur des zones très anthropisées où le débit de l'eau est ralenti par des barrages et réduit par le pompage agricole. La modélisation des évolutions de température de l'eau par rapport à celle de l'air est un des points de recherche cruciaux pour établir les prédictions concernant la faune pisciaire. La Nivelle a ainsi pu fournir un jeu de données sur 20 ans permettant de prédire la température de l'eau à l'échelle hebdomadaire avec comme variables explicatives la température de l'air et le débit [68].

Même si l'étude de Tisseuil [62] ne prenait pas en compte le saumon atlantique, elle suggère que les principales divergences de scénarios apparaîtront en seconde moitié du XXIe siècle et porteront essentiellement sur la sévérité des étiages automnaux. Cette hydrologie automnale est particulièrement

importante pour les salmonidés, car les crues sont des facteurs déclenchant de la migration, et des niveaux d'eau réduits peuvent interdire l'accès aux ruisseaux d'ordre 1 ou 2, situés en tête de bassin versant. Des travaux en cours sur la Nivelle permettent de suivre par radio-pistage la localisation des adultes de saumon depuis leur entrée en rivière au printemps ou en l'automne et jusqu'à la reproduction. Ils devraient nous éclairer dans un proche avenir sur la relation entre la température, l'hydrologie, la localisation des saumons et leur succès reproducteur dans le contexte d'une rivière localisée en limite sud de l'aire de répartition de cette espèce.

Les effets possibles sur les oiseaux de montagne

De nombreuses études décrivent les diverses réactions des oiseaux face au changement climatique : modifications de la dynamique locale de leurs populations, changements dans leur distribution géographique, ajustements ou découplage de leur calendrier de reproduction et/ou de migration, etc. Ces effets avérés ou projetés du changement climatique se manifestent au niveau des espèces et au niveau des assemblages d'espèces (par exemple [69][70][71]). Entreprise à l'échelle de l'Europe ou à l'échelle nationale, et disponible sous forme d'Atlas climatique et de publications (par exemple [47] [48]), cette information ne traite pas spécifiquement de la situation de la biodiversité dans les massifs montagneux et encore moins de celle souhaitée ici à l'échelle des montagnes d'Aquitaine. À l'échelle de l'Europe, pour la période 2070-2099, les projections réalisées à partir de modèles de distribution d'espèces font état d'effets variables sur la vulnérabilité et les changements possibles de distribution, selon le scénario climatique pris en compte. En théorie, l'aire potentielle future de distribution pour ces espèces pourrait atteindre 72 à 89 % de l'aire actuelle, et si cela se réalise, le nombre moyen d'espèces nicheuses par maille de 50 x 50 km baisserait de 6,8 à 23,2 % [47]. Les changements les plus dramatiques concerneraient les espèces endémiques pour lesquelles il y aurait un chevauchement très limité ou nul entre aire actuelle et aire future ; ces espèces seraient donc les plus vulnérables et présenteraient le plus haut risque d'extinction. *A contrario*, des espèces à affinité thermique chaude pourraient étendre leur aire de distribution et coloniser de nouveaux sites, en rapport avec le processus de *thermophilisation* évoqué plus haut [27].

En montagne Aquitaine, quelques études illustrent ces diverses tendances. L'installation toute récente, en 2001, du Monticole bleu *Monticola solitarius* dans les montagnes basques illustrerait la thermophilisation en cours de notre région. Il s'agit d'une espèce de Merle typiquement xéro-montagnarde confinée aux régions méditerranéennes qui ne trouvait pas jusqu'à présent dans les Pyrénées occidentales françaises, avec ses printemps à forte pluviosité, des conditions climatiques favorables et qui s'y reproduit désormais [72]. Le Grand Tétras *Tetrao urogallus* est l'une des espèces d'oiseaux bien étudiée aux Pyrénées pour laquelle différents indices témoignent du fait que les changements climatiques en cours jouent un rôle déterminant dans le devenir de ses populations [73][74]. La période des accouplements aurait été légèrement plus précoce au cours des 10 années écoulées que durant les années 1980-1997. Une baisse sensible du succès de la reproduction sur les versants français et espagnols a été mise en rapport avec les changements observés dans les conditions atmosphériques estivales depuis 1980 (notamment l'augmentation des précipitations entre mai et août) tandis que les changements dans les conditions d'enneigement et la phénologie de la végétation sont suspectés d'avoir également un impact important.

Des effets indirects sur la biologie des oiseaux existent mais sont moins connus et plus subtils, car ils s'exercent sur les déterminants physiques du milieu par exemple. Plusieurs études réalisées en vallée d'Ossau indiquent que les stratégies comportementales et les dépenses énergétiques du Cincle plongeur, espèce inféodée aux cours d'eau et abondante dans les Pyrénées [75], sont dictées directement par les caractéristiques du régime hydrologique naturel [76], elles-mêmes profondément affectées [77] par le changement climatique (cf. chapitre 8) et de façon variable par les différents modes de gestion hydro-électriques possibles [78].

Les travaux à long terme de l'Observatoire[4] Régional de la Migration des Oiseaux et les changements amorcés dans le calendrier de la migration des oiseaux en montagne Aquitaine.

