Changement climatique, impacts sur les milieux aquatiques et conséquences pour la gestion

Document de synthèse du séminaire des 29 et 30 juin 2009, PARIS

Laurent Basilico, Natacha Massu, Nirmala Séon-Massin

Arnaud Richard – Onema

Le séminaire « Changement climatique, impacts sur les milieux aquatiques et conséquences pour la gestion » a été organisé par l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (Onema) et le programme Gestion et Impacts du Changement Climatique (GICC) du Ministère en charge du développement durable, avec l'appui du GIP Ecofor, les 29 et 30 juin 2009 à Paris. Il a bénéficié d'une implication du conseil scientifique de l'eau et des milieux aquatiques.

Cette synthèse, sa version courte, les diapositives et interventions sont en ligne sur les sites suivants :
Onema (www.onema.fr/Seminaire-CC)
GICC (www.gip-ecofor.org/gicc).

Contacts

Natacha Massu
Chargée de Mission Changement climatique
GIP Ecofor
natacha.massu@gip-ecofor.org

Nirmala Séon-Massin
Chargée de Mission Changement global et biodiversité
ONEMA
Direction de l'Action Scientifique et Technique
nirmala.seon-massin@onema.fr

Véronique Barre
Conseil Scientifique et Valorisation
ONEMA
Direction de l'Action Scientifique et Technique
Veronique.barre@onema.fr

Daniel Martin
Chargé de mission Changement climatique
MEEDDM CGDD/DR/SR
daniel.martin@developpement-durable-gouv.fr

Laurent Basilico
Journaliste
lbasilico@free.fr

Préambule

Tout au long de plus de 270 000 km de ruisseaux, de rivières et de fleuves, les eaux douces françaises, ressource inestimable pour la société et l'économie, recèlent à la fois une formidable richesse écologique et un patrimoine humain et culturel unique.

À l'heure du changement climatique, elles constituent également un facteur d'inquiétude croissant. Quelles seront les conséquences de ce changement sur la quantité et la qualité des eaux françaises ? Comment les écosystèmes aquatiques réagiront-ils à de nouvelles conditions ? Que signifie cette nouvelle donne pour les différents acteurs humains de l'eau, gestionnaires, opérateurs de services, agriculteurs, pêcheurs ?

Consacré à ces questions, le séminaire « Changement climatique, impacts sur les milieux aquatiques et conséquences pour la gestion » organisé par l'Onema et le programme Gestion et Impacts du Changement Climatique (GICC) du MEEDDM a eu lieu les 29 et 30 juin 2009 à Paris. Il a réuni plus de 120 scientifiques, experts, gestionnaires, représentants d'associations et d'entreprises. Sur la base d'un panorama des connaissances disponibles, il s'est attaché à faire émerger, à l'échelle nationale, un dialogue entre scientifiques et gestionnaires de l'eau dans la perspective du changement climatique. Il a ensuite permis de proposer des éléments de prospective pour la prise en compte politique et économique des impacts de ce changement sur les milieux aquatiques.

Ce document a pour objet de synthétiser les données présentées, les points de vue exprimés et les interrogations soulevées au cours de ces deux journées.

Sommaire

1 – Changement climatique et milieux aquatiques : impacts observés et projections **4**

1.1 – Quel changement climatique ?

1.2 – Conséquences sur l'hydrologie

1.3 – Milieux aquatiques : impacts et adaptation

2 – Usages de l'eau et écosystèmes à l'heure du changement climatique **20**

2.1 – Ressource unique, besoins multiples

2.2 – Milieux aquatiques, usages de l'eau et société

3 – Quelles stratégies de gestion pour l'adaptation ? **30**

3.1 – Le dispositif existant

3.2 – Vers une prise en compte du changement climatique par les politiques publiques de l'eau

3.3 – Quelles perspectives scientifiques pour alimenter la décision ?

4 – Bibliographie / Webographie **38**

1 Changement climatique et milieux aquatiques :

Michel Bramard – Onema

impacts observés et projections

Le séminaire organisé par l'Onema et le programme GICC les 28 et 29 juin 2009 à Paris (Séminaire Paris 2009) s'est ouvert par une session intitulée « État des lieux des besoins opérationnels », au cours de laquelle des représentants des acteurs de l'eau – agriculteurs, opérateurs de services, gestionnaires de parcs naturels – ont exprimé de nombreuses interrogations quant à l'évolution de leurs pratiques dans une optique d'adaptation au changement climatique. Cette enquête, qui fait l'objet du point 2.1 du présent article, a fait émerger des attentes d'ordre technique ou socioéconomique propres à chaque type d'acteur. Elle a également mis en évidence des besoins récurrents en connaissances scientifiques, qui peuvent être résumés ainsi :

Une vision claire des évolutions globales
- scénarios climatiques envisagés
- modèles utilisés
- incertitudes associées

Des données prédictives exploitables sur la disponibilité de la ressource en eau
- à l'échelle du bassin versant
- à long terme (2050, 2100) mais aussi à plus court terme (2020, 2030)

Des connaissances sur les impacts du CC sur les milieux aquatiques
- évolution des aires de répartition des espèces
- modification du comportement des espèces

Des éléments de réponse – et d'autres questionnements – sont apportés dans le développement suivant qui synthétise les contributions scientifiques exposées lors du séminaire.

Paru en 2007, le quatrième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a reconnu officiellement la réalité du changement climatique, et a constitué une avancée significative dans l'explication des mécanismes qui y contribuent.

Le rapport affirme en particulier « *Le réchauffement du système climatique est sans équivoque, car il ressort désormais de l'observation de l'augmentation des températures moyennes mondiales de l'atmosphère et des océans, de la fonte généralisée des neiges et des glaces, et de l'élévation du niveau moyen mondial de la mer.* » (GIEC, 2007)

Il précise en outre : « *L'essentiel de l'accroissement observé sur la température moyenne globale depuis le milieu du XXème siècle est très probablement dû à l'augmentation observée des concentrations des gaz à effet de serre anthropiques.* » (GIEC, 2007)

Cette première partie est consacrée aux manifestations, déjà perçues ou prévues par les modèles, du changement climatique à l'échelle du territoire français métropolitain. Elle présente des données sur leurs impacts sur le cycle de l'eau et sur le réseau hydrologique en termes de qualité d'eau, de débit, de température, de variations saisonnières. On dressera enfin un état des lieux des connaissances et des interrogations relatives aux conséquences de ces changements sur les écosystèmes aquatiques, et notamment sur les peuplements piscicoles.

Hervé Jacquot – Onema

Le changement climatique, composante d'un changement global

Ce développement, et l'analyse socioéconomique qui suivra, ne prennent leur sens que si le changement climatique est replacé dans le faisceau plus large des pressions anthropiques qui s'exercent sur les écosystèmes aquatiques. En quelques décennies, l'industrie et l'agriculture intensive ont prélevé des volumes d'eau importants et entraîné de nombreuses pollutions. L'urbanisation accélérée a engendré une artificialisation des berges, la dégradation des milieux naturels. La globalisation des transports a quant à elle entraîné l'arrivée dans les écosystèmes d'espèces exotiques, parfois envahissantes. L'impact de ces pressions sur les milieux est bien souvent couplé avec celui du changement climatique. Ce dernier entraînera par exemple des conditions plus favorables à la pullulation de certaines espèces (il accélèrerait en outre l'eutrophisation des milieux). Les aménagements des cours d'eau accentuent le réchauffement de ceux-ci tandis que l'impact des pollutions sera amplifié par la baisse des niveaux d'étiage, qui accroît les concentrations des agents chimiques dans l'eau.

Du fait de ces interactions multiples, l'enjeu prioritaire des recherches menées sur l'adaptation au changement climatique est bien de diminuer la vulnérabilité des écosystèmes aux changements globaux. Réciproquement, l'amélioration de la capacité d'adaptation des milieux suppose un effort concerté pour la réduction des pressions locales. Cette notion de changement climatique comme composante d'un changement global a fait l'objet d'un large consensus lors du Séminaire Paris 2009.

1.1 – Quel changement climatique ?

Changement climatique déjà observé

Au cours du XX^{e} siècle et plus particulièrement depuis 1910, la température moyenne de la Terre s'est accrue d'environ 0,6°C. En France, l'augmentation a été de l'ordre de 1°C. De fait, la décennie 1990 a été la plus chaude du XX^{e} siècle avec, en valeur moyenne et au niveau planétaire, un record pour l'année 1998. La décennie actuelle ne dément pas cette tendance, qui a déjà été marquée en Europe par une sécheresse et une canicule exceptionnelles en 2003 et qui a vu les années suivantes rester chaudes et sèches. Ces modifications du climat sont dues à plusieurs causes parmi lesquelles la variation d'activité solaire et l'augmentation de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone et autres gaz à effet de serre. L'augmentation de ces gaz apparaît comme étant la principale responsable de ces modifications du climat.

Scénarios climatiques

Le futur est aujourd'hui assez bien connu pour les trois ou quatre décennies à venir sur lesquelles il sera difficile d'influer : les jeux sont faits sur cette période en raison de la grande inertie des phénomènes. En revanche, une forte incertitude demeure pour le reste du XXI^{e} siècle et pour les siècles ultérieurs. De multiples scénarios ont été établis par le Groupe international d'experts sur l'évolution du climat (GIEC), parmi lesquels deux sont souvent distingués : un scénario relativement optimiste (dit B2) qui correspond à une réduction efficace et générale des émissions permettant de ralentir l'augmentation de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre et de limiter l'augmentation de la température moyenne, en France, à environ 3°C d'ici 2100 ; un scénario plus pessimiste (dit A2) qui résulte d'une certaine inaction ou inefficacité des autorités mondiales qui ne pourraient éviter d'ici 2100 un triplement de la teneur atmosphérique en gaz carbonique par rapport au début de l'ère industrielle, soit une augmentation de température moyenne pour la France de 5°C en un siècle. Si ce second scénario semble inquiétant, le premier l'est également puisqu'il prévoit une augmentation de la température moyenne du globe au-delà de tout ce que la planète a connu au cours des 400 000 dernières années.

Modèle climatiques et incertitudes

Ces scénarios climatiques globaux se basent sur des modèles climatiques (citons par exemple le Modèle Système Terre développé par l'Institut Pierre Simon Laplace) qui essaient de modéliser de la façon la plus réaliste possible les concentrations en gaz de l'atmosphère et les phénomènes complexes qui régissent le climat. De plus en plus perfectionnés, ils ne rendent pourtant qu'imparfaitement compte de la réalité. Les scénarios climatiques présentent donc de grandes incertitudes qu'il est important de prendre en compte dans les travaux scientifiques ou les politiques basées sur ces scénarios.

