

Intégration du changement climatique dans les prochains SDAGE et programmes de mesures associés

Synthèse de ce qu'il faut retenir

Les deux points fondamentaux à retenir :

- Inscrire à minima des mesures d'adaptation « sans regret » ou à « faible regret » ;
- « Préparer le terrain » de sorte que le cycle suivant du SDAGE 2022-2027 puisse voir s'inscrire au besoin des mesures plus contraignantes (c'est à dire possiblement avec regret) d'adaptation au changement climatique, en fonction des enjeux sur le bassin.

Qu'est ce qui doit figurer dans le prochain SDAGE 2016-2021 ?

- La référence à au moins une étude d'impact sur le changement climatique sur le bassin. Dans tous les cas, le projet Explore 2070 peut être cité puisqu'il couvre tout le territoire et ses données peuvent être reprises pour appuyer les points suivants ;
- L'inscription du bassin dans une démarche sur les stratégies d'adaptation possibles à moyen - long terme. Pour démontrer qu'une telle démarche est en cours, il s'agit de s'engager à minima sur la diffusion des principaux résultats de ces études d'impact auprès des acteurs présents sur le bassin (comités de bassin, commissions locales de l'eau, collectivités, etc.). Lorsqu'une telle réflexion existe déjà sur le bassin, s'appuyer sur celle-ci.
- A minima, inscrire dans les documents du SDAGE, une liste des mesures d'adaptation « sans regret » ou à « faible regret ». Il s'agit avant tout de mettre en avant des mesures, souvent inscrites dans le cycle actuel, parfaitement cohérentes avec l'adaptation au changement climatique mais non fléchées comme telles (exemple : lutte contre les fuites dans les réseaux de distribution) ;
- Tous les bassins ne sont pas pareillement exposés aux impacts attendus du changement climatique. Lorsque les études d'impact et le niveau d'avancement d'une démarche sur l'adaptation le permettent, des mesures plus structurantes peuvent être inscrites. Cependant, si les études d'impact sur le bassin ne montrent pas de vulnérabilité fortement accrue à moyen terme, elles peuvent être utilisées pour justifier que les mesures précédentes (sans regret et avec faible regret) suffisent à ce stade ;
- les autres mesures des documents du SDAGE doivent être « climate check » :
 - (1) toutes les mesures qui visent explicitement l'atteinte des objectifs DCE doivent être considérées de fait comme compatibles avec le changement climatique (la Commission rappelle elle-même que la DCE est compatible avec l'adaptation au changement climatique) ;
 - (2) Parmi les mesures ne figurant pas au (1), celles qui visent à réduire les pressions, à améliorer la connaissance du milieu ou à favoriser sa préservation doivent aussi être considérées de fait comme compatibles avec le changement climatique ;
 - (3) Les mesures ne figurant ni au (1), ni au (2), qui apportent des gains à court terme importants et sont « orthogonales » (à priori ni atténuant, ni aggravant) avec les impacts du changement climatique peuvent être justifiées par ces gains.
 - (4) Les mesures restantes (ni (1), ni (2), ni (3)) doivent être soumises au logigramme (page 13) de la Commission pour être considérées comme acceptables ou non.
- Tous les éléments ayant trait à l'adaptation au changement climatique doivent à la fois être présents de façon transversale dans les documents du SDAGE mais également réunis et explicités dans une annexe spécifique. En effet, la visibilité du thème « adaptation au changement climatique » est primordiale pour monter que la France remplit ses obligations.

1) Introduction

La directive-cadre sur l'eau (DCE) établit un cadre légal visant à garantir une utilisation durable de la ressource en eau. Même si le texte de la DCE adopté en 2000 ne fait pas explicitement référence au changement climatique, les travaux menés depuis au niveau européen ont conduit à une prise de conscience progressive et partagée des impacts présents et à venir du changement climatique sur les milieux aquatiques et la ressource en eau.

En 2008, les directeurs de l'eau des différents Etats membres de l'Union européenne ont adopté une position commune sur l'eau et le changement climatique, soulignant l'importance de prendre en compte les impacts à moyen et long termes du changement climatique dans les plans de gestion. Cette position insiste déjà sur la nécessité de vérifier que les mesures retenues dans les plans de gestion ne vont pas à l'encontre des enjeux d'adaptation (notamment en cas de nouvelles infrastructures envisagées) et qu'elles soient suffisamment flexibles et robustes pour être pertinentes sous conditions climatiques changeantes. Cette position commune souligne également que les programmes de mesures associés aux prochains SDAGE (2016-2021 et 2021-2026) devront être rendus résilients vis-à-vis du climat et que la prise en compte du changement climatique pourra se traduire par des efforts d'amélioration des données disponibles, une vérification itérative de la pertinence des mesures retenues compte tenu des évolutions attendues du climat (« climate check »), le lancement de démarches prospectives à même d'intégrer l'ensemble des enjeux de l'eau sous influence climatique (aménagement du territoire, gestion par l'offre ou la demande en eau, etc), l'amélioration de la surveillance pour détecter les impacts du changement climatique.

Le livre blanc sur l'adaptation au changement climatique publié par la Commission européenne en 2009 confirme que les plans de gestion à publier en 2015 devront intégrer tous les aspects de la résilience au changement climatique.

Enfin, plus récemment, la Commission européenne a publié un rapport au Parlement européen et au Conseil sur la mise en œuvre de la DCE et les plans de gestion des bassins hydrographiques (communication du 14 novembre 2012). D'après ce rapport, un certain nombre de plans de gestion contiennent des informations sur les effets du changement climatique, mais la plupart du temps, ces dernières n'influencent pas la sélection des mesures. En ce qui concerne la France et ses SDAGE, le rapport relève qu'il n'y a eu aucune tentative visant à vérifier la compatibilité du programme de mesures au changement climatique. Il regrette que le changement climatique ne soit intégré que de façon très limitée. Des lacunes ont également été décelées en ce qui concerne la disponibilité et la qualité des séries de données. L'une des recommandations finales adressées à la France dans le cadre de ce rapport porte précisément sur le changement climatique : **« La prise en considération des questions liées au changement climatique doit être nettement plus intégrée dans les prochains SDAGE et comprendre une analyse des pressions, un suivi et une vérification des programmes de mesures à la lumière du changement climatique. »**

La présente note a donc pour objectif de donner suite à cette recommandation en explicitant auprès des instances de bassin le cadrage national arrêté pour l'intégration du changement climatique dans les prochains SDAGE et programmes de mesures associés.

Il est en parallèle prévu qu'une note spécifique sur la prise en compte des enjeux liés au changement climatique dans les programmes de surveillance soit prochainement diffusée aux groupes de travail nationaux (eaux de surface, eaux souterraines, eaux littorales) afin que ces enjeux soient dès le départ intégrés aux réflexions sur les modalités de mise à jour courant 2014 des programmes de surveillance.

2) Étude d'impact du changement climatique sur le bassin

Objectif : Évaluer la vulnérabilité du bassin au climat présent et futur

Les résultats les plus récents¹ dans le domaine de l'eau prévoient que des températures plus élevées et des changements dans les conditions météorologiques extrêmes affecteront notamment la fréquence et la distribution des précipitations, la couverture neigeuse, le niveau des mers, les ressources et la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines.

La nature de ces changements et l'importance vitale des enjeux qu'ils affectent font de l'eau le vecteur par lequel le changement climatique impacte les écosystèmes aquatiques et les usages de l'eau.

L'adaptation se décline pour tous les secteurs socio-économiques, à différentes échelles spatiales (de la ville au continent, en passant par les bassins, les zones côtières ou montagneuses, ...) et temporelles (de quelques années à plusieurs décennies) et dans les contextes les plus variés. Elle nécessite d'appréhender une diversité de problématiques concernant la maîtrise des risques, l'adéquation entre certaines activités humaines et la disponibilité en eau, la protection des milieux naturels (ex. milieux aquatiques) ou l'aménagement du territoire (ex. l'adaptation des espaces côtiers face au risque de submersion temporaire).

Ainsi, il est indispensable, avant d'aborder l'adaptation au changement climatique à l'échelle du bassin, d'avoir une bonne connaissance de la diversité spatiale et temporelle du changement climatique et de ses impacts sur ses différents territoires.

L'évaluation des impacts du changement climatique sur les milieux aquatiques et la ressource en eau du bassin constitue donc l'étape préalable indispensable à toute réflexion sur l'intégration du changement climatique dans les prochains SDAGE.

Cette étape doit permettre d'évaluer la vulnérabilité du bassin à un climat changeant et plus précisément de repérer les territoires ou sous-bassins les plus vulnérables et/ou à l'inverse les territoires ou sous-bassins les plus résilients. Elle doit également permettre de préciser les conséquences possibles du changement climatique sur les types de pressions identifiés dans le cadre de la mise en œuvre de la DCE (ex. : prélèvements d'eau, pressions microbiologiques, pollution organique, pressions azote et phosphore, pressions liées aux substances dangereuses prioritaires, etc).

La direction de l'eau et de la biodiversité du MEDDE a conduit de 2010 à 2012 un projet intitulé « Explore 2070 » dont l'un des objectifs était d'évaluer au niveau national les impacts du changement climatique sur les milieux aquatiques et la ressource en eau.

Les résultats et données issus de ce projet sont désormais disponibles et peuvent ainsi contribuer à alimenter les travaux à mener dans les bassins dans le cadre de la préparation des prochains SDAGE.

¹ 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 [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse, ..., 103 pages.

GIEC (2008), Bates, B. C., Z. W. Kundzewicz, S. Wu et J. P. Palutikof, (2008), Le changement climatique et l'eau, document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Secrétariat du GIEC, Genève, 236 p.

Alcamo, J.; Flörke, M; Märker, M. (2007). Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes. Hydrological Sciences Journal, 52(2), 247-275

La méthodologie décrite en annexe 2 est illustrée par les choix effectués dans le cadre d'Explore 2070 et précise la nature des données mises à disposition des acteurs de bassin pour réaliser des évaluations des impacts du changement climatique sur les milieux aquatiques et la ressource en eau.

Quelle est l'échelle spatiale pertinente pour conduire l'évaluation des impacts du changement climatique ?

L'évaluation des impacts peut nécessiter **différentes échelles d'analyse** :

- l'échelle du bassin dans son ensemble ;
et/ou
- l'échelle du sous-bassin, celle-ci permettant de mieux tenir compte et intégrer des spécificités locales et enjeux territoriaux, en particulier dans les bassins hydrographiques de grande taille.

Quelle est l'échelle temporelle pertinente pour conduire l'évaluation des impacts du changement climatique ?

Le guide de la Commission européenne de 2009 sur l'intégration du changement climatique dans les plans de gestion considère qu'il sera difficile, à la dernière échéance de mise en oeuvre de la DCE (2027) de distinguer l'influence directe du changement climatique de l'influence des activités anthropiques ou encore de la variabilité naturelle. Le guide relève que cette difficulté ne doit pas conduire à ignorer ou sous-estimer les impacts attendus du changement climatique à moyen-long terme.

