

Partenariat 2010 – Espèces – Espèces invasives



Changement climatique et invasions biologiques

Impacts sur les écosystèmes
aquatiques, risques pour les
communautés et moyens de gestion

Alain Dutartre, Yves Suffran

REBX

Janvier 2011

Contexte de programmation et de réalisation

L'objectif du présent rapport était de proposer un bilan des réflexions menées actuellement sur les prévisions de changements climatiques et leurs implications sur les dynamiques des espèces exotiques envahissantes en milieux aquatiques en métropole et sur les stratégies de gestion à mettre en œuvre dans ce contexte.

Les auteurs

Alain Dutartre
Hydrobiologiste
alain.dutartre@Cemagref.fr
REBX, Cemagref

Yves Suffran
Stagiaire

Les correspondants :

Onema : Nicolas Poulet, DAST, nicolas.poulet@onema.fr

Cemagref : Alain Dutartre, REBX, alain.dutartre@Cemagref.fr

Référence du document : Dutartre A., Suffran Y. 2011. Changement climatique et invasions biologiques. Impacts sur les écosystèmes aquatiques, risques pour les communautés et futurs moyens de gestion. Convention Onema – Cemagref, rapport 2010, 49 p.

Droits d'usage :	accès libre
Couverture géographique :	métropole
Niveau	national
Niveau de lecture :	Professionnels, experts
Nature de la ressource :	Document

Sommaire

1	Introduction	1
2	Méthodologie	2
3	Le changement climatique en France : Scenarios et Impacts sur les milieux aquatiques	3
	3.1 Modèles climatiques des experts	3
	3.1.1 Scenarios envisagés.....	3
	3.1.2 Températures	5
	3.1.3 Précipitations	8
	3.2 Impacts sur les écosystèmes aquatiques	11
	3.2.1 Conséquences physiques.....	11
	3.2.2 Changement du régime hydrique	12
	3.2.3 Autres conséquences indirectes et anthropiques	13
	3.3 Synthèse	15
4	Conséquences des modifications pour les communautés natives et exotiques des hydrosystèmes métropolitains	16
	4.1. Conséquences des modifications des zones humides pour les populations d'espèces natives	16
	4.1.1 Limites d'adaptation des espèces natives	16
	4.1.2 Un environnement déséquilibré et moins favorables aux espèces natives	20
	4.2 Conséquences des modifications écologiques et physico-chimiques sur les espèces invasives des milieux aquatiques	22
	4.2.1 Des conditions environnementales qui deviennent plus favorables à l'implantation d'espèces exotiques	23
	4.2.2 Des milieux déséquilibrés plus favorables aux espèces invasives :	27
	4.3. Synthèse	30
5	Propositions de nouvelles méthodes de gestion	31
	5.1 Suggestions pour diminuer l'impact du changement climatique sur les écosystèmes et les espèces natives	32
	5.1.1 Stratégies cherchant à optimiser la résistance des milieux vis-à-vis des changements globaux.....	32
	5.1.2 Stratégies cherchant à optimiser la résilience des milieux vis-à-vis des changements globaux.....	34
	5.1.3 Stratégies de facilitations.....	36
	5.2 Suggestions pour diminuer l'impact des invasions biologiques sur les écosystèmes perturbés par le changement climatique	38
	5.3 Synthèse	41
6	Exemples d'évolution d'espèces invasives des zones humides avec le changement climatique	42
	6.1 Le tamaris (<i>Tamarix</i> spp.)	42
	6.2 La crassule des étangs (<i>Crassula helmsii</i>)	44
7	Conclusions	45
	Bibliographie	48

Résumé

Dans les décennies à venir, les changements globaux, incluant les changements climatiques, l'élévation du niveau de la mer et les pressions anthropiques, auront des impacts majeurs sur les écosystèmes aquatiques. La gestion de l'eau et des milieux aquatiques devrait se compliquer au cours du XXI^{ème} siècle créant de nouvelles difficultés. Les modèles climatiques appliqués dans ce contexte prévoient une augmentation globale des températures, notamment en été et dans la moitié sud de la France. Cette évolution couplée à l'augmentation des précipitations hivernales et à leur diminution en été (surtout au sud) va entraîner des risques d'étiages plus sévères et de stress hydriques.

Plus généralement, l'augmentation des températures pourrait avoir de fortes conséquences sur la qualité de l'eau (hypoxie, eutrophisation...). Les variations du régime hydrique pourraient aussi présenter de fortes répercussions sur le fonctionnement et l'équilibre des milieux aquatiques. Les effets directs des changements climatiques sur les espèces autochtones des milieux aquatiques métropolitains, et indirects via les invasions biologiques, vont obliger les décideurs à élaborer de nouvelles stratégies de gestion à de larges échelles géographiques.

Faciliter les changements d'aires de répartition des espèces indigènes, augmenter l'interconnectivité des milieux et leur résilience, apparaissent comme pouvant largement contribuer à leur survie à long terme. Les stratégies de gestion adaptatives à développer dans le futur semblent les plus adaptées aux évolutions probables des territoires et des communautés vivantes mais elles peuvent également s'accompagner de nouvelles invasions biologiques qu'elles pourraient faciliter. En effet, en perturbant les milieux et en stressant les espèces indigènes, elles pourraient rendre disponibles des niches écologiques favorables à l'installation d'espèces exotiques. Les évolutions des activités anthropiques, qui sont les principales voies de transport d'espèces exotiques, sont aussi des facteurs à prendre en compte dans les questions de gestion des espèces invasives.

La commercialisation et/ou l'exploitation d'espèces exotiques qui causent des difficultés de gestion dans d'autres pays européens seront également à évaluer régulièrement. Par exemple, pour les plantes aquatiques, seules les jussies et la caulerpe sont actuellement interdites à la vente et au transport en France, alors que de nombreuses autres espèces invasives avérées sont disponibles dans les points de vente spécialisés.

La question des changements globaux et des invasions biologiques doit évidemment être abordée de façon intégrée, avec la mise en œuvre de modes de gestion adaptés aux espèces à gérer mais aussi à l'échelle du territoire concerné, depuis le "terrain" du gestionnaire local jusqu'à l'ensemble de la zone où se trouve l'espèce invasive avec une nécessaire harmonisation de ces stratégies, au moins au niveau européen. Par ailleurs, si des facilitations de la gestion des espèces invasives passent par le maintien du bon état écologique des écosystèmes aquatiques au sens de la DCE, les évolutions fonctionnelles de ces écosystèmes liées à ces changements globaux vont rendre plus complexes les choix et les interventions de gestion.

Enfin, dans tous les cas, des évolutions notables des réglementations s'appliquant à cette problématique sont indispensables, ainsi que de très importants efforts de sensibilisation des décideurs et du grand public.

Mots clefs : Changement global, changement climatique, invasion biologique, espèces exotiques envahissantes, espèces invasives, milieu aquatique, scénario, risque, gestion, France métropolitaine.

1 Introduction

L'objectif de ce rapport était tout d'abord de compiler les principales informations disponibles en termes de risques vis-à-vis des milieux aquatiques en métropole que pourraient produire les invasions biologiques dans le contexte des changements climatiques, eux-mêmes étant une partie de ce qui est maintenant communément dénommé "changements globaux".

Sans se vouloir exhaustif, ce travail suggère également des réponses qu'il serait possible de mettre en œuvre pour limiter ces impacts.

La destruction des habitats naturels et les invasions biologiques sont, selon le « Millenium Ecosystems Assessment » (rapport commandé par l'ONU et publié en 2005), les deux principales causes d'érosion de la biodiversité. [2]

Ainsi, les espèces invasives apparaissent-elles comme une des préoccupations majeures pour la conservation de la biodiversité et la fonctionnalité des habitats dans un contexte changeant. Une espèce invasive est, par définition, une espèce exotique (c'est-à-dire, sortie de son aire de répartition naturelle), qui une fois implantée dans le milieu d'accueil, présente une forte extension géographique et colonise des biotopes avec de telles intensités qu'elle y génère des nuisances notables (que ça soit d'un point de vue écologique ou vis-à-vis des activités humaines). Les impacts négatifs qu'ont ces espèces est une des notions clef de la définition des espèces invasives.

En ce qui concerne la métropole, un autre élément important est que 90 % des espèces exotiques (ou allochtones) françaises ont apparemment été introduites involontairement par l'Homme [3, 4], ce qui n'est probablement pas différent de ce qui a pu se passer dans d'autres régions du monde, mais contribue à rendre plus complexe la problématique.

Les changements climatiques sont vu comme l'ensemble des perturbations météorologiques que pourrait durablement connaître la Terre, à savoir une élévation moyenne des températures et des modifications des patrons de répartition des précipitations. Les changements climatiques actuels sont unanimement attribués aux activités humaines qui relâchent dans l'atmosphère de grandes quantités de gaz à effets de serre comme le dioxyde de carbone ou le méthane.

Les changements globaux incluent ces changements climatiques, l'élévation du niveau des océans et l'augmentation des pressions anthropiques, telles que l'augmentation de la population, l'urbanisation, etc. Il peut donc s'avérer très difficile de faire la part des choses en matière de prévision et d'identifier les impacts des espèces invasives provenant spécifiquement des changements climatiques.

Ce rapport comporte trois grandes parties : des éléments de prévision des changements climatiques et de leurs impacts sur les milieux aquatiques, les effets de ces perturbations sur les populations indigènes et exotiques et enfin les moyens de gestion qui pourraient être les mieux appropriés dans ce contexte changeant.

Une quatrième partie est constituée de deux exemples d'invasions biologiques, consacrés au tamaris et à la crassule des étangs.

2 Méthodologie

Ce travail est basé essentiellement sur la recherche, la synthèse et la compilation d'ouvrages scientifiques. La récupération des différents documents, nécessaires à la rédaction, est passée essentiellement par des sites privés auxquels le Cemagref est abonné, tels que « Scopus » ou « Web of Knowledge ». Ces sites internet mettent à la disposition de leurs abonnés, de larges bases de données rassemblant des milliers d'articles.

Une rigueur particulière a été observée pour synthétiser les articles utilisés, sans pour autant omettre de détails clefs, ou extrapoler les résultats. C'est pour cela que dans tous les exemples cités dans ce rapport, le lieu d'étude et le contexte sont mentionnés à chaque fois et le plus précisément possible. Effectivement, la dynamique d'une population ou les interactions interspécifiques ne seront pas les mêmes selon que l'espèce se trouve aux Etats-Unis ou en Europe par exemple. La grande majorité des cas ne sont pas extrapolables directement en France (beaucoup d'espèces invasives aux Etats-Unis sont originaires d'Europe), mais illustrent des dynamiques ou des interactions que l'on pourrait observer sur le sol métropolitain avec d'autres groupes d'espèces.

La première phase de documentation a donc consisté à trouver les articles exposant des modèles et des scénarios climatiques. Le GIEC, une source fiable, reconnu internationalement, a produit un grand nombre de documents sur le sujet qui ont été très utiles à la rédaction de ce travail. Mais la principale difficulté de cette étape fut de trouver des modèles et des prédictions à l'échelle de la France métropolitaine (ou de l'Europe à défaut). Or à cette échelle (géographique et temporelle), les données risquent d'être plus imprécises, optimiser le nombre de sources fut alors une priorité pour dégager des tendances fiables. C'est d'ailleurs pour cela qu'une grande partie de ce rapport est rédigée au conditionnel. Néanmoins, les changements globaux étant des sujets largement traités dans la littérature, il ne fut pas trop difficile de rassembler un grand nombre de documents pour les recouper entre eux et ainsi réaliser une synthèse suffisamment documentée pour en dégager des résultats fiables et cohérents.

L'impact de ces changements globaux sur les écosystèmes aquatiques est également très étudié même si la difficulté a été ici de trouver des exemples de cas français ou européens. Effectivement, la plupart des publications accessibles sur internet sont issues de centres de recherche américains et traitent donc de cas d'Amérique du nord. Malgré tout, quelques revues spécialisées ou des comptes-rendus de gestion de certains PNR (comme celui de la Camargue) ont fournis de nombreuses d'informations sur les évolutions possibles de ces habitats.

L'impact de ces perturbations sur les populations autochtones ou invasives a nécessité une plus large investigation. Encore une fois, beaucoup de publications provenaient des Etats-Unis et traitaient donc de cas nord-américains. Un nombre important d'espèces invasives aux Etats-Unis sont des espèces d'origine européennes qui ne posent aucun problème en France. Ce travail se voulant comme une vue d'ensemble à destination des chercheurs et des gestionnaires, il était donc très important de rassembler le maximum d'exemples concrets. Malgré tout, même si il n'a pas été possible de donner à chaque fois des exemples de cas français (ou européens), la littérature est assez riche pour dégager de nombreuses tendances générales sur l'évolution des populations invasives et indigènes.

Le rapport étant destiné autant à des gestionnaires qu'à des chercheurs, la dernière partie traite de l'évolution des méthodes envisageables de gestion des espèces indigènes et exotiques, dans le contexte des changements globaux. C'est pourquoi il est apparu nécessaire de trouver des exemples concrets et argumentés, bien que proposant encore trop souvent des mises en œuvre de pratiques de gestion qui ne sont que mentionnées et non encore appliquées ou testées. Un regard critique sur la faisabilité de telle ou telle méthode était donc nécessaire.

3 Le changement climatique en France : Scenarios et Impacts sur les milieux aquatiques

3.1 Modèles climatiques des experts

La première étape de cette étude est de caractériser le changement climatique, c'est-à-dire de définir les paramètres physiques majeurs qui risquent de fluctuer et d'estimer au mieux l'ampleur de leurs variations. Divers scénarios, du plus optimiste au plus alarmiste, sont proposés par l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) et servent de base commune pour les différents modèles climatiques que propose la communauté scientifique internationale. [5]

Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC – équivalent français du sigle anglais IPCC), cité à plusieurs reprises dans ce rapport, a pour mission d'évaluer les informations d'ordre scientifique, technique et socio-économique nécessaires pour mieux comprendre les risques liés au changement climatique d'origine anthropique. Il envisage également d'éventuelles stratégies d'adaptation et d'atténuation des impacts. Ses évaluations sont principalement fondées sur des publications scientifiques et techniques reconnues. Le GIEC a reçu le Prix Nobel de la Paix en 2007, tant les dérèglements climatiques sont déjà envisagés comme des sources potentielles de conflits dans un futur proche. [5].

Cette partie expose succinctement les grandes « familles » de scénarios d'émission de Gaz à Effet de Serre (GES), avant de présenter les résultats de différents modèles climatiques pour les facteurs de températures et de précipitations en France métropolitaine.

3.1.1 Scenarios envisagés

Entre 1992 et 2000, l'IPCC publia une série de rapports intitulés : Special Reports on Emission Scenarios (SRES), et contenant divers scénarios d'émission de GES, moteur avéré du changement climatique. [6]

L'objectif principal était de fournir une base de travail et de réflexion commune à l'ensemble des scientifiques qui s'intéressent aux problématiques du changement global. [6]

Les scénarios de l'IPCC sont regroupés en quatre familles (A1, A2, B1 et B2), qui étudient différentes voies de développement en fonction d'un large éventail de facteurs démographiques, économiques et technologiques (cf. Tableau 1). [7]

Les émissions de GES utilisées comme hypothèse dans ces projections sont utilisées pour estimer les changements climatiques à venir. Les hypothèses d'évolutions socioéconomique, démographique et technologique sur lesquelles se fondent ces estimations, sont également prises en compte dans de nombreuses évaluations de la vulnérabilité au changement climatique et des impacts de celui-ci. [7]

L'ensemble des scénarios A1 fait l'hypothèse d'une croissance économique très rapide, d'un pic de la population mondiale au milieu du XXI^{ème} siècle et du développement rapide de nouvelles technologies plus efficaces. Cette famille de scénarios se répartit en trois groupes qui correspondent à différentes orientations du point de vue des ressources énergétiques : quasi-exclusivement d'origine fossile (A1FI), non fossile (A1T) et équilibrant les sources (A1B).

Tableau 1 : Evolution, selon le scénario considéré, de quelques uns des facteurs clefs pris en compte par l'IPCC pour évaluer les émissions futures de GES (Adapté de l'IPCC). [8]

Famille	A1			A2	B1	B2
	A1F1	A1B	A1T			
Augmentation de la population mondiale	Faible	Faible	Faible	Importante	Faible	Moyenne
Accroissement du produit intérieur brut	Très important	Très important	Très important	Moyen	Important	Moyen
Consommation de l'énergie	Très importante	Très importante	Importante	Importante	Lente	Moyenne
Changement de l'occupation du sol	Faible/Moyenne	Faible	Faible	Moyenne /Importante	Importante	Moyenne
Disponibilité des ressources	Importante	Moyenne	Moyenne	Faible	Faible	Moyenne
Evolution des technologies	Rapide	Rapide	Rapide	Lente	Moyenne	Moyenne

Le scénario B1 suit les mêmes hypothèses démographiques que A1, mais avec une évolution plus rapide des structures économiques, vers une économie plus « responsable ». Le profil B2 est caractérisé par des niveaux intermédiaires de croissances démographique et économique, avec des actions plus locales pour assurer une pérennité économique et environnementale.

Enfin, A2 est sur une dynamique plus hétérogène, caractérisée par une forte croissance démographique, un faible développement économique et de lents progrès technologiques.[7]

En résumé :

- A1 : Scénarios globalisés et intensifs : Tendances du marché d'aujourd'hui (scénarios prolongeant les dynamiques actuelles)
- B1 : Scénario globalisé et extensif : Scénario basé sur un développement durable généralisé (scénario optimiste)
- B2 : Scénario local et extensif : Hétérogénéité des dynamiques mondiales (scénario intermédiaire)
- A2 : Scénario local et intensif : Incompatibilité des civilisations (scénario pessimiste) [8]

La prise en compte de ces facteurs permet de modéliser l'évolution des émissions de GES dans le monde, pour chacun des scénarios établis par l'IPCC (Figure 1).

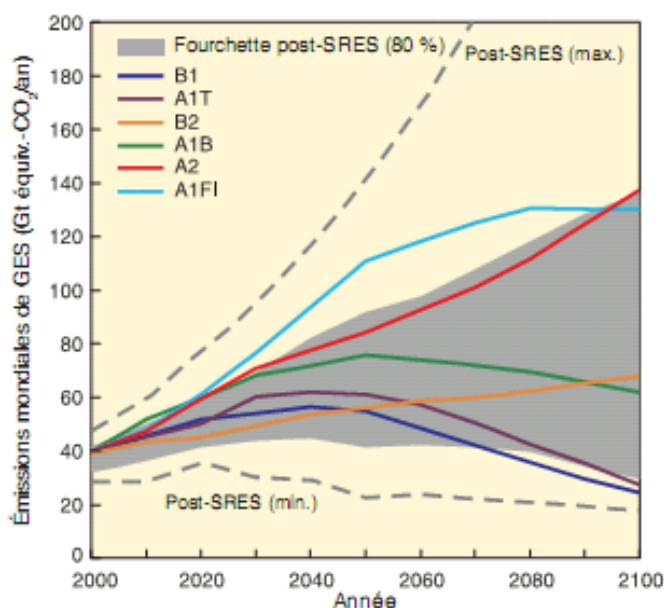


Figure 1 : Émissions mondiales de GES (en Gt équivalent CO₂/an) pour six scénarios illustratifs de référence SRES. [7]

Les courbes en pointillé délimitent la plage complète des scénarios post-SRES, sachant que 80 % des scénarios les plus récents sont inclus dans la plage de couleur grise. [7]

Dans les études publiées après le SRES (scénarios dits « post-SRES »), des valeurs inférieures ont été utilisées pour certains facteurs d'émissions, notamment pour les projections démographiques. De même, pour le taux de conversion utilisé pour le produit intérieur brut (PIB) qui ne modifie que sensiblement les valeurs d'émissions anticipées de GES. [7]

En conclusion, malgré les incertitudes sur l'évolution et sur le poids attribué à chacun des facteurs pour déterminer les émissions futures de GES, ces scénarios sont à la base de tous les modèles de changement climatique. A noter aussi qu'aucun de ces scénarios SRES ne s'est vu affecter un niveau spécifique de probabilité.

3.1.2 Températures

Un réchauffement d'environ 0,4°C sur les vingt prochaines années est attendu dans plusieurs scénarios d'émissions SRES. De plus, même si les concentrations de l'ensemble des GES avaient été maintenues aux niveaux de 2000, l'élévation des températures seraient d'environ 0,1°C par décennie. [7]

Dans le cadre du scénario A2, les modèles climatiques prédisent un réchauffement global moyen de l'ordre de 3,5°C pour 2100 [9]

A noter qu'une hausse comprise entre 1 et 3,5°C au cours des cent prochaines années, équivaldrait à un déplacement des isothermes (bandes géographiques de même température) actuels vers les pôles de 150 à 550 km, ou à leur déplacement en altitude de 150 à 550 m. [10]

Les résultats montrent une augmentation de la température en toutes saisons (Figure 2).