Une régionalisation nécessaire

Si elles donnent de grandes tendances, ces prévisions globales sont en revanche inadaptées à l'étude des conséquences de ces changements pour les milieux aquatiques, dont l'échelle la plus pertinente est celle du bassin versant. La régionalisation des modèles est une étape indispensable pour une prise en compte fine de la topographie, qui influence étroitement la météorologie locale.

Plusieurs programmes de recherche français et européens ont par exemple permis de développer des modèles de climat régionalisés à l'échelle du bassin méditerranéen. C'est le cas notamment des modèles tridimensionnels à maille variable développés par Météo France (Arpege) et l'IPSL (LMDz-Mediterranean). À scénario identique, ces modèles donnent des résultats cohérents avec les prévisions globales, tout en offrant une bien meilleure résolution spatiale, et en particulier un meilleur rendu des valeurs extrêmes.

Ces évolutions vers la régionalisation des modèles, la haute résolution, la prise en compte de plus en plus complète des paramètres influents et la transdisciplinarité constituent les tendances actuelles des orientations de recherche. Il est cependant prévisible que cette prise en compte de facteurs toujours plus nombreux et complexes ne conduira pas à une réduction des incertitudes. Un enjeu majeur résidera donc dans notre capacité à **définir des scénarios variés et à estimer leurs probabilités d'occurrence**.

1.2 – Conséquences sur l'hydrologie

La transcription de variations climatiques sur les rivières, en termes de débit ou de température, résulte d'un ensemble complexe d'interactions physiques. Les échanges thermiques entre la rivière et l'atmosphère sont notamment régis par la température de l'air, par le vent, par l'ensoleillement et par le taux d'humidité atmosphérique. Les caractéristiques physiques de la rivière – profondeur, vitesse d'écoulement, singularités topographiques – et les pressions anthropiques entrent également en ligne de compte.
Un certain nombre de données observées suffisent cependant à constater une évolution significative des températures moyennes des cours d'eau sur les trois dernières décennies. Ainsi, le Rhône français (Poirel, 2008) a connu une hausse de sa température moyenne de 1 à 2°C sur l'ensemble de son cours entre 1978 et 2008, hausse corrélée avec l'évolution de la température de l'air. Pour la Meuse, une augmentation de la moyenne annuelle comprise entre 0,3 et 0, 75°C a été enregistrée entre 1970 et 2005 (Laborelec – Univ. Namur, 2008).
Sur la Loire moyenne, le réchauffement a été de 1,5 à 2°C entre 1977 et 2003, et plus marqué au printemps et en été (Moatar, 2006). L'échauffement du fleuve est plus modéré (de l'ordre de 0.5°C) si l'on considère la période 1949-2003.

Température « naturelle » et pressions locales

Dans le cas de la Loire, une étude a cherché à évaluer la part du climat sur l'évolution de la température de l'eau (Gosse *et al.*, 2008). Elle est basée sur la comparaison de l'évolution observée avec celle qu'aurait eu la température « naturelle » locale (T^{nat}, soumise aux seuls effets de la profondeur et de la météo locale, (Gras, 1970) reconstituée sur la base de modèles déterministes à base physique. Cette étude a montré que 85% de l'échauffement constaté en été sur la Loire moyenne entre 1980 et 2003 est expliqué par les variations des conditions atmosphériques.

Plus généralement (Gosse, Séminaire Paris 2009), des rivières françaises sont à leur T^{nat} une grande partie de l'année (parties moyennes et aval de Loire, Moselle, Saône, Seine...) tandis que d'autres le sont moins fréquemment (la Garonne près de Toulouse). Dans les cas du Rhin et du Rhône français, les occurrences de T^{nat} sont exceptionnelles, l'impact des pressions climatiques et anthropiques (aménagements, rejets...) doit y être considéré sur de plus grandes portions de fleuve.

Différents modèles à base physique permettent de simuler l'évolution future de la température des rivières. En appliquant six scénarios de doublement des émissions de CO^2 ($3^{ème}$ rapport du GIEC) à la Loire moyenne, dans un modèle prenant en compte les effets de la température de l'air et des précipitations, le réchauffement moyen prévu est de 0,8 à 1,5°C à l'horizon 2050, pouvant aller jusqu'à +3°C pour les mois les plus chauds. Ce résultat est pourtant à relativiser au regard des limites des modèles physiques (pas de prise en compte de l'évolution prévue pour la nébulosité, le vent, l'humidité de l'air, et la gestion quantitative de la ressource en eau) et des incertitudes portant sur le scénario utilisé.

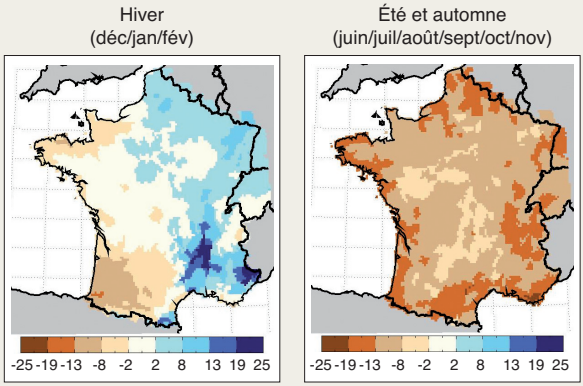
Projections en débit : évolution globale et régimes particuliers

Une approche complémentaire consiste à modéliser l'influence du changement climatique sur le débit des rivières. Une thèse récente

Michel Bramard – Onema

(Boé, 2007) s'y est attelée en régionalisant par la méthode dite des « régimes de temps » les projections des 14 modèles climatiques du 4ème rapport du GIEC et en appliquant les résultats à un modèle hydrologique donné. Cette approche a permis d'obtenir une cartographie détaillée de l'évolution des précipitations à l'horizon 2050. Dans le cadre du scénario climatique A1B, des chutes marquées du niveau pluviométrique moyen sont attendues.

Évolution des précipitations moyennes

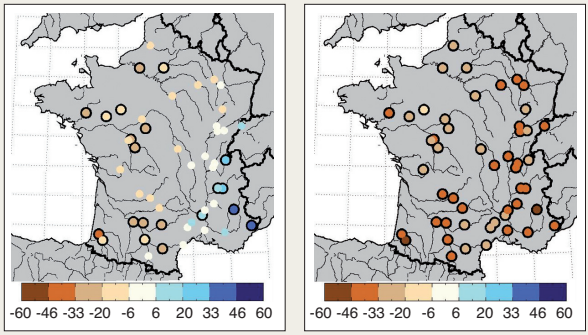


Changement relatif multi-modèle (en %) 2046/2065

Sur la période 2046-2065, en été et en automne, les niveaux de précipitation sont partout inférieurs aux niveaux actuels, la baisse dépassant 10% dans de nombreuses régions.

Source : J.Boé

Évolution des débits moyens



Changement relatif multi-modèle (en %) 2046/2065
Points cerclés de noir : accord de 85% des modèles sur le signe

Les changements relatifs qui en résulteraient sur les débits moyens d'été et d'automne seraient encore bien supérieurs, la chute dépassant 30% des valeurs actuelles (voire 50% !) pour de nombreux bassins versants.

Source : J.Boé

En hiver, seules quelques rivières alpines enregistreraient une hausse de leur débit. Pour les débits extrêmes, les simulations montrent des évolutions assez faibles des débits de crue, mais une **augmentation nette et générale de la fréquence et de la sévérité des étiages**. Ces résultats restent entachés d'une forte incertitude liée au scénario envisagé et aux limites des modèles utilisés.

Pour aller plus loin dans cette analyse sur les débits, il est cependant nécessaire de prendre en compte les spécificités des différents bassins versants, qui sont par exemple influencés par la neige (bassins versants de montagne) ou par les nappes souterraines (cas de la Seine). Le projet GICC-Rhône s'est intéressé aux bassins alpins de la Durance et de l'Ubaye. Dans tous les cas, les résultats montraient des débits hivernaux plus importants, des crues nivales avancées et des débits estivaux plus faibles (Ducharne, Séminaire Paris 2009).

Pour la Seine par exemple, le projet RExHySS prévoit, sur la base de dix scénarios régionalisés et de cinq modèles hydrologiques, un décalage de l'hydrogramme aux horizons 2050 et 2100, avec des crues et des étiages retardés, et surtout une baisse globale des débits sous l'effet de la chute des précipitations annuelles et du réchauffement (Ducharne *et al.*, 2009). En parallèle, la recharge annuelle en eaux souterraines, simulée par le modèle hydrogéologique MODCOU selon les mêmes scénarios, enregistrerait une chute de 27% à l'horizon 2050 (soit -2 200 Millions de m^3 par an), et de 33% à l'horizon 2100. Ce déficit considérable – comparable aux prélèvements annuels totaux actuels ! – est largement supérieur aux incertitudes générées par l'utilisation en cascade de plusieurs modèles, alors même qu'il ignore l'accroissement prévisible des besoins en irrigation.

Une étude basée sur l'évolution des débits de six fleuves côtiers languedociens depuis 1965, en regard des températures et des précipitations enregistrées pour la même période, donne des tendances pour une grande partie du bassin méditerranéen (Ludwig, Séminaire Paris 2009). Elle a notamment permis de confirmer l'amorce d'une baisse des débits, en réponse à la hausse constatée des températures au printemps et en été. Le projet européen SESAME (Ludwig, Séminaire Paris 2009), basé

Virginie Perraud – Onema

sur une modélisation rétrospective et prospective des apports fluviaux en eau à la Méditerranée et la Mer Noire, sur la base de quatre scénarios socio-économiques du Millennium Ecosystem Assessment, prévoit de même une baisse des apports fluviaux à la Méditerranée, y compris pour les scénarios les plus optimistes, ainsi qu'une aggravation des pressions climatiques et anthropiques sur les ressources en eau.

De manière générale, l'ensemble des recherches récentes montre des **tendances robustes pour ce qui est de la baisse des débits d'étiage et des niveaux piézométriques**, et pour ce qui est de la réduction des stocks de neige et de glace – et de leur effet tampon. Une augmentation très probable du risque de défaillance estivale est donc attendue, pouvant même aller jusqu'à la rupture de continuité sur certains cours d'eau.

D'autres évolutions – crues intenses dans les régions méditerranéennes, baisse des débits de crue dans le Nord de la France – sont également possibles mais ces hypothèses paraissent moins robustes en raison des fortes incertitudes qui pèsent encore sur les projections concernant les précipitations.

