



HAL
open science

3.4 Risques naturels

Yvan Caballero, Séverine Bernardie, Nina Graveline, María del Carmen Llasat, Christine Bouisset, Sylvie Clarimont, Isabelle Degrémont, Santiago Beguería, Juan Ignacio López Moreno, Vincent Jomelli, et al.

► **To cite this version:**

Yvan Caballero, Séverine Bernardie, Nina Graveline, María del Carmen Llasat, Christine Bouisset, et al.. 3.4 Risques naturels. OPCC (Observatoire pyrénéen du changement climatique). 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, p.111-122, 2018, 978-84-09-06268-3. hal-02166448

HAL Id: hal-02166448

<https://hal.science/hal-02166448>

Submitted on 25 Sep 2023

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

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).

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.

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.

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

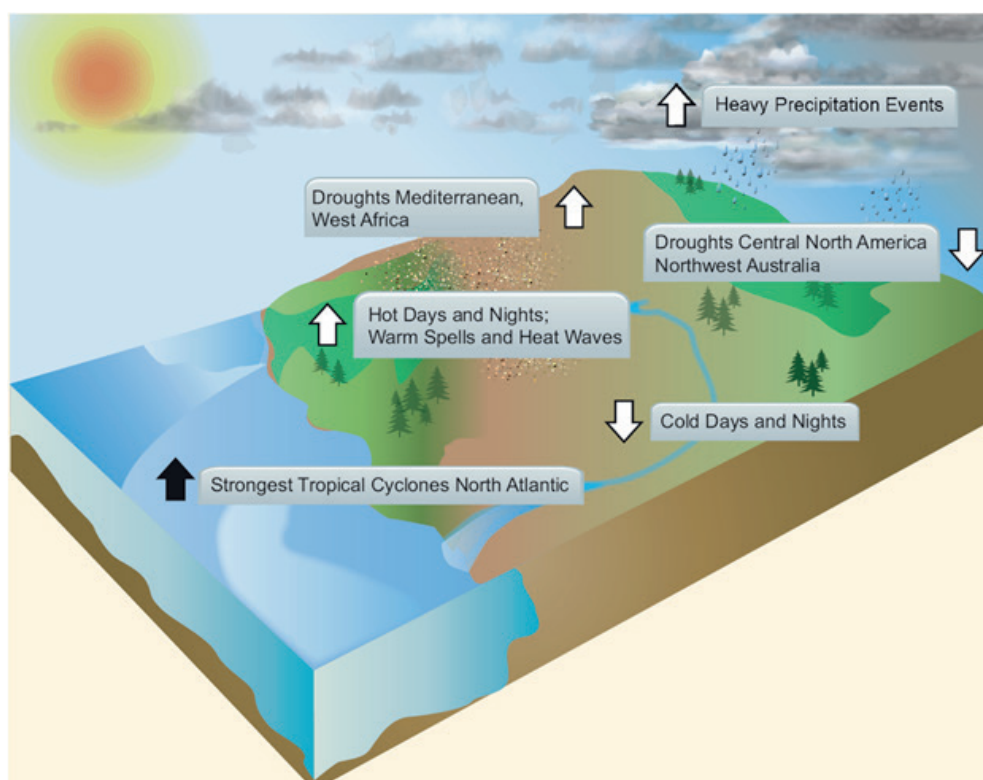


Figure 3.4.1. Évolution des fréquences (ou de l'intensité) de différents types d'événements extrêmes (l'évolution à la hausse ou à la baisse est indiquée par le sens de la flèche), depuis le milieu du 20ème siècle . Source: extrait de Hartmann et al., 2013.

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.