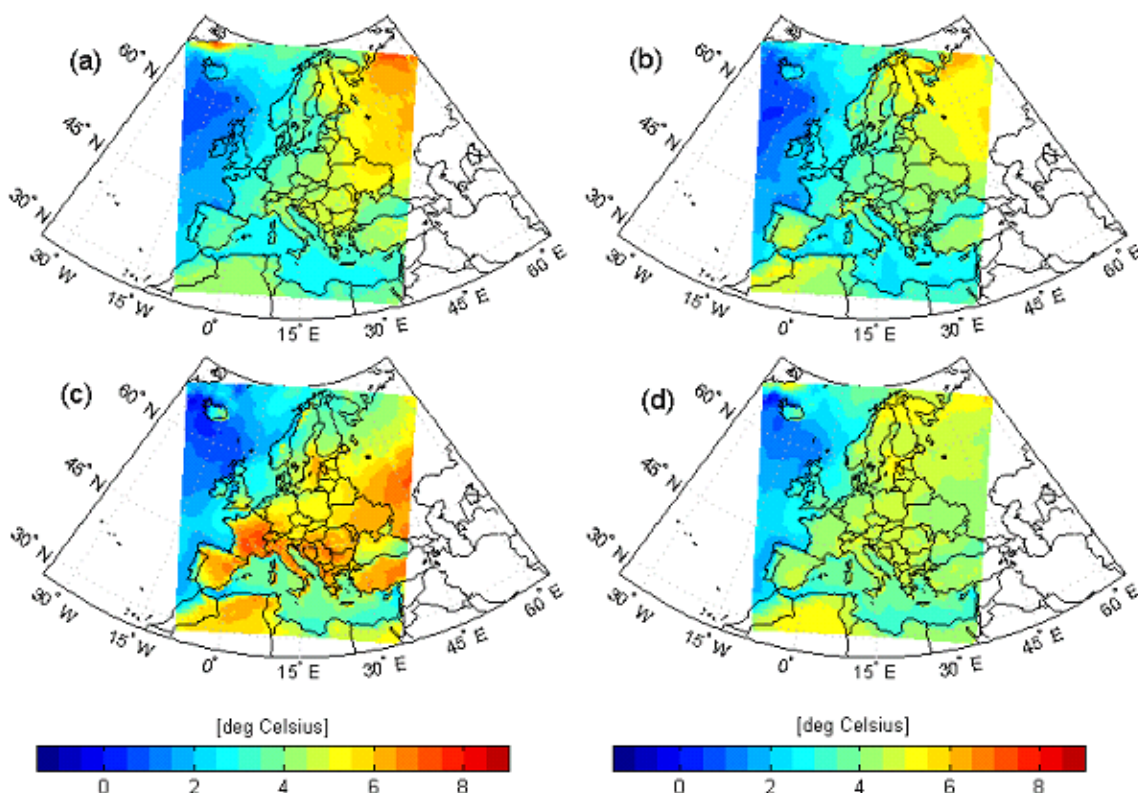


Figure 2 : Différence des températures moyennes, entre les périodes 1960/1990 et 2070/2100 pour : (a) l'Hiver (de Décembre à Février), (b) le Printemps (de Mars à Mai), (c) l'Été (de Juin à Aout) et (d) l'Automne (de Septembre à novembre) [11]

Sur la figure 2, il est intéressant de noter que même si sur les terres émergées l'augmentation des températures est généralisée, elle n'est pas uniforme sur l'année. Effectivement, la hausse des températures sera très probablement bien plus marquée en été que pour les autres saisons. Avec par exemple en France, une augmentation moyenne de 7°C pour cette saison est annoncée pour 2100, contre une hausse de « seulement » 3°C en hiver (cf. Figure 2, a. et c.). [11]

On attend aussi une hausse maximale de la température pour la moitié Sud de l'Europe et un réchauffement généralement plus limité pour l'Europe du Nord. [7]

Les résultats prédisent aussi une plus forte variabilité des températures interannuelles, ainsi que l'augmentation du risque d'événement extrême (Figure 4). [7, 12]

La régionalisation des scénarios de changement climatique issus de modèles plus « globaux » constitue un enjeu crucial pour arriver à des échelles spatiales compatibles avec les études d'impact. En utilisant la capacité de zoom du modèle climatique de Météo-France, ARPEGE-Climat (Figures 3 et 6), il est possible de régionaliser des scénarios de changement climatique à une échelle d'environ 50 km.[13]

Pour la France, un scénario de type A2 donne, pour la fin du XXI^{ème} siècle, une augmentation de la température en toutes saisons (Figure 3).

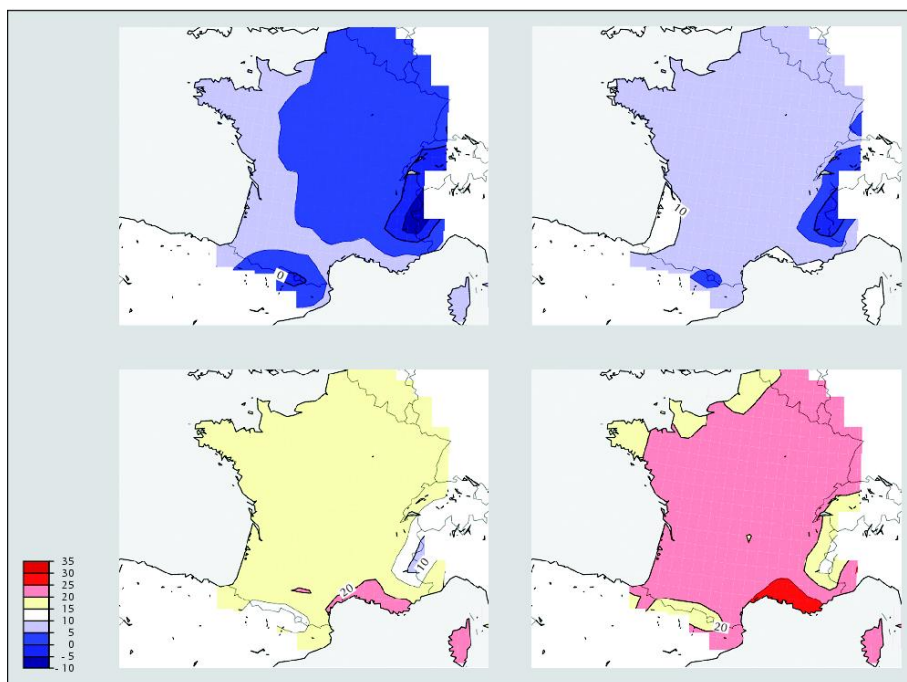


Figure 3 : Température moyenne en hiver (°C) : climat actuel (en haut à gauche) et scénario A2 (en haut à droite) ; température moyenne en été (°C) : climat actuel (en bas à gauche) et scénario A2 (en bas à droite). Zoom à partir du modèle climatique de Météo-France, ARPEGE-Climat. [13]

La figure 3 montre une hausse généralisée des températures. Les zones les plus chaudes demeurent celles avec les moyennes de températures les plus élevées. La côte méditerranéenne reste par exemple en été, la zone la plus chaude de France. [13]

En plus d'un accroissement global des températures, les modèles climatiques montrent également une forte augmentation des événements extrêmes tels que des vagues de chaleur (Figure 4).

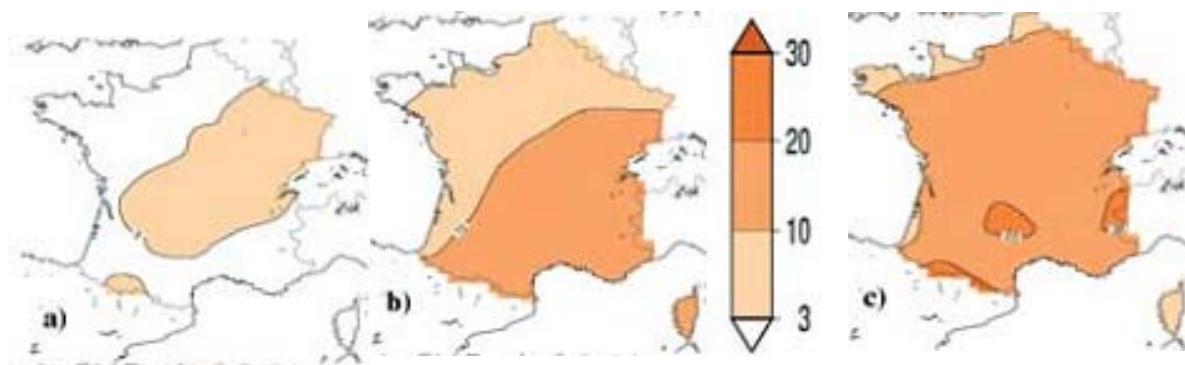


Figure 4 : Nombre moyen de jours de vague de chaleur par été : climat de référence (a) et climat moyen autour de 2050, simulé par les modèles IPSL (b) et CNRM (c) dans le cadre du scénario A2. [9]

Du point de vue de la définition météorologique, une « vague de chaleur » est une série d'au moins six jours consécutifs dont la température maximale diurne dépasse la normale climatique (1961-1990) d'au moins 5°C. [9]

Avec le scénario A2, la fréquence des jours où la température maximale quotidienne dépasse 35 °C serait en moyenne multipliée par 10. Pour la plaine toulousaine et la Provence, un jour sur quatre pourrait voir sa température maximale dépasser les 35 °C.[13]

Dans de telles conditions, un été moyen dans les années 2070 ou 2080 pourrait ressembler à ce que fut l'été 2003. [13]

A noter que la figure 4 présente les résultats de deux modèles climatiques, prédisant une même tendance mais montrant des résultats assez dissemblables, démonstration supplémentaire du fait que tous ces modèles donnent des réponses probabilistes. De par les approximations, les incertitudes et l'échelle de temps, ces modèles doivent donc être recoupés entre eux pour en dégager une tendance plus fiable et des amplitudes plus probables. Ceci est encore plus vrai lorsqu'on travaille à une échelle géographique fine, les modèles régionaux ayant les variabilités les plus fortes. [13]

En conclusion on peut retenir que d'ici à 2100, la température moyenne en France métropolitaine pourrait présenter une augmentation de 1 à 3,5°C, mais que cette augmentation serait plus marquée en été et au sud. De plus les prévisions s'accordent sur le fait que les événements extrêmes (tels que les vagues de chaleur) seront probablement plus fréquents et plus intenses.

3.1.3 Précipitations

Des évolutions dans la configuration spatio-temporelle des précipitations sont attendues par les experts. Car, même si une augmentation globale des précipitations moyennes, de 5 à 8 %, est annoncée à l'échelle du globe, les estimations diffèrent au niveau régional et selon la période de l'année. [9]

Ceci se traduira probablement par une augmentation des précipitations aux latitudes élevées et, au contraire, par une diminution sur la plupart des terres plus au sud. [7, 12]

Ces changements en Europe apparaîtront alors selon un gradient nord-sud. De nombreuses études prévoient que l'amplitude de ces perturbations sera particulièrement élevée dans le sud, notamment en Méditerranée. Les zones au climat déjà chaud ou semi-aride seraient encore plus sèches d'ici la fin du siècle (Cf. Figure 5). [12]

En hiver, qui serait une saison « climatiquement » plus courte qu'à l'heure actuelle, les régions du nord de la France et de la côte atlantique pourraient observer une augmentation du volume des précipitations, alors qu'au sud ces volumes pluvieux devraient rester à peu près stables. Cette augmentation des précipitations se fera aussi ressentir en haute altitude. En été, la baisse générale des pluies sera assez limitée au nord mais particulièrement marquée au sud (Figures 5 et 6). [9, 11].

Approximativement, pour le nord de la France, les précipitations moyennes annuelles pourraient augmenter selon les scénarios B2 ou A2, respectivement de 5 à 15 % à l'horizon de 2020 et de 9 à 22 % pour 2070. Pour le sud, et selon les mêmes scénarios, le volume des précipitations sur l'année pourrait baisser en moyenne de 0 à 23 % pour 2020 et de 6 à 36 % pour 2070 (cf. Figure 8). [12]

Ces baisses de pluviométrie pourraient aller jusqu'à 50 % pour la partie méditerranéenne française. [12].

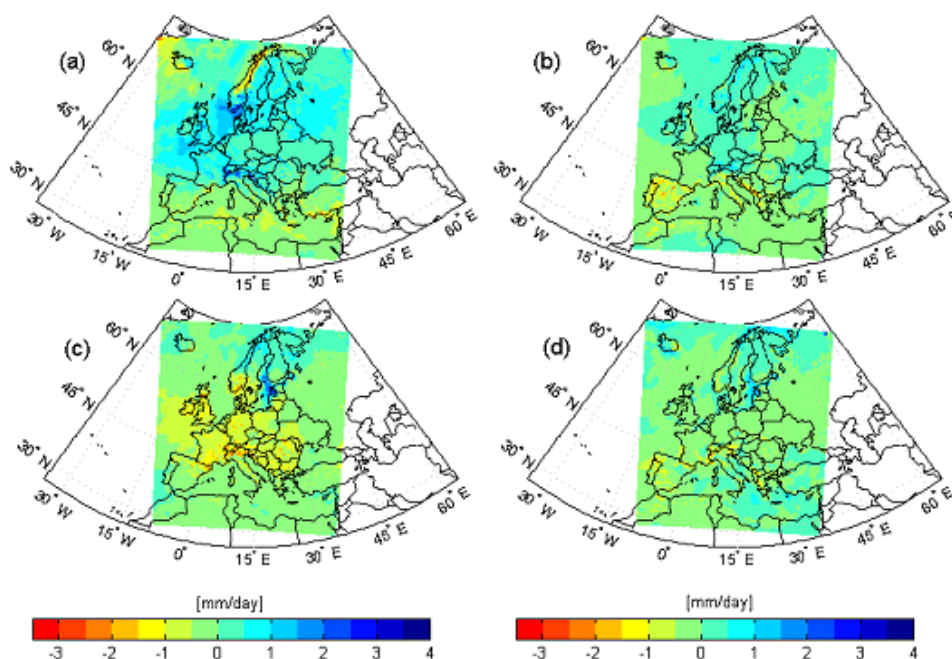


Figure 5 : Différence des précipitations moyennes (exprimées en mm/jour), entre les périodes 2070/2100 et 1960/1990 pour : (a) l'Hiver (de Décembre à Février), (b) le Printemps (de Mars à Mai), (c) l'Été (de Juin à Aout) et (d) l'Automne (de Septembre à novembre) [11]

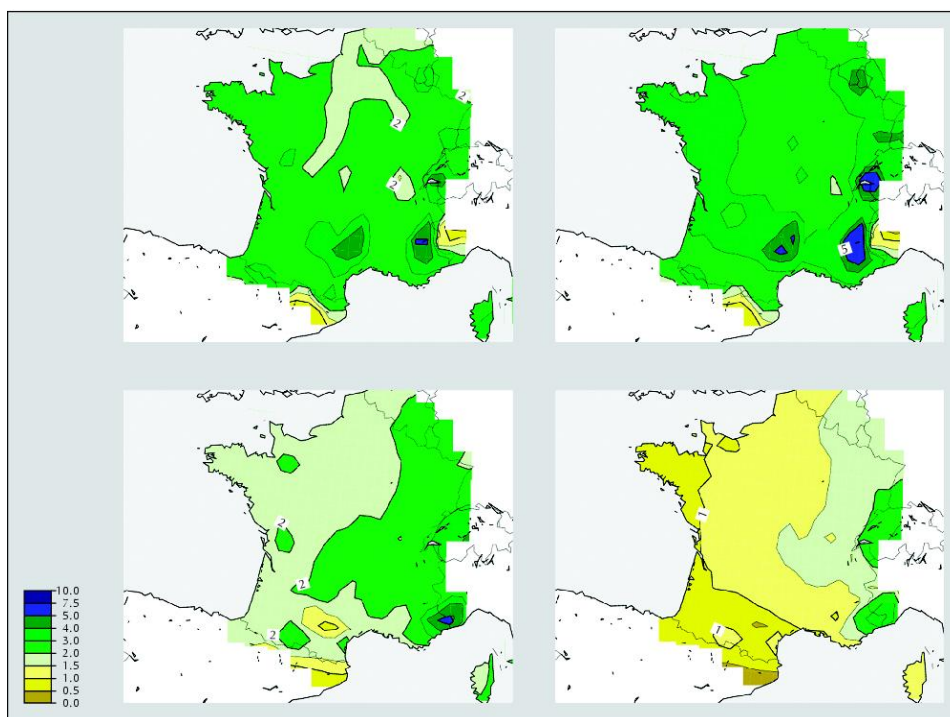


Figure 6 : Précipitations moyennes en hiver (en mm/jour) : climat actuel (en h. à g.) et scénario A2 en 2100 (en h. à d.) ; précipitations moyennes en été (en mm/jour) : climat actuel (en b. à g.) et scénario A2 en 2100 (en b. à d.). Zoom à partir du modèle climatique de Météo-France, ARPEGE-Climat. [13]

Durant l'hiver, les épisodes de fortes précipitations deviendraient plus fréquents (risque croissant d'inondations) et plus intenses. A l'inverse durant l'été, les périodes de sécheresse risqueraient de se faire elles-aussi, plus fréquentes et plus marquées (Figures 7 et 8). [7, 14]

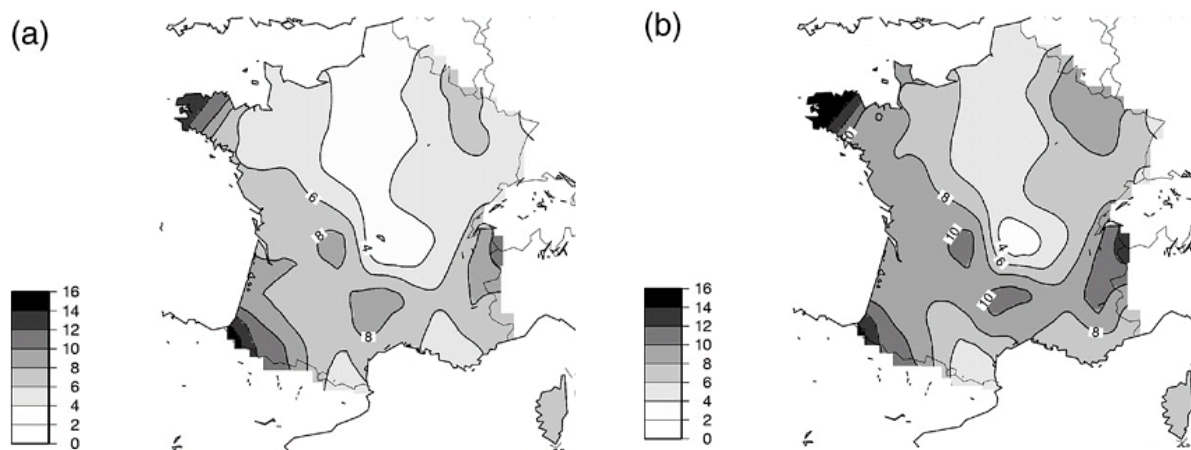


Figure 7 : Nombre de jours, par hiver, où la pluviométrie dépasse les 10 mm, pour le climat actuel (a) et dans le cas d'un scénario A2 en 2100 (b). [14]

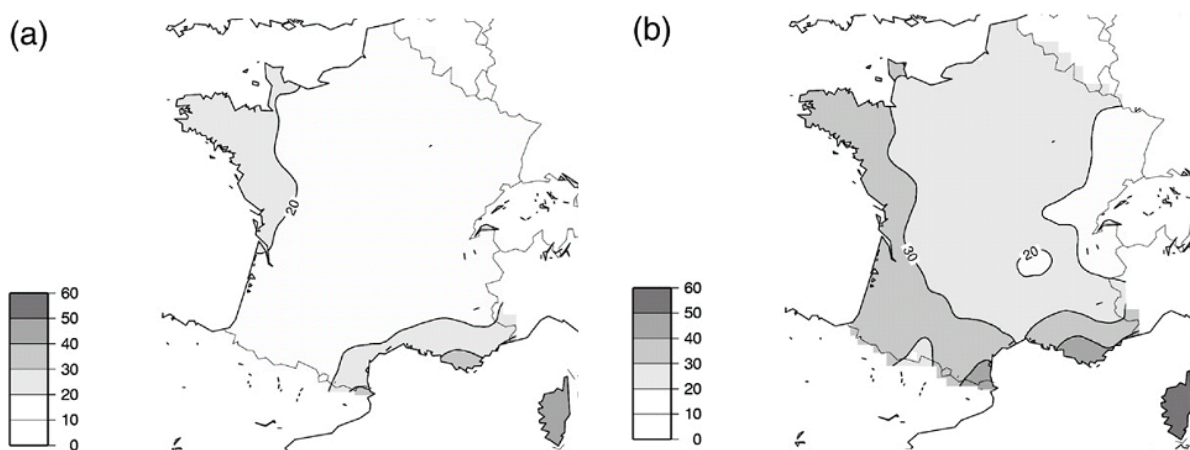


Figure 8 : Nombre de jours maximum consécutif sans pluie, en été, pour le climat actuel (a) et dans le cas d'un scénario A2 en 2100 (b). [14]

En conclusion, on peut retenir que les modèles climatiques s'accordent globalement sur une dichotomie nord/sud des changements de pluviométrie en métropole.

Pour le nord et une partie de la côte atlantique, les pluies seraient plus abondantes en hiver en 2100 qu'actuellement. En revanche la baisse des précipitations durant l'été sera assez limitée pour ces régions. A l'inverse, au sud, l'augmentation des pluies durant l'hiver serait assez limitée par rapport à la situation présente mais la réduction des précipitations serait très prononcée durant l'été.

De plus, en hiver, même si la saison pourrait être plus courte, les épisodes de forte pluie seraient plus fréquents et plus violents. A l'inverse, les périodes de sécheresse seraient plus fréquentes et plus marquées durant l'été. A noter aussi que les chercheurs impliqués dans cette problématique annoncent une plus grande variabilité interannuelle et que aucun des

scénarios n'est présenté comme étant plus probable qu'un autre. Il faut également souligner que les modèles de prédiction des précipitations sont beaucoup plus discordants et imprécis que ceux modélisant les températures.

3.2 Impacts sur les écosystèmes aquatiques

Alors que le changement climatique est reconnu comme inéluctable et que la recherche scientifique affine progressivement ses prédictions, il est nécessaire de prévoir dans toute la mesure du possible quelles seront les conséquences de ces changements globaux sur les écosystèmes aquatiques français. Ces milieux dépendant directement du régime pluviométrique et de la température pour leur équilibre, on peut s'attendre alors à un fort impact des changements climatiques sur ces écosystèmes, souvent déjà perturbés par les nombreuses activités anthropiques.

Ce chapitre a pour objectif de dresser l'inventaire des différentes modifications que pourrait créer le changement climatique sur le fonctionnement et la qualité des écosystèmes aquatiques en métropole; avec dans un premier temps, les conséquences directes dues aux changements de températures et de pluviométrie. Dans un second temps, il sera question des effets indirects du changement climatique comme les nouvelles utilisations potentielles par l'Homme de la ressource hydrique ou la montée du niveau des océans.

3.2.1 Conséquences physiques

Trois paramètres météorologiques sont essentiels à connaître : la température, les précipitations et, dans une moindre mesure, les vents. Leur action conjuguée peut se traduire par des bilans synthétiques déterminants pour les écosystèmes : le bilan thermique et le bilan hydrique (Richoux P. et Lebreton P., p.9 in [15]). Dans ce rapport, il n'est question que des deux facteurs principaux, la température et la pluviométrie. Effectivement, bien qu'étant, avec la température, un facteur important de l'évapotranspiration, le vent n'est pas utilisé comme paramètre de calcul dans les modèles prédisant les changements climatiques. Localement trop variable et changeant, les prévisions s'accordent uniquement sur une augmentation globale de la violence et de la fréquence des épisodes de tempêtes. [12, 15]. L'élévation des températures, l'augmentation des précipitations et les fréquences plus importantes d'événements extrêmes, comme les sécheresses ou les inondations, sont les principaux facteurs de modification du fonctionnement des écosystèmes aquatiques [12].

