



HAL
open science

Cycle hydrologique et ressources en eau

Santiago Beguería, Yvan Caballero, Enrique Serrano, Marilen Haver, Anne Zabaleta, Luis Javier Lambán Jiménez

► **To cite this version:**

Santiago Beguería, Yvan Caballero, Enrique Serrano, Marilen Haver, Anne Zabaleta, et al.. Cycle hydrologique et ressources en eau. 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, Observatoire pyrénéen du changement climatique, pp.66-77, 2018, 978-84-09-06268-3. hal-04217055

HAL Id: hal-04217055

<https://hal.science/hal-04217055>

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

2.6 Cycle hydrologique et ressources en eau

Coordination: Santiago Beguería (EEAD-CSIC)

Auteurs: Santiago Beguería (EEAD-CSIC), Yvan Caballero (BRGM), Enrique Navarro (IPE-CSIC), Marilen Haver (ECOLAB, CNRS, INPT, UPS), Anne Zabaleta (UPV/EHU), Luis Javier Lambán Jiménez (IGME).

RÉSUMÉ

Les Pyrénées ont une importance fondamentale pour les ressources en eau des territoires situés des deux côtés de la division hydrologique, car c'est dans ses bassins de tête que se produisent une partie très importante des débits de surface et des eaux souterraines qui sont utilisées en aval dans les bassins de l'Èbre, Adour, Garonne, etc. L'analyse des séries instrumentales de flux circulants montrent une tendance générale à la diminution des débits moyens annuels au cours des dernières décennies. Cette diminution ne peut être attribuée qu'en partie au changement climatique étant donné l'importance de l'effet des changements d'occupation du sol et de la végétation, surtout dans la partie sud de la cordillère. On a également observé des changements des régimes mensuels, liés à une modification de la relation neige / pluie en hiver, moins d'accumulation de neige et accélération de la fusion, qui se traduisent par des changements importants des régimes d'écoulement des rivières, qui évoluent vers des régimes de type pluvial, avec de plus gros débits en hiver, une précocité et une diminution des flux de fonte printaniers et des saisons sèches plus longues et intenses. L'analyse des données enregistrées au cours des dernières décennies n'a pas fourni de signaux clairs de changement en termes de fréquence des débits extrêmes. La plupart des modèles climatiques annoncent pour la région pyrénéenne des élévations de températures et une diminution des précipitations au cours du XXI^e siècle. Ces changements augmenteraient le stress sur la végétation, entraînant une évapotranspiration plus élevée, qui affecterait à son tour les autres composants du bilan hydrologique (ruissellement de surface et recharge). En conséquence, le teneur en eau dans le sol diminuerait, les situations de saturation seraient de moins en moins fréquentes et se limiteraient à des périodes hivernales et printanières. Outre les changements de forçage climatique, le bilan hydrologique des Pyrénées sera affecté par des changements de la couverture végétale. Celle-ci pourrait en effet bénéficier d'une reprise des processus de revégétalisation, d'ores et déjà observés au cours

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

des dernières décennies du XX^e siècle, suite à l'abandon des activités agricoles. Par ailleurs, le réchauffement conduirait à une migration des étages altitudinaux, alors que la pression humaine augmentera sur certains secteurs, au travers des stations de ski, du développement touristique et de la création de résidences secondaires. Les changements en termes de débits annuels et saisonniers peuvent entraîner une baisse de la qualité des eaux, du fait de la diminution de l'effet de dilution des substances polluantes. Le panorama général proposé dans ce chapitre va donc dans le sens d'une aggravation des tendances actuellement observées, entraînant une moindre disponibilité de ressources en eau dans le futur. Les ressources en eau générées dans les Pyrénées sont donc essentielles pour l'agriculture irriguée et la production d'aliments, pour la production d'énergie hydroélectrique, pour l'industrie et pour l'approvisionnement domestique non seulement des populations des Pyrénées, mais encore d'un territoire beaucoup plus large qui comprend des millions d'habitants et certaines des concentrations urbaines les plus importantes de la région. Tout changement qui affecte le cycle hydrologique des Pyrénées est donc susceptible d'avoir des répercussions sur un territoire et une population beaucoup plus vastes.