1.3 – Milieux aquatiques : impacts et adaptation

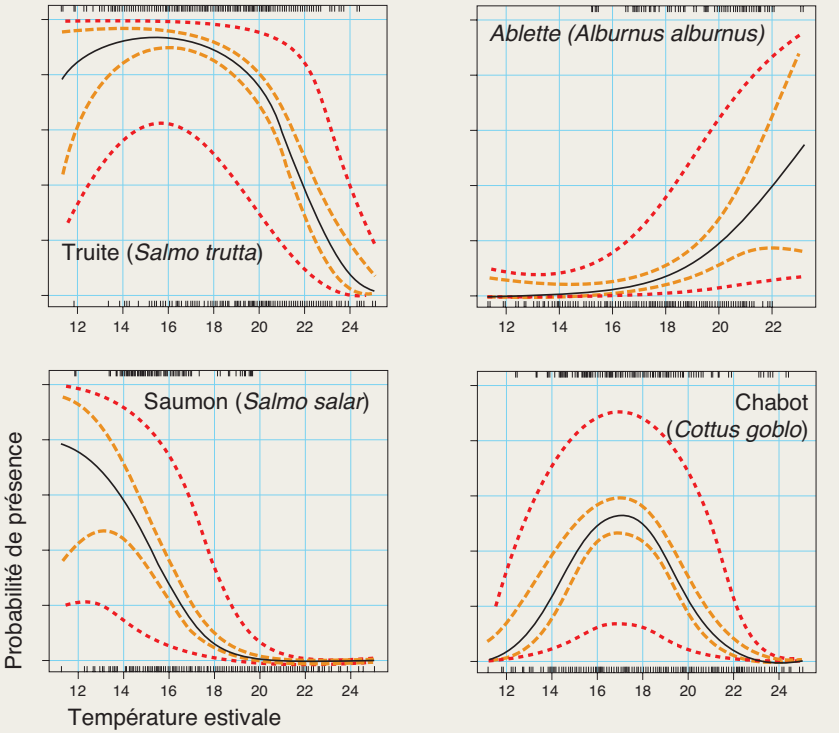
En plus des évolutions en débit et en température constatées au cours des dernières décennies sur le réseau hydrologique français, des modifications du fonctionnement des écosystèmes aquatiques sont d'ores et déjà observables. Selon la Fédération nationale pour la pêche en France (Breton, Séminaire Paris 2009), un fort développement des populations de certains poissons (barbeau, hotu, chevesne, vandoise), est observé dans la Seine en aval de Paris au détriment d'autres espèces comme la brème ou le gardon. Autre exemple : les recrutements d'anguille et d'alose affichent une inquiétante régression depuis plusieurs années. Ainsi, dans le cas des populations françaises d'alose, les recrutements annuels, qui étaient remontés de quelques dizaines de milliers d'individus à plusieurs centaines de milliers grâce aux efforts de protection de l'espèce, ont enregistré une brutale chute lors de la canicule de 2003 et se sont depuis stabilisés à seulement quelques milliers d'individus chaque année (Monnier, Séminaire Paris 2009). En parallèle, il se produit une accélération des arrivées et de l'expansion de nouvelles espèces dans les eaux françaises. Ainsi, en seulement 30 ans, le silure glane s'est implanté dans la quasi-totalité des grands cours d'eau de l'Hexagone. L'aspe, signalé pour la première fois dans le Rhin en 1988, est aujourd'hui régulièrement capturé dans la Moselle et ses affluents. En 2007, le gobie demi-lune (*Protherorhinus semilunaris*), le crabe chinois (*Eriocheir sinensis*) ou encore l'écrevisse de Louisiane (*Procambarus clarkii*). ont été observés pour la première fois dans les rivières du Nord-est de la France (Monnier, Séminaire Paris 2009).

Ces évolutions ne sont bien sûr pas imputables directement au seul changement climatique. L'arrivée de nouvelles espèces s'explique davantage par le développement des voies navigables (canal Rhin-Danube, par exemple) ou par des introductions volontaires ou accidentelles. La régression des migrateurs est à relier à la surpêche (anguille), à l'aménagement des cours d'eau et aux problèmes de qualité d'eau. Le changement climatique ne constitue de fait que l'un des éléments du changement global.

Température et aires de distribution d'espèces

Il est admis que la température de l'eau est l'un des facteurs déterminants des aires de répartition de la faune et de la flore aquatique, et notamment des poissons.

Modèles glm. Profils marginaux



Erreurs de prédiction
Intervallle de confiance

Les profils marginaux de probabilité de présence, pour chaque espèce, en fonction des températures estivales (Pont, Séminaire Paris 2009) constituent un outil d'analyse solide.

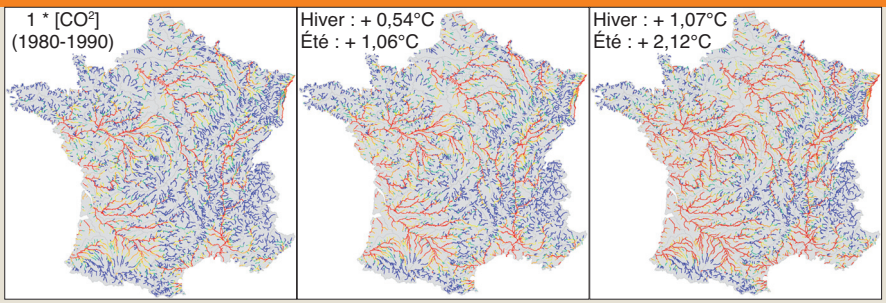
Didier Pont Séminaire Onema – programme GICC (MEDDAT) 29-30 juin 2009 Cemagref

Dans un contexte de changement climatique marqué par un réchauffement global, les conséquences pourraient être particulièrement marquées dans le cas des espèces cryophiles (saumon atlantique, éperlan, omble chevallier) ou sténothermes oligothermes (ombre commun en particulier).

Il existe trois types de réponses biologiques au changement global (Pont, Séminaire Paris 2009) : l'évitement, qui se traduit notamment par les modifications des aires de répartition, l'adaptation, c'est-à-dire l'évolution vers une « tolérance » plus forte, et les interactions biotiques, dont les mécanismes de régulation densité-dépendants sont un exemple. Ainsi, les données disponibles pour le chabot (*Cottus gobio*), poisson d'eaux fraîches, territorial, à régulation densité-dépendante, montrent qu'une augmentation de 2 à 3°C de la température de l'eau aurait de nombreuses conséquences sur la biologie de cette espèce, relevant de l'adaptation et des interactions biotiques : hausse de la fécondité et de la croissance juvénile, maturité sexuelle plus précoce, ralentissement de la croissance des adultes et baisse de la longévité (de 7 à 5 ans).

Les modifications d'aires de répartition ont, quant à elles, fait l'objet d'une étude prédictive sur un grand territoire dans le cadre du programme Gestion et impacts du changement climatique. Au moyen de modèles bioclimatiques corrélatifs, sur la base de prévisions climatiques du modèle ARPEGE de Météo-France, l'évolution des probabilités de présence de différentes espèces piscicoles sur l'ensemble du réseau hydrologique français a été simulée. Dans le cas du chabot par exemple, pour des réchauffements globaux forcés de +0,54°C en hiver et +1,06°C en été, puis de +1,07°C en hiver et +2,12°C en été, des pertes potentielles d'habitat respectives de 37% et de 77% sont prévues.

Prédictions sur l'ensemble du réseau français (~ 65 000 km, 8 467 tronçons) *Salmo Trutta*



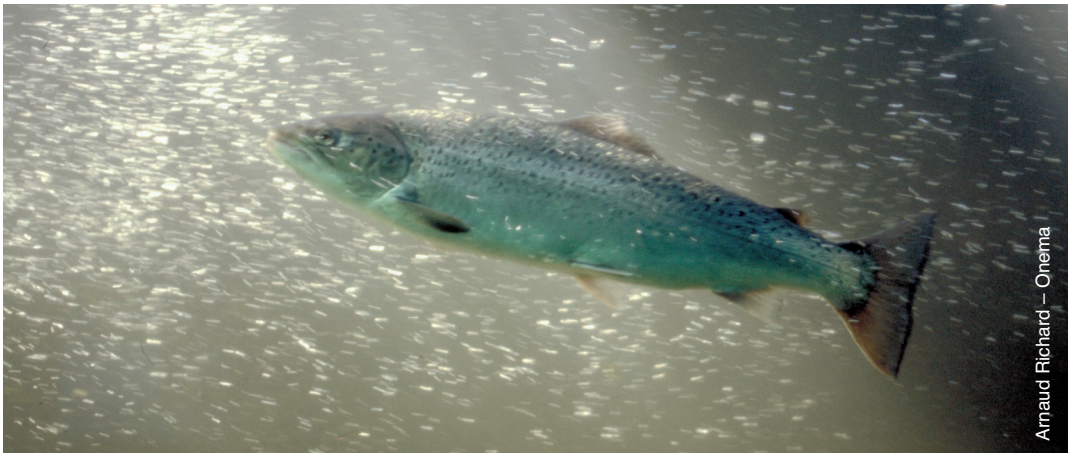
Probabilité de présence

0 0,2 0,4 0,6 0,8 1

Modèle de type CEM (Climat Envelop Models)
Prédictions climatiques Modèle ARPEGE (Météo-France)
Pont *et al.* 2006. MEEDDAT-GICC IFB

Dans le cas de la truite (*Salmo trutta*), avec les mêmes hypothèses, ces taux de perte se montent respectivement à 16% et 33% - une fois encore, aux incertitudes près (Pont, Séminaire Paris 2009).

Source : D. Pont


Arnaud Richard – Onema

Les poissons ne sont pas les seuls organismes aquatiques dont la répartition géographique est susceptible d'évoluer sous l'influence du changement climatique. Certaines **cyanobactéries** capables de synthétiser des toxines telle que *Cylindrospermopsis raciborskii* par exemple ont vu leur aire de répartition géographique évoluer récemment, notamment sous l'influence du changement climatique (Gugger *et al.*, 2005).

De même, certaines espèces de diatomées tropicales (*Hydrosera triquetra* et *Diadesmis confervacea* par exemple) sont présentes de façon permanente depuis quelques années dans la plupart des rivières du sud de la France. À la différence des cyanobactéries qui sont susceptibles de sécréter des toxines, aucun effet négatif particulier associé à la présence de ces diatomées n'a été identifié jusqu'à ce jour (Coste, 2006).

Par ailleurs, l'élévation des températures estivales des milieux aquatiques rend plus probable la survenue d'efflorescences (blooms) de cyanobactéries, à la fois en raison de son effet sur la physiologie de ces organismes et sur la stratification des plans d'eau. Des effets sur d'autres organismes pathogènes ne sont pas à exclure (De Toni *et al.*, 2009). En ce qui concerne les macrophytes, l'élévation de la température de l'eau jouerait aussi un rôle positif sur l'expansion d'espèces proliférantes comme la jussie (*Ludwigia peploides, Ludwigia grandiflora*).