3.2.1.1 Augmentation de la température

Depuis 1960, la température moyenne des eaux de surface des rivières et des lacs européens a augmenté de 0,2°C à 2°C [12].

Les effets les plus évidents de l'augmentation de la température en été sont la baisse du niveau des eaux par évaporation et l'échauffement de la masse d'eau. Or, température et quantité d'oxygène (O₂) et de gaz carbonique (CO₂) sont liées. Les gaz se dissolvent moins bien quand la température augmente (Loi de Henry). Une hausse de la température de l'eau de 3,5°C, reviendrait à une diminution d'environ 25 % de la concentration en O₂ atmosphérique dissous. L'augmentation des températures risque d'altérer l'évolution normale des milieux aquatiques, entraînant par exemple des productions plus importantes de phytoplancton et de végétation aquatique, des surconsommations d'oxygène par les bactéries et des dystrophies des eaux profondes (Richoux P. et Lebreton P. p.9 in [15]).

Pour les lacs, le réchauffement peut entraîner une prolongation de la stratification estivale et donc un retard de la période automnale de brassage des masses d'eau, ce qui peut induire

dans les couches superficielles une baisse des concentrations en nutriments et un épuisement de l'oxygène dans les couches profondes. [12]

Cette hypoxie des masses d'eau profondes aurait pour autre conséquence de permettre le relargage de phosphore par les sédiments, moteur de l'eutrophisation du plan d'eau. Cette plus grande stabilité thermique, en limitant le phénomène de brassage, peut donc entraîner une dégradation de la qualité générale de l'eau et perturbe le fonctionnement du milieu. [12, 16]

Enfin, avec l'augmentation des températures, il est possible que des lacs à la dynamique dimictique (deux brassages des eaux par an, un en automne et un autre dû aux changements de densité causé par le froid) passent à un état monomictique (un seul brassage annuel, en automne). [16, 17]

Les écosystèmes montagnards pourraient subir un surplus hydrique en hiver et au printemps, provenant de volumes d'eau qui tombaient précédemment sous forme de neige (et qui restaient « stockés » ainsi jusqu'en été) et qui tomberont et s'écouleront directement en pluies, ou venant de la couverture neigeuse fondue prématurément à cause des températures trop élevées. Or le rôle de stockage que joue la neige et les périodes de gel du sol sont des facteurs clef du fonctionnement de ces écosystèmes et se trouveront donc radicalement altérés dans le cadre d'un réchauffement climatique. Par exemple, une couche de glace entraîne une forte hypoxie des eaux qu'elle recouvre, ce qui peut limiter l'installation d'espèces allochtones. Et la fonte de la couverture neigeuse, en étant plus précoce et moins abondante, devrait favoriser potentiellement le risque de sécheresse et d'étiage durant l'été dans les bassins versants qui dépendent normalement des apports de sa fonte pour maintenir les débits de leur cours d'eau. [12, 16-18]

Jusqu'à 95 % des glaciers alpins pourraient disparaître d'ici 2100 et la couverture neigeuse va diminuer en durée (de l'ordre de plusieurs semaines pour des altitudes voisines de 1500 m), en extension spatiale et en épaisseur, quelque soit le scénario climatique considéré. [9, 10]

3.2.2 Changement du régime hydrique

Les réserves d'eau des nappes souterraines, qui font partie intégrante du cycle hydrologique, seront perturbées dans leur recharge par le changement climatique. Depuis la dernière décennie, le niveau des nappes phréatiques n'a cessé de baisser. Même si ce phénomène est essentiellement dû à leur surexploitation par l'Homme, le réchauffement climatique aggravera très certainement cette tendance. Les nappes phréatiques ne pourront plus alors remplir leurs rôles, particulièrement durant les étés plus chauds et secs qui sont annoncés. [12]

Dans le cas des scénarios de type A2, la plupart des modèles envisagés estiment qu'en 2050 la vitesse de recharge des nappes aura diminué d'au moins 70 % pour les régions méditerranéennes, [12]

En été, la diminution des pluies combinée à des températures plus chaudes, notamment dans le sud de la France, risque d'engendrer des périodes prolongées de débits anormalement faibles. L'insuffisance de l'alimentation des nappes phréatiques durant cette saison pourra aggraver ces phénomènes de sécheresse. [12, 19]

A l'inverse, en hiver et au printemps, l'augmentation des précipitations notamment dans le nord de la France pourra engendrer des inondations inhabituellement fréquentes. Ce phénomène pourra éventuellement être aggravé par les fontes précoces des couvertures neigeuses dans les zones montagneuses. Le changement climatique pourrait, en favorisant de tels événements extrêmes, augmenter les phénomènes d'érosion. [12, 18]

L'accentuation de la variabilité du débit hydrologique, notamment de la fréquence et de la durée de ces grandes crues et de ces fortes sécheresses, pourrait dégrader la qualité de l'eau, la productivité biologique et la qualité des habitats dans les cours d'eau. [10]

Or les zones humides, dans leur diversité, sont sensibles aux faibles débits comme aux fortes crues, à leur fréquence mais aussi à leur saisonnalité, aux sécheresses et aux niveaux des nappes phréatiques. De plus, de par leur adaptabilité limitée, ces écosystèmes sont considérés comme étant les plus vulnérables aux effets du changement climatique. (Barnaud in [15]) [12, 15]

En conclusion, en altérant le bilan thermique et le bilan hydrique, le changement climatique aura très probablement des impacts négatifs convergents sur les écosystèmes aquatiques. Par exemple en été, l'augmentation de la température et donc de l'évapotranspiration couplée à la diminution des précipitations, à la fonte précoce de la couche neigeuse au printemps (plus de stock de neige pour soutenir le débit des cours d'eau par sa fonte progressive) et à la faible hauteur de la nappe d'eau engendreront des périodes d'étiage plus longues. En hiver, l'augmentation globale des pluies, associée au surplus d'eau issue de la fonte de la neige causeront des crues plus nombreuses et plus violentes. Enfin, de ces situations extrêmes pourraient découler une dégradation nette de la qualité des eaux, une accentuation de l'érosion par la multiplication des crues, une plus grande fréquence des blooms d'algues et une augmentation de l'eutrophisation de certains milieux.

3.2.3 Autres conséquences indirectes et anthropiques

En plus des impacts dus aux facteurs température et précipitation, le changement climatique risque de toucher les milieux aquatiques métropolitains de façon plus indirecte. L'intrusion d'eau salée due à l'élévation du niveau des océans, ou la surexploitation des ressources hydriques par l'Homme, à cause notamment des températures plus élevées, sont autant de phénomènes découlant du réchauffement climatique et qui pourront avoir des impacts notables, sur les écosystèmes aquatiques.

3.2.3.1 Incidence de l'augmentation du niveau des océans

Selon les scénarios considérés, d'ici 2100 l'élévation moyenne du niveau de la mer pourrait être comprise entre 18 et 59 centimètres. [7]

Conjuguée à la diminution des apports d'eau douce, notamment en été, une conséquence additionnelle de cette élévation pourrait être la salinisation progressive des nappes phréatiques et des milieux aquatiques littoraux, par des intrusions salines plus importantes. [12, 20]

Ces intrusions d'eau salée seront donc d'autant plus accentuées que les nappes phréatiques seront basses et le débit des cours d'eau faible (remonté saline vers l'amont). [12]

Les évolutions de ces milieux aquatiques littoraux pourraient être de « migrer » vers l'intérieur des terres (recul du cordon dunaire par exemple), de remonter verticalement via la sédimentation (grâce aux apports sédimentaires des rivières qui compenseraient la montée des eaux), soit d'être submergés et se transformer en nappes ouvertes, ou encore se maintenir, mais en changeant de statuts et de biomes. (Romani M., Belair C. et Carreno M., p.15 in [15])

Les milieux déjà submersibles (comme les prés-salés en Gironde) pourraient connaître des submersions plus longues et plus fréquentes. (Verger F., p.11 in [15])

Cette élévation du niveau des océans entraînera également une plus grande vulnérabilité du trait de côte, de par l'accroissement de la hauteur d'eau par rapport au rivage, ce qui permettra aux vagues d'aborder le rivage avec plus d'énergie (Verger F., p.11 in [15]). En outre, la plus grande fréquence des tempêtes, également prévue par les modèles climatiques, ne peut qu'accroître cette vulnérabilité qui affectera notamment les cordons littoraux protégeant les zones basses. [15, 20]

Un aménagement d'une zone humide d'eau douce en marais salé a été réalisé volontairement en 1996 sur le site de Brancaster, en Grande-Bretagne. L'ouverture de la digue a permis à la mer de pénétrer dans la zone. Le milieu a alors évolué vers un marais salé et de nouvelles digues ont été construites 300 m derrière les premières. Cette opération effectuée dans le cadre de la politique britannique de « réalignement » avait pour but de s'adapter aux nouvelles conditions que provoque la montée du niveau de la mer. (Verger F., p.11 in [15])

Dans le cas de la Camargue, face à la montée des eaux il faudra probablement renforcer les digues de protection dans certaines zones, mais dans d'autres, il faudra reculer et redonner plus de liberté au fleuve et à la mer et augmenter la connectivité entre ces derniers et la plaine deltaïque. Le risque d'inondation est provoqué par des précipitations locales extrêmes, des crues du fleuve, des fortes marées et de fortes houles, facteurs qui risquent d'être plus fréquents dans le cadre du changement climatique. Par ailleurs, un étiage prononcé du fleuve entraîne la remontée d'eau salée dans les deux bras du Rhône, ce qui peut rendre l'eau impropre à une utilisation agricole et conduire à des restrictions sur les quantités prélevées, avec des conséquences possibles de confinement sur la ressource. (Chauvelon p.13 in [15])

Bien que prévisibles, les incidences d'une élévation du niveau de la mer restent très difficiles à quantifier. La hausse elle-même n'est pas précisément estimée (entre 18 et 59 cm d'ici 2100) car elle dépend du stock de calotte glaciaire qui fondra à cause du réchauffement climatique et car elle se répartira de manière hétérogène sur la surface du globe. Cette montée non-uniforme des eaux sera notamment due au fait que les masses d'eaux océaniques ne vont pas se réchauffer partout aussi vite et que la dilatation de l'eau due à l'augmentation de sa température (et donc la montée du niveau des océans) ne sera pas partout la même. Cette élévation risque d'être particulièrement marquée près des pôles, où l'augmentation des températures risque d'être la plus forte. [7, 12]

3.2.3.2 Effets de l'augmentation de la demande et des activités autour de l'eau

Beaucoup d'études n'ont pu (ou n'ont pas cherché à) séparer les effets de variations de températures et de précipitation dus au changement climatique, des effets dus aux actions anthropiques, notamment pour le captage des eaux souterraines. [12]

D'ici à la fin du siècle, les problèmes de démographie risquent de se faire plus importants, augmentant les tensions sur les ressources en eau potable. En plus des périodes probables de sécheresse en été, les incursions salines pourraient également diminuer les volumes exploitables. [21]

Le réchauffement climatique va également accroître le besoin en eau de l'agriculture pour l'irrigation. Ce surplus de consommation pourrait affaiblir les nappes phréatiques plus que le réchauffement climatique lui-même. [21]

Pour limiter ces phénomènes, il est fortement envisagé que de nouveaux aménagements de stockage d'eau soient construits pour limiter entre autre la déperdition d'eau l'été et contenir le surplus de l'hiver. Mais ces structures risquent de perturber encore plus les fonctionnements écologiques des écosystèmes. [12]

Les pollutions (par les produits phytosanitaires par exemple) risquent également d'avoir un impact plus marqué sur de plus petits volumes d'eau, comme cela sera le cas en été. Même s'il est très difficile de prévoir comment réagiront les milieux aquatiques, perturbés par le changement climatique, aux pollutions futures, on peut craindre une eutrophisation globale des écosystèmes. [7, 12]

Ce phénomène pourrait être encore accentué par l'augmentation des pluies d'hiver qui aggraverait l'érosion des terres agricoles, entraînant un surplus de particules en suspension, d'engrais et de produit phytosanitaire dans les eaux de tout le bassin versant associé. [12]

En conclusion, le changement climatique, qu'on restreint souvent à des variations dans les patrons de distribution de la température et des précipitations, aura bien d'autres répercussions moins évidentes à cerner ou à quantifier. Le réchauffement climatique, en provoquant la fonte de la calotte glaciaire, engendrera une montée du niveau de la mer (entre 18 et 59 cm) qui, en plus de menacer de submersion de nombreux écosystèmes littoraux, entraînera également des incursions salines, modifiant la nature et le fonctionnement du milieu.

Les activités humaines vont aussi évoluer à cause du changement climatique. Celles qui perturbent déjà l'équilibre écologique de la plupart des milieux aquatiques, risquent d'avoir des incidences croissantes avec le changement climatique. Par exemple, le pompage d'une nappe phréatique aura un impact bien plus conséquent dans un contexte environnemental où le changement climatique diminuera le volume d'eau disponible et limitera son rechargement.

Les impacts du changement climatique sur la qualité des eaux des milieux aquatiques dépendront également des évolutions des activités humaines : un milieu perturbé modérément par l'Homme sera plus à même de se maintenir en l'état malgré ces changements extérieurs. La biodiversité est, par exemple, reconnue comme un gage de stabilité pour les écosystèmes. [22]

3.3 Synthèse

Les changements climatiques en métropole font l'objet de différents modèles prévisionnels proposant diverses trames envisageables. Même si aucun de ces scénarios d'émission de GES ne semble actuellement plus probable qu'un autre, et même si aucun des modèles climatiques n'est plus robuste qu'un autre (surtout pour les précipitations), la tendance générale qui se détache en prenant en compte « l'ensemble » de ces pronostics, fournit une bonne appréciation des dérèglements climatiques probables à venir d'ici la fin du siècle.

Globalement, les étés seront nettement plus chauds et plus secs, notamment au sud de la métropole. Et à l'inverse, les hivers seront plus doux, en particulier dans le sud, et beaucoup plus pluvieux, surtout dans le nord et sur la côte atlantique.

Tous les modèles s'accordent aussi sur des fréquences et des intensités d'événements extrêmes nettement augmentées (inondation en hiver et sécheresse au sud), le tout avec une forte variabilité interannuelle. A noter que cette variabilité accrue est rarement prise en compte dans les estimations d'impacts. Ce qui amène à penser que l'effet de ces crues et sécheresses supplémentaires est sous estimé (en particulier par rapport à la disponibilité en eau et aux demandes futures en matière d'irrigation agricole). [12]

Tout ces changements auront un impact, encore difficile à évaluer, sur les fragiles écosystèmes aquatiques. L'augmentation de la température pourrait avoir de fortes conséquences sur la qualité de l'eau (hypoxie, eutrophisation...). Les variations du régime hydrique auraient aussi de fortes répercussions sur le fonctionnement et l'équilibre de ces milieux.

La fonte des glaces, en élevant le niveau de la mer générera de nombreuses difficultés de gestion pour les milieux littoraux ; submersions, érosion et recul du trait de côte, intrusions salines dans les cours d'eau et les nappes phréatiques...

Les activités anthropiques auront également un effet plus marqué sur les milieux aquatiques, que ce soit par leurs intensifications dus au changement climatique (pompages plus importants pour l'irrigation des cultures, stressées par le manque d'eau) ou par la concomitance avec les nouvelles perturbations à venir (difficulté d'éliminer une pollution en période de faible débit, ou aggravation du ruissèlement de produits phytosanitaires et d'engrais depuis les terres agricoles, à cause des plus fortes précipitations hivernales).

La répartition géographique des zones humides devrait se modifier en raison de l'évolution des températures et des précipitations. [10]

Il est probable que la résilience de nombreux écosystèmes sera réduite en raison de cette combinaison rapide et inédite du changement climatique, des perturbations secondaires qu'il entraîne et de la pression anthropique constante (ou croissante). L'impact du changement climatique sur la qualité des eaux des milieux aquatiques dépendra évidemment des futures activités humaines. [7, 22]

La question est aussi de savoir si toutes ces perturbations auront une influence sur les actions futures de l'Homme et si elles aggraveront, de façon non encore évaluée, les émissions de GES ; le rôle de puits de carbone des tourbières par exemple, pourrait être perturbé et engendrer une remise en circulation de CO₂ historiquement stocké. (Laggoun-Défarage et Muller[15])

4 Conséquences des modifications pour les communautés natives et exotiques des hydrosystèmes métropolitains

4.1. Conséquences des modifications des zones humides pour les populations d'espèces natives

Ce n'est pas la première fois dans l'Histoire que les espèces vivant sur notre planète se retrouvent confrontées à des modifications importantes du climat. Mais ici, la différence paraît essentiellement due à la rapidité de ces changements, qui se cumulent à d'autres stress (pollution, surexploitation...) et aux effets secondaires attendus (montée des eaux...), le tout étant susceptible d'augmenter la vulnérabilité des organismes vis-à-vis d'autres facteurs (espèces invasives, pathogènes, nouveaux aménagements...). (Barnaud p.5 in [15]) Après avoir considéré les caractéristiques des milieux aquatiques qui risquaient d'être altérés par les changements globaux, on peut se demander de quelle façon les espèces de ces écosystèmes réagiront et s'adapteront à ces perturbations climatiques et écologiques ?

Ce chapitre décrit les principales limites et contraintes dues aux changements globaux que risquent de connaître la faune et la flore des milieux aquatiques métropolitains. Dans un premier temps il sera question des modifications qui pourront se produire au sein des populations elles-mêmes (changement de localisation géographique, modification du cycle de vie...). La seconde partie traitera des modifications écologiques des milieux pouvant jouer des rôles sur les dynamiques des populations et leur avenir.

4.1.1 Limites d'adaptation des espèces natives

Pour qu'une population soit viable dans le temps, elle a besoin de certaines conditions physico-chimiques et biologiques (notion de niche écologique). En perturbant ces conditions nécessaires aux espèces, les changements globaux risquent de modifier très fortement la répartition de nombreuses espèces, de faire disparaître des populations incapables de se déplacer, de pousser des espèces animales à migrer et à s'adapter, etc. [23]

D'après les critères de l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN), vers 2080 les changements climatiques rendraient plus de la moitié des plantes européennes «vulnérables» ou «menacées», Les taux de survie fluctueraient alors selon la capacité des espèces à gagner de nouveaux habitats plus favorables. (Barnaud G., p.5 in [15])

4.1.1.1 Remontée vers le nord et en altitude des aires de répartition des espèces

La température est un des facteurs principaux de la remontée vers le nord et en altitude des aires de répartition des animaux et des végétaux. [7, 24]

Au cours du XX^{ème} siècle, à l'échelle du globe, pour plus de 1700 espèces issues de divers écosystèmes, a été observé un déplacement moyen de plus de 60 km vers le nord et de 60 m en altitude. Une hausse potentielle de température comprise entre 1 et 3,5°C pour la fin du siècle équivaldrait à un déplacement des isothermes actuels de 150 à 550 km (Barnaud p.5 in [15]) vers le nord, ou à une remontée en altitude de 150 à 550 m. [10, 15]

Pour les poissons, organismes homéothermes, donc étroitement liés à la température de l'eau, le patron de distribution expliquant le plus finement la répartition des espèces le long d'un gradient altitudinal est celui qui oppose des poissons dit d'« eau froide » à ceux dit d'« eau chaude » (par rapport à l'échelle des températures françaises). [24]

Ce patron de distribution est caractérisé par une augmentation longitudinale de la température et discrimine, par exemple, les salmonidés comme des poissons d'« eau froide », ayant une tolérance limitée aux températures élevées. [24]

Les poissons d'« eau froide » sont donc considérés comme étant les plus vulnérables aux changements climatiques, car pour assurer leur survie, ils doivent migrer quand cela leur est possible vers le nord ou plus haut en altitude. Les poissons d'« eau chaude » eux, les remplaceraient petit à petit au niveau des anciens habitats d'« eau froide ». Cela pousserait aussi espèces migratrices amphihalines à poursuivre leur migration plus en amont des cours d'eau, pour retrouver des conditions environnementales satisfaisantes (à condition évidemment que les aménagements des milieux le leur permettent). [25]

Pour les végétaux terrestres, la température est aussi un facteur clef définissant l'accès à la ressource hydrique (évapotranspiration) et influant sur leurs capacités à réaliser la photosynthèse (stress hydrique). Leurs aires de répartition seront donc également modifiées en fonction du nouveau gradient de température et de précipitations, donnant lieu à un nouvel agencement des principales séries de végétation. Par exemple, les extensions très importantes du pin maritime et du chêne vert se feraient au détriment du châtaignier et des chênes qui ne se maintiendraient que dans le nord et l'est de la métropole. (Figure 9)

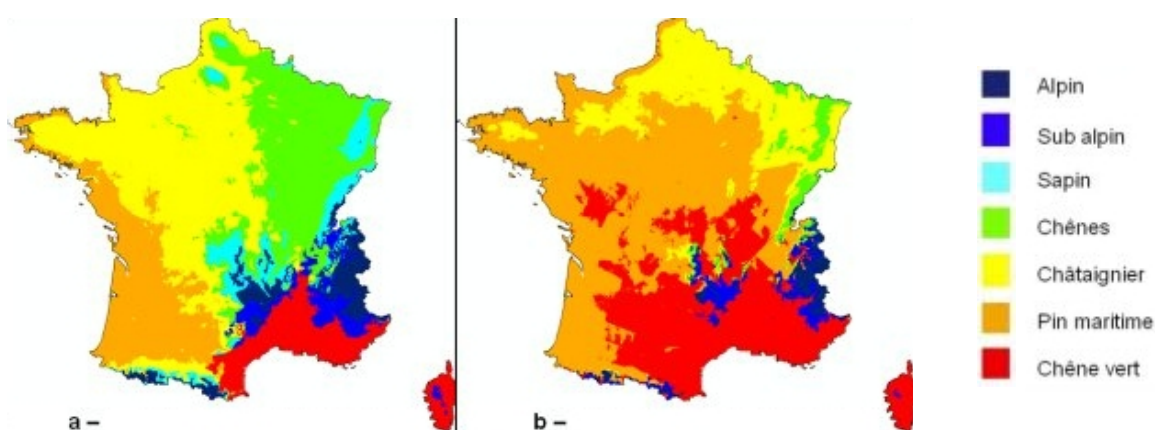


Figure 9 : Répartition des grandes séries de végétation dans le cadre d'un scénario A2. De nos jours (a) ; en 2100 (b) [2]

On peut en déduire que ce sont des écosystèmes « entiers » qui vont se déplacer en altitude et/ou vers le nord. Ce qui pose de nombreuses questions.