Les suivis effectués lors de la migration des oiseaux depuis plus de 30 ans au col d'Organbidexka ont été mis à profit pour documenter les décalages temporels (phénologiques) consécutifs ou susceptibles d'être liés au changement climatique [79][80]. L'analyse pondérée des dates moyennes de passage de 14 espèces de rapaces entre 1981 et 2008 a démontré un décalage temporel statistiquement significatif pour 8 d'entre elles, avec une avancée significative de 10 jours pour le Busard des roseaux *Circus aeruginosus* et un retard significatif de 9 jours pour le Faucon crécerelle *Falco tinnunculus* [79]. De façon générale, le décalage phénologique est plus prononcé chez les espèces migratrices sur de longues distances (par rapport à celles migrant sur des distances plus courtes).

L'analyse des dates de passage de la Grue *Grus grus* indique également une avancée significative de la migration automnale (20 jours en l'espace de 30 ans) et ce indépendamment des variations des conditions météorologiques locales. L'explication envisagée tient à l'augmentation des températures printanières à plus haute latitude en Europe, ce qui pourrait affecter à la fois la migration de printemps et le calendrier de la reproduction [80].

Cas particulier des espèces vulnérables, indicatrices et/ou emblématiques

Pour certaines espèces menacées, l'information disponible – issue en majorité de travaux de modélisation – à l'échelle européenne ou nationale permet de poser des bases réalistes de réflexion pour anticiper une évolution probable [49]. C'est le cas du papillon Apollon (*Parnassius apollo*), une des espèces menacées des espaces supra-forestiers pyrénéens et classée « Vulnérable » dans la liste rouge de l'IUCN (catégorie Vu A1cde). Comme annoncé plus haut, en 2080, elle aurait disparu des montagnes d'Aquitaine sous l'hypothèse la plus extrême (élévation attendue de température de 4,1 °C) tandis que sous l'hypothèse la moins défavorable (élévation de 2,4 °C), la distribution en Aquitaine serait au mieux la même, bien qu'une légère contraction de la distribution soit plus plausible **(Figure 7)**.

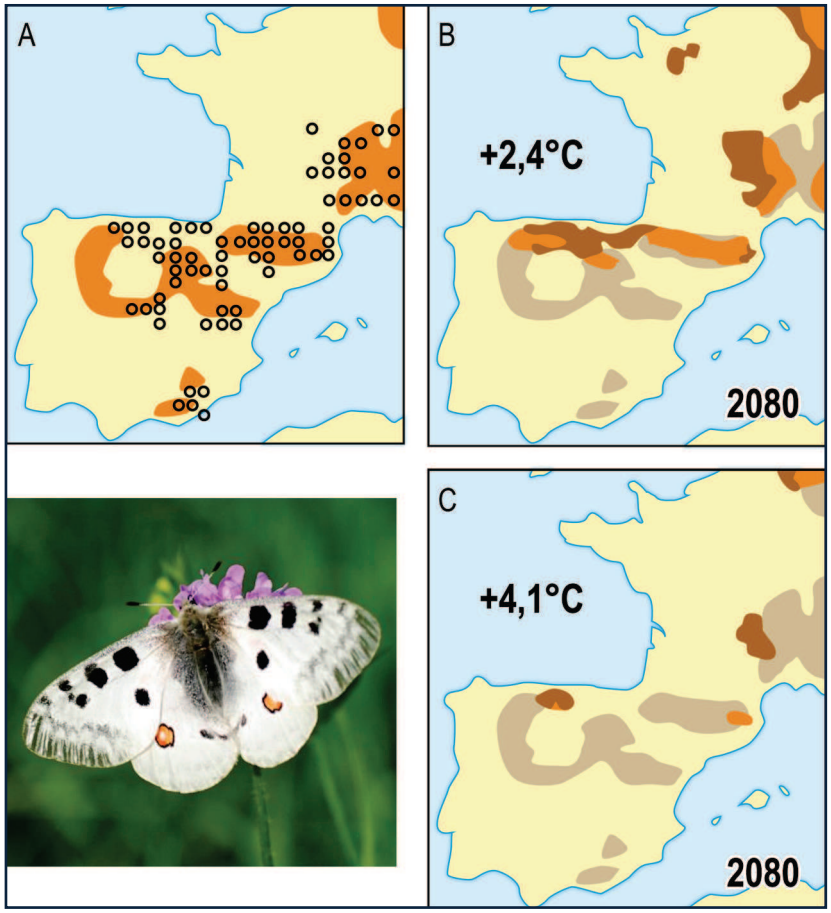


Figure 7 : *Exemple d'effet projeté, après transfert d'échelle, de l'évolution du climat sur la distribution d'un papillon emblématique des montagnes Pyrénées : l'Apollon (Parnassius apollo). (a) Distribution observée (cercles noirs/maille UTM de 50 x 50 km²) et distribution obtenue par modélisation de la niche climatique (orange). (b) et (c) Distribution d'espace climatique de niche projetée en 2080 sous deux scénarios d'évolution : (b) modéré – B1 et (c) extrême – A1F1. Légende : orange : pas de changement ; gris : perte prévisible ; marron : gain prévisible (source : Settele et al. 2008, http://www.pensoft.net/journals/biorisk/issue/1-1/).*