ENCADRÉ 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 température⁷⁰. 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 vulnérabilité, 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 19^{ème} 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 décès. 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-Rodríguez *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

ENCADRÉ 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 amont⁷¹. 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 Aire 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 événements 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 événements 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 événements 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 (Baills 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

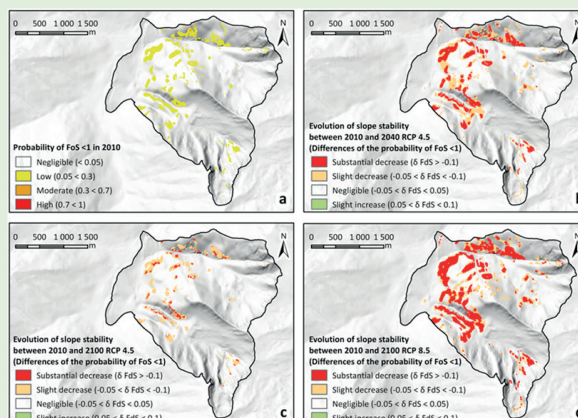


Figure 3.4.2: Évolution de la susceptibilité aux glissements de terrain en fonction du changement climatique avec deux scénarios différents: a) probabilité de FS⁷² <1 en 2010, b) différences de probabilité de FS <1 entre 2010 et 2040 avec scénarios RCP 4.5, c) différences de probabilité de FS < 1 entre 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.

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.

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 Kääh 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 montagne en Europe sont localisés dans les Alpes. Ravel 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).

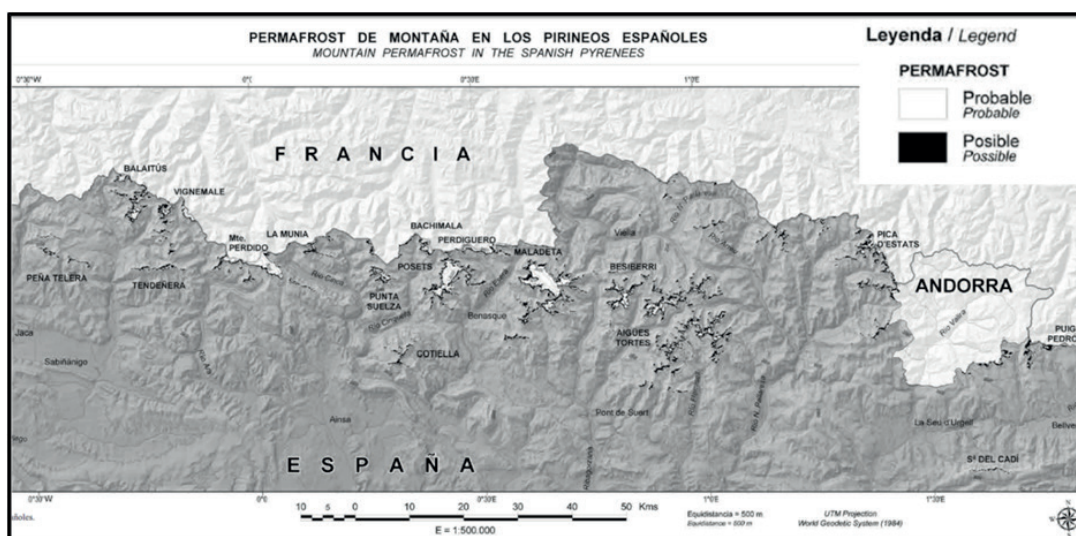


Figure 3.4.3: Présence possible et probable du permafrost dans les Pyrénées espagnoles (modifié de Serrano *et al.*, 2009).

3.4.5. Avalanches

Les avalanches peuvent caractériser 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 dus 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 due 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 mètres en hiver, à cause de la possible augmentation de la fréquence des fortes précipitations. Dans la zone pyrénéenne 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 XXI^{ème} 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 planification 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 (Schlätppy *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 projets⁷³ 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

ENCADRÉ 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.

(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.

3.4.7. Conclusions et recommandations

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'exemples⁷⁵ 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 soft⁷⁶

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 vertes⁷⁷

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'AAE (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'UE⁷⁸ 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://nwrn.eu/measures-catalogue>

Mesures grises⁷⁹

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

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).

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.

(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).