La vitesse de remonté de ces espèces sera-t-elle assez rapide par rapport à la progression des isothermes ? (Risque de disparition des populations ne pouvant se déplacer assez vite) [15]

Les obstacles, notamment anthropiques (barrages, digues...), ne sont-ils pas trop nombreux et difficilement franchissables pour permettre ces déplacements ? Surtout que certains de ces ouvrages risquent de se multiplier dans le futur. De même, pour les plantes, leurs stratégies de dissémination (via l'eau, le vent...) risquent d'être perturbées par les changements des conditions climatiques.

La lutte contre le morcèlement du paysage (restauration des corridors de migration et de la continuité écologique) et l'accessibilité des habitats refuge sont d'ailleurs en train de devenir des préoccupations de premier ordre depuis le Grenelle de l'Environnement (Notion de Trame verte et bleue). [26]

Les communautés vivant déjà très au nord de la France, ou très haut en altitudes sont-elles voués à disparaître car incapables de « fuir » vers des latitudes ou des altitudes plus élevées ? De nombreuses espèces devraient ainsi disparaître des régions montagneuses (jusqu'à 60 % d'ici 2080 dans certaines régions, selon les scénarios de fortes émissions). [7]

Des modélisations (via le modèle « Euromove ») montrent que la répartition géographique de 1400 plantes européennes, présentes dans différents milieux, se modifiera significativement d'ici à 2050. Le modèle prévoit également qu'en moyenne, par rapport à 1990, 32 % de ces espèces auront disparu pour cette même période. Ces modifications de biodiversité et ces changements de répartition, déclin et disparitions de populations, apparitions de nouvelles, seraient de plus en plus coûteux du point de vue écologique, sanitaire et socio-économique. (Barnaud p.5 in [15])

4.1.1.2 Perturbation des cycles de vie

Il a déjà été constaté que les animaux migrent plus tôt ou ont modifié leurs habitudes migratoires pour retrouver des habitats appropriés : les voies de migration évoluent. La superficie des sites d'hivernage, de reproduction et de stationnement de populations se modifient également. Les populations migratrices remontent moins au nord, ou restent sur leur zone d'hivernage plus longtemps comme les flamants roses en Camargue, qui y séjournent plus de temps qu'auparavant, non sans poser quelques problèmes comme la dégradation de certaines rizières (Richoux P. et Lebreton P. p.9, in [15]).

De même, les migrateurs amphihalins doivent remonter plus en amont des cours d'eau pour retrouver les mêmes conditions environnementales que dans le passé. [25]

Dans le cas du Saumon atlantique (*Salmo salar*), des études ont déjà mis en évidence des évolutions significatives de son cycle de développement telles que :

- une espérance de vie plus courte (très peu d'individus atteignant les 3 ans ou plus),
- un renouvellement plus rapide des populations,
- une augmentation du nombre de mâles précoces, conduisant à une stratégie de reproduction excluant quasiment la phase marine : en participant au frai, tout comme les grands mâles anadromes, c'est à dire ayant déjà séjournés en mer, ces mâles précoces participent à sélectionner cette nouvelle stratégie de reproduction. [27]. Le cycle de développement de l'espèce tend alors vers une stratégie semelpare (reproduction unique), contrainte également par la forte baisse d'effectif des poissons qui retournent en rivière après un second séjour en mer. [25, 27]

L'augmentation des températures joue un rôle majeur dans ces évolutions en réduisant les périodes favorable à la ponte (température de l'eau comprise entre 3 et 12°C), voire en

inhibant de façon physiologique les capacités reproductives des femelles et en accélérant, en rivière, la maturation des mâles. [27]

Un autre exemple d'altération du cycle de vie concerne la reproduction du corégone (*Coregonus lavaretus*), espèce d'eau froide endémique des grands lacs alpins. Cette espèce se reproduit en hiver quand la photopériode et la température des eaux diminuent. Le réchauffement des eaux en cours a déjà retardé sa reproduction de deux semaines environ. Mais comme la durée du développement embryonnaire est également raccourcie grâce à ces températures plus chaudes, l'éclosion des larves est en fait avancée de quelques jours [27]. Les larves se retrouvent alors dans des eaux plus chaudes qu'avant, avec une ressource nutritive (le zooplancton) dont la dynamique est plus précoce. Il est alors possible que la survie des larves soit meilleure et qu'elle explique la très bonne dynamique actuelle des populations de corégone observées dans le lac Léman, par exemple. Cependant, si le corégone semble aujourd'hui avantagé, il régressera ou disparaîtra si le réchauffement se poursuit. En effet, cette espèce fraie uniquement quand la température des eaux s'abaisse en-dessous de 7°C. [27]

Le réchauffement climatique a également d'autres conséquences sur le cycle de vie des végétaux, comme une plus grande précocité des dates de floraison et de fructification qui, en plus d'un décalage dans le temps, engendre des difficultés quelquefois importantes pour les plantes concernées, comme par exemple des expositions plus fréquentes au gel, des découplages temporels avec les cycles biologiques d'espèces facilitatrices, comme les pollinisateurs, etc. (Barnaud [15]).

Par exemple en France, les abricotiers (*Prunus armeniaca*) sont très sensibles aux conditions climatiques. Une étude de l'impact du changement climatique sur cette production, au stade de la floraison, a montré une avancée des dates de floraison sur les vingt dernières années d'en moyenne 0,5 à 1 jour /an. Cette précocité est attribuée à des températures plus élevées après la levée de la dormance. Cette tendance, si elle s'accroît, pourrait poser des problèmes de pollinisation des fleurs et de dégâts par le gel printanier. Par ailleurs, l'augmentation des températures durant la période de dormance pourrait être à l'origine d'une augmentation de l'intensité de nécroses physiologiques touchant les ébauches florales, ce qui réduirait significativement l'intensité de la floraison. Ainsi l'automne 2000, très doux, a induit de fortes nécroses à la floraison 2001 dans le sud-est de la France. [27]

En conclusion, en modifiant la nature et le fonctionnement écologiques des habitats, le changement climatique va obliger les espèces les moins tolérantes aux fortes températures à se déplacer au nord et en altitude, pour retrouver les conditions physico-chimiques et écologiques de leurs niches écologiques. Mais la rapidité de ces bouleversements couplée aux possibilités de déplacement souvent limitées (obstacles physiques, habitats refuges hors de portée, fragmentation du paysage...), entraîneront irrémédiablement la disparition de nombreuses espèces animales et végétales. Pour celles qui réussiront leurs « fuites » et leurs implantations, on peut s'attendre à ce qu'elles colonisent des milieux qui auparavant étaient trop froids pour elles.

Le réchauffement climatique aura également un impact sur le cycle de vie des espèces, en modifiant par exemple les trajectoires et les lieux d'hivernage des oiseaux migrateurs ou en accélérant le cycle de développement de certains poissons. Les conséquences de ces changements comportementaux et physiologiques sont encore difficiles à évaluer à l'échelle de tout un écosystème.

4.1.2 Un environnement déséquilibré et moins favorables aux espèces natives

En altérant les caractéristiques écologiques des milieux aquatiques, les changements globaux vont créer de nouveaux stress et modifier les interactions interspécifiques au sein des écosystèmes. De nombreuses espèces indigènes pourraient décliner voire disparaître, mais à l'inverse, ces nouvelles perturbations pourraient aussi favoriser la pullulation d'autres populations autochtones. (Barnaud 2008 in [15])

Bien qu'il soit très difficile de prédire comment pourraient réagir telle ou telle espèce, il est important de lister les différents facteurs perturbés par le changement climatique qui joueront probablement un rôle sur les populations animales et végétales des milieux aquatiques en métropole.

4.1.2.1 Modifications des relations interspécifiques

Comme abordé dans la partie précédente, le changement climatique va perturber les cycles de vie des espèces animales et végétales, ce qui aura pour conséquence d'avancer, de façon plus ou moins prononcée et hétérogène, le développement des individus. Tout ceci risque donc d'entraîner des désynchronisation des interactions entre les espèces.

Le réchauffement printanier plus précoce des eaux et le refroidissement plus tardif à l'automne provoqueront donc des décalages dans les différents cycles biologiques. Les ajustements entre les proies et leurs prédateurs seront également compromis. En Angleterre, les dates de procréation de certaines espèces d'amphibiens sont avancées d'une à deux semaines. Ainsi, l'arrivée précoce de tritons ponctués (*Triturus vulgaris*) dans les plans d'eau a pour résultat une prédation accrue des grenouilles des champs (*Rana arvalis*) au rythme de ponte inchangé (Barnaud [15]). A l'inverse, certaines espèces pourraient tirer profit de l'avancée de leur cycle de développement qui les soustrairait provisoirement à leurs prédateurs. Ces populations indigènes pourraient alors connaître une explosion démographique qui à son tour serait nuisible pour le fonctionnement écologique du milieu.

Par exemple, les populations de bouvières (*Rhodeus amarus*), espèce native d'Europe et notamment présente dans le Rhône, sont en pleine croissance démographique depuis 1980 (à noter que l'espèce est protégée en France depuis 1960). Cette expansion est en partie attribuée aux hausses de températures de l'eau. Au final, l'espèce est en train d'adopter le même comportement qu'une espèce invasive, avec un impact très négatif sur les moules d'eau douce (*Unionoida* sp.) que les alevins de la bouvière parasitent au cours de leurs développements. [15, 27, 28]

Même la perte de la couverture neigeuse ou de la glace à la surface de l'eau, à cause de la hausse des températures, peut altérer les relations interspécifiques. Par exemple, la glace procure aux poissons une protection contre les oiseaux et leurs prédateurs terrestres, notamment en ces périodes où les poissons sont « engourdis » par le froids et moins à même d'échapper à la prédation. La perte de cette couche de glace pourrait augmenter significativement la pression de prédation pour de nombreuses populations piscicoles. [25]

4.1.2.2 Augmentation des stress

Le risque biologique des gels tardifs augmente du fait de la précocité de la végétation qui expose des organes floraux à des stades plus précoces, et donc plus fragiles. Ceci est également valable pour les animaux qui sortiraient de leurs formes de résistance ou d'hibernation de manière trop précoce. [29]

La réduction, et à l'extrême la disparition, de la couche de neige en montagne est aussi un facteur aggravant l'impact potentiel du gel sur la faune et la flore : lorsque la température de

l'air est de -30°C, elle n'est que de -10°C sous une couche de neige de 10 cm et de -1 à -2°C sous un manteau neigeux d'un mètre. [12]

Le régime hydrique est un déterminant majeur de la structure de la végétation des écosystèmes aquatiques (Richoux et Lebreton [15]). L'avenir des espèces de ces milieux se trouve directement influencé par l'altération de ces processus. Des communautés végétales localisées en bordure de plan d'eau et modelées par les variations (saisonniers et interannuelles) de niveaux d'eau, disposent de peu d'espace d'adaptation spatiale (comme les roseaux - *Phragmites* sp.) alors que des plantes tolérant des conditions moins humides ont une forte probabilité de dominer localement, comme par exemple les frênes (*Fraxinus* sp.). [15, 19]

Or, le changement climatique, en instaurant un régime hydrique plus irrégulier risque de maintenir les nappes phréatique à des niveaux plus bas et donc plus difficiles à atteindre pour les racines des végétaux de la ripisylve. Ce stress hydrique pourrait donc devenir un élément structurant de plus en plus importants des futures communautés riveraines des cours d'eau. [19]

Par exemple, les peupliers et les saules sont des arbres pionniers dominant sur les berges quand le flot du courant est continu et que le rythme des inondations est "naturel". A l'inverse, le tamaris, un arbuste pionnier résistant au stress (racines profondes) mais sans potentiel compétitif, est très abondant sur ces mêmes berges quand le flot est intermittent ou régulé par des barrages. Ce changement de dominance s'explique essentiellement par la hauteur de la nappe d'eau et par l'apparition de nouvelles zones à coloniser pour le tamaris (due aux étiages plus marqués qui découvrent des portions de la rive, normalement sous les eux). [19]

La qualité des eaux jouera aussi un rôle dans les probables changements d'assemblage des populations. L'eutrophisation des plans d'eau, accélérée par les changements globaux, constitue une menace pour les espèces natives. Pollution, hypoxie, charge algale plus importante sont d'autant d'éléments qui tendront à faire disparaître les populations affiliées aux eaux oligotrophes. (Richoux et Lebreton [15])

La réduction globale de la concentration en oxygène des eaux, due par exemple à la surconsommation par des blooms de micro-algues ou à l'élévation des températures, pourra altérer les assemblages biotiques, la chimie et la productivité des lacs et des cours d'eau. C'est à la fois un moteur et un résultat de l'eutrophisation. [12]

Le changement de salinité due à la montée des eaux est également un élément qui va modifier la composition spécifique de certains milieux aquatiques littoraux, en favorisant les espèces halophiles des habitats aquatiques et des ripisylves. [19]

Les espèces pionnières et « stress tolérantes » pourraient donc le mieux résister à toutes ces perturbations des milieux aquatiques. Les espèces de fin de succession (c'est-à-dire les plus compétitives) devraient, elles, se déplacer ou disparaître (Grime, 1974).

En conclusion, en modifiant les conditions écologiques des milieux aquatiques, les changements globaux peuvent les rendre inhospitaliers pour de nombreuses espèces natives. Les limites nord de leurs aires de répartition deviendraient de plus en plus favorables, tandis que celles au sud le seraient de moins en moins jusqu'à devenir complètement inhabitable pour les populations en question. L'augmentation rapide (limitant fortement l'adaptation des espèces) de la température explique quasiment à elle seule le déplacement vers le nord et en altitude de la plupart des aires de répartition. Cela pose des questions sur la capacité des communautés animales et végétales à se mouvoir vers des habitats refuge, les distances à couvrir étant importantes et surtout, dans un laps de temps relativement court (de 150 à 550 km en latitude, en moins d'un siècle). De plus, les obstacles physiques et le morcellement des habitats sont d'autant de contraintes supplémentaires qui risquent au final d'entraîner la disparition de nombreuses espèces indigènes.

Mais ces perturbations auront également une influence sur les cycles de vie de nombreuses espèces. Des glissements phénologiques, des désynchronisations, des problèmes d'interactions (date de reproduction, de migration, durée de la saison de croissance, prédation...) sont déjà observées ou prévisibles. Les espèces migratrices seront probablement les plus vulnérables à ces variations et pourraient accuser les changements les plus marqués (exemple du saumon atlantique qui tend vers un cycle de vie de plus en plus court et dissocié de la phase marine).

En bouleversant de la sorte les mécanismes régissant ces écosystèmes, ces changements pourront logiquement engendrer la disparition des nombreuses espèces, mais risquent aussi de faire pulluler certaines espèces natives dans ces milieux désormais plus « ouverts », les rendant tout aussi nuisibles que les espèces invasives.

4.2 Conséquences des modifications écologiques et physico-chimiques sur les espèces invasives des milieux aquatiques

Dans les milieux aquatiques, les changements globaux vont être à l'origine de nombreuses perturbations. De multiples facteurs écologiques vont être altérés, perturbant ainsi les assemblages des populations animales et végétales natives ce qui pourrait conduire à rendre vacantes de nombreuses niches écologiques, facilitant alors la colonisation par des espèces allochtones. Ces espèces sont généralement de nature souvent plus ubiquistes que les natives et risquent donc de mieux s'adapter aux nouvelles conditions créées par les changements globaux.

Cette partie expose les différents facteurs qui, dans le cadre des changements globaux, peuvent faciliter le transport, l'implantation et le développement de nouvelles espèces invasives et stimuler la dynamique des populations invasives déjà présentes, soit en rendant plus favorable les milieux (Figure 10), soit en diminuant l'efficacité des méthodes de gestion.

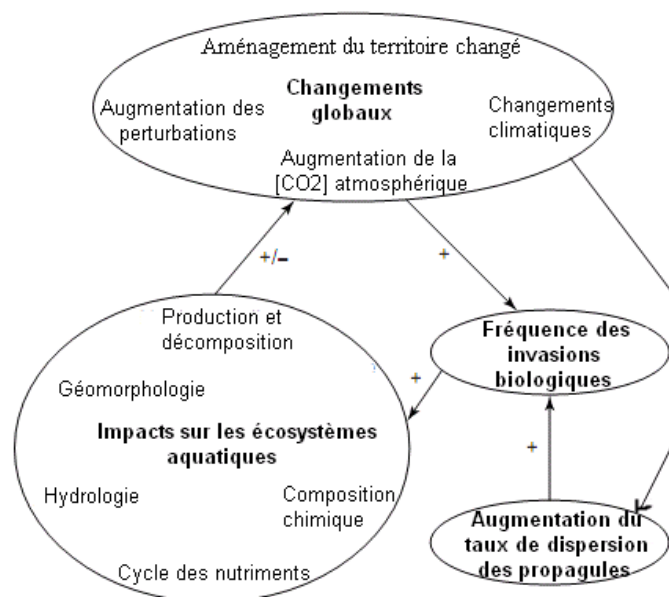


Figure 10 : Impacts des changements globaux sur les espèces invasives (Adapté de Dukes & Mooney, 1999) [30]

Pour rappel, les grandes étapes d'une invasion biologique sont dans un premier temps l'arrivée de l'espèce exotique dans un milieu qui est biogéographiquement éloignée de son aire de répartition naturelle. Ce phénomène d'introduction est souvent lié aux activités humaines. L'espèce pourra alors être suffisamment acclimatée aux conditions écologiques du milieu receveur pour s'y maintenir et y établir une population viable, l'espèce est dite « naturalisée ». Elle est alors considérée comme « invasive », lorsque sa population s'accroît fortement en nombre d'individus et/ou étend son aire de répartition avec des conséquences néfastes sur l'écologie et/ou l'économie. [3, 4]

4.2.1 Des conditions environnementales qui deviennent plus favorables à l'implantation d'espèces exotiques

Que cela soit grâce à la modification des mécanismes actuels de transport et d'implantation d'espèces exotiques ou via la dynamique d'invasions biologiques déjà effectives, les changements globaux risquent d'augmenter la pression des invasions biologiques sur des écosystèmes déjà perturbés.

D'après les résultats du programme DAISIE (Delivering Alien Invasive Species In Europe - 2009), l'Asie est devenue le premier continent d'origine des espèces exotiques que l'on retrouve en Europe, devant l'Amérique du Nord. Moins de 10 % de ces organismes auraient été délibérément introduits (par exemple comme agents de lutte biologique). [31]

4.2.1.1 Changement des mécanismes de transport et d'introduction

Les espèces exotiques envahissantes se dispersent la plupart du temps à l'aide de l'Homme, que ce soit volontairement ou accidentellement. Or, les changements climatiques pourraient modifier les habitudes humaines en termes de transports internationaux.

Les destinations touristiques pourraient évoluer avec l'attractivité des pays, ce qui pourrait potentiellement ramener de nouvelles d'espèces exotiques issues d'autres régions du monde en métropole.

Les voies de transport internationales pourraient également être modifiées. Avec notamment, la diminution de la superficie de la banquise au pôle nord, ce qui rendrait les voies de navigation plus praticables dans cette région du monde et cela toute l'année. La réduction du temps de trajet pourrait ainsi bénéficier à certaines espèces exotiques en favorisant leur survie grâce à un temps de séjour plus réduits dans les ballasts des navires. L'augmentation de la salinité des milieux littoraux, due à la montée du niveau des océans, pourrait également constituer un élément de facilitation de la survie de certaines espèces exotiques. [18, 32]

Le réchauffement climatique pourrait également augmenter les surfaces où l'aquaculture de poissons d'"eau chaude" (ou tropicaux) serait possible. Même chez les particuliers, le réchauffement pourrait permettre l'introduction de nouvelles espèces exotiques (piscicoles ou végétales) dans les bassins privés. Sans réglementation, ceci pourrait augmenter significativement le pool d'espèces potentiellement invasives et multiplier les sources possibles de « contamination ». [18]

La multiplication de phénomènes météorologiques extrêmes pourrait aussi favoriser la dispersion des propagules des espèces envahissantes dans de nouvelles zones. Par exemple, les inondations pourraient permettre à des poissons invasifs de rejoindre de nouveaux bassins versants, ou de franchir des obstacles limitant normalement leurs déplacements (barrage, digue...), voire même de s'échapper de bassins d'aquaculture. [18]

Les lacs avec une couverture de glace hivernale et présentant de ce fait une forte hypoxie en cette saison, ne sont généralement pas aménagés pour la pêche de loisir. Mais dans le cas

où le réchauffement climatique lèverait ces contraintes, on peut s'attendre à une pression pour l'introduction de poissons exotiques destinés à la pêche, ce qui risquerait de déséquilibrer les assemblages d'espèces natives. [18]

La diminution globale de la disponibilité en eau risque d'entraîner la construction d'ouvrages de retenue pour stocker au moins une partie des eaux des crues hivernales afin de soutenir en période d'étiage le débit des cours d'eau. Ces réserves serviront aussi à l'irrigation des cultures durant l'été. Des ensembles de bassins pourraient également se constituer en un réseau dense de canaux et d'aqueducs pour acheminer l'eau entre ces sources et les zones à fort enjeu. Un tel système de gestion pourrait créer de nouveaux habitats propices (les bassins de stockage) à l'installation d'espèces invasives qui pourraient de plus profiter du réseau de canaux pour aller coloniser de nouveaux milieux jusqu'alors préservés car hors d'atteinte. [18]

4.2.1.2 Implantation de nouvelles espèces exotiques

Les dynamiques des populations exotiques vis-à-vis du changement climatique pourraient être notablement différentes de celles des populations natives. Par exemple, un climat plus chaud peut augmenter le taux de survie des espèces allochtones issues de régions chaudes du globe. La combinaison de ces deux facteurs, anthropiques et climatiques, serait donc un élément favorisant l'implantation de nouvelles invasions biologiques. Alors qu'à l'inverse, ce réchauffement climatique pourrait surtout rester une source de stress pour les espèces natives. [33]

A partir d'un pool donné d'espèces pouvant potentiellement envahir un milieu, divers filtres écologiques empêchent l'implantation définitive de ces espèces exotiques. Par exemple, pour un milieu donné et une espèce exotique donnée, la température trop froide de l'eau sera une "barrière écologique" impossible à franchir pour l'envahisseur, préservant ainsi le milieu. De même la salinité, l'hypoxie hivernale ou le débit naturel sont d'autant d'obstacles, qui en temps normal, empêchent la plupart des espèces exotiques de s'implanter dans certains écosystème. Or, avec les changements globaux, certains de ces filtres écologiques risquent de ne plus jouer pleinement leur rôle de barrière : des eaux plus chaudes, des hypoxies hivernales moins fréquentes, des intrusions marines plus importantes, etc. (Figure 11) [18]