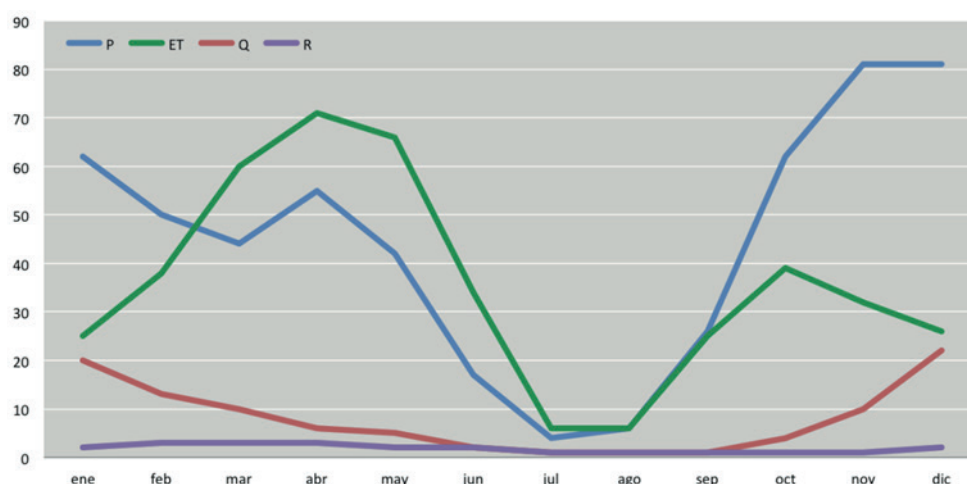


Figure 2.6.1. Bilan hydrologique mensuel typique d'un bassin de climat méditerranéen, avec indication des entrées par précipitation (P), les sorties par évapotranspiration (E), le débit de surface (Q) et la recharge (R). Unités : l m-2. Source : adaptation de Beguería et al., 2015.

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

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

certaines secteurs, tels que les stations de ski et les complexes touristiques et de résidence secondaire.

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

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

- Quelles sont les tendances d'évolution des ressources en eau de surface et souterraines des Pyrénées, observées dans les dernières décennies?
- Quelles sont les projections d'évolution des ressources en eau tout au long du XXI^e siècle, et quel est leur degré de confiance?
- Quelles conséquences auront les changements du cycle hydrologique des Pyrénées sur la qualité des eaux, les cycles biologiques et les écosystèmes associés aux plans d'eau?
- Comment peut-on faire face à ces conséquences?

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

- Approche statistique: L'analyse de séries temporelles suffisamment longues des principales variables du bilan hydrologique (précipitations, températures, débits) permet de déterminer l'existence de tendances d'évolution à la hausse ou à la baisse. Cette méthode, que nous pourrions

qualifier de rétrospective, doit nous permettre aussi de d'identifier la cause des variations observées, à savoir la relation avec le forçage climatique ou avec d'autres causes telles que les changements d'occupation du sol.

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

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

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

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

Outre ce travail de détection de signal, l'utilisation de modèles de simulation hydrologique permet aussi d'estimer l'évolution future des débits annuels face à divers scénarios de changement climatique. Ainsi, López-Moreno et al., (2014) ont estimé, pour le versant sud des Pyrénées et à l'horizon 2050, que les changements climatiques prévus entraîneraient une diminution des débits annuels de 10 à 20 % par rapport à la période 1970-2000, en fonction du bassin étudié. La Confédération Hydrographique de l'Èbre a estimé cette baisse à 5 % en moyenne pour l'année 2027 et la totalité du bassin (CHE, 2015). Quintana-Seguí et al., (2010), pour les rivières pyrénéennes du bassin de Rhône-Alpes, ont estimé une baisse des débits annuels de 10 à 20 % pour la période 2035-2065 par rapport à la période 1970-2000. Pascual et al., (2014) ont estimé des baisses des débits annuels allant de 25 à 34 % dans les bassins catalans pour le dernier quart du XXe siècle, et Manzano (2009) estime cette