4. Programme d'étude de la migration en Aquitaine coordonné par la LPO Aquitaine avec Organbidexka Col Libre.

Pour la plupart des espèces en fait, l'information n'existe cependant pas, à aucune échelle. Cet état de fait est particulièrement problématique pour certaines espèces dont la distribution en montagne aquitaine reste méconnue (par exemple le criquet *Cophopodisma pyrenea* **(Figure 2-A)** et la grenouille des Pyrénées *Rana pyrenaica* - [81]) ou dont la présence vient juste d'être signalée comme c'est le cas de la mouche des neiges, aptère, *Chionea pyrenaica* **(Figure 2-B,** [82]), ou dont l'écologie est encore insuffisamment explorée comme c'est le cas des espèces végétales des combes à neige (communautés retenues dans le cadre des actions de l'OPCC – cf. § ci-dessous), du Desman des Pyrénées qui bénéficie pourtant de mesures établies à l'échelle nationale (cf. § ci-dessous) ou de certaines espèces de lézards. Des trois lézards montagnards pyrénéens, *Iberolacerta bonnali* est la plus répandue et la seule dont la présence soit signalée en Aquitaine (dans le massif de l'Ossau ; Pyrénées-Atlantiques). Plus répandue que les deux autres, l'espèce est moins menacée [Classification IUCN : I. *aranica* (CR), I. *aurelioi* (EN) et I. *bonnali* (VU)]. Les principaux facteurs de menaces sont liés au fait qu'elle ait une aire de distribution réduite, qu'elle connaisse une fragmentation croissante de ses populations en raison de fortes pressions anthropiques locales en haute montagne et qu'elle possède une stratégie de reproduction exigeante [83]. Le changement climatique exacerberait probablement le confinement de sa distribution à des zones isolées de superficie plus réduites, à plus haute altitude [84] ; combiné à la progression en altitude d'autres espèces compétitrices telles que le Lézard des murailles, il en résulterait probablement une raréfaction accrue en Aquitaine dans un futur proche. Au même titre que l'Espagne, et que les régions Midi-Pyrénées et Languedoc-Roussillon, la région Aquitaine a une responsabilité forte vis-à-vis de ces espèces.

Le cas du Desman des Pyrénées

Bénéficiaire d'un Plan National d'Actions (2010-2015) basé sur 25 actions de conservation [85] et emblématique des Pyrénées, le Desman des Pyrénées (*Galemys pyrenaicus*) est un mammifère unique, totalement inféodé aux cours d'eau. Endémique, rare, très difficile à voir et à étudier, il est en déclin généralisé. L'Aquitaine abrite la population présente à l'altitude la plus basse enregistrée de son aire naturelle de distribution. La priorité des études[5] est donnée à l'actualisation de son aire de distribution et à la compréhension de l'influence des facteurs de l'environnement. Contrastant avec d'autres travaux menés à l'échelle européenne, les travaux d'une équipe internationale [86] démontrent l'importance majeure du facteur « précipitations » et l'absence relative d'influence du facteur « température » **(Figure 8)**. Dans ce cas, l'Aquitaine, en abritant la population la plus au nord-ouest, jouerait un rôle refuge capital dans la préservation de l'espèce face au changement climatique.