Il est donc nécessaire, pour évaluer les impacts du changement climatique sur les milieux aquatiques et la ressource en eau, de **considérer des échelles de temps allant bien au delà des échéances de la DCE, avec un horizon situé dans l'intervalle 2050-2100**, afin d'intégrer dès à présent :

- l'influence directe du changement climatique sur la ressource en eau ;
- l'influence indirecte du changement climatique via l'adaptation des activités anthropiques à l'évolution du climat ;
- l'influence rétro-active des mesures d'adaptation, au fur et à mesure qu'elles seront mises en oeuvre, afin d'être corrigées le cas échéant, eu égard aux objectifs poursuivis. Certaines pressions peuvent en effet être directement ou indirectement affectées par les politiques d'adaptation ou d'atténuation des effets du changement climatique.

La Commission ayant explicitement indiqué dans son rapport du 14 novembre 2012 que les prochains SDAGE français devraient comprendre **une analyse des pressions, il pourra être opportun de s'appuyer sur l'exemple britannique (salué par la Commission)** pour répondre à cette exigence.

Illustration avec Explore 2070

La période future utilisée est la période 2046-2065, pour des raisons de disponibilité des simulations climatiques.

La période de référence, passée, retenue pour Explore 2070 a été la période 1961-1990.

Il s'agit d'une période de référence couramment utilisée en climatologie et celle retenue dans la majorité des études d'impact. Elle est toutefois contraignante en termes de disponibilité de données hydrométriques (car beaucoup de stations ont été installées à la fin des années 1960 ou dans les années 1970).

Il faut noter que d'autres périodes de référence auraient pu être prises en compte, notamment la période 1970-1999. Sur cette période, la disponibilité des données hydrométriques est meilleure. De plus, elle correspond davantage au contexte « actuel », ce qui peut faciliter la communication des résultats. Elle fait cependant moins référence au niveau international. Le choix de la période de référence 1961-1990 peut probablement tendre à amplifier les deltas simulés par rapport au choix d'une période de référence plus récente.

Illustration avec le Royaume Uni

Le Royaume-Uni a réalisé cette évaluation dans le cadre des plans de gestion rapportés pour le cycle 2009-2015.

L'agence de l'eau britannique a conduit une analyse des impacts potentiels du changement climatique sur les grands types de pressions suivants :

- pressions liées aux prélèvements d'eau et aux débits artificiels
- pressions biologiques (pêche et espèces invasives)
- pressions microbiologiques
- pollution organique
- pressions liées à l'azote et au phosphore
- substances prioritaires et polluants spécifiques
- pressions liées à l'acidification
- intrusion saline
- température
- modifications physiques
- sédiments

L'analyse a été avant tout qualitative et ne donne pas nécessairement d'indication sur la sévérité ou l'échéance au delà de laquelle des changements pourraient avoir lieu. Elle indique néanmoins que les travaux en cours sur le changement climatique permettront progressivement de mieux cerner les incertitudes, d'améliorer à terme les analyses et de développer des réponses appropriées dans les prochains cycles de mise en œuvre de la DCE.

Les impacts potentiels du changement climatique sur les différents types de pression font l'objet d'un paragraphe détaillé par type de pression, expliquant la manière dont les pressions considérées sont susceptibles d'évoluer du fait de facteurs démographiques et/ou socio-économiques et sous l'effet du changement climatique.

Cette description aboutit à une qualification de la sévérité attendue des impacts du changement climatique sur le type de pression considéré, ensuite résumée sous forme de tableau pour l'ensemble des pressions :

L'exemple de résumé fourni par le « Anglian River Basin District » :

Sévérité relative des impacts du changement climatique sur :	Niveau de sévérité
Prélèvements d'eau et débits artificiels	Très élevé
Pressions liées à l'azote et au phosphore	Elevé
Pressions liées aux sédiments	Elevé
Pressions microbiologiques	Moyen
Pression organique	Moyen
Modifications physiques	Moyen
Intrusion salée	Moyen
Espèces invasives	Moyen
Pêche	Moyen/Bas
Acidification	Bas
Substances prioritaires et spécifiques, dont pesticides	Bas
Température	Bas

3) Stratégies d'adaptation possibles pour le bassin

Objectif : Définir les priorités à retenir en matière d'adaptation au changement climatique dans les prochains SDAGE et programmes de mesures, en s'appuyant sur les résultats des études d'impacts sur le bassin.

Construire et choisir des scénarios et des priorités d'adaptation

Les principaux résultats de l'évaluation des impacts du changement climatique sur les milieux aquatiques et la ressource en eau et de ses effets potentiels sur les pressions identifiées dans le cadre de la DCE, à l'échelle du bassin, voire de sous-bassins ou territoires pertinents du bassin doivent conduire à définir des **priorités en matière d'adaptation** pour les prochaines années.

Ces priorités peuvent notamment résulter de l'élaboration et de l'évaluation de **différents scénarios possibles d'adaptation** au changement climatique à l'échelle du bassin (cf encadré).

Vers des scénarios d'adaptation à l'échelle territoriale du bassin la plus pertinente

Il peut s'avérer utile de tester des scénarios d'adaptation contrastés à l'échelle du bassin ou du sous-bassin, afin d'en tirer des messages clairs en termes de priorités d'adaptation pour les prochaines décennies.

Certaines mesures peuvent directement dépendre d'évolutions de politiques nationales telles que la politique énergétique ou la politique agricole. Mais certaines orientations peuvent également être prises par les comités de bassin au niveau des grands bassins hydrographiques. Il peut donc être utile d'organiser des allers-retours entre le niveau national et le niveau des bassins pour affiner les scénarios d'adaptation possibles.

Pour évaluer différents scénarios, il peut être utile de s'appuyer sur un scénario de référence, ayant pour objectif de fournir un cadre de réflexion et un point de comparaison.

Le scénario de référence pourrait alors comporter un indicateur sur chacun des trois systèmes suivants :

- Système physique : climat, hydrologie, hydrogéologie ;
- Système biologique : écosystèmes aquatiques ;
- Système anthropique : activités humaines, aménagement du territoire, pressions sur les ressources ou les milieux.

Le scénario de référence doit ainsi favoriser une appropriation immédiate par les acteurs et les décideurs par la clarté et le caractère intuitif des indicateurs choisis. Il doit également permettre de se focaliser sur les défis du territoire et de hiérarchiser les enjeux. Ce scénario de référence peut prendre appui sur les études d'impact menées sur le bassin ou sur le territoire national (en considérant les données réduites au bassin).

Il est important qu'il soit partagé et compris par tous les acteurs devant construire et s'approprier le SDAGE. Plusieurs bassins se sont d'ores et déjà engagés dans cette voie. Des exemples sont fournis en annexe.

C'est à partir de la définition du scénario de référence que peuvent être identifiées les combinaisons de mesures qui constitueront les scénarios d'adaptation.

Enfin, il est nécessaire de pouvoir **évaluer ces différents scénarios d'adaptation** possibles, conçues à partir de la concertation, en termes de coût-efficacité et de coûts-bénéfices pour l'environnement et les usages. Cette évaluation doit permettre de s'accorder sur, voire d'ajuster, le cas échéant, les mesures à privilégier et leur mise en oeuvre.

4) Inscription dans les documents du SDAGE

Objectif : Traduire les impacts attendus du changement climatique et les mesures d'adaptation choisies pour le bassin dans les orientations du SDAGE et le PDM

Conséquences sur les orientations et dispositions du SDAGE

Les priorités en matière d'adaptation doivent ensuite être intégrées dans les orientations et dispositions envisagées dans le cadre du prochain SDAGE, en particulier dès lors que le changement climatique est susceptible d'avoir une incidence sur l'une d'entre elles.

Il est par exemple évident que toute disposition ou orientation ayant trait à la gestion quantitative de l'eau devra pleinement intégrer les impacts attendus du changement climatique et les priorités identifiées à l'échelle du bassin ou sous-bassin en matière d'adaptation.

Il convient également de ne pas exclure de consacrer une disposition ou orientation spécifique aux enjeux associés au changement climatique, en fonction de leur ampleur à l'échelle du bassin. Cette option peut notamment permettre de présenter la démarche de contrôle climatique des mesures (cf ci-dessous).

Conséquences sur les mesures du PDM

Le contenu des dispositions et orientations ayant trait au moins en partie aux effets du changement climatique doit ensuite être décliné et précisé sous forme de **mesures à inscrire dans le programme de mesures (PDM)**. Il est possible de rassembler ces mesures en deux grands types :

a) des mesures dites « d'adaptation au changement climatique », résultant de la déclinaison directe de priorités d'adaptation définies à l'échelle du bassin. Ex. : développement des économies d'eau, changements de pratiques, etc.

Il convient de noter que les programmes de mesures de la période 2009 – 2015 contiennent en général des mesures qui contribuent déjà à l'adaptation au changement climatique sans qu'elles soient nécessairement identifiées ou signalées comme telles.

Il s'agit en particulier des mesures :

- de résorption des déséquilibres entre offre et demande en eau, dont toutes les mesures d'économie d'eau ;
- de gestion des sécheresses ;
- de gestion de la demande agricole en eau ;
- de promotion de l'eau non conventionnelle (réutilisation des eaux usées traitées, récupération des eaux de pluie, etc.) ;
- de réduction des fuites dans les réseaux ;
- d'amélioration de la connaissance et d'acquisition de données.

Mais il convient de ne pas se contenter des mesures existantes et bien **d'engager, comme précisé précédemment, une réflexion à l'échelle du bassin** sur les effets attendus du changement climatique et d'**élaborer des scénarios d'adaptation possibles** pouvant *de facto* conduire à des

mesures supplémentaires d'adaptation au changement climatique.

Il est également nécessaire de faire le lien avec le plan national d'adaptation au changement climatique qui fixe un objectif de réduction des prélèvements d'eau de 20% d'ici 2020 – hors stockages d'eau d'hiver. Le SDAGE doit reprendre à son compte, à l'échelle du bassin, les priorités du PNACC et contribuer ainsi à l'atteinte de l'objectif fixé au niveau national. Cette déclinaison à l'échelle du bassin peut d'ailleurs prendre la forme d'un plan d'adaptation au changement climatique de bassin, comme cela est déjà prévu sur le bassin Rhône Méditerranée & Corse (cf annexe 3).

b) des mesures visant à démontrer la compatibilité de l'ensemble des mesures du PDM avec les impacts attendus du changement climatique (« climate check » des mesures). Ex. : évaluation de la capacité de remplissage de nouveaux ouvrages de stockage d'eau, compte tenu de l'évolution de la pluviométrie et de la température.

Les autorités de bassin doivent conduire, à l'occasion de la préparation des prochains SDAGE, un « contrôle climatique » (climate check) des programmes de mesures, et examiner plus particulièrement les répercussions potentielles des investissements ayant une longue durée de vie (ouvrages, réseaux) et/ou des mesures qui excluent de futurs ajustements.