réduction à 10 % pour 2040. Candela et al., (2012), pour l'horizon 2050, estiment des baisses de l'ordre de 20 % des débits, associés à des baisses de précipitation et considèrent aussi une baisse de la recharge des nappes aquifères d'environ 18 %. Caballero et al., (2007) estiment pour l'Ariège une baisse d'environ 20 % des débits annuels et saisonniers pour la période 2055-2065, par rapport à la période de référence 1985-1995. Les simulations effectuées dans des bassins de tête des réservoirs du Zadorra dans le Golfe de Biscaye, indiquent une diminution des débits annuels allant de 8 à 15 % pour l'année 2060, par rapport à la période 1961-2000 (IHOBE, 2017; Meaurio, 2017). La plupart de ces travaux tiennent compte de l'effet du changement climatique uniquement, mais si l'on y intègre l'effet des changements d'occupation du sol et en supposant un scénario qui prolonge la tendance au reboisement des dernières décennies, la chute des débits annuels des cours d'eau du versant sud des Pyrénées augmente de 10 à 20 % (López-Moreno et al., 2014). Dans la zone la plus occidentale et atlantique, les simulations considérant différents types d'utilisation du sol n'ont pas montré beaucoup d'influence sur les débits moyens annuels, mais plutôt sur les débits en saison sèche (IHOBE, 2017; Meaurio, 2017).

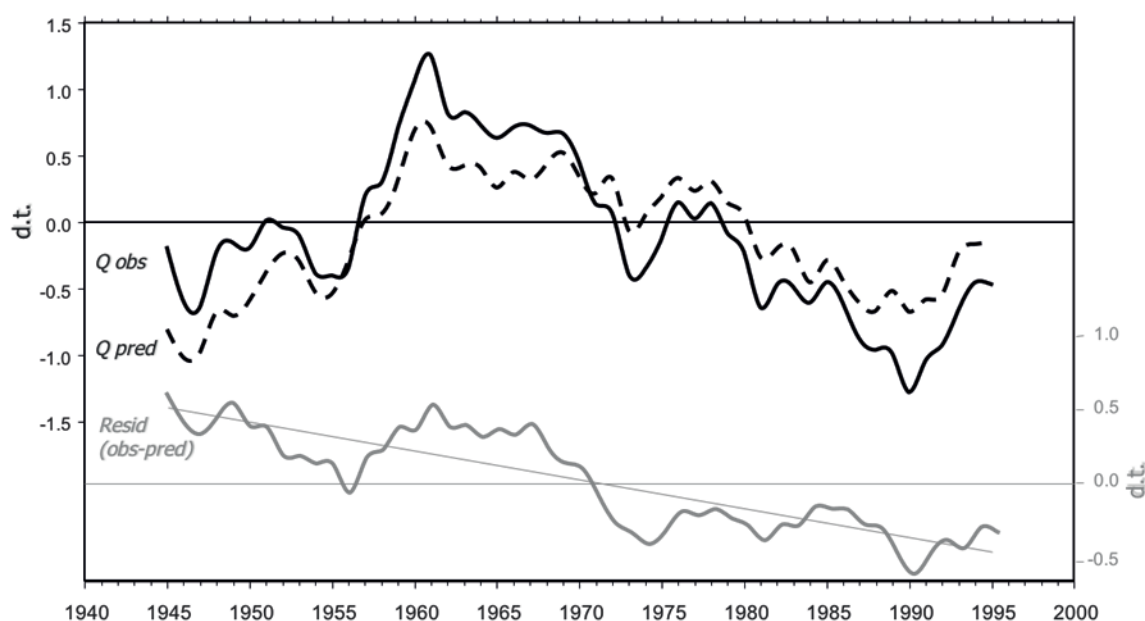


Figure 2.6.2. Évolution des contributions annuelles des rivières des Pyrénées centrales espagnols (Q_{obs}) et des débits théoriques à partir des seules données climatiques (Q_{pred}). La résiduelle (Resid), ou différence entre débits prévus et observés, montre une évolution à la baisse des débits qui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