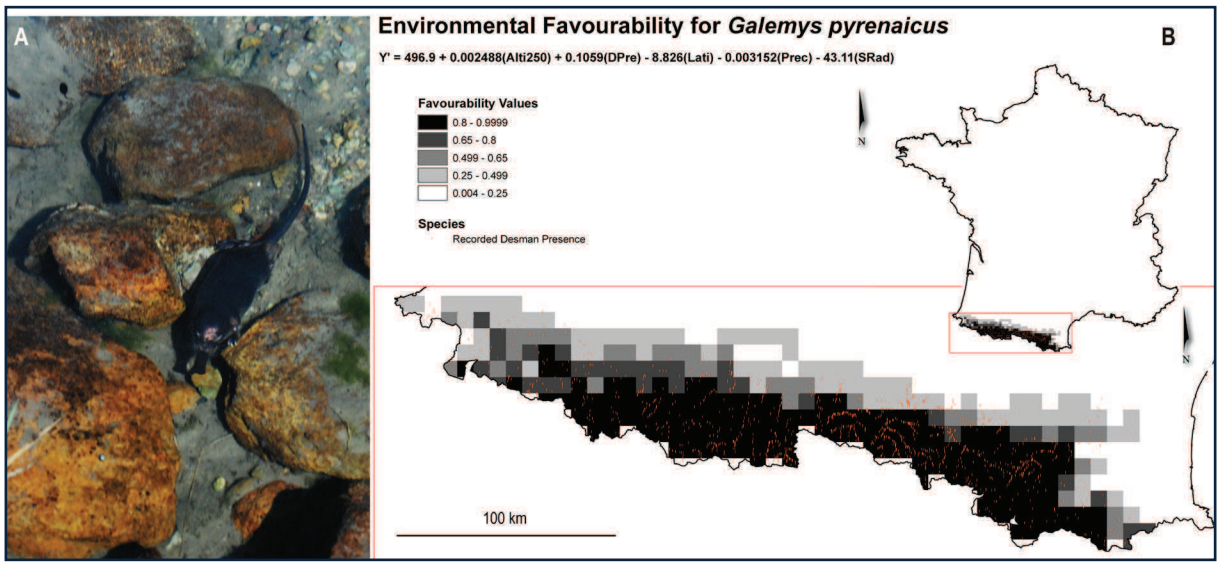
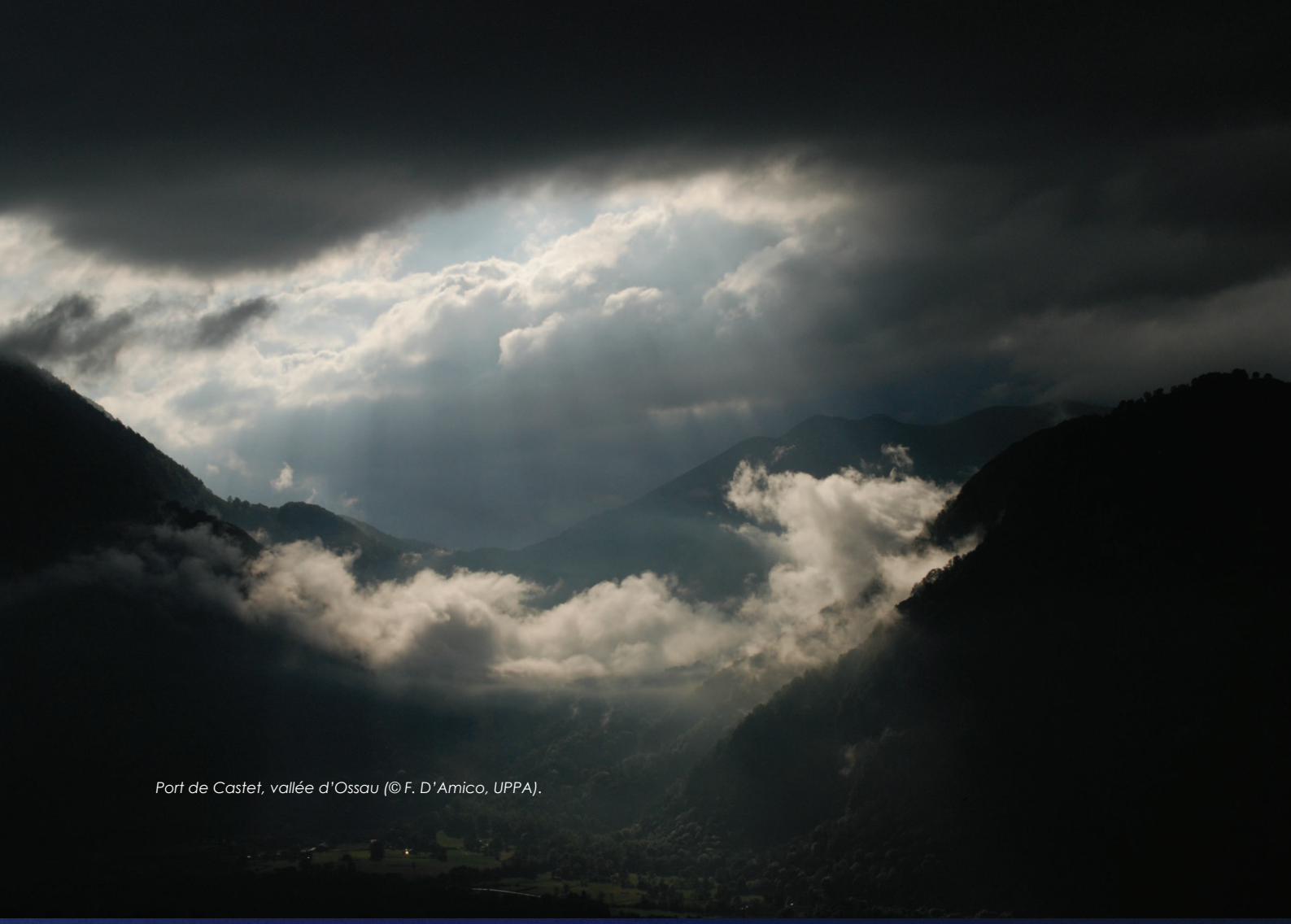


Figure 8 : *La distribution de l'endémique Desman des Pyrénées (Galemys pyrenaicus). (a) individu nageant (b) Distribution observée (cercles orange) et distribution obtenue par modélisation de la niche climatique (niveaux de gris). La favorabilité environnementale des cours d'eau en Aquitaine est en moyenne plus faible qu'ailleurs dans les Pyrénées. [Source : Williams-Trip, D'Amico et al. 2012].*

5. Programme partenarial entre l'INP-ENSAT, l'Université Paul Sabatier (Laboratoire Ecolab), l'Université de Pau & Pays de l'Adour, le CREN Midi-Pyrénées et divers partenaires industriels dont EDF.



Port de Castet, vallée d'Ossau (© F. D'Amico, UPPA).

Rocher d'Aran, vallée d'Ossau (© F. D'Amico, UPPA).

Le suivi des espèces végétales des combes à neige

L'étude des communautés végétales des combes à neige est proposée[6] pour comprendre les effets du réchauffement climatique global sur la végétation des Pyrénées. Ces communautés végétales, avec une flore très particulière, seraient particulièrement sensibles aux changements climatiques du fait de conditions pédoclimatiques exigeantes. *Salix herbacea* est une des rares espèces de chaméphytes avec S. *retusa* et S. *reticulata*, présente dans les combes à neige pyrénéennes. C'est également une des espèces les mieux connues de ces habitats [87][88]. Si les scénarios hypothétiques s'avéraient réels, les combes à neige seraient probablement l'habitat alpin où les conditions méso-climatiques changeraient le plus rapidement [89][90]. Un des principaux scénarios pour les combes à neige prévoit une fonte des neiges plus précoce qui exposerait la végétation à des changements brusques des températures atmosphériques et à une dessiccation plus importante du sol en période estivale. La fonte de la neige et l'augmentation des températures du sol contribueraient à l'évolution du milieu, sur le plan écologique, qui pourrait alors être occupé par d'autres espèces plus opportunistes. Le choix de suivre l'évolution des populations de S. *herbacea* pour évaluer les effets du climat est renforcée par le fait que la plante se situe dans des zones de faibles influences anthropiques, où les modifications d'utilisation des espaces n'ont quasiment aucun effet sur la communauté contrairement aux perturbations induites par le changement climatique.