Inquiétude sur les migrateurs

Le cas des poissons migrateurs a donné lieu une abondante littérature. Espèces souvent patrimoniales (anguille, alose, lamproies, saumon atlantique), de grande importance économique (esturgeon), ces voyageurs cumulent les signaux inquiétants en dépit de mesures de protection spécifiques telles qu'une diminution des abondances (Johnson *et al.*, 1999), ou une contraction des aires de distribution (de Groot, 1992, 2002). Une approche prédictive solide (Rochard, Séminaire

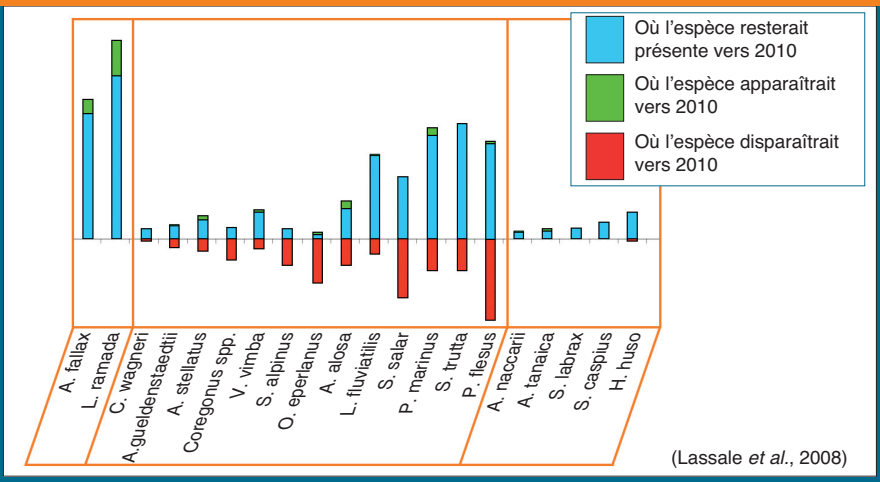
Paris 2009) consiste, sur la base des aires de répartition connues au début du XX^{e} siècle et au temps présent, à construire des modèles de distribution (présence-absence, classes d'abondance) en fonction des caractéristiques des bassins versants. L'évolution de ces aires géographiques peut ensuite être projetée selon différents scénarios d'évolution climatique.

Cette méthode a été employée pour 22 espèces de migrateurs amphihalins, dont 11 présentes en France (anguille, saumon atlantique, truite de mer, grande alose, alose feinte, esturgeon, lamproie marine et fluviatile, mulet, flet, éperlan), avec un large domaine d'étude englobant 196 bassins versants d'Europe, d'Afrique du Nord et du Proche-Orient (Lassalle, 2008) – *voir schéma ci-dessous*.

Pour le saumon atlantique, la comparaison des projections obtenues avec quatre scénarios A1, A2, B1, B2, montrent des disparités assez nettes, les scénarios B1 et B2, les plus optimistes, s'avérant, sans surprise, les moins impactants. Les quatre scénarios prévoient toutefois la disparition du saumon dans la péninsule ibérique, les bassins de la Baltique et, à différents degrés, dans certains bassins du Sud-Ouest et de l'Ouest français.

Citons enfin les méthodes de modélisation individu-centrées, intégrant démographie et génétique, qui ouvrent des perspectives prometteuses pour l'étude des stratégies d'adaptation chez les poissons (Piou, Séminaire Paris 2009). Actuellement en cours de développement, elles pourraient contribuer à la compréhension des influences du changement climatique sur le cycle de vie des saumons.

À partir des modèles de présence - absence



(Lassale *et al.*, 2008)

Dans le cas du scénario A2, de nettes contractions des aires de répartition sont prévues à l'horizon 2100 pour 14 des espèces et quelques gains (l'arrivée de l'Alose feinte dans les fleuves islandais).

Espèces exotiques et biodiversité : le débat reste ouvert

Parallèlement aux modifications de comportement et d'aires de répartition des espèces autochtones, les arrivées d'espèces dites exotiques connaissent une forte accélération : d'une dizaine d'espèces de poissons allochtones naturalisées en 1950, elles sont aujourd'hui 23 dans les eaux douces françaises métropolitaines pour 46 autochtones (Lévêque, Séminaire Paris 2009). Ces introductions peuvent être intentionnelles (pêche sportive, ressource alimentaire, aquaculture) ou accidentelles (spécimens « échappés », ballasts de bateaux...). Leur accélération s'explique par la globalisation des échanges mondiaux et le percement de nouvelles voies navigables, qui constituent autant de points de passage entre les bassins versants.

Cette évolution peut constituer un facteur supplémentaire de déséquilibre pour les milieux aquatiques, **certaines espèces pullulant ou se révélant envahissantes** – citons les cas bien connus de la moule zébrée (*Dreissena polymorpha*) ou de la perche soleil (*Lepomis gibbosus*), considérés comme nuisibles en France.

Il convient toutefois de nuancer cette perception des espèces exotiques comme nuisance potentielle en rappelant qu'après les glaciations (20 000 ans av. J.-C.) le repeuplement des eaux d'Europe de l'Ouest s'est effectué, de proche en proche, à partir du refuge ponto-caspien (Lévêque, Séminaire Paris 2009). Les arrivées récentes dans nos eaux de poissons comme le sandre, le silure, l'aspe ou la brème du Danube peuvent donc être vues comme le prolongement de ce mécanisme naturel, facilité par l'activité humaine. Quant aux véritables exotiques (originaires d'un autre continent), leur présence dans un milieu reste bien souvent anecdotique.

Au final, la modification des écosystèmes soumis à des pressions anthropiques est souvent à l'origine d'une fragilisation des populations autochtones. Ces nouvelles conditions écologiques sont favorables à l'installation d'espèces exotiques sans qu'il y ait nécessairement compétition entre espèces.

Autres questionnements

En dehors des différents aspects abordés au cours du Séminaire Paris 2009, il convient de signaler d'autres questionnements relatifs aux impacts avérés ou potentiels du changement climatique sur les milieux aquatiques. Il s'agit notamment des interactions potentielles entre le changement climatique et la présence et les effets de **contaminants** dans les milieux aquatiques.

Comme cela a déjà été évoqué, une modification du régime hydrologique s'accompagnera vraisemblablement de changements dans les patrons d'exposition aux substances toxiques, en induisant par exemple une élévation de la concentration en différents contaminants lors des périodes de basses eaux en raison d'une moindre dilution. Dans le cas où un stress associé à un toxique se surajoute aux stress induits par le changement climatique, une exacerbation des effets du toxique pourrait se produire. Diverses études réali-

sées en laboratoire sur des espèces aquatiques ont montré que, de manière générale, la sensibilité aux toxiques était plus élevée pour des individus placés dans des conditions environnementales proches de leur limite de tolérance thermique. De manière réciproque, l'exposition à un toxique pourrait réduire l'intervalle de tolérance des organismes exposés vis-à-vis des évolutions de leur environnement sous la contrainte du changement climatique.

De nombreuses hypothèses, parfois contradictoires, peuvent être envisagées lorsqu'il s'agit d'évaluer les interactions possibles (synergie, antagonisme ou additivité) entre l'augmentation de la température de l'eau, telle que prédite par les modèles climatiques, et le devenir et les effets des substances toxiques : accélération de la (bio)dégradation des molécules organiques, toxicité plus élevée pour les espèces sténothermes d'eau froide, compensation des effets toxiques individuels au niveau des populations par un accroissement de la reproduction, de la croissance ou de la densité, etc. Si les effets aggravants d'une élévation de la température sur la toxicité aiguë de diverses substances toxiques sur les organismes aquatiques et les mécanismes associés sont relativement bien connus au niveau individuel, les conséquences de l'interaction entre élévation de la température et effets des toxiques restent peu connues au niveau des populations, des communautés et des écosystèmes. Enfin, en dehors des aspects relatifs à la quantité d'eau et à la température, d'autres effets associés à l'élévation de la concentration atmosphérique en Gaz à effet de serre sur la dynamique des toxiques dans l'environnement et leurs effets ne peuvent être exclus, notamment en ce qui concerne les milieux littoraux (effet des modifications du pH de l'eau sur la dynamique des toxiques et leur impact par exemple).

Michel Bramard – Onema

Au cours du développement qui précède, il a été dressé un panorama des connaissances actuelles sur le changement climatique et des méthodes utilisées pour prévoir ses conséquences sur les eaux douces françaises et leurs écosystèmes, sur la base des contributions au Séminaire Paris 2009. Le lecteur y aura trouvé un certain nombre de données établies, de tendances globales, de fourchettes prédictives, d'ordres de grandeur. Il y aura aussi trouvé beaucoup d'interrogations.

À l'incertitude qui pèse, par définition, sur les scénarios socio-économiques d'émission de gaz à effet de serre envisagés, s'ajoutent, à chaque étape de l'analyse (modélisation climatique globale, régionalisation, couplage avec les modèles hydrologiques, couplage avec les modèles biologiques...) les incertitudes propres à chaque modèle et le caractère incomplet des données d'observation.

Cette science récente permet toutefois d'affirmer que le changement climatique va impacter significativement la ressource en eau française, entraînant une hausse des températures globales et une modification des hydrogrammes annuels caractérisée dans la grande majorité des cas par une baisse des débits moyens annuels et surtout un net accroissement de la fréquence et de la sévérité des étiages estivaux. Ces changements auront incontestablement des conséquences sur les milieux aquatiques, qui se traduiront par des modifications parfois majeures de la biologie et des aires de répartition des espèces. La gravité des impacts attendus apparaît toutefois fortement dépendante des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre, et plus généralement de l'évolution, à court et moyen terme, des pressions anthropiques.

2 Usages de l'eau et écosystèmes

Michel Bramard – Onema

à l'heure du changement climatique

Riches d'une biodiversité remarquable mais vulnérable, les milieux aquatiques constituent également un patrimoine culturel, historique et touristique ainsi qu'une ressource vitale pour de nombreux besoins et activités humaines. La quantité totale d'eau prélevée en France s'élevait en 2006 à 32,6 milliards de m^3, parmi lesquels 5,75 milliards, correspondant à la « part consommée », ne retournent pas au milieu naturel (Ministère en charge du développement durable, 2007). Cette part consommée se répartit comme suit : 49% pour l'irrigation, 24% pour l'eau potable, 23% pour la production d'énergie et 4% pour l'industrie (hors énergie). Les évolutions socio-économiques actuelles (croissance démographique, amélioration du niveau de vie et modifications de l'occupation des sols) devraient conduire à une **augmentation globale de ces prélèvements**.