Ce contrôle doit intégrer une **analyse de sensibilité de l'ensemble des mesures envisagées dans le programme de mesures**, afin d'évaluer si ces dernières seront toujours efficaces sous climat changeant. Il est en effet indispensable que les mesures privilégiées permettent de faire face à un ensemble de conditions climatiques ou soient suffisamment flexibles pour s'adapter à de nouvelles conditions. S'il s'avère qu'une mesure est potentiellement sensible au changement climatique, alors cette mesure doit être réévaluée.

La méthodologie du contrôle climatique doit être transparente et documentée de façon à ce que le processus puisse être répliqué si de nouvelles preuves ou des éléments plus probants sur les futurs risques climatologiques deviennent disponibles.

Un suivi des mesures doit également être assuré pour vérifier ou amender les conclusions du contrôle climatique.

Il est dans tous les cas nécessaire de choisir des mesures d'adaptation durables, présentant des avantages intersectoriels et ayant l'impact le moins négatif possible sur l'environnement, y compris en termes d'émissions de gaz à effet de serre.

Illustration avec le Royaume Uni

Les plans de gestion britanniques 2009-2015 fournissent, pour chaque type de pression, un résumé de la compatibilité des actions en cours ou proposées avec les effets attendus du changement climatique.

L'agence britannique de l'environnement a ainsi mené un contrôle climatique de la plupart des actions qui contribuent à la mise en œuvre de la DCE pour évaluer si et comment ces dernières sont susceptibles d'être pertinentes sous climat changeant.

Les actions sont qualifiées et classées de la manière suivante :



Gagnant – gagnant : mesures d'adaptation coût-efficaces, qui permettent de minimiser les risques climatiques mais ont également d'autres bénéfices sociaux, environnementaux ou économiques.

Sans regrets : mesures présentant peu de risques, qui sont coût-efficaces quelle que soit l'ampleur du changement climatique à venir.

Regrets faibles : mesures aux coûts associés relativement faibles et aux bénéfices potentiellement importants.

Adaptation flexible : mesures construites de façon à pouvoir être modifiées dans le futur, en fonction du changement climatique.

Regrets : Mesures inappropriées sous climat changeant ; mesures peu susceptibles de pouvoir être modifiées dans le futur.

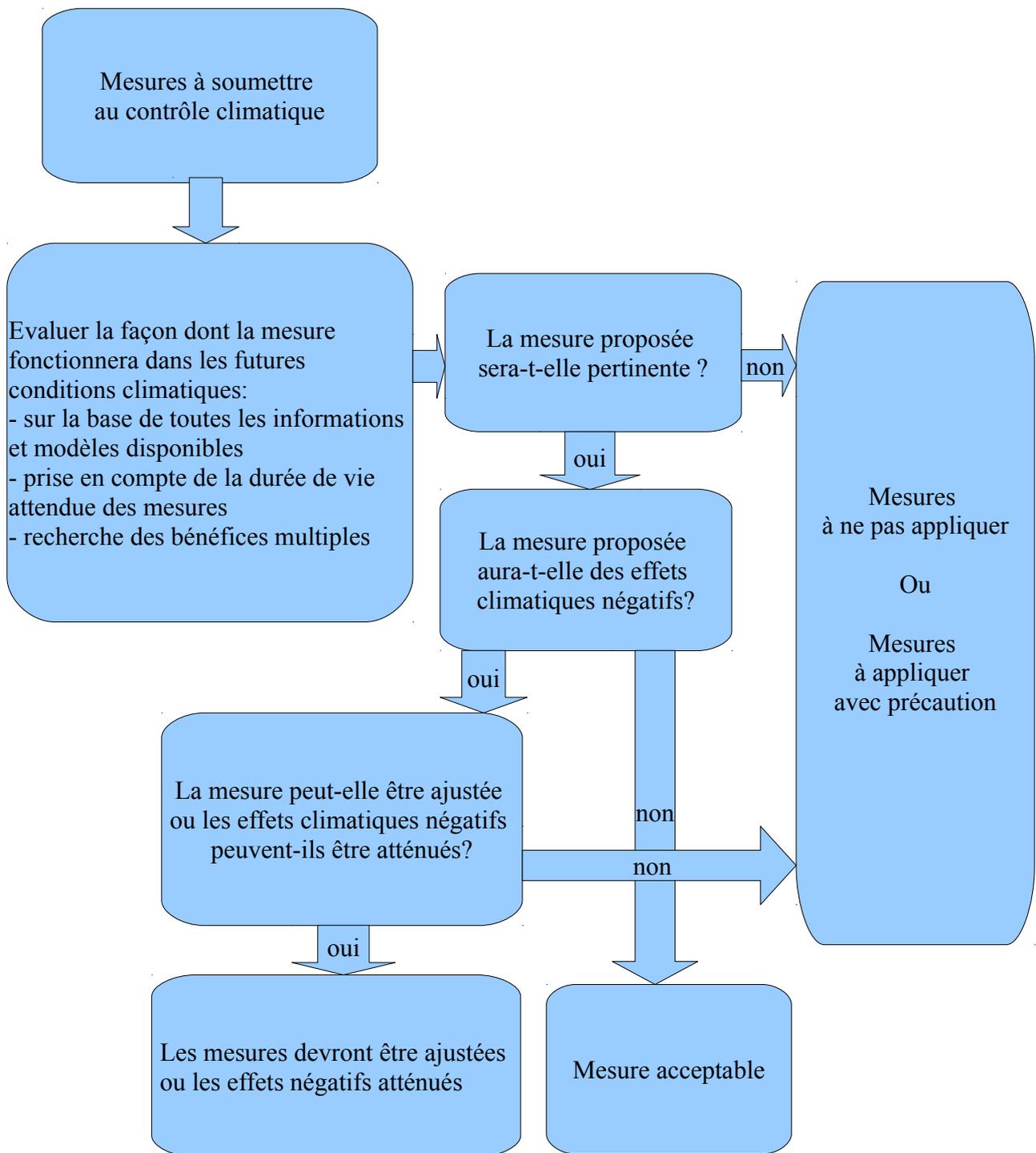
Chaque plan de gestion contient un exemple de résumé de la capacité des mesures à rester pertinentes sous l'effet du changement climatique.

Illustration avec le Royaume Uni

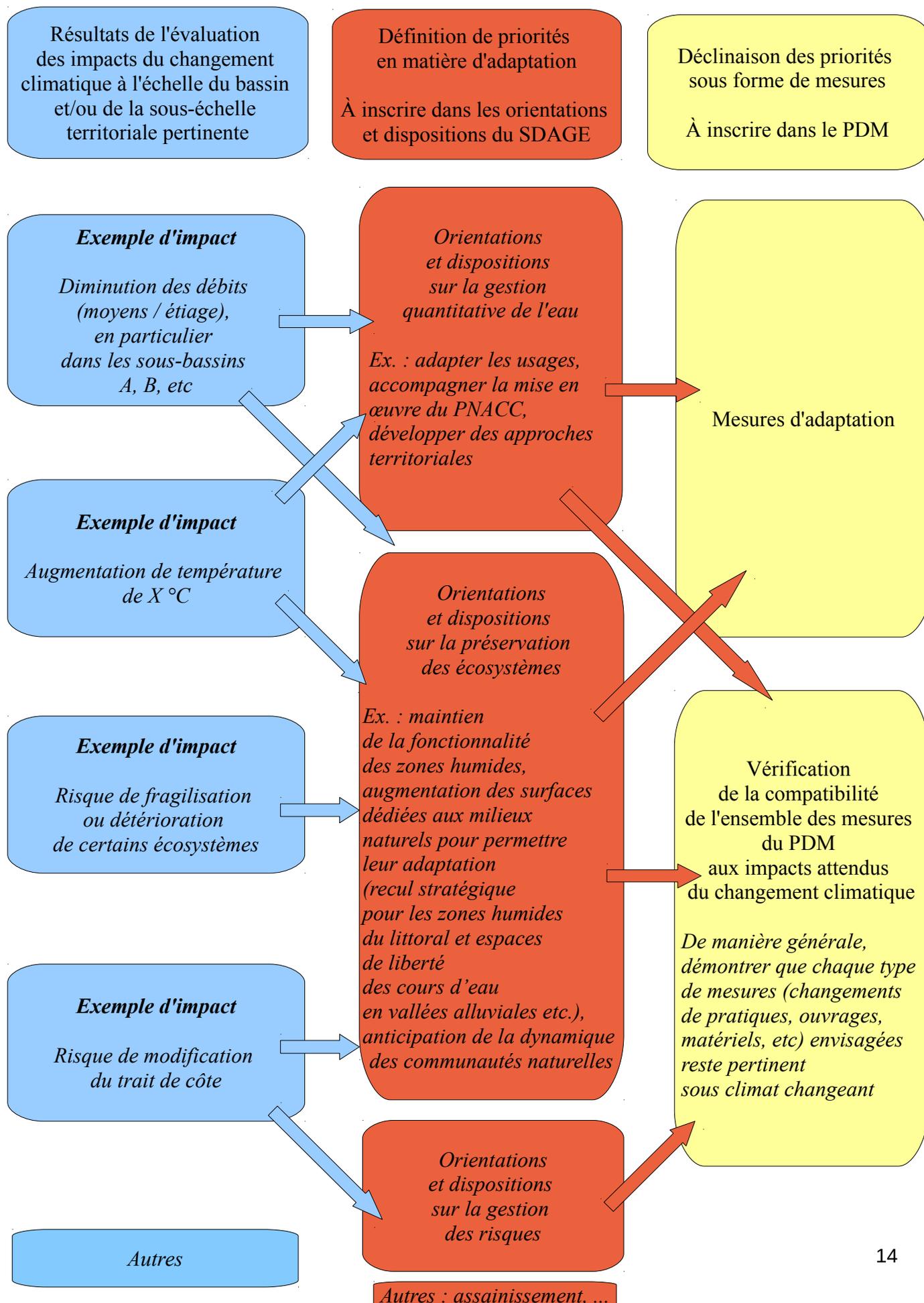
Exemple de résumé pour les pressions « prélèvements et autres débits artificiels »

Désignation de l'action	Mécanisme	Quelle est la pertinence de l'action sous climat changeant ?
Aménagements devant contribuer à l'atteinte du bon état et permettre de réduire le risque d'inondation	EIA Directive	Regrets Tout aménagement est susceptible d'augmenter les impacts d'événements extrêmes (type sécheresse) si pas bien adapté aux effets du CC. Il y a actuellement un faible niveau de confiance pour dire que tous les nouveaux aménagements seront parfaitement adaptés au climat futur. Options sans regret : systèmes de drainage durables ou haut niveau d'efficacité de l'utilisation de l'eau à rechercher.
Prévenir les prélèvements illégaux	Réglementation nationale	Sans regrets Prévenir les prélèvements illégaux nous aide à gérer les ressources en eau aujourd'hui et demain sous climat changeant.
Gérer les prélèvements de façon à ce qu'ils soient durables, efficaces et dans les limites environnementales	Réglementation nationale	Sans regrets
Actions de gestion de l'eau par la demande	Accords volontaires, incitations financières, campagnes de communication, etc	Gagnant - gagnant
Mesures d'atténuation	Actions pour maintenir, améliorer, augmenter les débits. Dépendantes des conditions naturelles.	Adaptation flexible
Etc...		