Impacts sur les écosystèmes

Impacts observés et attendus du changement climatique sur les forêts de montagne

L'analyse de la croissance des peuplements forestiers, totalisant une surface importante dans les montagnes béarnaises notamment, est un bon indicateur de l'impact des changements environnementaux car la croissance des arbres présente une réponse rapide aux variations environnementales [8] et permet de révéler les tendances à long terme sous l'influence des changements climatiques [91][92][93]. C'est avec cet objectif que l'UMR Biogeco de l'INRA a conduit une analyse dendrochronologique qui a mis en en évidence une remontée altitudinale de l'optimum de croissance du hêtre (*Fagus sylvatica*) dans les Pyrénées occidentales entre 1970 et 2009. Le long de gradients altitudinaux situés dans les Pyrénées françaises, l'optimum de croissance de cette espèce, qui est ici dans sa limite sud d'aire de répartition, s'est déplacé à la vitesse de 34 m par décennie passant de 420 m d'altitude en 1970 à 550 m d'altitude quatre décennies plus tard. Ce déplacement de l'optimum s'explique d'une part par un déclin de croissance à basse altitude (en dessous de 600 m) et d'autre part par un gain de croissance au-dessus de 600 m au cours des quatre dernières années **(Figure 9)**. De plus, la comparaison des années selon leur climat a permis de constater que les faibles précipitations tout comme les hautes températures pendant la saison de croissance conduisent à un optimum de croissance plus élevé le long du gradient.

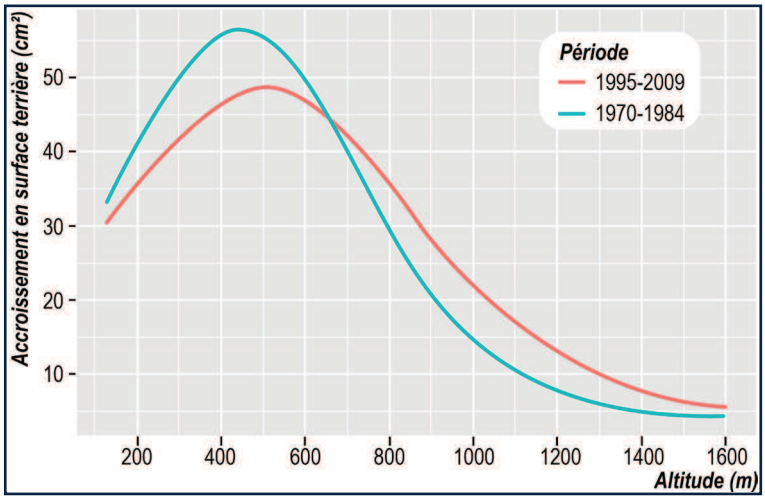


Figure 9 : *Comparaison des patrons de croissance moyenne le long du gradient au cours des périodes 1970-1984 et 1995-2009, ajustés sur les accroissements individuels des arbres. La croissance des 15 dernières années présente un déclin sensible en dessous de 600 m d'altitude par rapport à celle de 1970-1984. Au-dessus de 600 m, la croissance des arbres a par contre augmenté lors de la période récente. Le déclin à basse altitude et le gain de croissance à haute altitude induisent un déplacement altitudinal de l'optimum de croissance.*

6. Proposé pour l'OPCC par le CENMA et le CBNPMP.

Dans le cadre d'une expérimentation de transplantations réciproques du hêtre le long du même gradient altitudinal **(Figure 10)**, les populations de hêtre, transplantées à toutes les altitudes, ont été suivies pour leur croissance et leur phénologie durant plusieurs années [93].

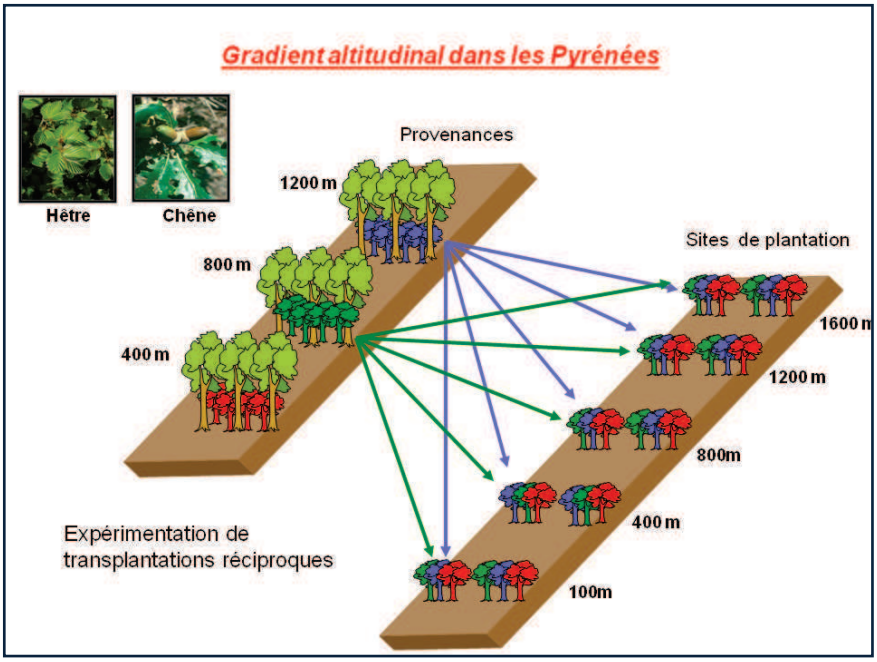


Figure 10 : *Représentation schématique du dispositif de transplantations réciproques du hêtre mis en place le long du gradient altitudinal dans les Pyrénées.*