Il est donc nécessaire pour comprendre et prévoir les impacts du changement climatique sur les milieux aquatiques, d'analyser sa traduction pour chacun des usages sociétaux de l'eau, lesquels contribuent aux pressions locales sur les écosystèmes. Réciproquement, les conséquences du changement global sur la ressource en eau, en termes de quantité et de qualité, vont influencer les pratiques et les stratégies des différentes activités humaines liées à l'eau.

2.1 – Ressource unique, besoins multiples

Intitulée « État des besoins opérationnels », la session d'ouverture du Séminaire Paris 2009 a permis de donner la parole, tour à tour, à des représentants de ces **acteurs : agriculteurs, opérateurs de services, gestionnaires de parcs naturels, pêcheurs, agences de l'eau, associations**. Cette discussion, ainsi que les réponses obtenues à un questionnaire largement diffusé en amont aux acteurs de terrain, a livré un premier inventaire des problématiques et besoins propres à chaque type d'acteur dans la perspective de l'adaptation au changement climatique. Une part des questionnements, souvent commune aux différentes parties, concernait les projections sur la disponibilité et la qualité de la ressource. Ces interrogations ont pu être levées, au moins en partie, par les différents exposés scientifiques dont le contenu est synthétisé dans la section 1 de ce document. Quant aux problématiques propres à chaque usage de l'eau, elles appellent des connaissances complémentaires et une réponse stratégique spécifique, que cette partie vise à préciser.

Secteur agricole : de la gestion des surfaces irriguées à la gestion des volumes consommés

Parmi les évolutions climatiques constatées, l'augmentation de la fréquence des épisodes de sécheresse constitue un facteur d'inquiétude particulièrement sensible pour la filière agricole, qui représente près de la moitié de la part d'eau consommée au niveau national. Entre 1976 et 2005, 13 épisodes de sécheresse affectant une région du territoire français ont été recensés, soit une fréquence doublée par rapport à la première moitié du XX^{e} siècle (Itier, 2008). L'épisode de 2003 a représenté, à l'échelle nationale, un coût de 590 millions d'euros. Les projections climatiques pour les décennies à venir, caractérisées par une augmentation de la température et de la fréquence des événements extrêmes, avec une disparité saisonnière et régionale (Nord/Sud) accrue, impliquent une disponibilité réduite de la ressource en eau avec des changements de distribution des précipitations.

Les impacts devraient être contrastés sur les prairies et les grandes cultures (Kristell Astier-Cohu, Ministère de l'agriculture et de la pêche, Séminaire Paris 2009). On peut s'attendre à un risque particulier pour des secteurs comme l'arboriculture et la viticulture, avec de possibles changements d'aires de production, ainsi qu'à une augmentation du risque de défaillance en fourrage.
Enfin et surtout, les besoins en eau pour l'irrigation – en particulier pour les cultures d'été – devraient augmenter significativement sous l'effet de la hausse des températures. Ainsi, selon le modèle agronomique « STICS » sous scénario A2, à surface irriguée et assolements actuels, l'irrigation en Beauce pourrait augmenter de 60% d'ici 2100 – ce chiffre reste cependant entaché d'une forte incertitude (Ducharne, Séminaire Paris 2009).

Pour s'adapter à une disponibilité moindre de la ressource en eau, **la gestion des volumes consommés devra considérer en priorité l'irrigation**. Cette nécessité est déjà présente dans le cadre de la LEMA (Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques ; voir section 3.1), qui définit des outils réglementaires pour les ZRE (zones de répartition des eaux). Ces dispositions prévoient notamment une gestion globale pour l'ensemble des usages de l'eau, la définition de volumes prélevables et l'organisation collective de tous les irrigants. La mise en œuvre de ces outils reste cependant pénalisée aujourd'hui par le **manque de données prédictives sur la disponibilité de la ressource et les capacités de stockage d'eau à l'échelle du bassin versant** – ceci rejoint la nécessité déjà évoquée de régionalisation des modèles. La question de **l'horizon prospectif** est également posée : la plupart des modèles s'intéressent aux tendances pour 2050 ou 2100 tandis que le secteur agricole cherche des réponses opérationnelles à court terme (2020 ou 2030), pour évaluer par exemple l'évolution des volumes prélevables sur chaque ZRE ou anticiper l'apparition de nouvelles ZRE.

Michel Bramard – Onema

Le second axe d'adaptation de la filière concerne la réduction de ses besoins en eau. Celle-ci pourra se faire en privilégiant les variétés précoces et à cycle court, ou en réduisant la croissance aérienne au profit de la croissance souterraine. Du point de vue agronomique, il apparaît nécessaire de repenser les itinéraires techniques pour optimiser l'utilisation de l'eau et de diversifier les cultures, notamment en combinant cultures irriguées et non irriguées, dans un double objectif d'intérêt écologique et de protection de l'exploitant. Ces mesures nécessitent à la fois **l'intensification de la recherche agronomique** et le développement **d'outils d'accompagnement**, de conseil et de formation pour l'adaptation pérenne des pratiques des exploitants.

Madeleine Carrouée – Onema

Enfin, de nouveaux besoins apparaissent en termes **d'outils d'aide à la décision publique** pour évaluer les impacts socio-économiques de ces alternatives, qui impliquent l'évolution de l'organisation des filières et le développement de nouveaux marchés.

Opérateurs de services : efficacité aquatique et mode de financement

Besoin fondamental, l'approvisionnement en eau potable de la population constitue, à l'heure d'une raréfaction annoncée de la ressource, un enjeu sociétal prioritaire. Avec environ 24% de part d'eau consommée en France, elle représente en quantité le second usage de l'eau derrière l'agriculture. À l'heure actuelle, le pays connaît une situation relativement favorable pour son alimentation en eau potable. Depuis 1976, de nombreux projets d'interconnexion ou de sécurisation d'accès à la ressource ont été menés. Depuis 1987, en France, plus de 5,3 milliards d'euros ont été investis sur les « déséquilibres de long terme » (260 millions/an), financés à 30% environ par les agences de l'eau (Rapport Changement climatique, adaptation et coûts associés, DGEC-MEEDM 2009).

Les projections suscitent néanmoins de nombreuses interrogations pour les décennies à venir. Le changement climatique se traduira par de plus fréquentes pénuries, même en l'absence d'une hausse de la demande. La dégradation de la qualité de la ressource, accentuée par le changement climatique (l'augmentation de la température de l'eau pourrait entraîner un développement de cyanobactéries par exemple), réduirait encore l'offre d'eau douce utilisable à des fins domestiques et accroîtrait les coûts de potabilisation.

Pour les opérateurs de service (Jaskulké, Séminaire Paris 2009), la première nécessité est, sans surprise, de disposer de données fiables sur les conséquences du réchauffement sur le cycle de l'eau, utilisables du point de vue opérationnel, c'est-à-dire présentant une résolution spatiale suffisante et basées sur des scénarios lisibles à moyen et long terme, mais aussi à court terme.

C'est sur la base de ces projections que l'opérateur pourra décider efficacement des mesures à adopter pour maîtriser les flux d'eau et gagner en **efficacité aquatique**. Dans cette optique, il sera nécessaire de poursuivre et d'intensifier les efforts engagés pour la recherche de fuites et l'interconnexion, et d'optimiser le couplage eau/énergie. Dans certaines conditions locales de fort stress hydrique, l'approvisionnement en eau conduira également à mettre en balance les ressources traditionnelles (eaux de surface et eaux souterraines) avec l'intérêt de développer des ressources alternatives (réutilisation ou recyclage d'eaux usées à un niveau adapté, d'eaux de pluies, recharge d'aquifère, dessalement, etc.).

Ces perspectives, qui pourraient se traduire par des conflits d'usage et d'aménagement du territoire, posent également la question du **mode de financement des services et de l'efficacité aquatique**. Il apparaît dès lors souhaitable d'envisager **l'intégration de la valeur eau dans le produit intérieur brut** (Jaskulké, Séminaire Paris 2009).

Plus globalement, la prise de décision impliquerait une **hiérarchi-**

sation des risques socio-économiques, entre pénurie d'eau, d'énergie, risque d'aléas climatiques, menaces sur la biodiversité, etc. La réflexion sur ces problématiques n'est encore qu'émergente (Jaskulké, Séminaire Paris 2009).

Gestionnaires : l'exemple du Parc naturel régional de Camargue

La démarche initiée par le Parc naturel régional de Camargue fournit un aperçu représentatif des questionnements soulevés par les gestionnaires de parcs naturels à forte dimension aquatique. Délimité par le delta du Rhône, ce territoire de 121 300 hectares dont 86 300 terrestres, très anthropisé et fortement dépendant des actes de gestion et d'aménagement, abrite une biodiversité remarquable.

Outre les évolutions constatées sur la température du Rhône (voir section 1.2), le delta est confronté à la hausse du niveau de la mer, au rythme moyen de 2 mm par an. Ces changements, couplés aux autres pressions anthropiques locales, entraînent une modification de paramètres déterminants tels que la salinité ou le niveau d'eau (Stéphane Marche, PNR de Camargue, Séminaire Paris 2009). Ces phénomènes se traduisent par des disparitions d'habitats (dunes et arrière-dunes). En parallèle, de nouvelles espèces (ibis sacré, poule sultane) apparaissent et des changements dans le comportement d'autres espèces sont observés. Ainsi le flamant rose semble rester de plus en plus souvent présent en hiver, ce qui préfigure un conflit avec la filière rizicole, sur laquelle cette espèce exerce des prélèvements importants.

Ce contexte conduit (Marche, Séminaire Paris 2009) à une rupture des consensus qui existaient historiquement entre les différents acteurs humains du territoire (agriculteurs, pêcheurs, gestionnaires du Parc). En conséquence, le Parc a initié une démarche stratégique issue des acteurs locaux, la Charte 2011-2023, dont l'objectif est d'intégrer le changement climatique dans un projet de territoire.

Les facteurs-clés de réussite de cette démarche, généralisables à d'autres projets menés ailleurs sur le territoire national, reposent d'abord sur une meilleure identification et compréhension des phénomènes à l'œuvre, ce qui implique de **disposer de réseaux de suivi pérennes** et **d'échanges réguliers avec le monde de la recherche**. Pour être réalisables, les projets devront être validés techniquement et politiquement, et dotés de **moyens administratifs et financiers**. Ils devront enfin s'appuyer sur un partage régulier du diagnostic avec les acteurs locaux.