Logigramme préconisé par la Commission européenne pour effectuer le contrôle climatique (« climate check ») des mesures.



Exemples de traduction impacts du changement climatique dans le SDAGE et le PDM



5) Visibilité dans les documents du SDAGE

Objectif : Assurer la visibilité du thème « adaptation au changement climatique » pour démontrer que la France remplit ses obligations.

La Commission européenne nous fait obligation de démontrer dans les prochains cycles de gestion la prise en compte effective des impacts attendus du changement climatique et de mesures d'adaptation appropriées.

En effet, dans sa communication du 14 novembre 2012, elle a relevé que les SDAGE 2009-2015 n'intégraient que de façon très limitée le changement climatique et que les prochains SDAGE devraient comprendre :

- une analyse des pressions ;
- un contrôle climatique et un suivi des programmes de mesures à la lumière du changement climatique.

Compte tenu de ces éléments et dans le prolongement du travail de fond proposé dans les parties précédentes de cette note, il conviendra d'améliorer la présentation de la question du changement climatique dans les prochains SDAGE, en particulier dans les parties suivantes du SDAGE :

– Introduction du SDAGE

L'introduction doit être l'occasion de préciser la manière dont le changement climatique a été pris en compte dans la démarche générale de préparation du SDAGE et d'annoncer les travaux menés à l'échelle du bassin, notamment en termes d'évaluation des impacts du changement climatique sur les milieux aquatiques et la ressource en eau.

– Dispositions et orientations du SDAGE

Il importe que le document de SDAGE reflète correctement la prise en compte du changement climatique dans les orientations et dispositions les plus concernées (cf partie précédente).

– Document annexé au SDAGE, ciblé sur le changement climatique

Ce document doit permettre de décrire en détail l'approche retenue par le bassin pour intégrer les enjeux associés au changement climatique.

Il doit ainsi comprendre :

- une description de l'évaluation des impacts attendus du changement climatique sur les milieux aquatiques et la ressource en eau du bassin ;
- une description de l'évaluation des impacts potentiels du changement climatique sur les pressions identifiées dans le cadre de la DCE ;
- une description des éventuels scénarios d'adaptation testés et des priorités d'adaptation identifiées ;
- une description de l'impact de ces priorités d'adaptation sur les orientations et dispositions

du SDAGE ;

- une description de la déclinaison des priorités d'adaptation en mesures d'adaptation intégrées dans le PDM ;
- une description de la procédure de contrôle climatique des mesures.

Sur ce point, l'outil OSMOSE pourrait *à terme* être amélioré afin d'intégrer ce contrôle climatique (case à cocher lorsque le contrôle climatique a été effectué et montre que la mesure est compatible avec les effets attendus du changement climatique).

Illustration avec le Royaume Uni

Plan de l'annexe sur le changement climatique présente dans les plans de gestion 2009-2015 du Royaume-Uni et approuvée par la Commission européenne dans son rapport sur les plans de gestion du 14 novembre 2012.

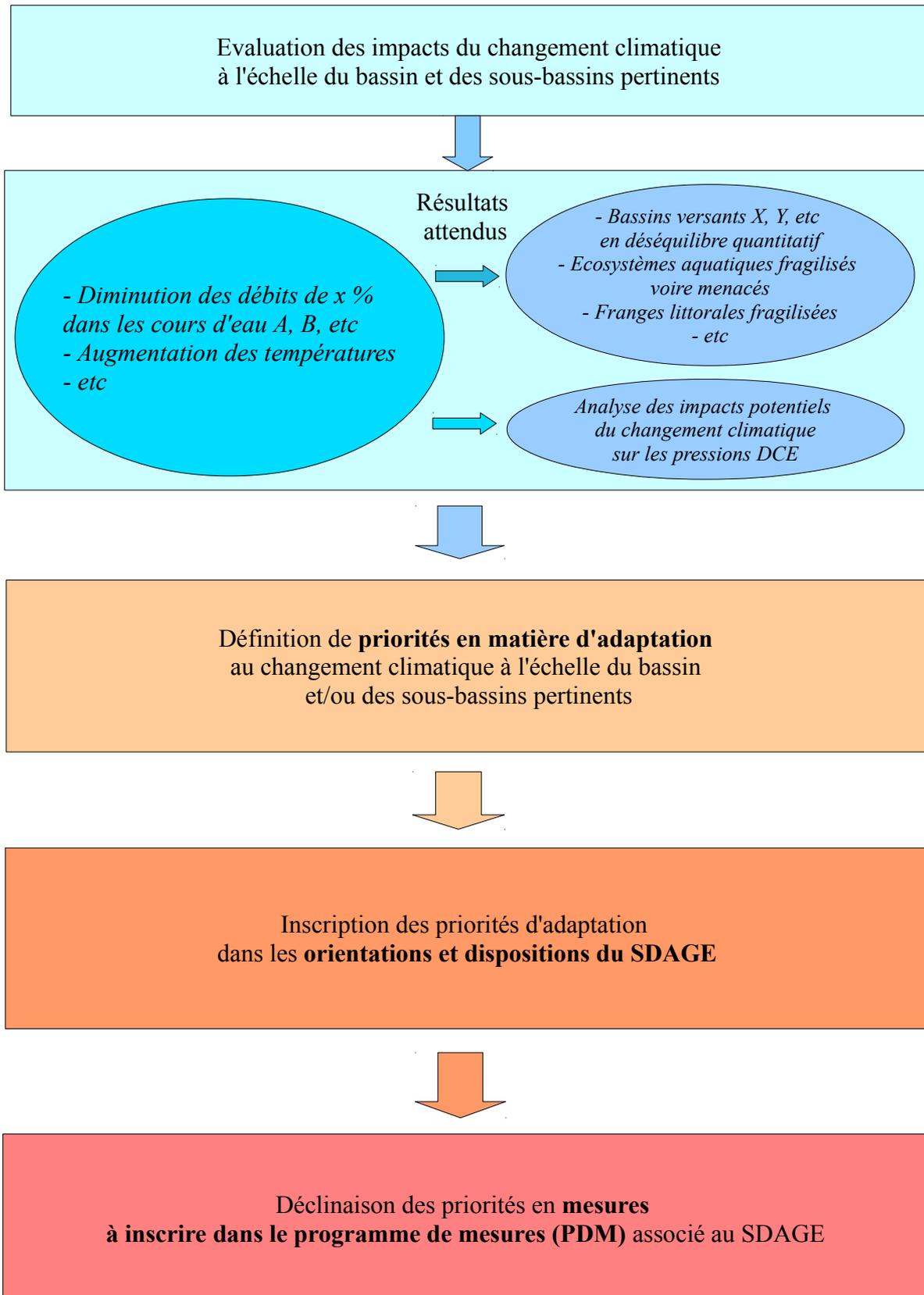
1. Introduction
2. Résumé de l'approche retenue pour aborder la question du changement climatique
3. Résumé des impacts du changement climatique
4. Impact du changement climatique sur les pressions identifiées et la capacité des mesures à rester efficaces sous climat changeant
5. Interaction des mesures
6. Stratégies d'adaptation
7. Adaptation en lien avec la biologie
8. Résumé

Exemple avec le lien vers les annexes dédiées à l'adaptation au changement climatique du plan de gestion du bassin de la Tamise :

<http://a0768b4a8a31e106d8b0-50dc802554eb38a24458b98ff72d550b.r19.cf3.rackcdn.com/geth0910bswi-e-e.pdf>

ANNEXE 1

Synthèse méthodologique de l'intégration du changement climatique dans les SDAGE et PDM



ANNEXE 2

Les sept étapes d'une étude d'impact au changement climatique sur les milieux aquatiques et la ressource en eau

– Étape 1 : la sélection d'un scénario d'émission de gaz à effet de serre

Le GIEC a établi différents scénarios socio-économiques pour évaluer l'évolution future des concentrations de GES. Ces scénarios établissent différentes hypothèses sur l'évolution socio-économique et géopolitique mondiale et sur la prise en compte des considérations environnementales.

La première étape d'une évaluation des impacts du changement climatique consiste à choisir un ou plusieurs scénarios d'émission de gaz à effet de serre, qui vont servir de données d'entrée pour la modélisation climatique.

Tableau : grandes classes de scénarios socio-économiques sur lesquels se basent les calculs d'émission des GES (les fourchettes de températures correspondent à l'élévation moyenne des températures estimée à l'horizon 2100 dans le 4ème rapport du GIEC)

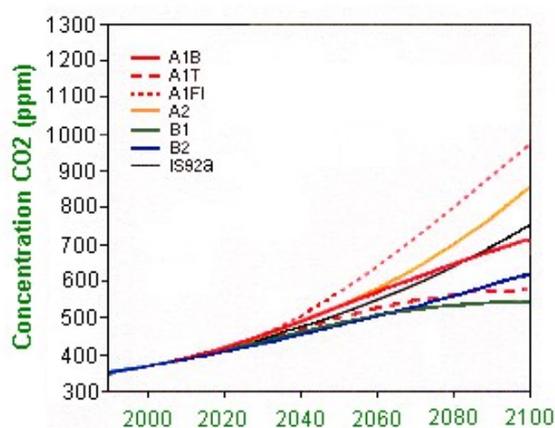
	Objectifs plus économiques	Objectifs plus environnementaux
Globalisation (monde homogène)	A1 Croissance économique rapide 1.4 – 6.4 °C	B1 Durabilité environnementale globale 1.1 – 2.9 °C
Régionalisation (monde hétérogène)	A2 Développement économique avec une orientation régionale 2.0 – 5.4 °C	B2 Durabilité environnementale locale 1.4 – 3.8 °C

Illustration avec Explore 2070

Le scénario d'émission de GES A1B a été sélectionné pour des raisons de disponibilité de données. Au moment du démarrage du projet Explore 2070, il s'agissait en effet du seul scénario pour lequel un grand nombre de modèles désagrégés étaient disponibles sur la France avec une finesse de résolution (8 km) adaptée aux ambitions du projet.

Le scénario A1B est un scénario médian. Cependant, l'utilisation d'un unique scénario ne permet pas de rendre compte, dans les résultats, des incertitudes liées aux hypothèses d'évolution des concentrations de gaz à effet de serre. Ces incertitudes peuvent être très fortes du fait de différences notables entre concentrations de GES possibles dans le futur (voir figure suivante). Les résultats hydrologiques finaux peuvent être fortement influencés par ce choix de scénario, sans que l'on puisse le mesurer.

Figure : évolutions des concentrations de CO₂ pour les différents scénarii utilisés par le GIEC (source : <http://www.ipcc-data.org>)



– Etape 2 : la sélection de modèles climatiques

Les simulations climatiques sont produites par des modèles de circulation générale (MCG). Il s'agit de modèles couplés océan-atmosphère qui modélisent la partie organisée des écoulements atmosphériques et océaniques, responsable du climat². Ils fonctionnent à l'échelle du globe.