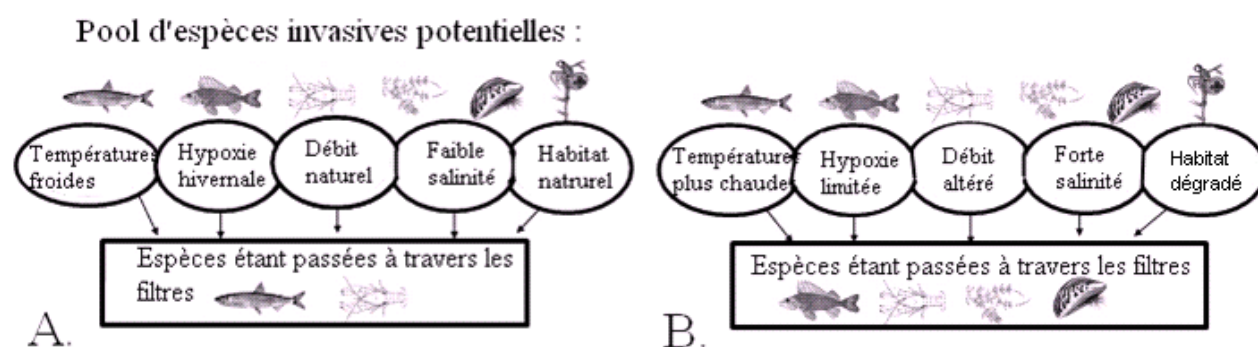


Figure 11 : Filtres écologiques limitant l'implantation des espèces invasives de nos jours (A.) et ces mêmes filtres altérés par les changements globaux et ayant perdu leurs atouts « protecteurs » (B.) (Adapté de Rahel & Olden, 2008). [18]

Par exemple, le réchauffement de l'eau va permettre l'implantation des espèces d'"eau chaude" dans des milieux anciennement "froids". [18]

Les variations de fréquence, d'intensité et de régularité des crues est aussi un élément qui risque d'entraîner le déclin des populations natives (en perturbant par exemple les cycles de reproduction) au profit des espèces allochtones. Dans le bassin versant du Rhône, la lippia (*Aloysia citriodora*), une plante exotique des ripisylves, venue d'Amérique du Sud, se multiplie très activement par reproduction végétative. Lors d'inondations ou de travaux du sol, des fragments de tige sont arrachés et emportés par le courant. Les nouvelles conditions environnementales risquent donc de favoriser grandement sa dissémination. [18]

La couche de glace hivernale à la surface de certains plans d'eau, y générant des périodes d'hypoxie et de faible luminosité et apparaissant comme une barrière à la survie de nombreuses espèces exotiques, va diminuer d'épaisseur ou de durée, voire même disparaître avec le réchauffement climatique, laissant ainsi la possibilité à ces espèces introduites de s'implanter. [18]

Au final, les espèces actuellement incapables de se maintenir dans un milieu donné en raison des conditions climatiques pourraient être de plus en plus à même d'y survivre. De plus les espèces exotiques réussissant à s'installer dans un écosystème auraient également plus de probabilités de s'y maintenir et d'y développer des populations viables. [34]

La transition entre espèce "exotique" et espèce "invasive" pourrait alors être facilitée si le changement climatique modifie les rapports de compétition entre les natives et les introduites au profit de ces dernières, et s'il stimule également leurs capacités de dissémination [30, 34]. C'est ainsi qu'en France, sous le climat méditerranéen, l'augmentation des températures n'handicape pas la fourmi d'Argentine (*Linepithema humile*), contrairement aux espèces natives d'insectes, qui sont obligés de se mettre à l'abri pendant les heures les plus chaudes de la journée. Cet avantage compétitif permet un meilleur développement de ces colonies exotiques par rapport à celles indigènes, l'extension de l'aire de répartition et l'impact écologique de ces fourmis d'Argentine est donc encore plus fort dans ces conditions, les rendant d'autant plus nuisibles. Alors que, sans les changements climatiques, cette espèce de fourmi serait peut être seulement restée au stade d'espèce introduite sans impacts écologiques significatifs. [30]

Les effets de l'augmentation de la pression partielle de CO₂ ne sont pas encore bien connus. Son effet fertilisant sera peut être plus bénéfiques aux espèces à croissance rapide, comme le sont souvent les espèces invasives... [30]. Beaucoup d'espèces végétales répondent positivement à l'augmentation du CO₂ atmosphérique lorsqu'elles poussent en monoculture. Mais, par exemple, dans des conditions naturelles, au sein d'une communauté végétale, le chèvrefeuille du Japon (*Lonicera japonica*), qui est une plante envahissante des milieux aquatiques européens, répond d'une façon plus incertaine et moins tranchée à cette augmentation de CO₂. [30]

4.2.1.3 Evolution des aires de répartition

L'augmentation des températures sera probablement le moteur principal de l'extension des aires de répartition des espèces exotiques. [34]

Par exemple, le myriophylle aquatique (*Myriophyllum aquaticum*) verrait son aire de répartition potentielle (c'est-à-dire basée uniquement sur les données climatiques ; températures et précipitations en l'occurrence) s'étendre notamment dans les pays du nord de l'Europe, où la température lui serait moins défavorable. (Figure 12) [45]

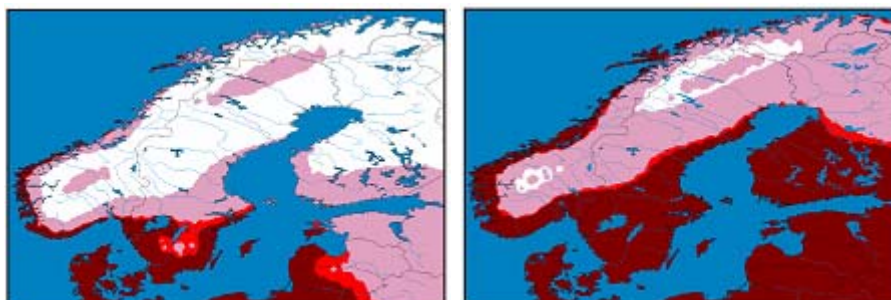


Figure 12 : Aire de répartition potentielle de *Myriophyllum aquaticum*, à gauche, de nos jours (avec les moyennes climatiques de la période 1961-1990) ; à droite en 2100 avec un scénario d'émission B2. (Adapté de Hallstan S.) [45]

■ Faible potentiel ; ■ Potentiel intermédiaire ; ■ Fort potentiel.

De même, aux Etats-Unis, les températures hivernales limitent l'implantation du piranha à ventre rouge (*Pygocentrus nattereri*) dans les états du sud. Des simulations montrent qu'avec une augmentation de température de 2°C, l'aire de répartition de cette espèce pourrait progresser d'environ 200 km vers le nord (Figure 13). [18]

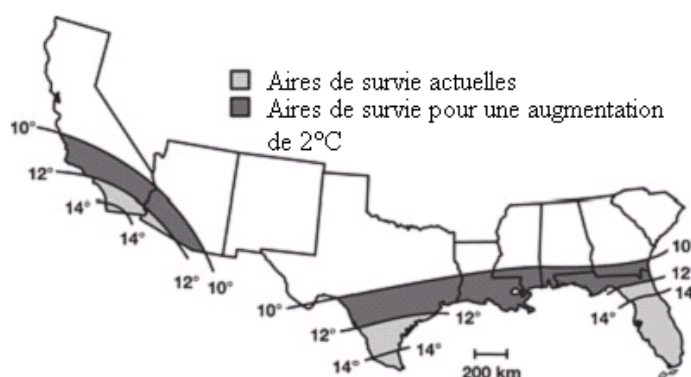


Figure 13 : Aire de répartition du piranha à ventre rouge aux Etats-Unis actuellement et en cas d'un réchauffement des températures moyennes de 2°C (Adapté de Bennett et al., 1997). [18]

Les caractéristiques hydromorphologiques et écologiques des milieux aquatiques expliquent partiellement la capacité que peuvent avoir les espèces exotiques à les envahir ou les autochtones à y pulluler. Il est généralement admis que plus le système est perturbé et stressé, plus il est vulnérable à ce type d'invasion ou de dérèglement. [15, 35]

Les populations autochtones fragilisées par les changements climatiques peuvent décliner au profit d'organismes (autochtones ou allochtones) adaptés aux nouvelles conditions et ayant une dynamique suffisante pour s'y installer et occuper l'espace. Les conséquences écologiques s'avèrent très importantes : homogénéisation des communautés, perte de diversité, dysfonctionnements... [15, 35]

Par exemple, le ragondin (*Myocastor coypus*), déjà très présent en France depuis près d'un siècle, progresse continuellement vers le nord. La grenouille taureau (*Rana catesbeiana*) (Figure 14) et la tortue de Floride (*Trachemys scripta elegans*), auparavant cantonnées à

l'Aquitaine, se propagent au bassin Loire-Bretagne. L'écrevisse de Louisiane (*Procambarus clarkii*) est elle aussi en très forte progression sur tout le territoire métropolitain. Sur les rives de cours d'eau altérés de toute la métropole, la renouée du Japon (*Fallopia japonica*) connaît un taux d'accroissement de 200 % sur ces dix dernières années et occupe de nouveaux secteurs (Rhin, Meuse, Allier, Loire, Garonne, Oise). [15].

Dans les eaux stagnantes, les jussies (*Ludwigia* sp.) sont en pleine extension sur la façade atlantique jusque vers la Belgique et vers l'est jusqu'en Alsace : la carte de la Figure 14 est déjà obsolète. Des espèces comme le myriophylle aquatique (*Myriophyllum aquaticum*) ou l'égéria (*Egeria densa*) ont conquis énormément de milieux aux eaux riches en matières organiques et eutrophisées. L'azolla fausse-fougère (*Azolla* sp.) qui est également une colonisatrice de milieux eutrophisés, connaît des pics d'abondance coïncidant avec les vagues de chaleur. (Dutartre, 2009)

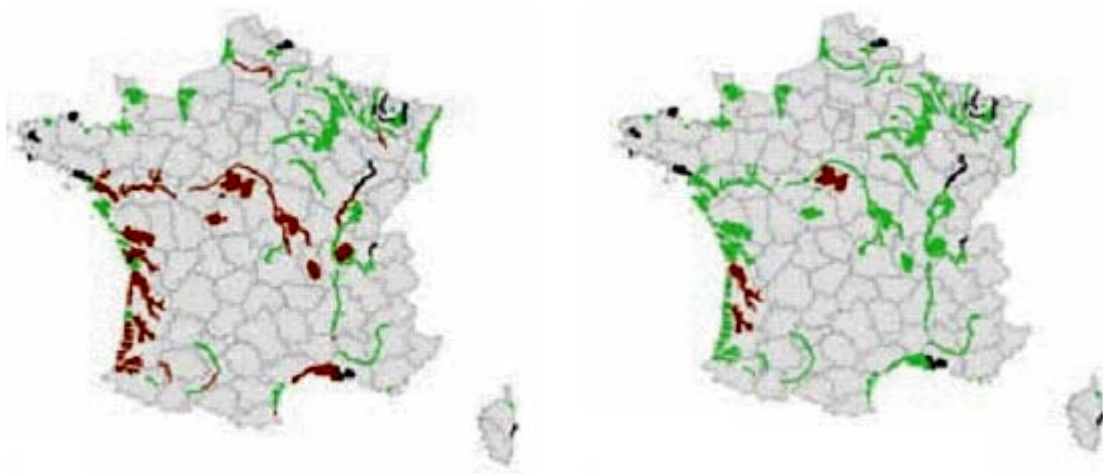


Figure 14 : Aire de répartition de la jussie (*Ludwigia* sp.) à gauche et de la grenouille taureau (*Rana catesbeiana*) à droite. En rouge foncé, les milieux où l'espèce est présente et en vert les milieux où elle en est absente (Source IFEN/ONCFS/MNHN/FNC, 2007). [15]

En conclusion le changement climatique, en réchauffant la température des eaux, en diminuant les périodes de gel, en augmentant les événements violents et en accroissant la salinité et la demande en eau (ainsi que le réseau de structures qui va avec : bassins et canaux) pourrait favoriser le transport, l'implantation et le développement de nombreuses espèces exotiques.

4.2.2 Des milieux déséquilibrés plus favorables aux espèces invasives :

En plus de favoriser plus ou moins directement la dissémination et l'implantation de nouvelles espèces exotique, les changements globaux auront également une influence sur la dynamique des populations d'espèces allochtones déjà présentes en métropole.

De plus, les méthodes de gestion actuellement utilisées pour contenir les espèces nuisibles risquent de perdre leur efficacité avec les changements climatiques.

4.2.2.1 Modification des dynamiques des espèces invasives déjà implantées

L'altération du régime thermique risque d'entraîner un changement dans le rapport de dominance entre les espèces natives et les introduites. L'augmentation de la consommation de proies natives par des prédateurs exotiques (ou d'une ressource quelconque dans le cas des végétaux) ou le plus grand impact d'un parasite allochtone sur les populations natives, sont des conséquences potentielles d'une augmentation de la température. On sait en effet qu'aux Etats-Unis, la truite mouchetée (*Salvelinus fontinalis* – Espèce native d'Amérique du nord) et la truite commune européenne (*Salmo trutta* – Espèce invasive aux Etats-Unis) sont d'égales compétitrices pour la nourriture à basse température. Mais la truite commune européenne surclasse son homologue américaine dans ce domaine quand la température de l'eau est plus élevée (à partir de 12°C). [18]

La prédation est la voie principale par laquelle une espèce aquatique animale exotique peut affecter une communauté. Effectivement, la plupart des animaux aquatiques étant homéothermes, leur consommation de nourriture augmente avec la température jusqu'à ce que cette dernière devienne un stress. Or, les espèces invasives sont a priori plus tolérantes à la température et seront donc de meilleurs prédateurs avec le changement climatique, limitant alors le stock de proies disponible pour les natives, qui risquent d'atteindre leurs limites physiologiques. [18]

Ainsi, dans le fleuve Colorado (sud-ouest des Etats-Unis), des espèces telles que le silure jaune (*Ameiurus natalis*), le black-bass à grande bouche (*Micropterus salmoides*), qui pose également des problèmes en Europe) ou la perche-soleil verte (*Lepomis cyanellus*) utilisée en aquariophilie en France, ont des seuils de tolérance aux fortes températures plus élevés que la plupart des espèces piscicoles indigènes, et seront donc avantagées dans le cadre du réchauffement climatique en cours. [1]

De même pour les végétaux, le manque d'eau, par exemple, constituera un stress important en été, notamment pour les espèces natives habituées aux conditions hydriques antérieures. Les espèces invasives, généralement plus tolérantes, seront alors à même de se multiplier et d'appauvrir d'autant plus la réserve utile des sols (en eau et en nutriments). [34]

Effectivement, les plantes tolérantes au stress (hydrique par exemple), comme le sont souvent les plantes invasives, ont par définition un système racinaire bien plus développé (trait fonctionnel caractéristique des « stress-tolérantes ») que les espèces indigènes. Dans ce contexte de stress, la compétition se fait donc au niveau racinaire et ce sont alors les plantes autochtones qui se trouvent défavorisées (qui sont généralement des compétitrices à la lumière avec un système aérien plus développé – Définition de Grime, 1974).

Le réchauffement climatique peut également stimuler la virulence de pathogènes exotiques en leur permettant de compléter leur cycle de développement plus rapidement, créant ainsi des populations plus nombreuses et plus denses. Par exemple, *Myxobolus cerebralis* est un pathogène des salmonidés qui détruit le cartilage des juvéniles. Originaire d'Europe, ce protozoaire crée des difficultés dans toute la moitié ouest de l'Amérique du Nord. Or, sa virulence augmente avec la température, son impact sur les populations de salmonidés pourrait donc être progressivement plus fort avec le réchauffement climatique. [1, 34]

4.2.2.2 Altération de l'efficacité des méthodes de gestion actuellement utilisées

Avec les changements climatiques, les gestionnaires risquent de devoir modifier certaines stratégies de gestion ou certains moyens de contrôles des populations invasives avérées, mais aussi en développer de nouveaux pour celles qui ne posaient pas de problèmes auparavant. [18]

Si les hivers deviennent trop doux, le froid et le gel ne limiteront plus certaines populations et les méthodes de gestion risquent de devoir devenir plus agressives et onéreuses. Par exemple dans le nord-est des Etats-Unis, les faibles températures, combinées au ramassage manuel permettent actuellement de contenir efficacement l'extension des populations de jacinthe d'eau (*Eichhornia crassipes*) et de laitue d'eau (*Pistia stratiotes*) [15]). Mais si les basses températures hivernales ne détruisent plus une partie des effectifs de ces deux nuisibles, le ramassage manuel risque de ne plus être suffisant et la mécanisation des interventions sera sans doute nécessaire. [15, 34]

La jacinthe d'eau est d'ailleurs une espèce invasive posant déjà d'importants problèmes de gestion au Portugal et en Espagne. Elle est fréquemment observée en métropole où elle forme des populations fugaces à partir d'individus échappés de bassins ornementaux. Ces petites populations disparaissent en hiver et, a priori, aucune population pérenne n'a encore été observée en milieu naturel sur le continent ; en revanche au moins une est présente dans un site du sud de la Corse à proximité de Figari. Cette situation pourrait évoluer au fur et à mesure que les températures s'élèveront.

Les herbicides sont un des moyens de contrôle de certaines populations invasives régulièrement utilisé aux Etats-Unis. Mais si les changements globaux dynamisent les espèces nuisibles ciblées par ce mode de gestion, il est possible que les quantités d'herbicides à utiliser soient toujours plus importantes, avec des effets négatifs croissants sur les organismes non-cibles. Notons par ailleurs que l'effet du changement climatique sur les modes d'action des herbicides n'est pas encore complètement évalué. [34]

L'élévation du niveau de la mer rendra également plus compliquée la gestion des zones littorales. Par exemple, en Camargue, les échanges entre la mer et l'intérieur des terres se font aux travers de pertuis. La manipulation des vannes détermine la salinité et les niveaux d'eau de la zone. Or, l'ouverture des écluses conduit à des situations contraires selon les niveaux d'eau et le sens du vent : par vent de nord et haut niveau des étangs, le delta se vide vers la mer de son eau et de son sel et à l'inverse, par vent de sud et haut niveau marin, les étangs se remplissent et leurs eaux deviennent plus salées [15]. La manipulation des vannes est en lien avec des usages et des intérêts variés : agricoles, halieutiques, conservation de la nature : avec l'élévation du niveau de la mer, il pourrait être plus difficile de drainer les milieux humides et d'évacuer le trop plein d'eau douce vers la mer. La salinité apparaît donc comme devant irrémédiablement augmenter et la gestion de ces sites comme devant développer de nouvelles stratégies. [15, 36]

Enfin, le changement climatique risque d'affecter l'efficacité des bio-contrôles (gestion d'une espèce donnée par l'introduction par exemple, dans le milieu, d'un de ces prédateurs ou pathogènes naturels), ces derniers étant basés sur des relations interspécifiques très ciblées entre l'espèce régulatrice et l'espèce à contrôler. Dans certains cas le changement pourrait être positif, mais dans d'autres situations les populations invasives pourront retrouver de leur nuisibilité. Ainsi dans le Colorado (Etats-Unis), une espèce exotique de scarabée, *Diorhabda elongata*, risque de perdre toute son efficacité dans la gestion du tamaris (*Tamarix ramosissima*) à cause des températures trop élevées. [34]

4.3. Synthèse

L'augmentation rapide des températures, limitant fortement les adaptations physiologiques, est donc le principal facteur amenant les populations animales et végétales à se déplacer vers le nord et en altitude. Effectivement, si la température s'élève, des espèces pourront étendre leurs aires de répartition vers le nord, là où auparavant leurs propagules ne pouvaient pas passer l'hiver. A l'inverse, vers le sud, les conditions seront de moins en moins favorables et les populations ne pourront plus se développer normalement et vont alors régresser et disparaître. On peut alors se demander si ces populations auront les capacités à se déplacer suffisamment vite et au travers des différents obstacles (barrage, digues...). Il est donc difficile de prédire quelles seront les aires de répartition effectives de ces populations à la fin du XXI^{ème}.

Les perturbations des milieux aquatiques seront également des sources de stress pour les communautés natives. Les nappes phréatiques plus basses en été, engendreront un stress hydrique plus marqué pour les végétaux. Seules les espèces les plus tolérantes au stress et aux perturbations seront capables de se maintenir dans ces écosystèmes aux conditions écologiques altérées. Ce sont donc les individus de fin de succession, c'est-à-dire, les plus compétitifs qui risquent de pâtir le plus de ces changements (car étant, par définition, les moins résistants au stress et aux perturbations – Grime, 1974).

Au final, les assemblages natifs risquent de perdre certaines communautés (faune et flore confondus) et une partie variable de leurs capacités de compétition, ouvrant ainsi le milieu aux colonisations mais aussi à la prolifération éventuelle d'espèces natives, qui adopteraient alors un comportement tout aussi nuisible que celui des espèces invasives. On peut aussi noter que les écosystèmes en question risquent très probablement de perdre une partie des services qu'ils pouvaient auparavant fournir (que cela soit pour l'Homme ou d'un point de vue plus écologique).

En Europe, les espèces invasives aquatiques qui nécessitent chaque année des budgets plus importants, du fait des conséquences négatives de leur prolifération ou des coûts pour la maîtrise de leur propagation, sont *Chrysochromulina polylepis* (algue unicellulaire toxique) en Norvège (8,2 millions d'euros), la jacinthe d'eau (*Eichhornia crassipes*) en Espagne (3,4 millions d'euros/an) et le ragondin (*Myocastor coypus*) en Italie (2,8 millions d'euros/an). Ces impacts économiques pourraient encore s'alourdir avec les changements globaux. [27]

De plus, le changement climatique favorisera globalement le transport des espèces exotiques en modifiant par exemple les mouvements de l'Homme sur le globe, ce qui pourrait apporter toujours plus de nouvelles espèces exotiques potentiellement invasives. A noter aussi que les futurs moyens de gestion de l'eau (bassins de réserve et réseaux de canaux) pourraient également faciliter la colonisation de nouveaux secteurs par des espèces allochtones.