Pêcheurs : des témoins privilégiés

Acteurs de l'eau particulièrement sensibles aux évolutions de l'hydrologie et de la biodiversité aquatique, les pêcheurs sont des témoins privilégiés des effets du changement global et agissent souvent comme des lanceurs d'alerte. La Fédération Nationale de la Pêche en France (FNPF) rapporte ainsi (Bernard Breton, Séminaire Paris 2009) des modifications constatées d'aires de répartition de poissons (voir section 1.3) et des étiages de plus en plus sévères, nécessitant régulièrement le sauvetage manuel des populations piscicoles. La Fédération par-

tage les inquiétudes exprimées sur le devenir des espèces à spectre thermique réduit (ombre) et des migrateurs, ainsi que sur l'évolution à terme des espèces exotiques ou invasives – le cormoran est à ce titre perçu comme particulièrement nuisible du fait de l'importante prédation qu'il exerce sur les populations de poissons.

La question du caractère nocif ou bénéfique du **brassage génétique** engendré par les rempoissonnements de poissons de souche allochtone (qui entraînent une perte potentielle de biodiversité en « abâtardissant » les souches autochtones), donne lieu de longue date à un débat passionné mais se heurte à un **manque persistant d'études scientifiques** solides.

Sur le volet réglementaire, on constate la **difficulté de mise en œuvre des textes nationaux**, du fait de moyens de contrôle limités et de la subsistance de nombreuses situations locales particulières – réglementations en période d'étiage par exemple.

Enfin, la Fédération déplore une évolution des pratiques de pêche jugée calamiteuse, la remise à l'eau systématique des prises se substituant à une réelle gestion piscicole.

Besoins exprimés par les acteurs de l'eau

Représentant	Agriculture	Opérateurs de services	Parcs naturels régionaux	Pêcheurs
Connaissances scientifiques	• Scénarios fiables à l'échelle du bassin versant • Horizon prospectif 2020 – 2030 • Recherche ciblée en agronomie	• Prédictions en débit de résolution suffisante • Horizon prospectif 2020 – 2030	• Compréhension des phénomènes à l'œuvre • Évolution des aires de répartition des espèces et des comportements spécifiques	• Évolution des aires de répartition des poissons et des comportements spécifiques • Impact du brassage génétique
Besoins techniques	• Données sur l'apparition de zones de répartition des eaux (ZRE) ou l'évolution des volumes prélevables	• Utilisation des ressources en eau alternatives (récupération des eaux de pluie, etc.) • Optimisation du couplage eau/énergie	• Échanges réguliers avec la recherche • Réseaux de suivi pérennes	• Harmonisation législative
Organisation	• Outils d'accompagnement pour les exploitants • Conseil et formation		• Intégration du changement climatique dans une charte de territoire	
Financement économique		• Mode de financement des services et de l'efficacité aquatique	• Moyens économiques et financiers	
Sociopolitique	• Outils d'aide à la décision publique • Sensibilisation du public	• Intégration de la valeur eau dans le PIB • Hiérarchisation des risques sociétaux • Sensibilisation du public		

2.2 – Milieux aquatiques, usages de l'eau et société

Non exhaustives par nature, ces réponses des acteurs de l'eau constituent la base d'un dialogue appelé à être poursuivi plus avant pour chacune des parties prenantes. Ceci a permis toutefois de montrer que tous les types d'acteurs de l'eau, constatant le changement climatique sous leur angle respectif, ont initié une démarche d'adaptation, laquelle fait émerger un grand nombre de besoins et d'interrogations nouvelles. Celles-ci appellent deux types de réponses : scientifiques et techniques d'une part, socio-économiques d'autre part.
Parmi les besoins en connaissances scientifiques, se retrouve bien sûr la préoccupation sur la pertinence des scénarios utilisés et la nécessité de prévisions utilisables à court terme, au niveau local – évolution des capacités de prélèvement et de stockage pour l'irrigation par exemple. Ce besoin implique de compléter les données d'observation en développant notamment les réseaux de suivi. L'agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse (Pelte, Séminaire Paris 2009) pointe ainsi la nécessité d'investir sur la donnée, et plaide pour la création d'un observatoire national.

Des besoins en connaissances spécifiques sont par ailleurs évoqués : recherches ciblées en agronomie, études sur l'impact du brassage génétique, projections sur l'impact de l'hivernage des flamants roses sur la riziculture...
Les questions d'ordre socio-économiques reflètent pour leur part trois types de besoins : besoins en organisation, besoins en moyens et en financement, besoins en sensibilisation de la population.

Un constat partagé par les différents acteurs et observateurs est celui du risque de survenue ou d'aggravation de **conflits d'usage de l'eau**, dans un contexte de besoins accrus et de disponibilité moindre de la ressource. Une hiérarchisation des risques socio-économiques – pénurie d'eau ou d'énergie, risque d'aléas climatiques, menaces sur la biodiversité, etc. est nécessaire (Jaskulké, Séminaire Paris 2009). Les conflits pourraient apparaître entre les différents usages de l'eau au niveau global (irrigation ou fourniture en eau potable) ou dans un contexte local (agriculteurs et pêcheurs en Camargue).

Dans tous les cas, les arbitrages engagés pour la résolution de ces conflits devront intégrer la préoccupation de **préserver les écosystèmes**. Un rapport approfondi du Centre d'Analyse Stratégique (CAS, avril 2009), consacré à une « Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes », s'est attaché à inscrire cette nécessité dans une perspective économique. Il rappelle notamment (p. 36) : « *La biodiversité et les écosystèmes au sein desquels elle s'exprime fournissent un grand nombre des biens et services qui soutiennent la vie humaine* ». En ligne avec les conclusions du *Millennium Ecosystem Assessment* de 2005, il distingue trois types de services procurés par les

écosystèmes : services de prélèvement (nourriture, eau, ressources...), services de régulation (du climat, des maladies...), et services culturels (pédagogie, tourisme, pêche sportive...).

Dans ce contexte de risque accru de conflits d'usage, la préservation des milieux aquatiques apparaît comme la condition première de disponibilité d'une ressource de qualité. La sensibilisation à cet impératif des acteurs de terrain et, au-delà, du grand public, constituent un enjeu majeur pour préparer une évolution des pratiques sociétales : évolution des productions agricoles, attitude économe vis-à-vis de la consommation en eau et en énergie, pratiques responsables pour le tourisme et la pêche sportive. Cet enjeu de sensibilisation se traduit par un **besoin croissant de dialogue entre le monde scientifique et la société** dans le but de décloisonner les connaissances et d'objectiver la perception collective du risque. L'information et la vulgarisation scientifique font déjà partie des missions d'organismes comme l'Onema ou les Agences de l'eau. De réels problèmes d'appropriation des connaissances par le grand public subsistent pourtant à l'échelle nationale, comme en témoigne le très faible taux de retour (1%) de la consultation sur la Directive Cadre sur l'Eau (DCE). Il apparaît donc nécessaire de comprendre (Henri Décamps, membre de l'Académie des Sciences, Séminaire Paris 2009), par le prisme des sciences humaines et sociales, les mécanismes de cette appropriation.

Madeleine Carrouée – Onema

3 Quelles stratégies de gestion

pour l'adaptation ?

Hervé Jacquot – Onema

Depuis le Sommet de la Terre, organisé en 1992 à Rio de Janeiro, suivi en 2002 du sommet du développement durable de Johannesburg, la biodiversité s'est imposée comme une préoccupation croissante de la communauté internationale qui s'est concrétisée par la convention sur la diversité biologique. Cette préoccupation s'est traduite à l'échelle européenne, dès 1995, avec la définition de la Stratégie paneuropéenne sur la diversité biologique et paysagère (actualisée en 2006), et en France avec la Stratégie française de la biodiversité (2004) et le Grenelle de l'Environnement de 2007.

Par ailleurs, plusieurs lois majeures ont posé les bases du système de gestion de l'eau français. La Loi sur l'eau de 1964, qui a instauré l'approche par bassins versants géographiques, est également à l'origine d'une organisation institutionnelle décentralisée avec la création des **agences de l'eau**. La Loi sur l'eau de 1992, qui définit l'eau comme un patrimoine commun de la nation, relance la planification décentralisée par la mise en place de deux outils de gestion : le SDAGE (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux) au niveau des grands bassins hydrauliques, qui se décline aux niveaux locaux au travers des SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux).
À l'échelle européenne, la Directive Cadre Européenne sur l'Eau du 23 octobre 2000 a institué les principes d'une politique communautaire de l'eau, en s'inspirant notamment de l'approche française par bassin hydrographique. Elle a été traduite en droit français par la loi du 21 avril 2004, qui prévoit, entre autre, la révision des SDAGE.

En 2009, la commission européenne a publié un livre blanc sur l'adaptation au changement climatique exposant les mesures nécessaires pour renforcer la capacité de résilience de l'Union face au changement climatique.

La prise en compte des impacts du changement climatique sur l'eau et la notion d'adaptation n'apparaissent cependant en France qu'avec la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA) du 30 décembre 2006.

Après un focus sur certains des dispositifs existants (DCE et LEMA, projet Trame Verte Trame Bleue), cette troisième partie s'attache à donner des éléments de prospective pour une meilleure prise en compte par les politiques publiques des impacts du changement climatique sur les milieux aquatiques, de l'adaptation et des coûts associés, sur la base des contributions au Séminaire Paris 2009.
Elle s'achève par un retour à un horizon scientifique, en tentant une recommandation de politique scientifique dans une optique d'aide à la décision.

3.1 – Dispositifs existants

Appelée à jouer un rôle stratégique et fondateur en matière de politique de l'eau, la DCE définit un cadre pour la gestion et la protection des eaux par grand bassin hydrographique au plan européen. Elle fixe des objectifs ambitieux pour la préservation et la restauration de l'état des eaux superficielles (eaux douces et eaux côtières) et pour les eaux souterraines.

Elle demande en particulier de veiller à la non-dégradation de la qualité des eaux et **d'atteindre d'ici 2015 un bon état général** tant pour les eaux souterraines que pour les eaux superficielles, y compris les eaux côtières. Un objectif adapté (le bon potentiel écologique) peut par ailleurs être retenu pour des masses d'eau artificielles ou fortement modifiées, notamment en raison d'activités économiques. Aucune prise en compte des impacts du changement climatique n'est cependant prévue dans la version actuelle de la DCE. C'est le cas, en revanche, dans le cadre la **Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques** (LEMA), qui répond à une triple ambition : mettre en place les outils nécessaires pour atteindre les objectifs de la DCE, améliorer le service public de l'eau et de l'assainissement dans une optique d'accès à l'eau pour tous, et enfin moderniser l'organisation de la pêche en eau douce. Issue de plusieurs années de préparation, composée de 102 articles, elle affirme fortement la volonté de protéger les milieux aquatiques et leur biodiversité. Elle aboutit à une **refonte de la gouvernance de l'eau** en instituant, en particulier, la création de l'ONEMA et de la FNPF.