En entrée de ces modèles, on fait varier les concentrations de gaz à effet serre (GES) et aérosols selon le scénario GES choisi. On obtient en sortie des simulations climatiques qui renseignent plusieurs variables telles que l'évolution des températures, des précipitations, de l'évapotranspiration, de l'humidité des sols ou encore du manteau neigeux. Ces résultats sont à une résolution spatiale de l'ordre de plusieurs dizaines voire centaines de km.

Il est important de noter que les situations météorologiques simulées n'ont pas pour objectif, pour une date donnée, de reproduire la situation correspondante réellement observée (ou qui sera observée). Cependant les chroniques simulées doivent restituer les principales statistiques du climat observé.

Pour répondre aux questions posées par le changement climatique et ses impacts, le GIEC utilise les modèles du système climatique en concordance avec différents scénarios socio-économiques. Ils composent, non pas des prévisions, irréalisables à l'échelle de plusieurs décennies, mais des scénarios d'évolution du climat, supposés couvrir un large éventail d'évolutions possibles.

Près d'une vingtaine de modèles sont répertoriés dans le dernier rapport du GIEC. Ces modèles sont à des stades de développement variables et montrent des capacités différentes à simuler différents aspects du climat. Les différences en termes de variables simulées peuvent être fortes et indiquent que de nombreuses améliorations sont encore possibles sur ces modèles.

Un cinquième rapport du GIEC est prévu d'ici 2014-2015, basé sur une nouvelle génération de modèles mondiaux plus fiables de circulations atmosphérique et océanique, avec une meilleure résolution. Toutefois, ces derniers ne permettent pas d'apprécier les impacts à une échelle autre que continentale même s'ils offrent des informations précieuses. Chaque territoire doit ainsi se tourner, pour répondre à ses besoins, vers des études spécifiques qui prennent toutefois appui sur ces projections mondiales.

² Le climat est défini par l'Organisation Mondiale de la Météorologie comme « la description statistique, en termes de moyenne et de variabilité, des quantités pertinentes (précipitations, températures...) sur une période de temps ».

Illustration avec Explore 2070

Dans le projet Explore 2070, les résultats de sept modèles de circulation générale ont été utilisés. Ces sept modèles ont été choisis, parmi les vingt trois modèles utilisés par le GIEC, par le Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS) pour leur représentativité de la variabilité climatique.

Cette approche multi-modèles permet, par la comparaison des sept résultats, une prise en compte de l'incertitude liée à ces modèles climatiques.

Il est à noter que le site DRIAS permet d'accéder gratuitement à des projections climatiques régionalisées sur l'ensemble du territoire de la France métropolitaine et bientôt l'Outre-mer, à partir des résultats de plusieurs modèles de circulation générale, contraint par plusieurs scénarios d'émission de gaz à effet de serre (voir <http://www.drias-climat.fr/>).

Enfin, s'il est important de souligner que c'est à partir des modèles climatiques qu'est estimée, il faut aussi considérer que choisir que le nombre de modèles est plus important que le nombre de scénarios de .

– Etape 3 : la descente d'échelle

Les 7 MCG fournissent des simulations à une résolution de plusieurs centaines de kilomètres. Il est donc nécessaire de mettre en œuvre des méthodes de descente d'échelle qui visent à désagréger ces données à une échelle adaptée aux études hydrologiques.

Deux approches complémentaires existent :

- ▶ l'approche statistique qui repose sur la recherche d'une relation statistique entre les variables locales et les prédicteurs modèles ;
- ▶ l'approche dynamique qui consiste à résoudre explicitement la physique et la dynamique du système climatique régional. Elle utilise une modélisation localisée avec comme conditions aux limites les résultats des modélisations conduites à l'échelle du globe.

Illustration avec Explore 2070:

Dans le cadre d'Explore 2070, les résultats d'une seule méthode de descente d'échelle ont été utilisés. Ces résultats ont été établis en amont d'Explore 2070 par la méthodologie DSCLIM développée au CERFACS (Boé et al. 2006 ; Boé 2007).

Ce choix d'utilisation d'une seule méthode de descente d'échelle a été contraint par des questions de disponibilité des données à une résolution spatiale adaptée au projet.

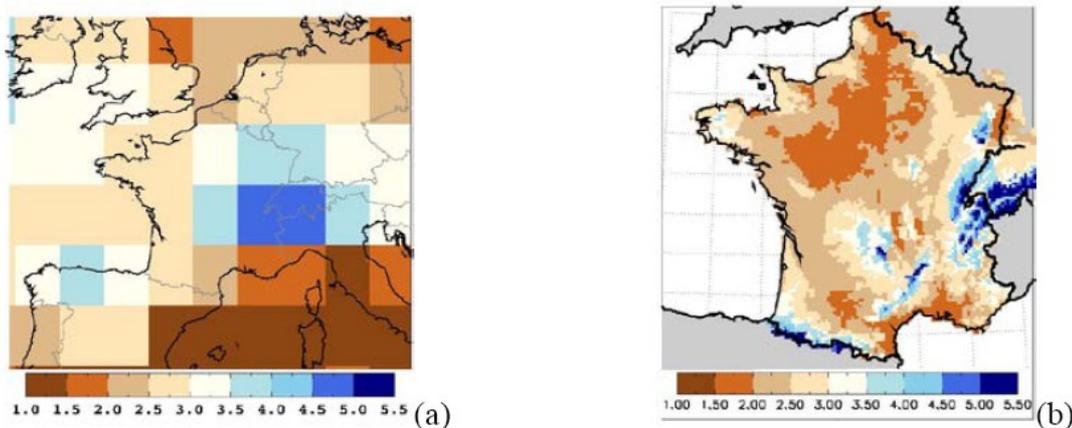
Il faut noter que la méthode de descente d'échelle peut induire des incertitudes importantes, qui ne pourront pas être quantifiées en raison du choix d'une seule méthode. En particulier, les incertitudes liées à la descente d'échelle peuvent être importantes sur les pluies (Déqué et al. 2007) et ainsi avoir des impacts forts sur les débits (Quintana 2010).

A l'issue de ce travail de descente d'échelle, ont été obtenues sur la Métropole :

- ▶ des données simulées de précipitations liquides et solides, températures et ETP,
- ▶ au pas de temps journalier,
- ▶ au pas d'espace de 8 km x 8 km (il s'agit de la grille Isba),
- ▶ pour la période de référence 1961-1990 et pour la période future 2046-2065,
- ▶ ceci pour chacun des 7 modèles climatiques.

A partir de ce maillage de 8km x 8km, des séries climatiques ont été calculées à l'échelle des bassins versants étudiés.

Figure : Exemple de données de précipitations (mm/jour) couvrant la France. La figure (a) montre les données à la résolution typique d'un modèle global du climat, tandis que la figure (b) montre les données désagrégées statistiquement à une résolution de 8 km. (Source : Pagé et al., 2008)



– Etape 4.1 : la sélection de modèles hydrologiques

La modélisation hydrologique est une étape clé de toute étude d'impact des changements climatiques sur les eaux de surface. Elle permet en effet de faire le passage entre les entrées climatiques (typiquement pluie et température) et le débit à l'exutoire des bassins considérés, en simulant la transformation pluie-débit. Certains modèles hydrologiques peuvent également simuler d'autres variables (qualité de l'eau, température, humidité, niveau de nappes, etc.).

Les modèles hydrologiques existants sont tous, à des degrés divers, des simplifications des bassins réels. Il y a aujourd'hui un très grand nombre de modèles existants, qui diffèrent par le niveau de simplification réalisé par le modèle et par la quantité d'information nécessaire pour utiliser le modèle (que ce soit en termes de données d'entrée ou de données nécessaires pour la paramétrisation du modèle). On peut différencier les modèles par exemple en fonction :

- du niveau de description des processus (modèles à bases physiques, modèles conceptuels, modèles empiriques)
- du niveau de discrétisation spatiale (modèles globaux, semi-distribués ou distribués)
- du pas de temps de fonctionnement (allant typiquement de l'heure à l'année)

Ces différences peuvent générer des différences significatives dans les sorties des modèles, que ce soit en conditions actuelles ou en conditions futures. **Aujourd'hui, il n'existe pas de modèle de référence donnant les meilleures performances sur tous les bassins. Il apparaît donc intéressant, dans le cadre d'études d'impacts, d'adopter une approche multi-modèles permettant de quantifier les écarts de résultats liés à la modélisation hydrologique.**

Illustration avec Explore 2070 :

Dans l'objectif de prendre en compte l'incertitude liée aux modélisations hydrologiques, une approche multi-modèles a été adoptée. Deux modèles hydrologiques ont été mobilisés : le modèle GR4J d'Irstea (ex-Cemagref) et le modèle Safran-Isba-Modcou (SIM) de Météo-France, qui correspondent à des approches de modélisation très différentes.

Le modèle GR4J est un modèle global, apparenté aux modèles conceptuels. L'approche est qualifiée de descendante : on cherche à avoir une description systémique du fonctionnement du bassin versant. Il est construit pour reproduire le comportement hydrologique global d'un bassin versant : il fait le lien entre la lame d'eau précipitée et l'évapotranspiration potentielle sur le bassin, et son débit à l'exutoire.

Le modèle Safran-Isba-Modcou est un modèle distribué (il fonctionne avec un découpage de l'espace en mailles élémentaires de 8 km x 8 km) à bases physiques. L'approche est qualifiée d'ascendante : on cherche à modéliser des composants "élémentaires" du système et ensuite à les assembler. Il s'agit en fait d'une chaîne de trois modèles à bases physiques.

Choix des points de calcul

Les résultats des simulations pour Isba-Modcou (chaîne de calcul Safran-Isba-Modcou) étaient déjà disponibles en amont du projet et ont été mis à disposition par Météo-France dans le cadre du projet au droit de **907 points correspondant à des stations hydrologiques et de 256 points correspondant à des exutoires maritimes de bassins versants**. Les résultats sont au pas de temps journalier (débit moyen journalier en m³/s) et correspondent aux simulations réalisées avec chacun des 7 modèles climatiques cités précédemment pour la métropole (scénario de concentration en GES A1B).

Il s'agissait donc de faire un choix pour les calculs réalisés avec GR4J :

- ▶ choix de stations parmi celles déjà traitées avec Isba-Modcou afin d'avoir le plus possible de stations communes aux deux modèles (pour cerner l'incertitude liée à la modélisation hydrologique) ;
- ▶ choix d'autres stations visant à compléter l'échantillon pour le rendre le plus représentatif possible de la variabilité des conditions et des enjeux à l'échelle nationale, en garantissant une couverture relativement homogène du territoire.

Ce choix a principalement impliqué les aspects suivants : la disponibilité, la qualité des données hydrométriques et enfin les enjeux associés à certaines problématiques pour le projet (évolution de la ressource et des risques). Ce choix s'est effectué au sein de la base de données nationale hydrométrique HYDRO gérée par le MEDDE.