2.6.2. Changements des régimes d'écoulement mensuel

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

Sur le versant français des Pyrénées, Boé *et al.*, (2009) ont utilisé un ensemble de scénarios climatiques avec un modèle de simulation hydrologique et décrivent une évolution similaire du régime annuel dans les rivières Ariège et Garonne (Figure 2.6.4). En comparant la période 2046-2065 à la période de référence 1970-1999, ils trouvent des réductions générales du débit qui sont plus marquées au printemps et au début de l'été

en raison de l'effet combiné des précipitations réduites, de l'évapotranspiration plus forte et de la réduction du manteau nival. Au contraire, les débits d'hiver montrent peu de variation avec la période de référence (Garonne), ou même augmentent (Ariège), en raison d'une plus grande fréquence des épisodes de pluie par rapport à ceux de neige. La simulation de Caballero *et al.*, (2007) estime à environ 50 % la réduction de la précipitation sous forme de neige dans le bassin Adour-Garonne pour l'horizon 2050-2060, par rapport à la période de référence 1985-1995. Les conséquences en sont l'augmentation des débits d'hiver et une précocité du pic de printemps, avec des réductions des débits d'environ 11 % en été.

2.6.3 Modifications pour les eaux souterraines et les sources

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

2.6 Cycle hydrologique et ressources en eau

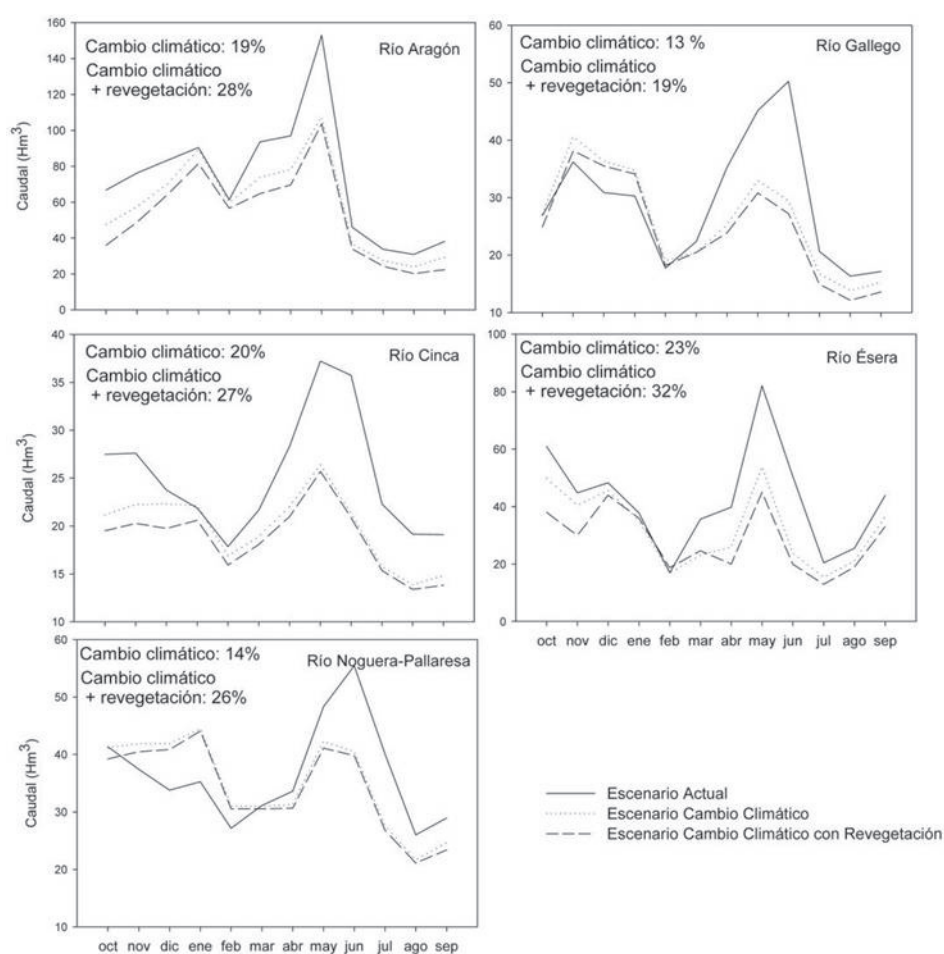


Figura 2.6.3 Variaciones en el régimen de algunos ríos de los Pirineos en el año 2050 con respecto al régimen medio del periodo 1970-2000, para escenarios de cambio climático y de cambio climático con revegetación. (Fuente: adaptado de López-Moreno et al., 2014.)