Les espèces invasives étant par définition plutôt ubiquistes, on peut s'attendre à ce qu'elles réagissent, dans l'ensemble, de façon plus positive aux changements globaux que les natives. Les changements dans les rapports à la compétition seraient eux aussi en faveur des espèces invasives. Le fait que les milieux aient perdu leurs espèces les plus compétitives et disposent de niches écologiques vacantes, joue également en faveur de l'implantation d'espèces exotiques.

Un dernier élément pouvant aggraver l'impact des espèces invasives dans le cadre des changements globaux est la perte d'efficacité des méthodes de gestion actuelles. Ce dernier point devrait nécessiter une surveillance accrue. La recherche de nouvelles stratégies risque d'être inévitable au vu de la multiplication probable d'invasions à venir.

L'homogénéisation des communautés animales et végétales, à toutes les échelles géographiques envisageables, est également un risque dont il faudra avoir conscience. Surtout si aucune précaution concrète visant à limiter la dissémination et l'implantation des espèces exotiques n'est prise, dans un contexte d'altération croissante des écosystèmes.

5 Propositions de nouvelles méthodes de gestion

Pour répondre aux nouvelles perturbations dues aux changements globaux, les gestionnaires des milieux vont eux aussi devoir s'adapter. En effet, en complément de leurs actuelles problématiques de gestion (comme l'eutrophisation, les espèces invasives, la fragmentation des milieux ou la gestion de l'eau...), ils vont devoir faire face aux interactions que ces dernières auront avec les changements globaux (Figure 15).

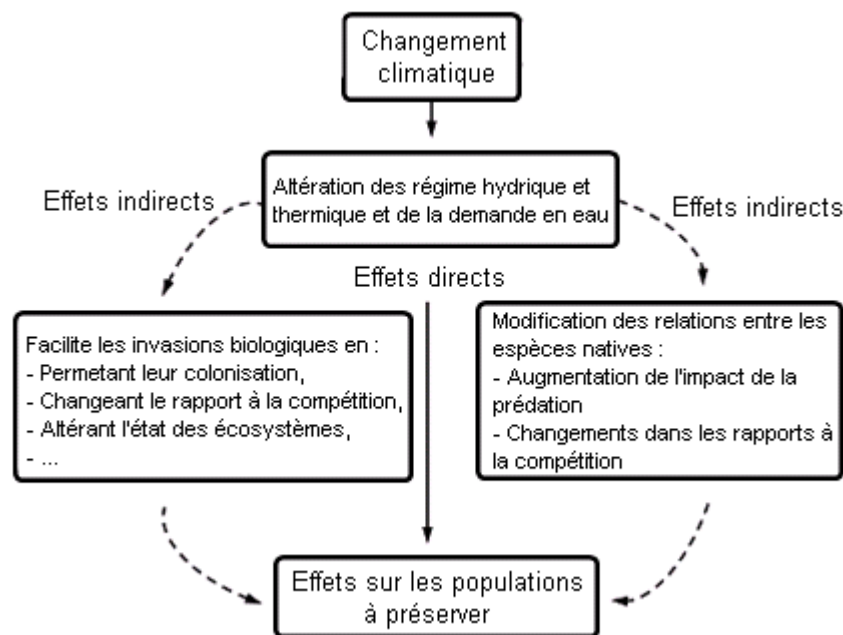


Figure 15 Schéma récapitulatif des mécanismes par lesquels les changements climatiques, avec les espèces invasives, seront à même d'affecter les espèces d'intérêt (Adapté de Rahel et al., 2008). [1]

Les gestionnaires devraient donc anticiper le déplacement des aires de répartition des espèces qu'ils souhaitent sauvegarder, ainsi que la dégradation croissante des milieux qui se traduirait par une augmentation des pressions des espèces invasives par exemple. Tout ceci va obliger à développer de nouveaux modes de pensée et de gestion pour maintenir optimaux les services (écologiques ou autres) que fournissent les écosystèmes aquatiques, mais avec des contraintes budgétaires qu'il est très difficile de prévoir...

Les incertitudes sur l'ampleur et la vitesse d'évolution de tous ces phénomènes sont des problématiques clés pour les futures stratégies de gestion qui devront prendre en compte les changements globaux dans leurs plans d'action.

Dans ce qui va suivre, il sera souvent question de "gestion adaptative". Il s'agit d'une démarche d'amélioration constante des pratiques de gestion, basée sur les leçons tirées des résultats antérieurs de l'application de ces pratiques. La gestion adaptative nécessite de solides protocoles de suivi, qui devront aboutir dans la mesure du possible à des ajustements éventuels des objectifs ainsi qu'à la sélection de la (ou des) meilleure(s) stratégie(s) de gestion. [37]

La gestion adaptative fait appel au sens de gestion des responsables publics ou privés mais aussi aux informations issues des activités de recherches. Car dans ce cadre, la gestion est également abordée de manière empirique, comme une expérimentation sur le terrain, visant à tester des hypothèses. [37]

La réévaluation régulière des méthodes de gestion au fur et à mesure de leur application semble être la meilleure approche pour répondre au mieux aux évolutions continues que connaîtront les écosystèmes au cours des décennies à venir. Cette approche vise aussi à anticiper au mieux les effets des perturbations et à les prévenir via des interventions moins lourdes qu'elles l'auraient été avec des stratégies de détection plus tardives. [38]

La mise en place de ce type de gestion nécessite un personnel qualifié, capable de mettre en œuvre et de sélectionner des stratégies pertinentes (droit à l'erreur limité) et ayant les capacités pour analyser les données issues des nombreux contrôles de suivi. [38]

Dans cette partie, il sera d'abord question des différentes approches pour tenter de diminuer l'impact du changement climatique sur les milieux aquatiques et leurs populations, animales et végétales puis dans un second temps, seront exposés quelques exemples de nouvelles stratégies, permettant d'appréhender l'ensemble des implications des invasions biologiques dans ce contexte de perturbations climatiques.

5.1 Suggestions pour diminuer l'impact du changement climatique sur les écosystèmes et les espèces natives

La stratégie « traditionnelle » qui consiste à isoler une espèce menacée, dans une réserve aux conditions environnementales favorables, n'est plus adéquate dans le cas où ces conditions vont évoluer. Les retombées du changement climatique vont nécessiter de nouvelles approches, pour la conception des futures méthodes de gestions adaptatives. [1]

Par exemple, les plans de gestion actuels des eaux ne sont pas assez robustes pour résister aux changements du régime hydrique que risquent d'entraîner les changements climatiques (crues et étiage plus marqués). [12]

Globalement, on retrouve dans la littérature trois grands types d'approches. La première vise à optimiser les chances qu'a un écosystème à se maintenir tel quel face aux perturbations à venir. La deuxième compte sur l'amélioration de la résilience du milieu et l'atténuation de l'impact des changements. Enfin la troisième vise à sauvegarder les espèces présentant des intérêts écologiques importants en facilitant leurs déplacements vers de nouveaux espaces plus favorables.

5.1.1 Stratégies cherchant à optimiser la résistance des milieux vis-à-vis des changements globaux

Pour maintenir stable la composition actuelle des communautés natives sur un territoire donné, une gestion intensive des écosystèmes serait théoriquement nécessaire. Mais la réponse logique des espèces face au réchauffement climatique étant la remontée vers le nord, l'idée classique de la mise en place de sanctuaires, immuables et préservés des perturbations extérieures, semble être un concept difficilement applicable dans ce contexte. [39]

En effet, pour satisfaire cet objectif, toutes les espèces n'appartenant pas aux communautés « historiques » seraient à bannir, bien qu'étant issues de la remontée naturelle des aires de répartition (à l'inverse des espèces invasives, introduites plus ou moins directement par

l'Homme). Pour maintenir la composition spécifique dans un milieu où la nappe phréatique serait en baisse, par exemple, il faudrait tenter d'éliminer toutes les espèces mieux adaptées aux milieux secs que les natives, pour ne pas risquer qu'elles finissent par dominer l'écosystème à préserver. L'IUCN encourage d'ailleurs le développement des pratiques d'éradication pour gérer les invasions biologiques. [39]

Par exemple, depuis 2007, des campagnes d'éradication des principaux animaux invasifs (chats, chiens, rats...), sont en cours dans les îles Galápagos. Pour ce système insulaire, que l'on peut considérer comme clos l'éradication des "nuisibles" est apparue comme la meilleure solution pour préserver les communautés endémiques de l'archipel. Le coût 2008 des interventions est de 3,19 millions de dollars [27]

Les impacts en matière de débits des cours d'eau des crues et des sécheresses plus importantes pourraient eux aussi être théoriquement atténués grâce à des constructions de bassins de stockage et de réseaux de canaux. Mais encore une fois, la recherche du maintien des conditions antérieures aurait a priori un coût très élevé et devrait aussi compter sur l'augmentation de la demande estivale en eau. Dans un contexte où l'irrigation risquerait d'être de plus en plus intensive, allouer les réserves en eau pour maintenir un écosystème en l'état, risque d'être difficilement défendable, notamment d'un point de vue économique. Les choix de gestion des territoires et des usages qui y seraient maintenus ou développés sont donc d'une importance primordiale. [12]

En règle générale, les espèces avec des capacités de réponse rapide au changement climatique pourraient être perçues comme pouvant poser des problèmes de gestion. La surveillance accrue des maladies, des parasites et des espèces exotiques déjà présentes sera nécessaire, avec une augmentation des efforts de régulation ou d'extermination. [39]

Par exemple, l'écureuil de Corée (*Tamias sibiricus*) dont les populations introduites dans des forêts françaises captent des tiques avec une fréquence considérable, apparaissant ainsi comme un vecteur potentiellement non négligeable de la maladie de Lyme, situation qui a incité le Conseil régional d'Île-de-France à financer une étude sur ce problème sanitaire émergent (ONCFS, 2008).

Une gestion visant à limiter les stress dans les écosystèmes aquatiques, comme la sécheresse par exemple, peut aussi être nécessaire pour prolonger la durée de vie des communautés existantes. Par exemple, un projet de pompage (pour l'irrigation entre autres) pourrait être adapté de manière à maintenir la nappe phréatique à un niveau suffisamment élevé en été. Ce qui permettrait ainsi de prévenir le dépérissement des populations natives et de préserver leur compétitivité face à d'autres espèces plus tolérantes au stress hydrique. Les communautés végétales, bien alimentées en eau, seraient plus à même de résister aux perturbations climatiques (températures et évapotranspiration importante). Cette bonne santé préservée pourrait également limiter l'impact des ravageurs et des pathogènes qui risqueraient d'être plus virulents avec l'augmentation des températures. De toute évidence, une diversité génétique importante au sein d'une population augmente les chances de cette population de survivre à un pathogène. [39]

Mais bien qu'ayant l'avantage, très théorique, de conserver la composition « historique » des communautés d'un territoire donné, ces stratégies sont difficilement envisageables au vu de l'ampleur estimée des perturbations attendues. Effectivement, maintenir artificiellement les conditions écologiques d'un écosystème donné, nécessiterait des interventions très poussées et onéreuses, qui amènerait en plus à isoler le milieu du continuum écologique dans lequel il se trouve. Cette option seule n'est donc pas viable sur le long terme et ne convient pas à la gestion d'écosystèmes aquatiques dans le cadre des changements globaux.

5.1.2 Stratégies cherchant à optimiser la résilience des milieux vis-à-vis des changements globaux

La deuxième stratégie envisageable est de maintenir ou de rétablir la résilience des écosystèmes. Si les milieux arrivent "d'eux-mêmes" à retrouver un fonctionnement normal, cela pourrait limiter les actions de gestion. Cette optique semble pertinente dans le cadre d'évolutions graduelles qu'entraîneraient les changements globaux. D'un point de vue pratique, la résilience est une propriété des milieux naturels très difficile à estimer, ce qui risque de rendre les suivis plus compliqués et les objectifs plus difficiles à définir dans le cadre de gestions adaptatives. [39, 40]

Un élément clef de cette approche est d'obtenir un maximum d'hétérogénéité au sein d'une réserve qui dans l'idéal serait de taille importante (plus un écosystème est étendu, plus il sera à même de se maintenir face à des perturbations - Théorie des Îles ; Mac Arthur & Wilson, 1967). L'isolation géographique et les unités de petites tailles sont autant d'éléments pouvant compliquer la gestion adaptative du milieu face aux changements climatiques. Dans un contexte de morcèlement des paysages, la résilience devient encore plus importante pour le maintien des communautés. [40, 41]

La pérennité de l'écosystème passerait théoriquement par cette hétérogénéité qui générerait des zones de refuges (ayant des microclimats favorables) vis-à-vis des stress découlant des changements globaux. Cette hétérogénéité s'appuierait aussi sur une biodiversité optimale. Mais dans des régions aux milieux fortement anthropisés, beaucoup de réserves, sans possibilité d'extension, ne pourront pas avoir l'hétérogénéité écologique adéquate qui aurait permis la constitution de refuges climatiques (telles des zones topographiques encaissées ou exposées au nord), à même d'abriter les populations animales et végétales. [39]

Multiplier les milieux protégés (en nombre) et leur variété (en diversité écologique) ainsi que leur connectivité (cf. Figure 16), serait, dans l'idéal, des mesures à suivre pour contribuer à améliorer la résilience de ces écosystèmes. En France, ces démarches sont encouragées depuis le Grenelle de l'environnement en 2008. [26, 40]

Effectivement, les mesures de "trame verte" et de "trame bleue" (chantier n°11 du comité opérationnel du Grenelle de l'environnement) visent à maintenir autant que faire se peut les continuités écologiques. Ces trames sont présentées comme un outil d'aménagement du territoire et ont pour objectif de constituer de grands ensembles naturels reliés par des corridors pouvant aussi servir d'espaces tampons. La « trame bleue » est formée de cours d'eau, de masses d'eau et des bandes végétalisées associées le long de ces milieux aquatiques. Elle pourrait permettre de créer une continuité territoriale, ce qui semble constituer une priorité absolue. La France s'est donné deux ans pour, dans un premier temps, cartographier les continuités et discontinuités du territoire, sachant que la finalisation du projet est prévue pour 2015. [26, 40]

D'un point de vue plus pratique, la mise en place de ces trames passerait déjà par l'acquisition de grandes surfaces de zones humides pour les préserver de l'artificialisation (20 000 ha pourraient ainsi être acquis). Les objectifs sont aussi de mettre en place des bandes enherbées et des zones tampons végétalisées d'au moins 5 m de large, le long des cours et des plans d'eau inscrits dans les documents d'urbanisme. La reconnexion des écosystèmes passerait par l'élimination des obstacles à la migration et aux déplacements des populations, notamment au niveau des cours d'eau. Mais également par l'assignation aux PLU (Plan Local d'Urbanisme) d'objectifs chiffrés de lutte contre la régression des surfaces agricoles et naturelles. Cette reconnexion des écosystèmes devra prendre en compte les dispersions alors facilitées d'espèces exotiques, invasives ou non, dans les modalités de gestion de ces trames écologiques. [26]

En plus de l'extension et de la reconnexion des habitats, les stratégies visant à préserver la résilience des écosystèmes peuvent inclure la manipulation des habitats afin de favoriser les espèces indigènes, vis-à-vis des exotiques notamment (Figure 16). [1]

Par exemple, l'augmentation de la température de l'eau pourrait être atténuée en plantant dans la ripisylve des essences adaptées à ces biotopes qui seraient capables de mieux ombrager le milieu : avec des eaux un peu plus froides, les espèces indigènes seraient plus à même de se maintenir. Cette technique peut être appliquée dans le cadre d'une restauration de l'habitat, comme cela a été le cas dans l'Utah (Etats-Unis) où les invasions de gambusies (*Gambusia affinis*) menaçaient les populations endémiques de *Lotichthys phlegethontis*. La remise en place de la ripisylve (par des essences d'arbres indigènes) a généré suffisamment d'ombre pour abaisser la température jusqu'au seuil où les gambusies n'étaient plus assez compétitives par rapport aux poissons indigènes. Mais cette technique est également possible en implantant de nouvelles essences lorsqu'aucune essence native ne peut remplir ce rôle, mais avec tout les risques que cela comporte (aider à la mise en place d'une nouvelle espèce invasive). [1]

Autre exemple, mais au niveau de la ripisylve, pour les écosystèmes où la durée de maintien de la couche neigeuse est un facteur important pour la survie des espèces natives. L'aménagement de la végétation pourra générer des zones avec des microclimats (ombragées ou coupées du vent par exemple) à même de conserver la couche de neige plus longtemps. [1];

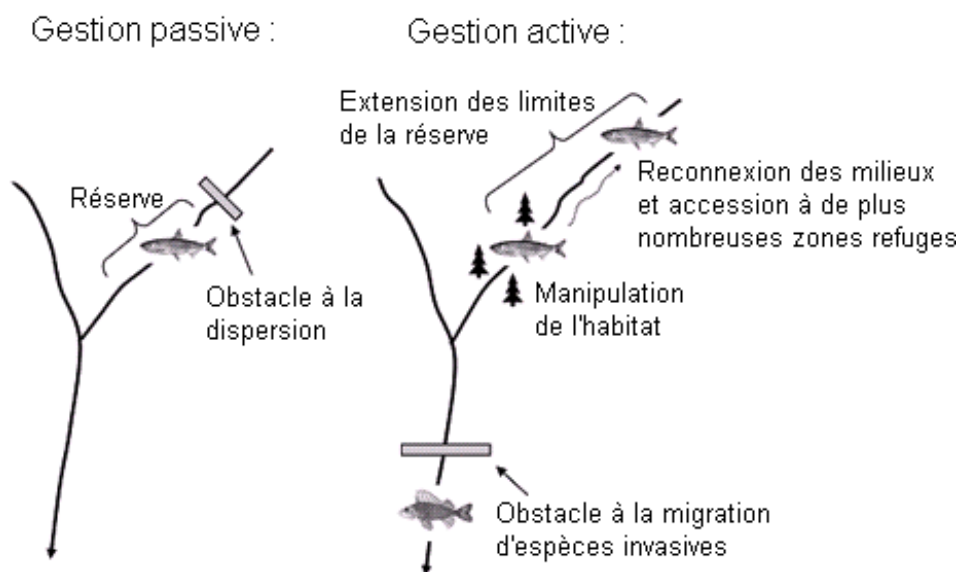


Figure 16 : Opposition entre une gestion "classique" et une gestion visant à augmenter la résilience d'un milieu pour une population piscicole donnée (Adapté de Rahel et al., 2008). [1]

Les stratégies d'amélioration de la résilience des communautés devraient se penser et s'organiser à plusieurs niveaux interconnectés, à large échelle (nationale ou européenne), au niveau des planifications régionales et à l'échelon des actions de gestion d'une zone donnée. Il est important que les actions menées au niveau local soient inscrites dans un plan plus général. Par exemple aux Etats-Unis, où le réseau qui gère les zones écologiques d'intérêt (National Wildlife Refuge System - NWRs), regroupe 60 millions d'hectares répartis sur 550 réserves naturelles. [40]

En Europe, depuis 1992, le réseau Natura 2000 a aussi la volonté de fixer des orientations communes aux responsables de la conservation de la biodiversité et de la valorisation des territoires. Les territoires regroupés dans le réseau Natura 2000 le sont selon deux catégories :

- Zone de Protection Spécial (ZPS), qui sont les territoires jugés particulièrement importants pour la conservation des oiseaux, que ce soit pour leur reproduction, leur alimentation ou leur migration.

- Zones Spéciales de Conservation (ZSC), qui sont les espaces naturels ayant un intérêt communautaire de par leur rareté, leur rôle écologique et/ou les espèces qu'ils abritent. [2]

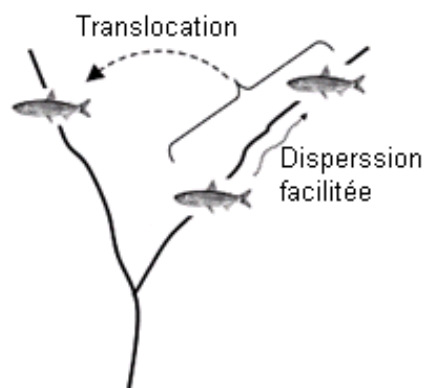
Cette approche de l'augmentation de la résilience des écosystèmes est une option déjà prise en compte par les gestionnaires mais elle pourrait être amenée à se développer encore plus avec les changements climatiques. En laissant une plus grande liberté à la dynamique des populations, elle apparaît a priori comme moins onéreuse et intrusive que les stratégies visant à conserver "strictement" un assemblage précis, sur un territoire donné. Même si le maintien de la résilience passe par des réserves plus étendues et interconnectées, les politiques publiques semblent être favorables à cette option (exemple du Grenelle de l'Environnement, 2008).

5.1.3 Stratégies de facilitations

Actuellement, les plans de gestion sont principalement centrés sur des stratégies visant à maximiser la résistance et la résilience des milieux naturels. Avec les changements globaux, les décideurs pourraient être amenés à délaisser la première option et se pencher vers une troisième option qui utiliserait le déplacement de certaines populations comme mode d'atténuation des impacts. Cette gestion viserait à aider les espèces qui n'auraient pas la capacité à se déplacer suffisamment vite et à faciliter le franchissement des grands obstacles qui pourraient entraver leurs mouvements. Contrairement aux deux autres approches, cette stratégie de facilitation ne vise pas à maintenir l'intégrité d'une zone écologique donnée. Elle donne la priorité à la sauvegarde des espèces indigènes d'une région et des services écologiques rendus par ces écosystèmes, sur une échelle plus large en favorisant leur dispersion et leur maintien en parallèle avec les évolutions des conditions climatiques (découplage entre la protection d'une zone écologique donnée et des communautés qui y vivent). [39]

La migration assistée (ou translocation - cf. Figure 17) consiste à déplacer de façon artificielle des groupes d'individus d'un habitat devenu défavorable (conditions écologiques changeantes, milieux sous pressions et isolés...) vers des territoires devenus écologiquement plus propices avec les changements climatiques et qu'ils n'auraient pu atteindre naturellement (et dans un laps de temps suffisamment court).