Par rapport aux enjeux soulignés dans le cadre de l'intégration, les stations suivantes ont été privilégiées :

- ▶ **stations correspondant aux points nodaux définis dans les SDAGE**
- ▶ **points considérés comme de bonne qualité pour le suivi des étiages dans les travaux récents d'Irstea (centre de Lyon) pour l'ONEMA**
- ▶ **points appartenant au réseau national de vigilance sur les crues VIGICRUES**

► **points situés sur des cours d'eau traversant l'une des 15 grandes métropoles françaises**

Pour l'aspect « qualité des données », des filtres ont été mis en œuvre pour éliminer les stations ne comportant pas assez de mesures renseignées comme étant de bonne qualité, ou trop influencées par des ouvrages hydrauliques.

Pour l'aspect « disponibilité des données », le critère était de disposer d'au moins dix années de données pour le calcul des descripteurs hydrologiques. Cependant, des points de calcul pour lesquels seulement six années de débit étaient disponibles sur la période de référence ont tout de même été retenus. Cette durée peut-être considérée comme une durée minimale pour évaluer et caler les modèles hydrologiques de type GR4J. Sur ces stations, il y a donc un modèle calé pour réaliser des simulations et ainsi calculer des variables hydrologiques, mais pas de références sur les débits observés.

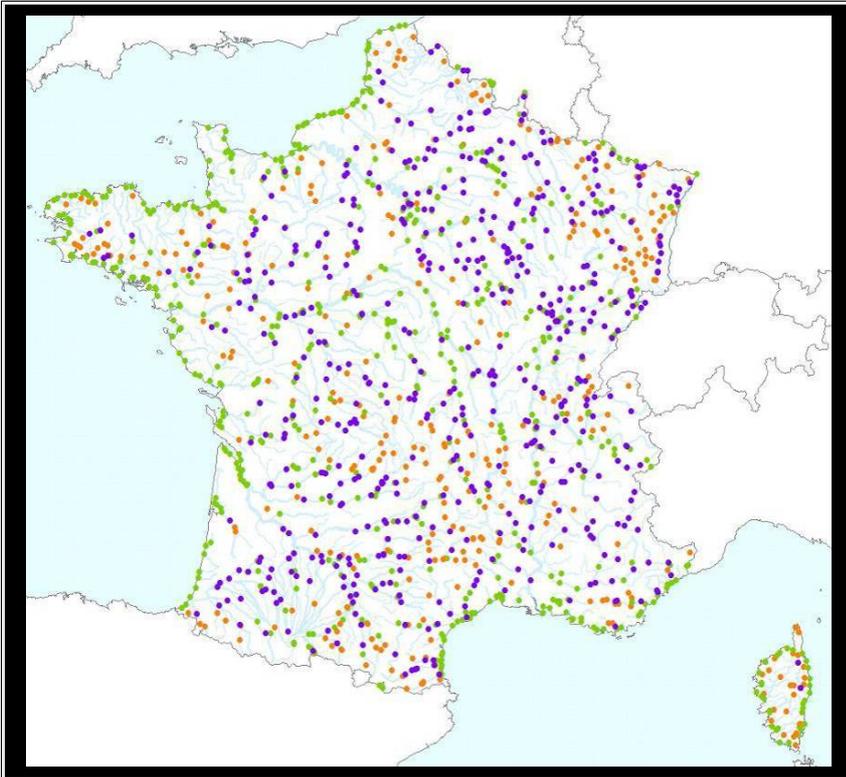
Un taux de lacune mensuel maximum égal à 50% et un taux de mesures valides (suivant les codes qualité de la banque HYDRO) supérieur ou égal à 80% ont été imposés, de manière à s'assurer de l'homogénéité temporelle des données.

Pour les simulations par GR4J, 902 points de calcul ont été sélectionnés parmi les stations hydrométriques de la Banque HYDRO.

Pour la métropole, les calculs ont donc été établis au droit de 1522 points (voir figure ci-dessous) :

- **543 points GR4J+Isba-Modcou ;**
- **359 points GR4J seul ;**
- **620 points Isba-Modcou seul.**

Figure : Localisation des 1522 points de calcul retenus pour Explore 2070 en Métropole



En chaque point d'étude, pour chaque combinaison modèle hydrologique x modèle climatique, les simulations des débits passés (1962-1990) (*) et futurs (2046-2065) ont été effectuées, au pas de temps journalier. **Ont donc été générées, pour chaque point de calcul, 7 ou 14 chroniques de débits journaliers en temps passé et 7 ou 14 chroniques de débits journaliers en temps futur.**

(*) NB : L'année 1961 est réservée à l'initialisation des réservoirs internes et est donc exclue de l'analyse.

Afin de présenter parallèlement les évolutions hydrologiques calculées et une évaluation de l'incertitude associée, et cela à différentes échelles de lecture, plusieurs rendus sont désormais disponibles:

- ▶ **Des fiches de synthèse par bassin versant.** Pour chaque point d'étude, une fiche synthétise les évolutions de tous les indicateurs. Pour chaque indicateur, sont présentées :
 - la valeur issue des observations, lorsque l'on possède au moins 10 ans de données (critère minimum pour réaliser un calcul statistique pertinent),
 - les valeurs médiane, minimale et maximale du Δ pour chaque modèle hydrologique respectivement.
- ▶ **Un ensemble de graphes** rend compte de l'évolution globale et des incertitudes associées à l'échelle nationale, après partition des points par type de régimes hydrologiques et à l'échelle de quelques bassins en particulier.

Etape 4.2 : la sélection de modèles hydrogéologiques

Les premières études d'impact du changement climatique sur les eaux souterraines se sont principalement concentrées sur l'estimation des impacts sur la recharge. Elles sont pour cela basées

sur un nombre limité de simulations du changement climatique, avec de faibles résolutions spatiales et temporelles.

Désormais, l'utilisation de modèles plus raffinés capables de simuler les transferts sol-végétation-atmosphère avec parfois l'estimation du transport dissous et des simulations plus explicite de l'impact du CO₂ sur l'évaporation se développent.

Peu d'études se sont intéressées à l'impact d'une évolution de l'occupation du sol sur la recharge, alors que cela pourrait avoir un impact important sur celle-ci. Cependant, ces modifications sont difficiles à anticiper.

Illustration avec Explore 2070 :

Afin de quantifier l'impact du changement climatique sur les ressources « quantitatives » en eau souterraine, le groupement BRGM/ ARMINES a proposé, dans le cadre de sa contribution au projet Explore 2070 :

- d'utiliser les modèles hydrodynamiques maillés, déjà calés sur la période actuelle
- de compléter ces évaluations par quelques modélisations globales pluie-débit-niveau piézométrique déjà réalisées avec des logiciels tels que GARDENIA ou TEMPO du BRGM
- d'étendre les résultats obtenus à l'aide de ces modèles à l'ensemble du territoire.

Les modèles hydrodynamiques qui ont été utilisés dans le cadre d'Explore 2070 ont permis de couvrir une grande partie du territoire métropolitain et une partie de la Guadeloupe.

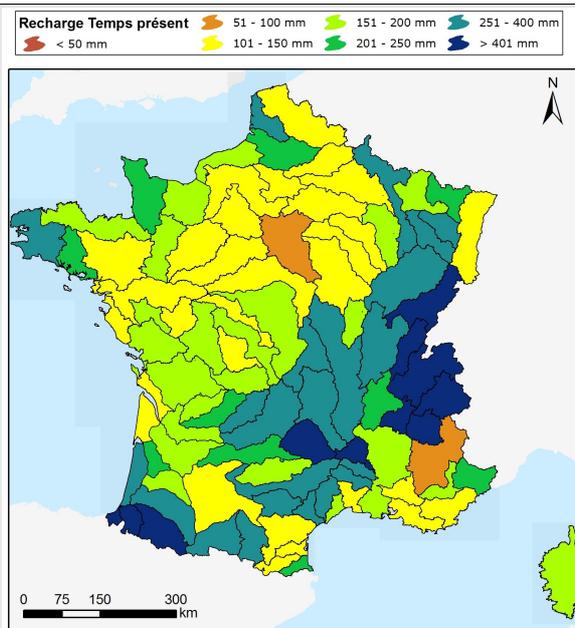
Les systèmes aquifères modélisés, les objectifs de modélisation et les logiciels utilisés étant différents, les modèles ont des données d'entrée, des pas de temps de modélisation, des maillages et mêmes des données et rendus de sortie très différents.

Les principaux résultats obtenus à partir des modèles climatiques ont été utilisés simultanément avec les résultats sur l'hydrologie de surface afin de préciser et/ou évaluer les impacts sur les eaux souterraines au droit des bassins versants « Explore » non modélisés. L'IDPR permet de fournir une estimation de la répartition ruissellement – percolation et donc de définir, à partir de la pluie efficace, la recharge des aquifères.

La recharge temps présent des bassins versants (illustration ci-après) a ainsi été estimée à partir des valeurs obtenues par modélisations hydrodynamiques, complétées :

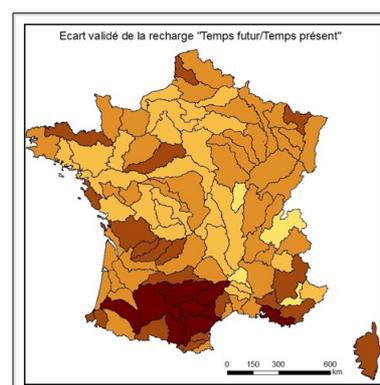
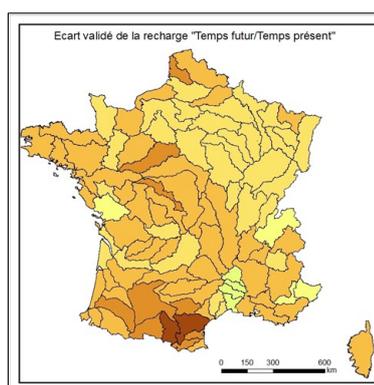
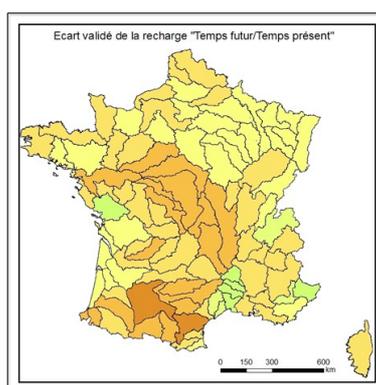
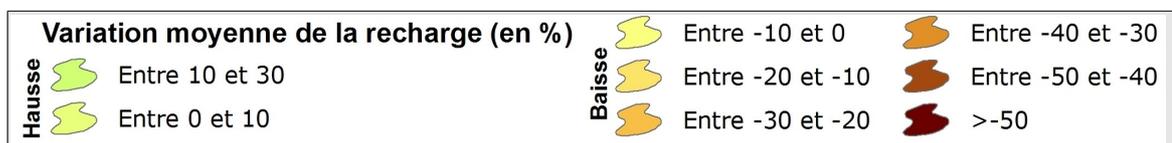
- pour les bassins non modélisés, par la recharge obtenue à l'aide de la lame ruisselée au moyen des résultats du modèle GR4 et de l'IDPR ;
- pour les points manquants ou douteux restants (Rhône moyen, Rhône aval, Loire moyenne, Garonne moyenne), par la recharge obtenue à l'aide de la pluie efficace Météo France et de l'IDPR.