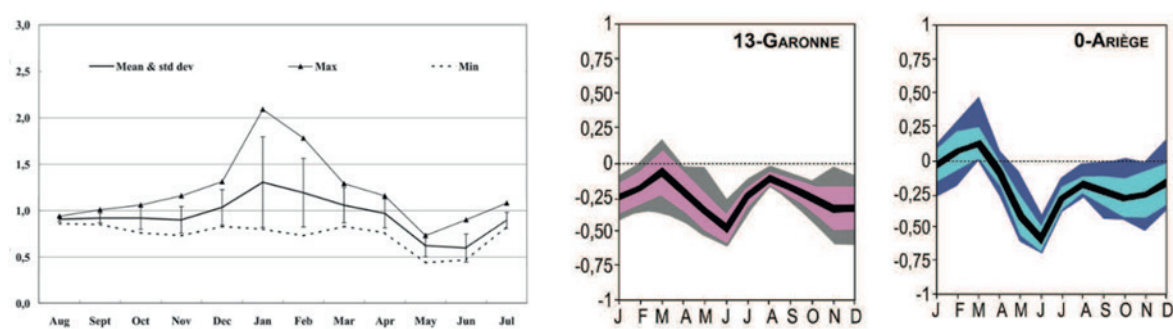


Figura 2.6.4. Variación relativa del régimen de los ríos Garonne en Foix (2055-2065 con respecto a 1985-1995); Garonne en Lamagistère y Ariège en Foix (2046-2065 con respecto a 1970-1999). (Fuente: Caballero et al., 2007; Boé et al., 2009.)

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

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

Le rapport Acclimaterra (Le Treut, 2013) souligne le manque de connaissances sur l'impact du changement climatique sur les ressources en eau dans le bassin Adour-Garonne. De manière similaire, et pour ce qui est des systèmes hydrogéologiques de la partie centrale des Pyrénées françaises, aucune tendance n'a

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

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

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

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

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

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

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

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

du fleuve, mais encore modèleraient (dans les deux sens) la toxicité des polluants dans l'eau (Val *et al.*, 2015c). Par exemple, alors qu'une augmentation des solides en suspension due aux inondations réduirait la toxicité des métaux lourds, les variations de qualité du matériau dissous, comme le carbone organique, pourraient l'accroître.

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

2.6.5. Modifications dans la composition biologique des masses d'eau

Le changement climatique, les changements dans l'utilisation des sols et la pollution, sont des facteurs de stress pour les écosystèmes aquatiques de montagne et menacent leur fonctionnement et leur bonne santé. Les gradients abrupts des conditions abiotiques (température, précipitation etc.) en terrain de montagne génèrent une diversité de micro-habitats qui hébergent ainsi une biodiversité très riche. Les organismes qui colonisent ces habitats sont adaptés à des gammes étroites de conditions abiotiques, ce qui les rend particulièrement sensibles au changement climatique (Nogués-Bravo *et al.*, 2007; Elsen et Tingley, 2015) Certaines espèces peuvent être ainsi utilisées comme des indicateurs, des sentinelles des perturbations environnementales. Par leur présence ou absence et leur état de santé, elles peuvent nous renseigner sur l'état de santé du système aquatique. Les amphibiens de par leur mode de vie semi-aquatiques sont affectés par les modifications de leur habitat dans l'eau ou sur terre. En raison de leur sensibilité face aux changements environnementaux, ils sont souvent considérés comme espèces indicatrices de la qualité des systèmes aquatiques. L'extinction massive et actuelle des amphibiens à l'échelle globale semble être liée à une combinaison complexe d'interactions entre perte d'habitat et dégradation de l'environnement, ainsi qu'à des maladies émergentes (Blaustein et Kiesecker, 2002).