Pour la croissance du hêtre, on observe une courbe en cloche vis-à-vis du gradient altitudinal avec des accroissements en hauteur plus faibles aux extrémités du gradient. L'optimum de croissance des juvéniles estimé sur cette courbe se situe en moyenne à 789 m, correspondant ici à une température annuelle de 9,54 °C. La température optimale estimée pour la saison de végétation est plus élevée et comprise entre 10 et 13 °C [93], correspondant à une altitude moyenne de 750 m. Les optimums altitudinaux estimés pour la saison de végétation et la croissance sont donc semblables, suggérant que la phénologie et la longueur de saison de végétation sont de bons indicateurs de la croissance et de la *fitness* des individus et des populations. Le changement climatique a d'ores et déjà affecté la croissance des populations de hêtre dans les Pyrénées et les populations de cette espèce à basse altitude pourraient être défavorisées au profit d'espèces plus thermophiles ou plus résistantes à la sécheresse **(Figure 11)**.

Les optimums de croissance et de saison de végétation sont similaires entre les différentes populations de hêtre **(Figure 12)**. Ces résultats démontrent que les populations naturelles ont tendance à vivre dans un climat suboptimal [95]. Les populations de haute altitude vivent au sein d'un climat plus froid que leur optimum et pourraient ainsi bénéficier positivement du réchauffement ; au contraire, les populations de basse altitude vivent déjà dans une zone où le climat est plus chaud que leur optimum ce qui pourrait engendrer un déclin de croissance lors d'un réchauffement. Les résultats obtenus sur les modifications du patron de croissance le long du gradient altitudinal en population naturelle et dans l'expérimentation de transplantations réciproques suggèrent que le réchauffement sera bénéfique pour les populations de haute altitude et qu'il affectera négativement celles de basse altitude. Ainsi, l'optimum de croissance et de présence/absence du hêtre devrait remonter en altitude au cours des prochaines décennies et nous pourrions même observer une extirpation (= extinction locale) à basse altitude dans un futur très proche, ce qui a d'ailleurs déjà été constaté au sein de populations de hêtre à basse altitude en Catalogne [8][96].

Figure 11 : *Le changement climatique a d'ores et déjà affecté la croissance des populations de hêtre (en arrière-plan sous l'imposante stature du Pic du Midi d'Ossau – 2 885 m) et les populations de cette espèce à basse altitude pourraient être défavorisées au profit d'espèces plus thermophiles ou plus résistantes à la sécheresse (au premier plan de la photographie, cliché : F. D'Amico, 9 mai 2012).*

Impacts observés et attendus du changement climatique sur les écosystèmes prairiaux

C'est dans les situations environnementales moyennement stressées et moyennement perturbées, par les herbivores ou la fauche traditionnelle, que les communautés herbacées de pelouses et prairies sont les plus diverses (**Figure 13** : graphique du bas). En effet, conformément au modèle de Grime [97], dans les milieux plus stressés et/ou perturbés la diversité est très faible du fait de l'importance des contraintes environnementales (partie droite de la **Figure 13**), alors que dans les milieux à faible stress et/ou perturbation c'est l'intensité de la compétition entre les plantes qui fait chuter la diversité (partie gauche de la **Figure 13**). Ce modèle de maximum de diversité au milieu des gradients de productivité herbacée a été particulièrement discuté très récemment [98] mais il demeure encore largement reconnu dans la littérature scientifique [99]. Néanmoins, les interactions entre les plantes ne sont pas toujours négatives et l'importance des interactions biotiques positives est maintenant également largement reconnue, en particulier dans les environnements très contraints par le stress ou la perturbation [100]. Michalet *et al.* [101] ont notamment proposé que ce seraient les interactions

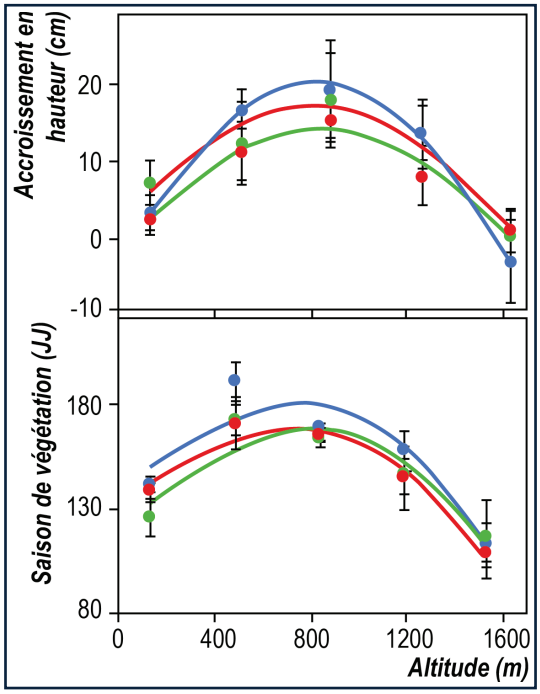


Figure 12 : *Accroissement en hauteur et longueur de saison de végétation en fonction de l'altitude. Les valeurs correspondent aux moyennes par population mesurées dans l'expérimentation de transplantations réciproques. En rouge, les populations de hêtre provenant de 400 m, en vert, celles de 800 m et en bleu, celles de 1 200 m.*

positives (facilitation) qui pourraient également expliquer la forte diversité de ces pelouses, de par une augmentation de la facilitation depuis les environnements les plus contraints jusqu'aux environnements moyennement contraints (**Figure 13** : graphique du haut).