Figure 17 : Illustrations d'actions de facilitation pour une population d'intérêt écologique.
(Adapté de Rahel *et al.*, 2008) [1]



Cette méthode pose néanmoins diverses questions :

- tout d'abord sur son efficacité, les individus ainsi déplacés seront-ils capables d'établir une population viable (nombre d'individus et diversité génétique sont à prendre en compte) ?
- deuxièmement, cette technique ne va-t-elle pas favoriser l'émergence de nouvelles espèces invasives ou l'apport de nouveaux pathogènes, nuisibles au milieu hôte ? Par exemple, la translocation en altitude de la truite commune européenne (*Salmo trutta*) serait probablement une lourde menace pour les communautés locales d'amphibiens qui comportent de nombreuses espèces d'intérêt écologique à préserver. [1]

Une réponse possible à ces interrogations serait d'utiliser la translocation pour remplacer un taxon perdu, en utilisant une espèce ayant des propriétés semblables mais mieux adaptées aux nouvelles conditions de ce milieu. Pour reprendre un exemple précédent, il serait envisageable de réimplanter dans une ripisylve plus au nord, des végétaux menacés dans leur milieu d'origine et dans le but qu'ils produisent un ombrage que n'assurerait plus les communautés indigènes.

En plus de sauvegarder l'espèce en question, cette translocation permettrait de fournir un service que le milieu hôte aurait perdu (potentiellement à cause des changements globaux). Mais à noter, en ce qui concerne la législation française, que le Code Rural interdit l'introduction d'espèces animales non représentées en France, même si des autorisations à des fins scientifiques ou pour des élevages en milieu clos peuvent être accordées. Dans le cas des végétaux, la libre circulation est autorisée au sein de l'Union Européenne et est soumise à contrôle phytosanitaire pour ceux en provenance de pays tiers. [27, 39]

L'inclusion dans un nouveau milieu d'espèces provenant du sud est une stratégie de facilitation jugée peu risquée, voire nécessaire pour les espèces situées aux limites de leurs aires de répartition que l'on souhaite conserver. Effectivement, il y a peu de risque que des espèces natives d'un continent, puissent envahir un écosystème appartenant à ce même continent. Les espèces invasives en France sont très souvent originaires d'Asie ou d'Amérique du Sud, mais jamais d'un autre pays européens (Programme DAISIE, 2009). [39]

Comme pour les stratégies visant à préserver la résilience, la mise en place de corridors est un élément clef des stratégies de facilitation. Mais l'intérêt est ici de permettre plutôt la remontée naturelle des populations vers le nord (ou en altitude), en réponse au réchauffement climatique. Et non plus « seulement » pour garder les populations connectées les unes aux autres et favoriser leur survie. [1, 42]

A noter que la fonctionnalité même de corridors écologiques que jouent actuellement certains habitats risque d'être modifiée avec les changements globaux, ce qui pourrait menacer la survie de nombreuses populations. Par exemple, certaines espèces de poissons se déplacent en plusieurs étapes, durant leur cycle de vie, entre divers habitats. Comme le brochet (*Esox lucius*) qui recherche pour frayer des zones avec peu d'eau et une végétation abondante (comme les bras morts de rivière). Ces espèces seraient alors incapables de terminer leurs cycles de développement, si les corridors entre ces différents habitats clefs étaient coupés par des périodes d'étiage ou la construction de structures servant à la gestion de l'eau (bassins de stockage par exemple). [1, 42]

Le maintien ou la création de corridors ne peuvent pas être une option dans des régions arides, où les précipitations réduites associées au changement climatique peuvent réduire encore la connectivité fragile qui existe actuellement entre les habitats aquatiques. Dans ces situations, les espèces peuvent être plus efficacement protégées par des translocations vers des milieux plus favorables. [1, 42]

Au final, les gestions adaptatives visant à faciliter les déplacements naturels (ou à l'inverse, à complètement les artificialiser via les translocations) sont assez complémentaires avec celles d'optimisation de la résilience. Elles se placent également toutes les deux à une plus grande échelle que celle de la simple réserve. Ce qui nécessite d'ailleurs une harmonisation des objectifs de conservation, également à plus grande échelle (niveau national, voire européen, à défaut d'être planétaire).

Des translocations judicieuses peuvent par exemple renforcer la résilience de milieux "receveurs" qui sont naturellement trop éloignés d'écosystèmes « donneurs ».

Dans les deux approches, la connectivité entre les écosystèmes est préconisée, mais selon deux finalités : cela peut être pour faciliter le maintien des communautés natives ou à l'inverse pour permettre leurs déplacements en lien avec la remontée des isoclines de températures.

La méthode de gestion à préconiser doit tenir compte du seuil de tolérance de la communauté ou de l'espèce à préserver, ainsi que l'impact attendu des changements globaux sur l'écosystème en question (nécessité d'un travail de recherche important pour appréhender aux mieux ces questions d'écologie). Les stratégies de facilitation sont par exemple plus enclines à sauvegarder des espèces spécialistes et/ou vivant dans des milieux risquant de très fortes perturbations.

Une gestion adaptative basée à la fois sur la résilience et les facilitations des mouvements des populations semble donc être la meilleure réponse possible face aux changements climatiques. Les stratégies basées sur le maintien, en l'état, d'un écosystème en un endroit donné ne sont plus envisageables, tant l'ampleur des perturbations climatiques risque d'être importante. De tels objectifs nécessiteraient une gestion bien trop agressive et onéreuse qui serait donc impossible à maintenir durablement.

Enfin, il est important de rappeler que les choix et les orientations à donner à chaque unes de ces méthodes, dites de gestion adaptative, doivent être guidés par des protocoles de suivi précis et répétés, capables de détecter les nouvelles menaces à venir. Car ceci est l'élément principal permettant l'adaptation rapide et l'efficacité durable de ces méthodes de gestion face aux progressifs et incertains changements globaux.

5.2 Suggestions pour diminuer l'impact des invasions biologiques sur les écosystèmes perturbés par le changement climatique

En plus de la difficulté à gérer les espèces natives d'intérêt écologique, face aux changements globaux, les gestionnaires vont devoir également réfléchir aux conséquences qu'auront ces perturbations sur les invasions biologiques. Comme cela déjà été indiqué, de par leurs capacités de dissémination et de colonisation d'habitats très divers, les espèces invasives sont typiquement des espèces qui vont pouvoir profiter de ces changements. Le risque de les voir coloniser de nouveaux milieux et de présenter alors des dynamiques plus rapides sont élevés. De nouvelles stratégies de gestion sont donc à élaborer, celles menées actuellement risquant de perdre de leur efficacité. [1]

Or, cette thématique n'est pas encore très représentée dans les plans de gestion actuels (seuls 8 Etats des Etats-Unis mentionnent les interactions entre les changements globaux et les invasions biologiques dans leur objectifs de gestion), alors qu'une anticipation des ces problèmes à venir pourrait réduire les coûts et l'agressivité des interventions à mener. [38]

Malgré tout, en Europe, de 2005 à 2008, le projet DAISIE a évalué le nombre d'espèces exotiques dans 15 pays de l'Union, proche de 11 000 au total, flore et faune confondue. Ce qui, par exemple, a débouché sur des inventaires de plus de 6600 plantes terrestres, moins de 1000 plantes aquatiques ou près de 2500 espèces d'invertébrés terrestres. Ce travail a

alors évalué que le taux d'implantation (de 20 par an entre 2000 et 2007) d'espèces exotiques avait doublé par rapport à 1950 et 1975. Cette étude a également recommandé le maintien de la biodiversité pour résister aux implantations d'espèces exotiques et a constaté les effets aggravants des changements globaux. [31]

Ces changements globaux risquent d'aggraver les impacts d'espèces invasives déjà implantées mais ne posant actuellement que des problèmes mineurs. Ces changements vont probablement nécessiter des interventions urgentes et radicales avant que les dommages soient trop importants pour le maintien de l'écosystème. Par exemple, le ragondin (*Myocastor coypus*) déstabilise les berges de part ses terriers, problème sérieux mais ne nécessitant pas de gestion lourde ou immédiate. Or, avec la montée du niveau de la mer, l'érosion du trait de côtes sera plus prononcée. Les submersions des milieux aquatiques littoraux risquent d'être plus violentes et fréquentes. Dans ce contexte, l'instabilité des berges pourrait devenir un enjeu majeur pour le maintien de ces écosystèmes. Des opérations urgentes de limitations des populations de ragondins risquent alors d'être nécessaires. [42]

Une stratégie communément admise comme limitant l'intrusion d'espèces invasives, est de maintenir les conditions écologiques initiales du milieu. Ainsi à Putah Creek (en Californie), le surplus d'eau durant l'hiver et le printemps est capté dans des réservoirs qui relâchent une partie de leurs stocks en été, pour maintenir un débit suffisant et correspondant aux conditions nécessaires pour que les espèces natives de poissons soient compétitives par rapport aux invasives (à noter que des retenues de soutien d'étiage existent dans de nombreux bassins versants français, même si les objectifs sont moins clairement écologiques et sont plus fréquemment liés au développement de l'irrigation agricole). Mais on peut se demander si l'aggravation des périodes de sécheresse et l'augmentation des tensions autour de l'eau, au cours des décennies futures ne vont pas amener à changer l'utilisation de ces stocks vers des activités à plus forts enjeux économiques (irrigation, eau douce de consommation...). Cette gestion, bien qu'efficace, ne pourra peut être pas être menée indéfiniment. Cette question est à réfléchir au niveau du bassin versant associé et par rapport aux « tensions » autour de l'eau qui y règnent. [1]

Une gestion adaptative, basée sur la prévention, est également recommandée. Elle s'appuie sur des méthodes de suivi régulières, pour une détection la plus précoce possible, pour déboucher sur des interventions rapides et les moins lourdes possibles. Le tout devra s'appuyer sur des connaissances théoriques approfondies afin d'établir les indicateurs et les gestions les plus adaptées. [38]

Malgré tout, il est reconnu qu'un écosystème en « bonne santé » sera plus à même de résister aux invasions biologiques. La bonne conduite des stratégies visant à augmenter la résilience des milieux aquatiques (abordées dans la partie précédente) font donc déjà des parties des plans de gestion qui devraient contribuer à lutter indirectement contre les espèces invasives. [38]

Dans d'autres situations; ces méthodes de gestion peuvent aussi favoriser la propagation de ces mêmes espèces invasives. La multiplication des corridors peut aussi s'avérer être une facilitation des passages des espèces exotiques pour aller coloniser de nouveaux milieux. De même l'hétérogénéité et par la même, la multiplication des zones refuges, augmente également les risques qu'une espèce invasive trouve un milieu favorable à son implantation. Enfin, les translocations d'espèces d'intérêt patrimonial vers de nouveaux écosystèmes, risquent d'engendrer des invasions dans ces milieux hôtes, que ça soit l'espèce déplacée elle-même ou les éventuels pathogènes qu'elle pourrait véhiculer. [1, 42]

La mise en place de barrières empêchant les déplacements des espèces invasives vers les milieux d'intérêts est une solution apparemment viable pour répondre aux extensions de certaines aires de répartition d'espèces invasives. La mise de ce type d'obstacle est particulièrement adaptée aux milieux aquatiques. Par exemple, dans les Rocky Mountains

(Etats-Unis), la truite fardée (*Oncorhynchus clarki*) est en train de remonter en altitude et de coloniser des milieux qui étaient auparavant trop froids pour son implantation. Ce qui pourrait être radicalement empêché par la mise en place de barrières artificielles, mais avec le risque est de perturber les mouvements des populations natives par la même occasion. [1]

Des barrières, empêchant le passage des espèces invasives mais permettant celui des indigènes, seraient idéales. Des travaux de recherches sont ainsi menés dans la région des grands lacs américains, pour développer des barrages de faibles hauteurs qui préviendraient la remontée des lamproies de mer (*Petromyzon marinus*) mais pas celui des poissons natifs aux capacités de saut plus élevées.

En Europe, des chutes d'eau de 35 cm de haut peuvent permettre d'empêcher la remontée des vairons d'Europe (*Phoxinus phoxinus*) mais permet celle des truites communes (*Salmo trutta*) natives. Ici encore, la discrimination se fait par rapport aux capacités de ces poissons à sauter les obstacles. Mais on peut imaginer que la mise en place de telles barrières sélectives ne sera pas possibles dans de nombreux cas, notamment pour limiter la dispersion d'un envahisseur végétal. [1]

La possibilité d'exploiter les espèces invasives comme une ressource abondante est également étudiée, voire même d'utiliser les services qu'elles pourraient rendre à certains écosystèmes perturbés (« positiver les espèces invasives »). [32]

Par exemple, aux Etats-Unis, la plante immergée *Hydrilla verticillata* génère des tapis denses causant des nuisances importantes, dont des difficultés de navigation. La principale crainte est néanmoins que cette domination entraîne la disparition de nombreuses espèces natives. [32]. La gestion d'hydrilla est souvent problématique. Les techniques de ramassage ne marchent que très rarement, la plante étant capable de repousser à partir d'un simple fragment. Les méthodes de bio-contrôle via la carpe herbivore (*Ctenopharyngodon idella*) donnent de meilleurs résultats, même si elles nécessitent donc l'introduction d'une autre espèce allochtone. Communément, c'est l'utilisation d'herbicides qui est préférée, mais avec d'importantes répercussions sur les autres végétaux de l'écosystème. Au final, le coût de cette gestion est souvent du même ordre, voire plus élevé, que les dommages attribués à la plante elle-même... [32]

Néanmoins, au niveau de la rivière Potomac et de la baie de Chesapeake (sur la face atlantique des Etats-Unis), hydrilla semble avoir eut un impact positif sur la qualité des eaux, en réduisant la turbidité et la charge nutritive ; qualité qui profite aux espèces natives. Les communautés natives semblent répondre positivement et se maintiennent bien dans le milieu. On peut donc imaginer que cette espèce, très tolérante vis-à-vis des conditions environnementales, puisse être utilisée dans des plans de gestion visant à rétablir la bonne qualité des eaux, favorisant ainsi le retour des communautés natives. Enfin, Rybicki et Landwehr (2007) ont constaté une plus grande biodiversité (richesse spécifique) dans les milieux où hydrilla était présente. [32]

Malgré tout, ces expérimentations sont à considérer avec précaution, le risque d'une domination du milieu par hydrilla serait très difficile à gérer et surtout fatale aux populations natives. En plus de ces risques dus au fait qu'hydrilla reste une espèce invasive très compétitive, ce type de gestion, utilisant une plante invasive, risque de servir de tremplin à ces espèces pour aller coloniser d'autres milieux. De plus, l'implantation répétée de ces plantes à des fins de gestion risque aussi d'engendrer l'homogénéisation des milieux, ce qui entrainerait peut être un gain temporaire de biodiversité au niveau local, mais une perte globale à une échelle géographique plus vaste. Enfin, ces expérimentations ont été menées dans les limites nord de l'aire de répartition d'hydrilla. On peut se demander alors comment évoluera la situation dans cette zone, quand l'augmentation des températures rapprocheront les conditions climatiques de ces régions de l'optimum écologique d'hydrilla [32, 43].

Une autre voie de recherche qui considère également les plantes invasives comme une ressource à exploiter (limitant également leur abondance), pourrait être de les utiliser comme biocarburant. En plus d'en tirer une valeur économique, qui pourrait rendre rentable leur exploitation, cette utilisation permettrait de réduire les émissions de GES (dans cette voie, les espèces invasives pourraient être aussi utilisées comme des puits de carbone). Effectivement, les plantes invasives ont souvent les caractéristiques nécessaires : plante en C4, résistante, pérenne, avec une longue durée de vie des feuilles, une croissance rapide et une bonne efficacité d'utilisation de l'eau. Deux envahisseurs des ripisylves sont actuellement étudiés aux Etats-Unis dans cette optique : la canne de Provence (*Arundo donax*) et la baldingère faux-roseau (*Phalaris arundinacea*) [42]

Le risque de cette approche est de faciliter la dispersion et la colonisation de ces plantes. De plus cette voie, qui est censé être un moyen de réduction des coûts de gestion, risque de rendre un territoire dépendant de l'exploitation de ces espèces invasive (emplois et économies liés à la filière). La finalité ne serait plus alors leur éradication, mais le maintien de ces populations invasives dans le temps. [42]

En conclusion, la prévention basée sur des moyens de détection, les plus précoces possibles, et préconisée dans le cadre de gestions de type adaptatives, semble être la meilleure solution pour gérer les futures espèces invasives. L'interdiction de l'importation et de la vente des espèces dites « à risque » (recommandée par les experts du programme DAISIE ; pour l'instant seules les jussies, la caulerpe et quelques animaux sont interdits à la vente et au transport en France) et la sensibilisation à ces problématiques auprès des particuliers sont également des démarches à adopter pour ne pas accroître les foyers et la fréquence d'invasions potentielles. L'aspect législatif doit également rentrer en ligne de compte et un dialogue avec les décideurs politiques serait à mener, pour des actions plus marquées et surtout à plus large échelle pour être efficaces ; ainsi que pour les questions de financements. De surcroit, l'approche préconisée, dans un premier temps, est de conserver les milieux en « bonne santé » (en bon état écologique au sens de la DCE, c'est-à-dire sans perturbation fonctionnelle significative) car ce sont dans ces conditions qu'ils résisteront le mieux aux invasions biologiques;

5.3 Synthèse

Les effets directs des changements globaux sur les espèces autochtones des milieux aquatiques métropolitains, et indirects via les invasions biologiques, vont obliger les décideurs à élaborer de nouvelles stratégies de gestion.

Dans ce cadre, la gestion va tendre à ne plus se concevoir seulement à l'échelle locale (vue comme une unité isolée), mais au niveau régional et national, voire européen. La connexion entre les habitats, permettant de former de grands ensembles hétérogènes, favorables à la résilience de ces milieux et donc propices aux maintiens des espèces, est nécessaire et déjà encouragé par les politiques publiques, comme par exemple en France avec les trames vertes et bleues, conséquences du Grenelle de l'environnement. Toutefois, ces créations de corridors risquent également de faciliter la dispersion d'espèces invasives, risques qui devront faire partie des éléments de base de création des futurs plans de gestion.

Mais contrairement aux visions "sanctuaristes" passées, il faudra nécessairement accepter dans l'avenir que certaines espèces quittent leurs aires de répartition historique et que les écosystèmes d'une zone donnée évoluent dans leur composition floristique et faunistique mais aussi dans leur fonctionnement pour ainsi accompagner les changements à venir.

De même les stratégies de gestion devront prendre en compte les évolutions permanentes des conditions environnementales au cours du XXI^{ème}, d'où la nécessité d'un suivi constant et de réponses adaptées et évolutives (gestion adaptative). A ce niveau, il sera donc

nécessaire de revoir régulièrement les références actuellement utilisées. A ce sujet, comment les gestionnaires vont-ils pouvoir tendre vers « le bon état écologique », que fixe la DCE (Directive Cadre sur l'Eau), dans un contexte où tous les écosystèmes tendent à évoluer vers de nouvelles conditions environnementales ?

Un travail plus important d'échanges entre les domaines de la recherche et de la gestion est à mener ; les gestionnaires ont besoin de mieux anticiper les perturbations à venir et, en conséquence, de mettre au point de nouvelles modalités de gestion avec l'aide du monde de la recherche.

Les prochains travaux à conduire seraient potentiellement :

- de mieux identifier les mécanismes clefs du climat qui affectent la faune et la flore,
- d'inventorier les espèces et les habitats les plus vulnérables aux changements globaux,
- de redéfinir les objectifs de conservation pour les prochaines décennies,
- d'identifier et d'évaluer l'accessibilité aux zones de refuges climatiques,
- d'orienter les plans de gestion vers des stratégies de facilitation et de maintien de la résilience,
- de développer des systèmes de suivi adéquats. [40]

6 Exemples d'évolution d'espèces invasives des zones humides avec le changement climatique

6.1 Le tamaris (*Tamarix* spp.)

Il s'agit d'un arbuste invasif des ripisylves de la moitié ouest des Etats-Unis. Il a été intentionnellement introduit au début du XIXème siècle en tant que plante ornementale. Il fait partie des espèces invasives considérées comme causant le plus de nuisances sur la planète. Son invasion aux Etats-Unis cause des difficultés importantes d'appauvrissement des ressources en eaux des sites colonisés où elle entraîne le déclin de différentes espèces natives. [44]

Son introduction ancienne a permis aux populations de tamaris de coloniser et de se maintenir dans tout les milieux favorables qu'il leur a été possible d'atteindre (Figure 18 a.). Il reste donc à déterminer quels pourraient être les mouvements futurs de ces populations en fonction des changements globaux. [44]

La distribution des populations de tamaris est, dans l'absolu, faiblement liée aux conditions climatiques et est située dans les ripisylves. Malgré tout, le patron de répartition des précipitations (contrairement à celui des températures) reste un assez bon indicateur pour déterminer les zones les plus favorables au tamaris. [44].

Les projections de la figure 18 sont des aires potentielles déterminées uniquement avec les données climatiques qui ne prennent pas en compte d'autres paramètres, comme la capacité à atteindre la zone en question ou la nature de l'écosystème concerné (qualité du sol, perturbations et stress associé à ce milieu, régime hydrique...), sachant de plus que le tamaris est une plante que l'on retrouve uniquement dans les ripisylves.