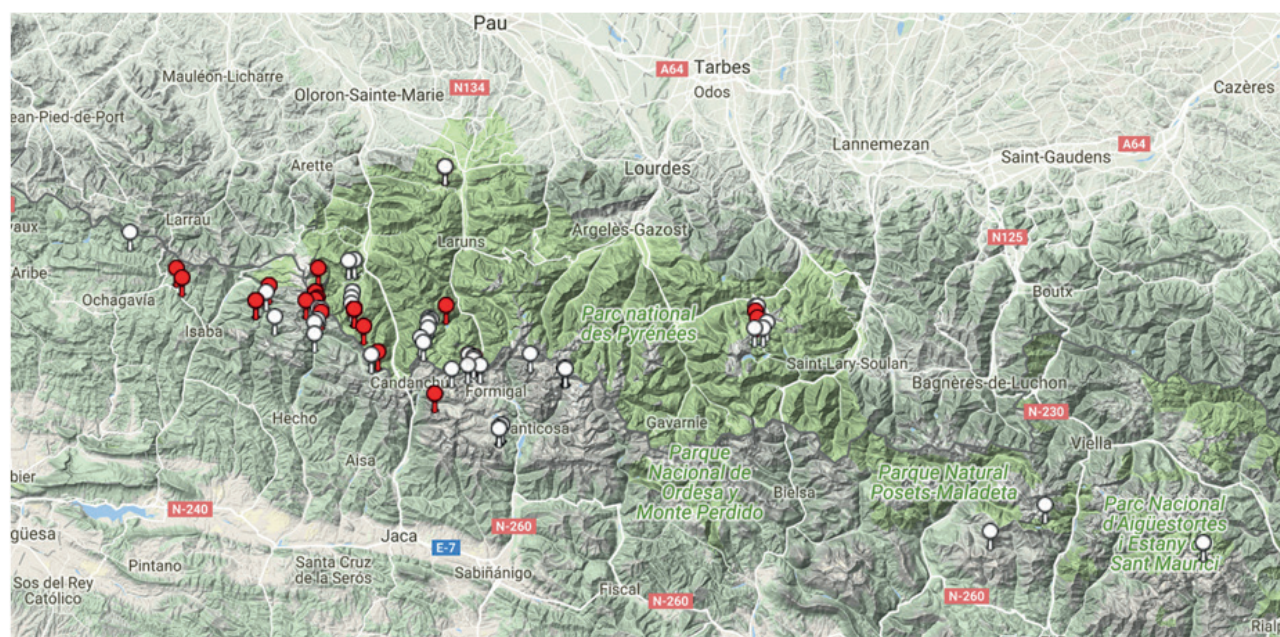
Con formato: Fuente: Cursiva La propagation alarmante d'un pathogène fongique, *Batrachochytrium dendrobatidis*, *Bd*, à été considérée comme responsable de nombreux déclinés récents (Wake et Vredenburg, 2008). Des épidémies de *Bd* ont été observées dans

plusieurs contextes bioclimatiques et les régions de montagne en sont particulièrement affectées ainsi qu'observées par les mortalités de masse. Le *Bd* est aussi présent dans les Pyrénées et a causé des extinctions locales de populations d'amphibiens. Les intensités d'infection par *Bd* observées sur des amphibiens varient spatialement, avec des zones d'occurrence maximale dans la partie centrale ouest, dans ou à proximité du Parc National des Pyrénées.

Pour appuyer les efforts de conservation des espèces indigènes aux Pyrénées, ainsi que pour améliorer le suivi de santé des écosystèmes, il est important de comprendre quelles conditions environnementales régissent la propagation des agents pathogènes. Température et présence d'eau figurent parmi les facteurs les plus cruciaux qui contrôlent la croissance et survie du (Walker et al. 2010; Clare et al. 2016). La croissance optimale de *Bd* en culture a été observée entre 17 et 25 °C, et ses zoospores ne tolèrent pas la déshydratation (Piotrowski, Annis et Longcore, 2004). Les températures supérieures à cette plage représentent une limitation physiologique pour le pathogène. Par contre, les températures inférieures apparaissent liées au déclenchement des épidémies de la maladie. Ceci peut s'expliquer par une variation

de stratégie du *Bd*, qui produit plus de zoospores en milieu plus froid (Woodhams et al., 2008). Les conditions climatiques humides favorisent également la croissance de *Bd* et sont associés positivement aux taux d'infection. (Berger et al., 2004; Murray et al., 2011). Les amphibiens qui fréquentent des étangs parfois asséchés de manière saisonnière ont présenté moins d'infection par la maladie (Scheele et al., 2015).