La DCE institue plusieurs grands principes, parmi lesquels :

- **La gestion par bassins versants**, sur le modèle français, en assurant la cohérence des délimitations pour les bassins internationaux.
- **Une analyse économique** : la directive demande de faire état des modalités de tarification de l'eau et de l'application du principe de récupération des coûts des services d'eau, y compris des coûts environnementaux, compte tenu de l'application du principe pollueur payeur.
- **La consultation du public** : Dans une volonté de transparence, la directive demande d'assurer une participation active des acteurs de l'eau et du public à l'élaboration du plan de gestion, en prévoyant en particulier des consultations du public.

Trame verte et bleue : un projet majeur pour la continuité écologique en France

Le concept de trame verte existe en France depuis les années 80, désignant un ensemble de réseaux plus ou moins connectés d'espaces verts, souvent structurés autour de chemins de promenades ou randonnées. Il prend une véritable ampleur écologique avec les lois Grenelle I et II, qui prévoient la création d'une Trame Verte et Bleue d'ici fin 2012 à l'échelle du territoire français.

Partant du constat de la fragmentation des milieux naturels dans l'Hexagone du fait de l'anthropisation (aménagements, réseau de

transport), le projet se donne pour finalité de préserver et restaurer les continuités écologiques. Cette ambition se décompose en plusieurs objectifs :

- Identifier et relier les espaces importants pour la **préservation de la biodiversité** par des corridors écologiques ;
- Atteindre ou conserver le bon état écologique ou le bon potentiel des eaux de surface ;
- Prendre en compte la biologie des espèces migratrices ;
- Faciliter les échanges génétiques nécessaires à la survie des espèces sauvages ;
- Améliorer la qualité et la diversité des paysages ;
- Permettre le déplacement des aires de répartition des espèces sauvages et des habitats naturels **dans le contexte du changement climatique**.

Il constitue ainsi un outil opérationnel contribuant à la mise en œuvre des dispositions de la DCE et de la LEMA relatives à la protection des milieux naturels.

Le projet de Trame Verte et Bleue repose sur la complémentarité entre une composante verte, composée de zones sous couvert environnemental permanent reliées par des corridors écologiques, et une composante bleue composée de cours d'eau, de sections de cours d'eau, de canaux et de zones humides importants pour la protection de la biodiversité. Dans le contexte du changement climatique, l'élaboration du projet vise à **favoriser l'adaptation des espèces** (Salles, Séminaire Paris 2009), notamment en préparant la réorganisation spatiale de leurs aires de répartition, tout en maintenant la diversité et les équilibres des écosystèmes, qui seront ainsi mieux à même de résister aux perturbations.

La traduction du projet sur le terrain repose sur le principe d'une co-construction entre les projets des collectivités locales, des schémas régionaux de cohérence écologique établis dans une logique de démocratie participative, et enfin des orientations nationales. Ce mode d'élaboration concertée répond à la volonté **d'associer étroitement les acteurs du territoire** (exprimée à la section 2.2) à la décision sur l'adaptation au changement climatique, et constitue de fait un moyen de **sensibilisation du public**. Dans la même optique, le comité opérationnel Trame Verte Trame Bleue, qui s'est réuni fin 2009, aura notamment une mission de communication et d'information, en lien avec d'autres réflexions menées en France, comme le projet « nature en ville ».

3.2 – Vers une prise en compte du changement climatique dans les politiques publiques de l'eau

À l'échelle européenne (Davy, Séminaire Paris 2009), la prise en compte des impacts du changement climatique sur la gestion de l'eau a franchi une première étape-clé avec la création d'un groupe

de travail chargé de produire un **guide « DCE et changement climatique »**, soumis à l'approbation des directeurs de l'eau européens en novembre 2009[1].
S'appuyant sur les travaux de groupes existants – notamment sur les thèmes de la sécheresse, les inondations et de l'état écologique – pour préciser les impacts du changement climatique sur la DCE, le groupe de travail s'attache à anticiper les changements à l'échelle des masses d'eau ; à comprendre l'importance et les causes du changement au niveau de sites de référence ; à évaluer les influences directes ou indirectes du changement climatique sur les pressions ; à préciser les **évolutions de l'état de référence et des bioindicateurs associés**, et enfin à organiser le monitoring des zones identifiées comme les plus sensibles au changement climatique. Pour chacun de ces objectifs, le guide propose des **principes directeurs à l'intention des gestionnaires de bassins**.

La mise en œuvre des dispositions est planifiée en cohérence avec les étapes de mise en œuvre de la DCE. Sauf justification réelle, le changement climatique ne pourra servir de dérogation aux objectifs de la DCE.
Le document a reçu les commentaires des pays membres et des autres groupes de la Stratégie de mise en œuvre commune de la DCE jusqu'à août dernier. Un séminaire européen sur le thème « DCE et changement climatique » a été organisé à Paris fin octobre 2009.

Estimation de coûts associés : limites des connaissances actuelles

En France, un Groupe interministériel a travaillé de début 2007 à octobre 2009 sur l'ambitieuse thématique « Impacts du changement climatique, adaptation et coûts associés en France ». Issu de la Stratégie nationale d'adaptation, ce groupe se base sur les scénarios A2 et B2 du GIEC et envisage trois horizons prospectifs : 2030, 2050 et 2100. Dans la perspective du **Plan national d'adaptation** de 2011, il aborde de manière sectorielle les impacts du changement climatique sur divers domaines, parmi lesquels l'agriculture, la forêt, la santé, l'énergie, les infrastructures de transport, ou encore le tourisme, avec une prise en compte transverse des impacts sur la biodiversité, l'eau et les territoires.

Disponibles sur le site de l'ONERC (http://www.onerc.gouv.fr), les rapports de ce groupe constituent une somme considérable de données d'observation, de statistiques, d'analyses et de questionnements. Dans une optique de prise de décision sur l'adaptation au changement climatique, ils constituent (Berthault, Séminaire Paris 2009) un outil précieux pour la sensibilisation des décideurs, l'argumentation et l'arbitrage.
Cependant, force est de constater que du fait de l'intérêt encore récent porté à ces questions, les recommandations sociopolitiques issues de ces travaux restent souvent d'ordre général et peu opérationnelles, à l'exception notable du domaine forestier. La littérature, no-

1 – Le guide a été adopté par les directeurs de l'eau européens lors de la dernière réunion en Suède les 30 novembre et 1er décembre 2009.

tamment dans le cas de l'eau, reste davantage axée sur les aspects scientifiques que sur les mesures d'adaptation sociales et politiques. En particulier, **la problématique des coûts associés à l'adaptation apparaît aujourd'hui difficile à aborder. Cette difficulté, qui reflète le déficit d'approche quantitative des services rendus par les milieux aquatiques**, provient du caractère multifactoriel des impacts du changement climatique et des autres composantes du changement global. Ces constats débouchent sur un consensus quant à la **nécessité de renforcer la gouvernance** sur les questions liées au changement climatique.

Adaptation et économie : quel rôle pour le secteur privé ?

L'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE), dont les travaux sur l'adaptation ont démarré en 2002, propose quelques pistes (Macher-Poitras, Séminaire Paris 2009) pour le traitement économique de l'adaptation au changement climatique dans le secteur de l'eau. Définissant l'adaptation comme « l'ensemble des actions menées pour réduire les impacts négatifs et tirer profit des impacts positifs du changement climatique », l'OCDE dresse un état des lieux par secteur des estimations des coûts/bénéfices de l'adaptation. Elle fait le constat que celles-ci se limitent pour l'heure, dans le secteur de l'eau, à des études de cas particulières – alors qu'elles sont assez abouties par exemple dans le cas de l'agriculture et surtout des zones côtières, les études disponibles couvrant la quasi-totalité des littoraux.

La prospective menée par l'OCDE sur l'adaptation de la gestion de l'eau en France plaide pour une **action complémentaire des autorités publiques et du secteur privé**. Dans cette vision (Macher-Poitras, Séminaire Paris 2009), les pouvoirs publics, considérant l'adaptation comme un bien public (via une infrastructure dédiée), s'attacheraient à créer des mesures favorisant l'adaptation. Le secteur privé engagerait, quant à lui sa capacité financière et opérationnelle ainsi que ses ressources pour la recherche et le développement. Dans le cas de la France, ce rôle serait facilité par la longue tradition du secteur privé dans la distribution d'eau et les services municipaux, engageant des acteurs de premier plan tels que Suez, Veolia ou Saur. En 2006, les investissements dans le domaine de l'eau et de l'assainissement se sont montés à 5,6 milliards d'euros, dont 713 millions par le privé.

Les **Partenariats Public-Privé** pourraient dans cette optique constituer un instrument économique utile, à disposition des pouvoirs publics (Macher-Poitras, Séminaire Paris 2009). Cette possibilité apparaît cependant conditionnée par la capacité des partenaires privés à se financer à un coût raisonnable dans un contexte de risque accru, à gagner en efficacité (par une réduction des coûts de maintenance par exemple), et à tirer pleinement parti de l'innovation technologique.

Stratégie d'adaptation ou stratégie adaptative ?

Les mesures initiées pour la prise en compte de l'adaptation par la gestion, encore en cours pour la plupart, témoignent d'une **prise de**

conscience récente mais puissante des impacts du changement climatique par les politiques publiques. Gageons que leurs apports (Guide « DCE et changement climatique », Rapports du groupe interministériel français) permettront d'éclairer la décision lors des prochaines échéances – à commencer par le Plan national d'adaptation de 2011.

Les limites constatées sur des points cruciaux tels que l'estimation des coûts associés à l'adaptation ou la monétarisation des services de l'eau paraissent toutefois inhérentes à la notion même d'adaptation, qui suppose de lier le temps de la décision – constituée d'événements ponctuels – au temps du changement climatique, lequel repose sur l'évolution continue de phénomènes complexes. Par exemple, faut-il tout mettre en œuvre dès aujourd'hui pour maintenir la présence d'une espèce piscicole (ou d'une culture) sur un bassin versant particulier à l'horizon 2050, alors que la majorité des scénarios présente sa disparition comme localement inévitable ?
Cette difficulté conduit à questionner, du point de vue sémantique (Millier, Séminaire Paris 2009) la pertinence du vocable de « stratégie d'adaptation ». Plusieurs intervenants (Astier-Cohu, Berthault) ont ainsi fait référence au concept de **« stratégie adaptative »**. Cette expression semble pertinente pour rendre compte du caractère nécessairement itératif, basé sur l'affinement continu des prévisions au regard des évolutions constatées et du traitement politique du changement climatique.