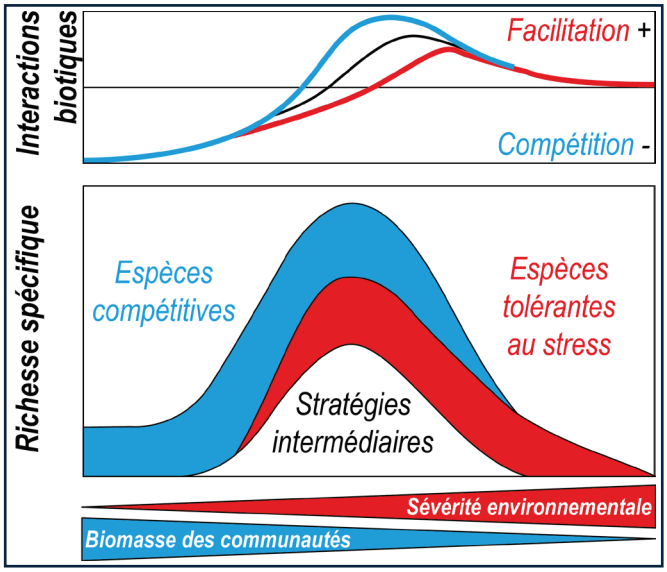


Figure 13 : *Évolution des interactions entre plantes le long d'un gradient complexe de contrainte environnementale croissante (stress et perturbation physique) et de biomasse végétale décroissante (graphique du haut). Le graphique du bas représente l'évolution en parallèle de la richesse spécifique des communautés herbacées proposée par Grime (1973) D'après Michalet et al. (2006).*

Les recherches internationales effectuées sur les effets du changement climatique sur les communautés herbacées visent à étudier les effets du changement climatique sur leur diversité et/ou leur productivité mais la plupart se sont intéressées aux seuls effets d'une augmentation de température ou éventuellement d'une diminution des précipitations [102][103][104]. Cependant, dans ces milieux la diversité étant également sous la dépendance des pratiques de gestion (perturbation par fauche ou pâturage), il est important d'étudier les interactions entre les changements de perturbation et les changements climatiques. Ceci est particulièrement vrai dans les écosystèmes du sud de l'Europe où de nombreuses études théoriques et de modélisation ont prédit que l'interaction du stress (sécheresse par exemple) et de la perturbation pourrait entraîner des effets catastrophiques sur le fonctionnement des écosystèmes et la diversité [101][105]. D'autre part, ces études de changement climatique se sont rarement intéressées aux changements éventuels d'interactions entre les plantes au sein des communautés en ne ciblant que sur les changements de productivité et les réponses des espèces dominantes, alors qu'il est maintenant admis que les interactions entre les organismes pourraient fortement moduler les réponses des communautés et des écosystèmes au changement climatique [106][107][108]. En particulier, dans les écosystèmes stressés du sud de l'Europe il est prédit que l'interaction du stress d'origine climatique et des perturbations devrait entraîner l'effondrement des écosystèmes et de la diversité par effondrement des interactions positives entre plantes ([101][105] et **Figure 13**).

Conduites en Aquitaine par les chercheurs de l'UMR 5805 *EPOC* (Université Bordeaux 1)[7] les expérimentations mises en place en 2010 dans les estives des Pyrénées-Atlantiques à la Pierre-Saint-Martin (1 900 m, commune d'Arette) permettront de comprendre les interactions entre (1) l'augmentation de la sécheresse d'origine climatique due à l'effet combiné du changement climatique et des perturbations liées aux activités anthropiques et (2) le rôle modulateur des interactions biotiques. Diverses communautés de pelouses d'humidités édaphiques contrastées ont été asséchées en installant des tunnels interceptant les précipitations estivales **(Figure 14)** et en appliquant une perturbation de type fauche. Pour les conditions d'humidité, un gradient de seize communautés a été choisi ; il s'échelonne depuis des pelouses très xérophiles sur rocher affleurant jusque des pelouses très mésophiles dans des dépressions sur sol profond. Dans chaque parcelle, la réponse aux traitements sécheresse et fauche d'espèces représentatives de ces communautés a été étudiée soit en présence de voisins ou dans des microsites où les voisins ont été éliminés. A également été suivie la réponse des communautés en termes de diversité, de productivité et de fonctionnement des écosystèmes (décomposition des litières). Au niveau de ce site d'étude

7. 2009-2012, dans le cadre d'un projet ANR SYTERA coordonné par Laurent Hazard, INRA Toulouse.

pyrénéen, les résultats sont encore provisoires **(Figure 15)** et l'expérimentation est toujours en cours. Les premiers résultats au niveau des interactions biotiques indiquent que dans les parcelles les plus humides la compétition est dominante, aussi bien avec que sans fauche. Au milieu du gradient d'humidité la compétition cède la place à la facilitation, conformément aux modèles théoriques. Cette dernière semble persister à l'extrémité du gradient de sécheresse où la fauche a alors un effet négatif significatif sur la survie des espèces.