Hormis quelques bassins où les résultats fournissent une recharge proche voire supérieure à la pluie efficace et dont les valeurs peuvent être considérées comme légèrement surestimées, la recharge ainsi obtenue varie entre 20% et 90 % de la pluie efficace avec une valeur moyenne comprise entre 55 et 60%. En valeur absolue, elle varie de 88 mm ou 98 mm à 600 mm voire 724 mm autour d'une valeur moyenne d'environ 230 mm.



Carte de la recharge temps présent

La recharge temps futur a été déterminée de la même manière. Toutefois, afin de préciser les incertitudes dérivant des différents modèles climatiques utilisés dans le cadre de cette étude, il est apparu nécessaire de fournir non seulement la valeur moyenne obtenue par l'intermédiaire des sept modèles mais également les valeurs maximales et minimales des écarts évalués entre la recharge future et la recharge actuelle par chacun de ces modèles. Il y a donc trois cartes disponibles permettant ainsi de fournir une évaluation moyenne et des évaluations minimales et maximales.



Écarts minimal, moyen et maximal de la recharge temps futur/ temps présent

- Etape 5.1 : la quantification des évolutions de la demande en eau par secteur à partir des démographiques et socio-économiques à climat constant

La quantification de la demande en eau est le complément de la quantification des ressources superficielles et souterraines en eau. Cette quantification doit être menée à minima par grands secteurs d'activité, à savoir :

- l'Alimentation en eau potable (AEP) ;
- l'Industrie ;
- l'Énergie (eau de refroidissement des centrales nucléaires et thermiques) ;
- l'Agriculture.

A cela, il convient de rajouter, lorsque le cas se présente, les transferts d'eau inter-bassins.

Illustration avec Explore 2070

Deux scénarios tendanciels à stabilité climatique ont été définis comme points de départ pour l'estimation future des impacts sur l'eau du changement climatique et construits à l'horizon 2070.

Partant d'hypothèses de contexte mondial et de projections démographiques au niveau national, déclinées au niveau régional en tenant compte des évolutions du solde naturel au niveau régional et des migrations résidentielles inter-régionales, des projections de nombre de ménages, par type de ménage, ont été construites. Ces projections du nombre de ménages permettent de définir les besoins en logements et les besoins en eau, ainsi que les besoins de mobilité, les consommations énergétiques et les consommations d'autres biens et services. Toutes ces évolutions de la demande influencent l'activité économique des secteurs concernés.

Le système de prévision est donc organisé en plusieurs modules, interconnectés entre eux pour assurer une cohérence globale. Sept grands modules ont été définis, relatifs à : la démographie, l'agriculture, l'habitat/construction, les transports, l'énergie, les activités économiques par grands secteurs, les besoins en eau. De ces modules, ont été déduits dans un second temps les pressions anthropiques sur la ressource en eau.

Le premier scénario tendanciel est un scénario de **concentration relative de l'habitat** : l'augmentation du nombre de ménages se traduit par une concentration plus forte de l'habitat dans les zones déjà occupées par des activités économiques et des logements.

Le deuxième scénario suppose une **accélération du phénomène d'étalement de l'habitat** connu ces dernières années, avec une multiplication par deux de la superficie artificialisée en métropole. La part des sols artificialisés en métropole s'approcherait ainsi de 20% du territoire métropolitain, comparé à un chiffre légèrement inférieur à 10% aujourd'hui, ce qui réduit d'autant les surfaces disponibles pour l'agriculture, les prairies et les forêts, et oblige à faire des arbitrages sur l'utilisation future des sols. Pour éviter une réduction des surfaces occupées par les prairies et forêts, le scénario d'étalement de l'habitat conduit à une production agricole moins importante que dans le scénario précédent. Le scénario d'étalement a aussi des conséquences sur la demande finale d'énergie, puisqu'au plus grand étalement de l'habitat est associé une augmentation du nombre de kilomètres moyens annuels parcourus par les ménages, et une hausse du transport de marchandises - augmentant de ce fait la consommation d'énergie des transports.

Concernant le cadrage socio-démographique des deux scénarios tendanciels à stabilité climatique, les deux scénarios s'appuient sur les prévisions de l'INSEE en termes de croissance

démographique et de migrations internes, et les prolongent à horizon 2070. Ils prévoient une hausse de la population en France métropolitaine de 13 millions d'habitants, ce qui porterait la population à 74,8 millions d'habitants en 2070, contre 61,8 millions au 1^{er} janvier 2007. Cette population aura vieilli puisque 16,6% aura 75 ans ou plus en 2070, contre 8,5% en 2007, et 21,8% aura moins de 20 ans (24,8% en 2007). La différence la plus significative se situe sans doute dans le pourcentage de la population âgée de 20 à 59 ans, qui passerait de 53,8% en 2007 à 45,5% seulement en 2070. Cette évolution se produit malgré l'arrivée nette de quelques 100.000 migrants par an sur toute la période de prévisions (tranche d'âge des actifs).

L'augmentation de la population résidente et les évolutions de la pyramide des âges de la population se traduisent par une augmentation du nombre de ménages de 0,5% par an en moyenne entre 2007 et 2070, soit une hausse inférieure à celle observée sur le passé (proche de 1% par an) mais toujours positive. En particulier, le nombre de ménages d'une personne augmente sensiblement, ce qui influence les besoins en logement.

Cette population se déplace progressivement vers la façade atlantique et vers le sud, ce qui implique une relative stabilité de la population de certaines régions, et une forte augmentation des besoins en logement dans d'autres régions.

Le module agriculture prévoit une augmentation de la superficie consacrée à l'agriculture, une hausse modérée des rendements des principales cultures agricoles³ et une augmentation de la surface dédiée aux agrocarburants, conformément aux objectifs en la matière. Le scénario permet de déduire l'impact de ces évolutions sur l'aménagement du territoire, en termes de superficies de bois et forêts, d'une part, et de prairies, d'autre part. En raison des hypothèses d'évolution des sols boisés et des surfaces toujours en herbe, les transferts entre types d'occupation du territoire se font principalement entre les sols cultivés et les surfaces artificialisées.

Dans le scénario « concentration de l'habitat », cela se traduit par une baisse d'un point de la part des sols boisés, et d'un point de la part des sols cultivés dans la surface totale de la métropole. Une fois confrontées aux prévisions de demande (tenant compte des évolutions démographiques), ces projections d'évolution des productions agricoles permettent de déduire l'impact de ces évolutions sur les balances extérieures de la France et le taux de sécurité alimentaire du pays : le scénario « concentration de l'habitat » conduit ainsi au maintien d'un excédent de la balance des échanges pour les céréales à un niveau proche du niveau actuel (ratio exportations/importations proche de 2), une stabilité (ratio proche de 1) pour les produits issus de l'élevage, et une hausse du ratio exportations/importations pour les fruits et légumes.

Toujours dans le scénario « concentration de l'habitat », les autres secteurs économiques connaîtront une croissance annuelle moyenne de l'ordre de 1,6% pour l'industrie et 2,1% pour les services marchands, avec une évolution moins dynamique pour la construction (1,1% par an en moyenne) et les services administrés (0,6% par an). Cela se traduit par une croissance totale du PIB de 1,7% par an en moyenne entre 2008 et 2070, et une baisse du taux de chômage à 4,2% en 2070 : ce taux de chômage représente le pourcentage de personnes en âge de travailler n'exerçant aucune activité : certains actifs peuvent travailler à temps partiel, voire seulement occasionnellement.

Le scénario « étalement du territoire » suppose que 70% des nouveaux ménages choisissent une maison individuelle et 30% choisissent un appartement. Dans ce scénario, la superficie occupée par l'habitat passerait de 9,4% en 2010 à près de 20% en 2070, réduisant les superficies pouvant

³ L'augmentation prévue est inférieure à celle des scénarios prospectifs Agrimonde décrits dans le premier rapport d'étape.

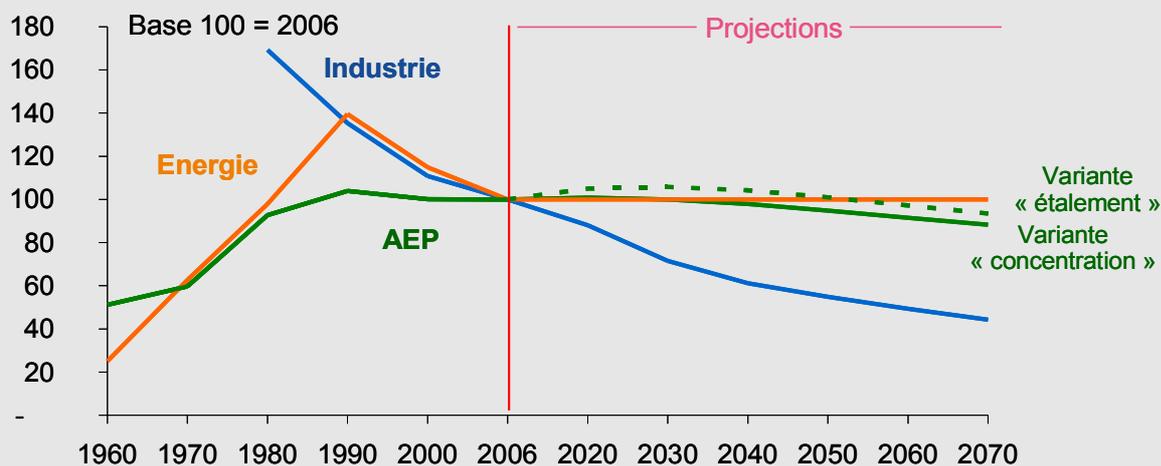
être allouées à l'agriculture. Ainsi, la part des sols cultivés passe de 34% à 25% du territoire. L'évolution des sols boisés est la même que dans le scénario précédent, ce qui signifie que ceux-ci baissent d'un point en part du territoire.

Du fait de la diminution des surfaces cultivées, la production agricole est moins dynamique que dans le scénario précédent, et le taux de couverture de la demande intérieure par la production domestique diminue, dans tous les segments. Par exemple, le ratio de production de maïs sur la demande intérieure tombe de 180% à 120% ; pour les céréales hors maïs, ce ratio passe de 225% environ aujourd'hui à 160% en 2070, et pour les fruits et légumes il tombe sous la barre des 50% à horizon 2070.

Les projections ont été réalisées à l'échelle des bassins versants et sont présentées à cette échelle ainsi qu'à l'échelle nationale.

Le graphique ci-après décrit le cheminement de la tendance à la baisse des prélèvements d'eau pour les différents usages à l'exception de l'agriculture à l'horizon 2070 dans le scénario tendanciel (à climat constant).