Au final, les changements climatiques n'ont que peu d'effet sur les zones potentiellement favorables au tamaris (Figure 18 b.). Effectivement les zones avec les risques maximum en 2100 sont celles qui sont déjà actuellement favorables à l'implantation du tamaris. Au contraire même, quelques zones, pour l'instant favorables, se voient attribuer un indice de risque de colonisation plutôt faible pour 2100, même si ces modèles ne prévoient pas non plus de régressions des populations déjà implantées. [44] Néanmoins, au niveau local, l'implantation du tamaris devrait progresser à cause des changements globaux, bien que

cette extension soit difficilement modélisable compte tenu du nombre de facteurs environnementaux à prendre en compte. [19]

Les peupliers (*Populus* spp.) et les saules (*Salix* spp.) sont les arbres pionniers natifs et dominants des ripisylves américaines. Le tamaris est également une plante pionnière au fort pouvoir de dissémination, présentant une forte production de graines sur de longues périodes mais avec de très mauvaises aptitudes à la compétition. En revanche, grâce à ses longues racines, le tamaris résiste mieux au stress hydrique que les essences natives. [19]. Un des moteurs-clefs de ces changements de dominance serait du la perturbation du régime hydrique, notamment avec des périodes d'étiages estivaux. Ces débits irréguliers entraîneraient une baisse du niveau de la nappe phréatique. Les peupliers et les saules natifs seraient alors désavantagés par rapport au tamaris et perdraient une partie de leurs aptitudes compétitives qui empêchaient jusqu'alors l'installation du tamaris dans ces milieux. Un débit intermittent entraînerait donc une nouvelle codominance entre les populations natives et invasives. [19]

De plus, la diminution marquée du niveau des eaux l'été, va découvrir des surfaces vierges sur lesquelles seul le tamaris pourra s'installer car étant le seul à disséminer encore ses graines à cette période. Même si par la suite les crues hivernales remodelent ces zones, les graines seront à même de germer au printemps sur ces substrats très riches et ainsi occuper un nouvel habitat qui était auparavant inaccessible. [19]

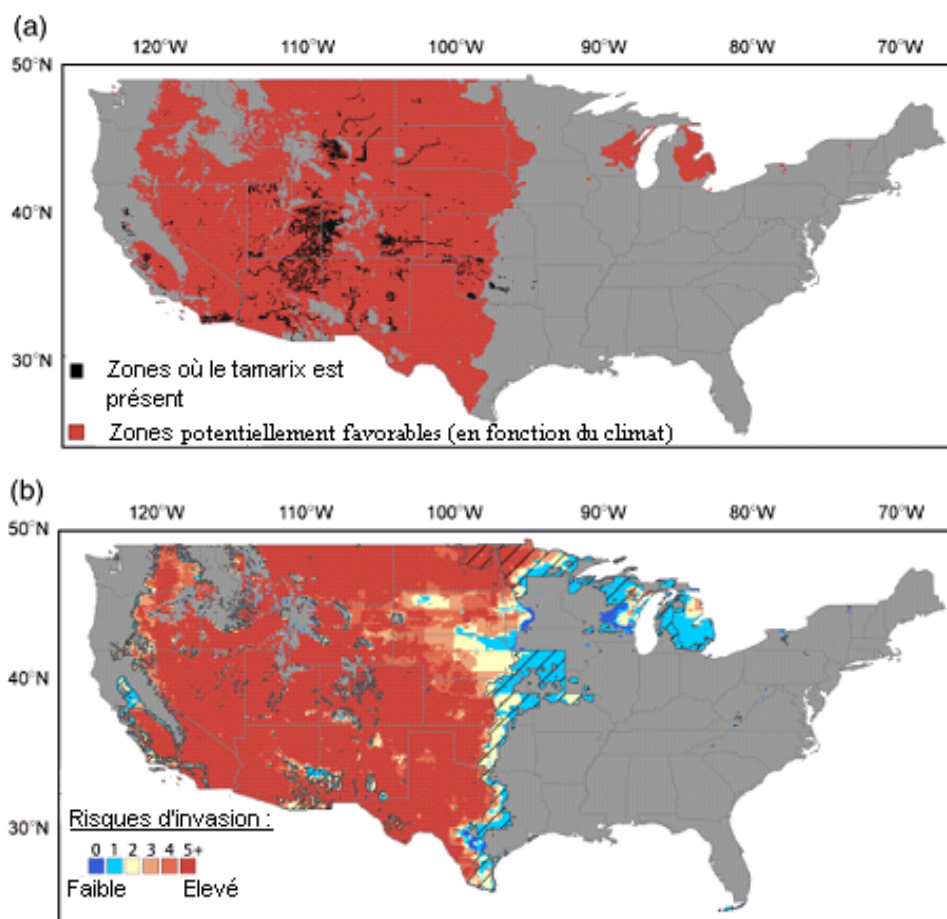


Figure 18 : Aire de répartition du tamaris (en noir) et zones qui lui sont potentiellement favorables (en rouge) actuellement (a). Evaluation des risques d'invasion avec un changement climatique de type A2 en 2100 (b). [11]

Le moyen de gestion le plus efficace serait alors de maintenir les débits tels qu'ils le sont naturellement. Mais cela présume que la demande en eau le permette. [19]

Ainsi, même si les changements climatiques ne favorisent pas directement l'expansion des zones favorables au tamaris, les changements globaux au niveau local (demande en eau augmentée par exemple) risquent de permettre l'extension de cette espèce dans des milieux où elle était absente depuis son introduction aux Etats-Unis et de limiter les possibilités techniques de gestion de cette espèce.

6.2 La crassule des étangs (*Crassula helmsii*)

Cette plante aquatique amphibie, originaire d'Australie et de Nouvelle-Zélande, a volontairement été introduite en Angleterre au début du XX^{ème} et commercialisée pour l'aquariophilie dès 1927. [46]

En Europe, les premières observations en milieux naturels datent de 1956. Elle a envahi depuis de nombreux milieux aquatiques stagnants (étangs, bras morts, fossés, marécages...) plus particulièrement dans la moitié nord de l'Europe. Cette plante, pouvant supporter des températures allant de -6 °C en hiver, à 30°C en été, est très abondante en Bretagne et au Royaume-Uni (plus de 1000 sites colonisés) où elle peut même maintenir une croissance végétative durant l'hiver. [46]

Elle forme d'épais tapis de végétation, pouvant entraîner une altération physico-chimique du milieu (interception de la lumière...) et une diminution notable de la biodiversité. La crassule des étangs peut aussi causer une réduction de l'écoulement de l'eau (pouvant aggraver l'impact des inondations) et diminuer la valeur récréative des plans d'eau concernés. Dans certains cas, elle peut même être à l'origine de phénomènes d'eutrophisation et d'anaérobiose. [46]

Dans le contexte du changement climatique, cette plante, très peu contraignante sur ses conditions de vie et ayant de très bonnes capacités de colonisation (notamment grâce à la reproduction végétative par stolons et fragmentation des tiges), risque de connaître une expansion importante. La figure 19 montre par exemple l'évolution des aires de répartition potentielles de la crassule des étangs pour le nord de l'Europe, en prenant en compte les variations climatiques attendues pour la fin du siècle (pour un scénario optimiste) :

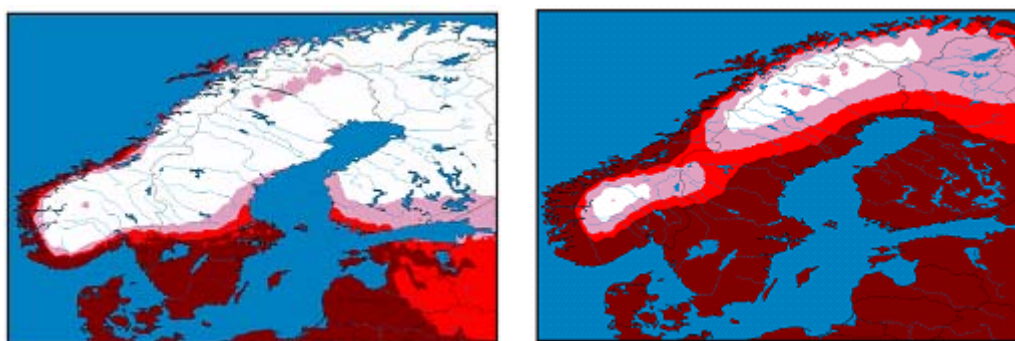


Figure 19 : Aire de répartition potentielle de *Crassula helmsii*, de nos jours (avec les moyennes climatiques de la période 1961-1990) ; à gauche. Et en 2100 avec un scénario d'émission B2 ; à droite. (Adapté de Hallstan S.) [45]

Dans l'hypothèse d'un scénario A2, l'ensemble de la zone, ici présentée, aurait de forte potentialité pour être colonisée par la crassule des étangs. [45]

Les événements extrêmes plus fréquents et plus violents, comme les inondations ou les tempêtes, risquent d'accroître la dispersion de fragments de ce genre de plante qui, par reproduction végétative, pourront générer de nouveau foyer et coloniser ainsi de nouveaux habitats jusqu'alors inaccessibles. [18]. De plus, étant tolérante à une large gamme de conditions environnementales, *Crassula helmsii* pourrait coloniser des milieux très perturbés ou stressés (étant une plante amphibie, tolérant donc des hauteurs d'eau fluctuantes) au détriment des espèces autochtones. [46]

En France, il n'existe actuellement pas de mesures de gestion contre la crassule des étangs. Par contre, les gestionnaires au Royaume-Uni ont examiné plusieurs possibilités. L'arrachage mécanique est à proscrire au vue de la fragilité de la plante et de ses fortes capacités de bouturage. Des arrachages manuels pourraient sans doute donner des résultats sur des sites en tout début de colonisation. La lutte biologique est également difficilement applicable, car même si des poissons, comme les carpes, peuvent consommer des pousses éparpillées, ils seraient incapables de survivre sous les tapis de végétation que forme la crassule. La méthode qui a semblé la plus efficace a donc été l'application d'herbicides, technique interdite en France : son manque de sélectivité et les pollutions occasionnées sont toutefois très contradictoires avec l'évolution actuelle des pratiques de gestion des milieux naturels. [46]

Une technique alternative a néanmoins été proposée par les gestionnaires anglais. Elle consiste à faire de l'ombre à l'herbier de crassule via des bâches ou par l'implantation de végétaux adaptés. Cette technique a montré quelques résultats encourageant en Angleterre et pourrait se conjuguer aux éventuelles techniques de gestion visant à limiter l'échauffement de la masse d'eau également par un ombrage plus important. [46]

Crassula helmsii présente donc les principaux traits écologiques des espèces invasives, dont une grande tolérance vis-à-vis des conditions environnementales et forte capacité de colonisation. Ce qui fait d'elle une espèce à surveiller d'encore plus prêt dans le cadre des changements globaux à venir. Les aires favorables à son installation risquent probablement de s'étendre en Europe et les perturbations climatiques prévues risquent également de favoriser sa dissémination. Une surveillance soutenue est donc nécessaire pour détecter, le plus précocement possible, d'éventuelles implantations de cette espèce invasive, sur de nouveaux territoires. Effectivement, il n'y a pas encore de méthode de gestion assez satisfaisante pour gérer un foyer étendue. Malgré tout, un arrachage manuel ou mécanique en début d'invasion peut stopper radicalement la propagation de *Crassula helmsii*. [46]

7 Conclusions

Les prévisions de changements climatiques ont été modélisées à partir d'une multitude de scénarios décrivant les émissions de GES au cours du siècle à venir, selon divers critères (augmentation de la population, développement des technologies...). Même si ces scénarios et ces modélisations ne sont évidemment pas vérifiables, ils convergent tous vers une augmentation généralisée des températures, particulièrement en été et dans le sud de la France. Pour cette même période les précipitations devraient également fortement décroître, alors qu'elles seront plus intenses pendant l'hiver, surtout dans le nord. Les événements extrêmes devraient être également plus fréquents et la variabilité interannuelle plus forte.

Tout ces changements auront un impact, encore difficile à évaluer, sur les écosystèmes aquatiques. L'augmentation de la température, les variations du régime hydrique et la montée du niveau océanique auront de fortes conséquences sur la qualité de l'eau et

d'importantes répercussions sur le fonctionnement de ces milieux. Les activités anthropiques risquent d'avoir des effets encore plus marqués sur ces écosystèmes aquatiques, que ce soit par leur intensification ou par leur association avec les autres effets des changements globaux.

La gestion des stocks d'eau pouvant être destiné à la consommation humaine risque d'être problématique, avec les possibles incursions d'eau salée dans les nappes phréatiques littorales ou des déficits d'alimentation de ces réserves en été.

Le GIEC fournit régulièrement des rapports sur l'évolution des connaissances au sujet des changements globaux et de ses impacts potentiels sur l'environnement et les sociétés humaines.

Toutes ces perturbations auront évidemment des répercussions sur les espèces indigènes des écosystèmes aquatiques. La rapidité et la brutalité de ces changements pourraient obliger les animaux et les végétaux à remonter plus au nord, ou plus haut en altitude. Les aires de répartition risquent d'évoluer, leurs limites sud devenant de moins en moins favorables alors que les territoires plus au nord seront potentiellement plus favorables.

Les potentialités de déplacement des différentes espèces concernées seront évidemment très variables selon leur biologie et leur écologie : les espèces ne pouvant se déplacer suffisamment vite pourraient régresser puis disparaître au fur et à mesure que les aires géographiques favorables se réduiront. De plus, l'augmentation des activités anthropiques prévues au cours du siècle à venir risque de morceler encore plus les paysages et de couper ainsi les corridors reliant les différents écosystèmes.

Faciliter la remontée des populations autochtones, augmenter l'inter-connectivité des milieux et leur résilience, apparaissent comme des éléments clefs de leur survie. Les stratégies de gestions adaptatives à mener dans le futur et à l'échelle européenne semblent les plus adaptées aux évolutions probables des territoires et des communautés vivantes mais elles peuvent également s'accompagner de nouvelles invasions biologiques qu'elles pourraient faciliter. En effet, en perturbant les milieux et en stressant les espèces indigènes, elles pourraient rendre disponible des niches écologiques favorables à l'installation d'espèces exotiques. Les évolutions des activités anthropiques, qui sont les principales voies de transport d'espèces exotiques, sont aussi des facteurs à prendre en compte dans les questions de gestion des espèces invasives.

Cette stratégie de gestion adaptative apparaît comme la plus appropriée et devrait trouver une place importante dans ce contexte. Elle nécessitera des acquisitions régulières de connaissances précises et opérationnelles sur les modifications fonctionnelles des milieux et les paramètres de la dynamique des espèces invasives ou indigènes.

La commercialisation et/ou l'exploitation d'espèces exotiques qui causent des difficultés de gestion dans d'autres pays européens seront également à évaluer régulièrement. Par exemple, pour les plantes aquatiques, seules les jussies et la caulerpe sont actuellement interdites à la vente et au transport en France, alors que de nombreuses autres espèces invasives avérées sont disponibles dans les points de vente spécialisés.

La question des changements globaux et des invasions biologiques doit évidemment être abordée de façon intégrée, avec la mise en œuvre de modes de gestion adaptés aux espèces à gérer mais aussi à l'échelle du territoire concerné, depuis le "terrain" du gestionnaire local jusqu'à l'ensemble de la zone où se trouve l'espèce invasive avec une nécessaire harmonisation de ces stratégies, au moins au niveau européen. Par ailleurs si des facilitations de la gestion des espèces invasives passent par le maintien du bon état écologique des écosystèmes aquatiques au sens de la DCE, les évolutions fonctionnelles de ces écosystèmes liées à ces changements globaux vont rendre plus complexes les choix et les interventions de gestion.

Enfin, dans tous les cas, des évolutions notables des réglementations s'appliquant à cette problématique sont indispensables, ainsi que de très importants efforts de sensibilisation des décideurs et du grand public.

Sigles utilisés

DAISIE : Delivering Alien Invasive Species Inventories in Europe

DCE : Directive Cadre sur l'Eau

GES : Gaz à Effet de Serre

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (équivalent français du sigle anglais IPCC)

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

MEEDDAT : Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire

NWRS : National Wildlife Refuge System (Etats-Unis)

ONCFS : Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage

ONEMA : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques

ONU : Organisation des Nations Unies

PIB : Produit Intérieur Brut

PLU : Plan Local d'Urbanisme

SRES : Special Reports on Emission Scenarios

UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature (équivalent français du sigle anglais IUCN)

Bibliographie

1. Rahel, F.J., B. Bierwagen, and Y. Taniguchi, 2008, *Managing aquatic species of conservation concern in the face of climate change and invasive species*. Conservation Biology, 22(3): p. 551-561.
2. <http://www.ecologie.gouv.fr/>, 2007, *Site Internet du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer* - Consulté en Juillet 2009.
3. Mazaubert, E., 2008, *Espèces exotiques envahissantes en milieux aquatiques en France : évaluation des risques en relation avec l'application de la DCE, Eau, Santé, Environnement*. Université Victor Segalen - Bordeaux 2. p. 124.
4. <http://www.iucn.org/>, 2009, *Site officiel de l'IUCN* - Consulté en Aout 2009.
5. <http://www.ipcc.ch/>, 2009, *Site Internet de l'IPCC* - Consulté en Juillet 2009.
6. GIEC, 2007, *Changements climatiques 2007 : Les éléments scientifiques - Résumé à l'intention des décideurs*. 27 p.
7. GIEC, 2007, *Bilan 2007 des changements climatiques*. Genève (Suisse) : PNUE (Programme des Nations-Unies pour l'Environnement) et GIEC. 114 p.
8. IPCC, 2001, *Special Report on Emissions Scenarios*. New York (US), Cambridge University Press. 599 p.
9. CEA, et al., 2007, *Les recherches françaises sur le changement climatique*. 20 p.
10. GIEC, 1997, *Incidence de l'évolution du climat dans les régions : Evaluation de la vulnérabilité - Résumé à l'intention des décideurs*. Genève (Suisse): PNUE (Programme des Nations-Unies pour l'Environnement) et GIEC. 27 p.
11. Ekstrom, M., et al., 2007, *Regional climate model data used within the SWURVE project 1: projected changes in seasonal patterns and estimation of PET*. Hydrology and Earth System Sciences, 11(3): p. 1069-1083.
12. Bates, B.C., et al., 2008, *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Genève (Suisse). 214 p.
13. Somot, S., 2005, *Regional climate change scenarios*. Hydrology & Earth System Sciences, 4(2): p. 89-94.
14. Deque, M., 2007 *Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values*. Global and Planetary Change, 57(1-2): p. 16-26.
15. Zones Humides Infos, 2008, *Dossier : Changement Climatique*, in *Zones Humides Infos*. p. 32.
16. Hauer, F.R., et al., 1997, *Assessment of climate change and freshwater ecosystems of the Rocky Mountains, USA and Canada*. Hydrological Processes, 11(8): p. 903-924.
17. Peterson, A.T., et al., 2008, *Shifting global invasive potential of European plants with climate change*. PLoS ONE, 3(6): p. 2441.
18. Rahel, F.J. and J.D. Olden, 2008 *Assessing the effects of climate change on aquatic invasive species*. Conservation Biology, 22(3): p. 521-533.
19. Stromberg, J.C., et al., 2007, *Altered stream-flow regimes and invasive plant species: The Tamarix case*. Global Ecology and Biogeography, 16(3): p. 381-393.
20. Adam, P., 2002, *Saltmarshes in a time of change*. Environmental Conservation, 29(1): p. 39-61.
21. Jackson, R.B., et al., 2001, *Water in a changing world*. Ecological Applications, 11(4): p. 1027-1045.
22. Ducharme, A., 2008, *Importance of stream temperature to climate change impact on water quality*. Hydrology and Earth System Sciences, 12(3): p. 797-810.
23. Thuiller, W., et al., 2005 *Niche-based modelling as a tool for predicting the risk of alien plant invasions at a global scale*. Global Change Biology, 11(12): p. 2234-2250.

24. Matulla, C., et al., 2007, Assessing the impact of a downscaled climate change simulation on the fish fauna in an Inner-Alpine River. *International Journal of Biometeorology*, 52: p. 127-137.
25. Cooney, S.J., et al., 2005, Modeling global warming scenarios in greenback cutthroat trout (*Oncorhynchus clarki stomias*) streams: Implications for species recovery. *Western North American Naturalist*, 65(3): p. 371-381.
26. <http://www.legrenelle-environnement.fr/>, 2008 *Site du Grenelle de l'Environnement* - Consulté en Juillet 2009.
27. <http://www.inra.fr/presse>, 2008, *Site Internet de l'INRA ; Section "Presse"* - Consulté en Juillet 2009.
28. Damme, D.V., et al., 2007 The introduction of the European bitterling (*Rhodeus amarus*) to west and central Europe. *Fish and Fisheries*, 8(2): p. 79-106.
29. Seguin, B., 2003, *Adaptation of agricultural production systems to climatic change*. *Adaptation des systèmes de production agricole au changement climatique*, 335(6-7): p. 569-575.
30. Dukes, J.S. and H.A. Mooney, 1999, *Does global change increase the success of biological invaders?* *Trends in Ecology and Evolution*, 14(4): p. 135-139.
31. <http://www.europe-aliens.org/>, 2009, *Site Internet du programme DAISIE* - Consulté en Aout 2009.
32. Hershner, C. and K.J. Havens, 2008, Managing invasive aquatic plants in a changing system: Strategic consideration of ecosystem services. *Conservation Biology*, 22(3): p. 544-550.
33. Bierwagen, B.G., F.J. Rahel, and R. Thomas, 2008, *Special section: A synthesis of climate-change effects on aquatic invasive species*. *Conservation Biology*, 22(3): p. 518-520.
34. Hellmann, J.J., et al., 2008, Five potential consequences of climate change for invasive species. *Conservation Biology*, 22(3): p. 534-543.
35. Theoharides, K.A. and J.S. Dukes, 2007, Plant invasion across space and time: factors affecting nonindigenous species success during four stages of invasion. *New Phytologist*, 176(2): p. 256-273.
36. <http://www.parc-camargue.fr/>, 2003 *Site internet du PNR de Camargue ; Section "Ses Actions"* - Consulté en Juillet 2009.
37. GreenFacts, 2007, *Consensus Scientifique sur le Changement Climatique*. 41 p.
38. Bierwagen, B.G., R. Thomas, and A. Kane, 2008, *Capacity of management plans for aquatic invasive species to integrate climate change*. *Conservation Biology*, 22(3): 568-574.
39. Galatowitsch S., Frelich L., and Phillips-Mao L., 2009, Regional climate change adaptation strategies for biodiversity conservation in a midcontinental region of North America. *Biological Conservation*, 10.
40. Griffith, B., et al., 2009, *Climate Change Adaptation for the US National Wildlife Refuge System*. *Environmental Management* p. 1-10.
41. MacArthur R.H. and Wilson E.O., 1967, *The theory of island biogeography*.: Princeton University Press.
42. Pyke, C.R., et al., 2008, Current practices and future opportunities for policy on climate change and invasive species. *Conservation Biology*, 22(3): p. 585-592.
43. Rahel, F.J., 2002, *Homogenization of freshwater faunas*. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 33: p. 291-315.
44. Bradley B.A., Oppenheimer M., and Wilcove D.S., 2009, *Climate change and plant invasions: restoration opportunities ahead ?* *Global Change Biology*, (15): p. 1511 - 1521.
45. Hallstan S., 2005, Global warming opens the door for invasive macrophytes in Swedish lakes and streams. *Sveriges lantbruksuniversitet, Miljöanalys (Suède)*, 27
46. <http://www.bretagne-environnement.org/>, 2008, *Site internet du réseau Bretagne Environnement; Section « Espèces invasives – Invasives avérées »* - Consulté en Aout 2009.



Partenariat 2010
Espèces
Espèces invasives



Onema
Hall C – Le Nadar
5, square Félix Nadar
94300 Vincennes
01 45 14 36 00
www.onema.fr

Cemagref
Parc de Tourvoie
BP 44,
92163 Antony cedex
01 40 96 61 21
www.cemagref.fr