Franck Cichy – Onema

3.3 – Quelles perspectives scientifiques pour alimenter la décision ?

Les mesures opérationnelles présentées dans la section qui précède (prise en compte du changement climatique dans la DCE à l'échelle européenne, Plan national d'adaptation en France) doivent être soutenues par des actions de recherche adaptées, permettant de compléter les connaissances disponibles. Les attentes d'ordre technique des acteurs, les besoins exprimés au cours du séminaire (recensés tout au long de ce document) contribuent à préciser les contours de cette politique scientifique.

Parmi les objectifs globaux figure celui **d'affiner progressivement le faisceau de scénarios climatiques et d'améliorer la pertinence physique des modèles**. Ce point implique la prise en compte toujours plus complète des **mécanismes croisés** qui influent sur le climat, mais aussi la **régionalisation** des modèles dans une perspective d'utilisation opérationnelle des résultats. Dans la même logique, les **horizons prospectifs** envisagés devront permettre l'anticipation des évolutions à moyen et long terme, mais aussi la prévision localisée à court terme (2020 ou 2030). Ces projections devront en outre s'appuyer sur **des données d'observation étendues et adaptées**.
Enfin, dans le contexte du changement global, la stratégie adaptative des différents acteurs de l'eau devra **s'appuyer** sur des recherches spécifiques dans des **domaines variés – agronomie, génétique, énergétique, mais aussi sciences humaines**.

Ces objectifs se retrouvent à court terme, sur plusieurs **actions concrètes** à l'échelle française. Citons notamment l'atelier de réflexion prospective ADAGE (Adaptation au changement climatique de l'agriculture et des écosystèmes anthropisés), lancé en février 2009 par l'Agence Nationale de la Recherche, qui a pour objectif d'identifier les recherches nécessaires pour adapter au changement climatique l'agriculture et les écosystèmes gérés par l'homme, tels que les forêts, les prairies et les milieux aquatiques.

Le Conseil scientifique animé par l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques met par ailleurs en place un groupe de travail sur le changement climatique, dans un esprit d'orientation de la recherche vers les besoins opérationnels, notamment sur la base des travaux présentés au cours du Séminaire Paris 2009. Ces travaux ont bénéficié également au conseil scientifique du programme GICC, pour la préparation de son appel à propositions de recherche 2010.

AEE, 2006. *The changing faces of Europe's coastal areas (Évolutions des zones côtières de l'Europe)*. Rapport de l'AEE n° 6/2006.

AEE, 2008. *Impacts of Europe's changing climate — 2008 indicator-based assessment (Impacts du changement climatique en Europe : l'évaluation 2008 basée sur des indicateurs)*. Rapport de l'AEE n° 4/2008.

AEE, 2009. *Water resources across Europe - Confronting water scarcity and drought*. Report 2/2009, 60 pp., European Environment Agency, Coppenhaguen.

AEE, 2008, *Rapport 2008 énergie et environnement*. Rapport de l'AEE, n° 6/2008.

Amigues J. P., Ebaeke D. P., Itier B., Lemaire G., Seguin B., Tardieu F., Thomas A., 2006. *Sécheresse et agriculture. Adapter l'agriculture à un risque accru de manque d'eau*. Rapport de l'expertise scientifique collective, INRA, Paris.

Boé J., Terray L., Habets F., Martin E., 2006. A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling, *J. Geophys. Res.*, 111, D23106.

Boé J., 2007. *Changement global et cycle hydrologique : une étude de régionalisation sur la France*, Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III – Paul Sabatier, 256 pp + annexes.

Boé J., Terray L., Habets F., Martin, E., 2007. Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. *International Journal of Climatology*, 7 (12), 1643–1655. URL http://dx.doi.org/10.1002/joc.1602.

Boé J., Terray L., 2008. Uncertainties in summer evapotranspiration changes over Europe and implications for regional climate change. *Geophys. Res. Lett.*

Centre d'analyse statégique, 2009. Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes : contributions à la décision publique. *La documentation française* - Paris, juin 2009. ISBN : 978-2-11-007791-2.

Coste M., Ector L., 2006. Diatomées invasives exotiques ou rares en France: principales observations. *Systematics and Geography of Plants*. Pt 70 : 373-400.

De Groot R.S., 1992. Functions of Nature: Evaluation of Nature in Environmental Planning, Management and Decision Making. *Wolters-Noordhoff*, Groningen.

Bibliographie

De Groot R.S., Wilson M. and Boumans R., 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* Volume 41, Issue 3, 393-408.

De Toni A., Touron-Bodilis A., Wallet F., 2009. Effet du changement climatique sur les micro-organismes aquatiques pathogènes : quelques exemples. *Environnement, Risques & Santé*. Volume 8, Numéro 4, 311-21. DOI : 10.1684/ers.2009.0274.

Ducharne A., Habets F., Déqué M., Evaux L., Hachour A., Lepaillier A., Lepelletier T., Martin E., Oudin L., Pagé C., Ribstein P., Sauquet E., Thiéry D., Terray L., Viennot P., Boé J., Bourqui M., Crespi O., Gascoin S., Rieu J., 2008. *Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme*. Rapport final du projet Rexhyss financé dans le cadre du programme GICC.

Ducharne A., Gascoin S., Ribstein P., Carli M., Habets F., 2009. Adaptation of a catchment-based land surface model to the hydrogeological setting of the Somme River basin (France). *Journal of Hydrology* Volume 368, Issues 1-4, 105-116.

Ducharne A., Baubion C., Beaudoin N., Benoit M., Billen G., Brisson N., Garnier J., Kieken H., Lebonvallet S., Ledoux E., Mary B., Mignolet C., Poux X., Sauboua E., Schott C., Théry S. and Viennot P., 2007. Long term prospective of the Seine river system: Confronting climatic and direct anthropogenic changes. *Science of the Total Environment*, 375, 292-311, DOI : 10.1016/j.scitotenv.2006.12.011.

GIEC, 2001 : *Third Assessment Report - Climate Change 2001*, GIEC, Genève, Suisse.

GIEC, 2007 : *Bilan 2007 des changements climatiques*. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), Genève, Suisse, 103 pages.

Gosse Ph., Gailhard J., Hendrickx F., 2008. Analyse de la température de la Loire moyenne en été sur la période 1949 à 2003. Analysis of the mid-Loire temperature in summer (1949-2003) *Hydroécol. Appl.* 16 233-274. DOI : 10.1051/hydro/2009009.

Gras R., 1969. Simulation du comportement thermique d'une rivière à partir des données fournies par un réseau classique d'observations météorologiques. *IAHR Congress*, Kyoto. Article A53, Vol. 1, 491-502.

Gras R., 1970. *Estimation des éléments du bilan radiatif pour le calcul des températures naturelles d'un secteur de cours d'eau*. Rapport EDF HF/041/70/n° 26, Électricité de France, Paris.

Gugger M., Lenoir S., Berger C., Ledreux A., Druart J. C., Humbert J. F., Guette C., Bernard C., 2005. First report in a river in France of the benthic cyanobacterium Phormidium favosum producing anatoxin-a associated with dog neurotoxicosis. *Toxicon* Volume 45, Issue 7, 919-928.

Itier B., Seguin B., 2007 - La sécheresse : caractérisation et occurrence, en lien avec le climat et l'hydrologie. *Fourrages* (Versailles) - cat.inist.fr.

Itier B., 2008. Agriculture et sécheresse : le contexte et les enjeux. *Innovations Agronomiques* 2, 1-8.

Johnston N. M., Clarke A, 1999. Scaling of metabolic rate with body mass and temperature in teleost fish. *Journal of Animal Ecology*, 68: 893-905.

Khalanski M. *et al*., 2008 Étude thermique globale du Rhône - Impacts hydrobiologiques des échauffements cumulés. *Hydroécol. Appl.* Tome 16, 53-108.

Lassalle G., Béguer M., Beaulaton L., Rochard E., 2008. Diadromous fish conservation plans need to consider global warming issues: An approach using biogeographical models. *Biological Conservation* Volume 141, Issue 4, 1105-1118.

MEEDDM – ONERC, 2009. *Rapport Changement climatique, adaptation et coûts associés*, DGEC-MEEDM.

Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-being : Synthesis*. Island Press, Washington, DC.

Moatar F., Meybeck M., Poirel A., 2009. Variabilité journalière de la qualité des rivières et son incidence sur la surveillance a long terme : exemple de la Loire moyenne. *La Houille Blanche* (4) 91-99. DOI : 10.1051/lhb/2009050.

Oberdorff T., Pont D., Hugueny B., Porcher J.P., 2002. Development and validation of a fish-based index (FBI) for the assessment of river health in France. *Freshwater Biology* 47, 1720–1734.

Poirel A., Lauters F., Desaint B., 2008. 1977-2006 : Trente années de mesures des températures de l'eau dans le Bassin du Rhône. *Hydroécol. Appl.* 16 191-213 (2008), DOI : 10.1051/hydro/2009002.

Pont D., Hugueny B., Rogers C., 2009. Development of a fish-based index for the assessment of river health in Europe: the European Fish Index. *Fisheries Management and Ecology*, Volume 14 Issue 6, 427-439.

Pont D., Hugueny B., Beier U., Goffaux D., Melcher A., Noble R., Rogers C., Roset N., Schmutz S., 2006. Assessing river biotic condition at the continental scale : a European approach using functional metrics and fish assemblages. *Journal of Applied Ecology* 43, 70–80.

Pont D., 2010. *Changement global et stratégies démographiques des populations piscicoles.* Rapport final en cours de rédaction dans le cadre du programme GICC.

Webographie

IPSL : http://www.ipsl.fr/fr/Organisation/Les-structures-federatives/Les-poles-scientifiques/Pole-de-modelisation-du-climat

AEE : http://www.eea.europa.eu/fr

IPCC / GIEC : http://www.ipcc.ch

CNRM - MétéoFrance : http://www.cnrm.meteo.fr

MEEDDM : http://www.developpement-durable.gouv.fr

Office International de l'Eau OIEAU : http://www.oieau.fr

Le portail EauFrance : http://www.eaufrance.fr/spip.php?rubrique187&id_article=449

En savoir plus sur la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques Lema :

Texte complet sur legifrance.gouv.fr : http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000649171&dateTexte=

Maquette et création graphique :
Inzemoon – 06 75 24 19 30

Achevé d'imprimé en février 2010
sur papier issu de fôrets gérées
durablement par : Promoprint – Paris

Imprimé en France