Figure 14 : *Installations expérimentales de simulation d'une augmentation de l'aridité estivale par interception des précipitations au niveau des estives de la commune d'Arette (Col de la Pierre-Saint-Martin, 1 900 m, Pyrénées-Atlantiques).*

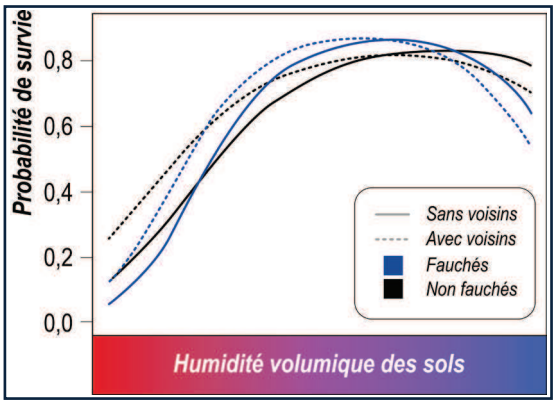


Figure 15 : *Probabilités moyennes de survie de cinq espèces (ou phénotypes d'espèces) herbacées des estives de la Pierre-Saint-Martin le long d'un gradient complexe (naturel et expérimental) d'humidité du sol, avec et sans fauche et avec et sans voisins.*

Comme cela a été montré dans les anciens parcours ovins de Dordogne, la diversité, la productivité et le fonctionnement des écosystèmes pourraient être très négativement affectés par le seul effet de la sécheresse estivale. Par contre, dans les situations les plus xérophiles la perturbation par la gestion (pâturage, fauche) ne semble pas augmenter les risques de détérioration des propriétés de ces écosystèmes et ce d'autant plus que ces parcours sont déjà fortement abandonnés par les éleveurs. Les premiers résultats obtenus dans les estives pyrénéennes sont identiques en ce qui concerne les communautés les plus mésophiles et soulignent la nécessité de conserver une pression de gestion importante. Par contre au niveau des situations les plus sèches, l'importance de la facilitation entre les plantes, semble constituer une assurance pour la diversité face à l'augmentation de la sécheresse induite par le changement climatique. Des études plus longues pourraient néanmoins démontrer que l'ajout de la perturbation par la gestion entraînerait un effondrement des propriétés des communautés et des écosystèmes, conformément aux modèles théoriques et mathématiques les plus récents.

III- Adaptations/Mitigation

Quelques 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 :

- 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 pour renforcer la capacité d'adaptation des forêts au changement climatique.

- 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.

- 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 [109].

- 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 comme zones-cibles pour établir des populations transplantées [110].

- 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 [30] 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 peut se traduire pour l'Aquitaine par un maintien ou un renforcement des échanges avec les territoires situés plus à l'Est (région Midi-Pyrénées notamment) et au Sud (Euskadi, Navarra…).

Conclusion

Plusieurs travaux scientifiques témoignent déjà d'impacts significatifs, tant sur les activités économiques – pronostic ou diagnostic plutôt incertain pour le futur des stations de ski béarnaises sans adaptation particulière – que sur l'évolution des quelques espèces animales étudiées pour l'instant en Aquitaine (qui de ce fait, a une responsabilité forte en terme de conservation de celles-ci) et sur le fonctionnement des forêts et des estives. Certes les glaciers du massif sont menacés de disparition d'ici 2050, mais le côté le plus alarmant de ces constats n'est pas nécessairement dans la dramatisation des

impacts possibles et/ou avérés mais plutôt dans la révélation d'un manque de scénarios fiables à l'échelon des massifs et des vallées des Pyrénées occidentales (Ossau, Aspe, Barétous, Aldudes…). Les résultats observés et décrits ici pour le milieu montagnard relèvent de recherches encore souvent préliminaires et nécessitent parfois une prise de recul prudente. Ils montrent que les effets possibles du changement climatique sur les communautés (notamment herbacées) sont très dépendants des situations locales et qu'il faut se garder de généraliser trop rapidement des observations ou expérimentations réalisées dans des contextes spécifiques. Il reste indispensable 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. La prise de recul sur les modèles est absolument nécessaire car les effets possibles du changement climatique sur les communautés (notamment herbacées) sont très dépendants des situations locales. Qui plus est, ce sont pour l'instant des modèles centrés sur l'espèce elle-même, et *a fortiori*, ils n'intègrent pas encore, ou pas suffisamment les entrées « écosystème », « communauté » ou « diversité génétique » et ils s'appuient peut-être de façon excessive sur les données de répartition actuelle, elle-même largement conditionnée par les activités anthropiques passées et actuelles. Il n'en demeure pas moins que la modélisation est un outil extrêmement précieux pour accroître la connaissance, permettre l'anticipation et la préparation des mutations.

Les manifestations à venir du changement climatique mettent en jeu des systèmes complexes propres à l'altitude, intriquant processus nombreux physico-chimique, écologiques et socio-économiques. À côté des premières certitudes, de nombreuses inconnues subsistent pourtant : qu'en est-il des effets (régionaux voire globaux) de l'écobuage ? Que dire de la prolifération algaire et de l'eutrophisation visibles dans les ruisseaux des estives : effets combinés du changement climatique et des modifications locales des pressions de pâturage ? Quels seront les effets sur certaines pratiques artisanales comme l'apiculture ? Quelle est l'ampleur des effets réels sur l'intégralité de la biodiversité d'altitude dans les Pyrénées-Atlantiques ?

De façon indubitable, les premiers résultats démontrent l'importance de construire des projets expérimentaux de longue durée dans des contextes écologiques diversifiés et invitent à la promotion de recherches concertées et basées sur des observations de terrain, complémentaires aux travaux de modélisation, dans le cadre d'Observatoires notamment.