Les changements dans les conditions hydro-climatiques s'ajoutent aux changements d'usage des sols et leurs couvertures en terrain de montagne. Ces changements sont probablement ceux qui régissent les schémas d'apparition de *Bd* dans les Pyrénées. Pour explorer l'habitat abiotique du pathogène, il faut analyser des données climatiques et hydrologiques, ainsi que les propriétés physicochimiques de cet habitat. Le projet P³ - Population, Pollution et Pathogènes (Schmeller et al., 2018) - a pour but d'étudier l'état de santé d'écosystèmes aquatiques des Pyrénées et de trois autres zones de montagnes (USA, Chine, Oman). Le projet inclut la collecte d'échantillons de qualité de l'eau, du microbiome et de sédiments de lacs de montagne le long des gradients d'altitude. Pour caractériser les dynamiques hydrologiques dans les bassins versants, il faut disposer de données



Prévalence du *Batrachochytrium dendrobatidis* dans les Pyrénées Centrales, capture-écran retiré en 2017 from www.bd-maps.net; points rouges = Bd-positif, points blancs = Bd-négatif

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

peut représenter une option d'adaptation effective du point de vue des environnements situés en aval et souffrant de pénuries d'eau. Par exemple, une option de gestion forestière comme l'éclaircissage, peut améliorer l'infiltration des eaux souterraines et l'écoulement de surface, augmentant ainsi la production d'eau bleue³⁶ à l'échelle du bassin tout en permettant d'optimiser la productivité de l'eau verte³⁷ forestière. De plus, les actions de ce type ont un effet direct et mesurable sur les communautés pyrénéennes, car elles sont créatrices d'emploi et d'activité économique.

2.6.6. Conclusions et recommandations pour l'adaptation

Le terme Gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) dénote « un développement et gestion coordonnés des ressources en eau, des terres et autres ressources naturelles, dans le but de maximiser le bien-être économique et social » (Agarwall *et al.*, 2000). En dépit du succès relatif de ce concept parmi la communauté scientifique, il existe peu d'exemples de son application pratique à la gestion des ressources en eau. Toutefois, il est évident que pour relever les défis du changement climatique par rapport à la ressource eau, il faut adopter une vision intégrée de la gestion du territoire, qui remette en question la distribution territoriale de l'utilisation de l'eau. Les zones de tête de bassin génèrent la plus grande partie des ressources en eau utilisées en aval dans les plaines et les régions côtières en déficit d'eau et à haute densité de population. Par conséquent, la mise en œuvre d'actions de gestion de l'eau en tête de bassin

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

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

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

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

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

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

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

Au niveau régional, il existe également des initiatives importantes. Ainsi, la Stratégie catalane d'adaptation au changement climatique, de 2013, réalise déjà une évaluation des effets observés et attendus des changements climatiques sur différents secteurs socioéconomiques et environnementaux, en identifiant et promouvant des mesures concrètes d'adaptation. De même, la stratégie aragonaise de changement climatique et d'énergies propres planifie des stratégies d'atténuation et d'adaptation au changement climatique, en harmonie avec la stratégie espagnole. Le Plan basque de lutte contre le changement climatique propose, pour l'année 2020, la consolidation d'un modèle socioéconomique qui ne dépende pas du carbone et la réduction au minimum de la vulnérabilité face au changement climatique. La Stratégie face au changement climatique de Navarre identifie également les objectifs et les actions concrètes pour améliorer l'adaptation de la

société navarraise au changement climatique, en fixant le même horizon 2020. Le Plan Climat de la région Languedoc-Roussillon de 2009, propose des mesures concrètes d'adaptation qui mobilisent toutes les compétences de la région. La région Midi-Pyrénées a également développé un Plan Régional Climat, Air et Énergie, qui adapte la stratégie nationale aux spécificités de la région. Le Plan Régional Climat, Air et Énergie d'Aquitaine de 2012, établit le cadre d'adaptation pour cette région et réussit même à constituer un comité d'experts pour renforcer les politiques publiques avec le savoir scientifique, spécialement adapté aux conditions de la région.

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