Évolution des prélèvements d'eau par usage de 1960 à 2006 et projections 2006 à 2070, à climat constant



Source : Etude RNDE sur les prélèvements d'eau en France en 2001, Février 2004 et Projections BIPE 2011

Pour les prélèvements d'eau potable, la modélisation des prélèvements retient 6 facteurs-clés : les niveaux de consommation par habitant, la démographie, la structure des ménages, le type d'habitat, les taux de consommation d'eau (% / quantités distribuées : par différence, on obtient le pourcentage d'eau qui retourne au milieu) et le rendement des réseaux. Les projections sont réalisées sur la base des évolutions de chacun de ces facteurs dans les deux variantes du scénario tendanciel à stabilité climatique. Les prévisions sont effectuées à l'échelle des bassins versants, les 28 000 points de prélèvements AEP répartis sur toute la France métropolitaine ayant été regroupés par bassin versant. Les prévisions au niveau national s'appuient sur l'hypothèse d'une hausse du nombre de ménages de 40% sur la période 2006-2070, d'une diminution des consommations d'eau par les ménages à un rythme différencié selon le type d'habitat : de -0.3% par an pour l'habitat vertical et -0.6 % par an en moyenne sur la période 2006-2070 pour l'habitat pavillonnaire, avec un ralentissement progressif de la décroissance à partir de 2020, et d'un taux de rendement primaire des réseaux qui s'améliore de 0,1 à 0,3 point par an entre 2006 et 2070.

La projection des prélèvements industriels à long terme a été réalisée sur la base de l'évolution de plusieurs variables clés qui dimensionnent les volumes d'eau nécessaires au fonctionnement des usines. Les volumes d'eau de base sont représentés par les prélèvements réalisés en 2006, site par site, tels que renseignés dans la base de données du SOeS (Service de l'Observation et des Statistiques). La modélisation s'articule autour de trois variables : la production industrielle (on considère que les prélèvements en eau sont en partie proportionnels à la production en volume de chaque secteur d'activité), les économies d'eau (sur le passé, on a observé une baisse tendancielle des prélèvements d'eau alors que dans le même temps, la production industrielle en volume augmentait), la nature des circuits de refroidissement : Explore 2070 a distingué les sites industriels dans la base prélèvements du SOeS selon 3 classes de prélèvements qui reflètent a priori, sur la base d'une approche empirique, la nature des circuits de refroidissement (ouvert ou fermé) et le potentiel de réduction des prélèvements : prélèvements de 0 à 300 000 m³ (circuits fermés), prélèvements situés entre 300 000 et 1 million de m³ (circuits mixtes) et prélèvements situés au dessus de 1 million de m³ par an (circuits ouverts).

Les estimations relatives à l'énergie sont effectuées en supposant le maintien des capacités de production actuelles d'électricité des centrales nucléaires, le surplus éventuel par rapport à la demande étant exporté. Les hypothèses retenues par le MEDDE sont des prélèvements et des consommations d'eau identiques à celle de 2006, soit respectivement 15 958 et 790 millions de m³.

Pour les prélèvements de l'agriculture, 2000 est l'année de base utilisée pour l'analyse et les projections de prélèvements/consommation d'eau. Elle correspond à celle du dernier RGA connu. Les projections de surfaces cultivées par type de culture et par région à l'horizon 2070 dans le scénario tendanciel ont été réalisées selon les deux variantes. Pour obtenir la demande en eau des cultures, le modèle mis au point commence par calculer le besoin en eau mensuel de chacune des cultures. Ce besoin en eau des cultures est ensuite comparé aux précipitations sur les surfaces cultivées. Les besoins en eau sont reconstitués à la fois pour les cultures irriguées et les cultures qui ne le sont pas. Si ces précipitations ne sont pas suffisantes pour satisfaire l'ensemble des besoins en eau des cultures et que la surface est irriguée, alors un apport supplémentaire par irrigation est nécessaire. Le volume d'eau qui est effectivement apporté pour l'irrigation dépendra ensuite de l'efficacité du système d'irrigation. Pour un système d'irrigation très efficace (goutte à goutte) le volume apporté sera proche de la différence entre les besoins en eau des cultures et les précipitations, mais pour certains systèmes beaucoup moins efficaces (irrigation gravitaire) le volume apporté peut être jusqu'à deux fois supérieur à celui effectivement nécessaire pour compléter les besoins en eau des cultures.

– **Étape 5.2 : la quantification des évolutions de la demande en eau par secteur à partir des démographiques et socio-économiques à climat constant**

Il est difficile de calculer quelle serait l'impact spécifique du changement climatique sur la demande en eau de la plupart des secteurs d'activité (AEP, Industrie, Énergie, etc.). Toutefois, il est vraisemblable de la considérer comme négligeable (et donc de partir du résultat de l'étape 5.1) sauf pour un secteur : l'agriculture. En effet, l'augmentation attendue de l'évapotranspiration étant non compensée par une augmentation des précipitations, conduit irrésistiblement à une augmentation de la demande en eau d'irrigation, à assèchement constant.

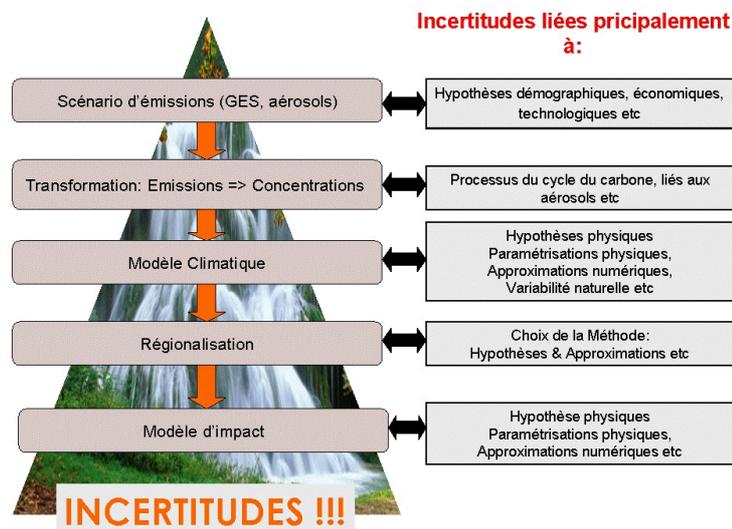
Illustration avec Explore 2070

Pour prendre en compte les effets du changement climatique sur l'agriculture, mais sans anticiper sur les mesures d'adaptation potentiels de ce secteur, la demande en eau du secteur agricole a été calculée en considérant les assolements de l'année 2000 (dernier RGA connu) et le climat futur projeté. Le résultat du calcul est une augmentation de la demande en eau agricole de +42 à +66% par rapport à l'année de référence de 2006, à l'échelle nationale.

– Étape 6 : la question des incertitudes

Les incertitudes sont fortes dans les études d'impact du changement climatique, en partie du fait que ce sont des études prospectives et que l'on s'intéresse à un avenir lointain, mais également en raison des nombreuses difficultés inhérentes à la chaîne de modélisation mise en place dans ces études. Boé (2007) donne l'image de la cascade d'incertitudes, indiquant qu'au fur et à mesure que l'on descend dans la chaîne de modélisation, les incertitudes totales vont croissant, chaque étape ajoutant de nouvelles sources d'incertitudes.

Figure : La cascade d'incertitude, d'après Boé (2007)



Il est donc utile de quantifier les incertitudes associées aux projections réalisées. Les différentes sources d'incertitudes correspondent aux différentes étapes de la modélisation. On trouvera notamment des incertitudes liées :

- ▶ au choix du scénario d'émission de GES, et leur traitement dans les modèles climatiques,
- ▶ au choix du GCM,
- ▶ au choix de la méthode de descente d'échelle et d'une méthode de correction de biais,
- ▶ au choix du modèle hydrologique, au calcul de ses entrées et à sa paramétrisation,
- ▶ l'impact local des activités humaines.
- ▶ l'évolution spontanée des écosystèmes (végétation en particulier) en réponse aux modifications environnementales.

L'IPCC (2005) a produit un document donnant des préconisations sur le traitement des incertitudes. Ce rapport distingue différents types d'incertitude, à savoir la non-prédictabilité liée notamment aux comportements humains, l'incertitude structurelle liée aux erreurs des modèles, leurs hypothèses et leurs approximations, et l'incertitude liée à la mesure (observation, représentativité spatiale, valeurs de paramètres). Pour chacune de ces sources d'incertitudes, le rapport préconise des modes de caractérisation, traitement et représentation.

Divers travaux ont été menés pour quantifier l'importance relative des diverses sources d'incertitudes. Il est par exemple difficile de savoir quelles sont les incertitudes qui prédominent lors de projections hydrologiques. Wilby et Harris (2006) considèrent que les incertitudes sont apportées de manière décroissante par : (1) le modèle climatique, (2) la méthode de désagrégation, (3) la structure des modèles hydrologiques, (4) les paramètres des modèles hydrologiques et (5) le scénario d'émission. Cependant, leurs travaux n'ont été menés que sur un seul bassin (celui de la Tamise) en comparant deux modèles hydrologiques et Wilby (2005) note que selon le modèle hydrologique utilisé, les incertitudes liées à la modélisation peuvent être prédominantes.

La représentation des incertitudes peut prendre différentes formes, avec par exemple la représentation de faisceaux de courbes représentant toutes les simulations, d'intervalles de confiance sur les sorties ou la définition de niveaux de confiance associés.

– **Étape 7.1 : Évaluation de l'impact du changement climatique sur l'équilibre entre la disponibilité et la demande en eau à l'échelle des bassins versants**

L'évaluation de l'impact du changement climatique sur un territoire se fait directement par la confrontation offre/demande en eau à l'échelle des bassins versants. Il est important de souligner que cette confrontation doit tenir compte des besoins des écosystèmes aquatiques.

Illustration avec Explore 2070

Un module de simulation, reposant sur l'élaboration de bilans massiques à l'échelle des bassins versants (une centaine au total) interconnectés selon des relations amont-aval et l'existence de transferts d'eau entre bassins, a été développé.

Les bilans massiques confrontent la demande en eau des différents usages présents sur ce bassin à la ressource en eau disponible (eaux de surface, eaux souterraines ou ressources alternatives telles que la désalinisation d'eau de mer par exemple).

Des seuils de débit spécifiques sont fixés en certains points nodaux afin d'appréhender les besoins des usages navigation et production d'énergie, ainsi que ceux des écosystèmes aquatiques (approche type « débits seuils écologiques »).

Pour déterminer les situations de non satisfaction, des priorités d'allocation entre usages de l'eau ont été établies en cohérence avec la législation actuelle.

En complément des hypothèses et méthodes propres aux lots thématiques, la construction de la capacité de simulation du modèle intégrateur a conduit à simplifier certains processus et relations.

Les principales hypothèses simplificatrices sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Les principales hypothèses du module « confrontation offre-demande en eau »

Hypothèse 1 – L'établissement des bilans massiques se base sur les données de débits renaturalisées en soustrayant les consommations actuelles (prélèvements - rejets dans les eaux superficielles et potentielles pertes vers ces mêmes eaux). Le bilan utilise des hypothèses de taux de rejets vers les eaux de surface prédéfinis pour chaque usage. Les pertes par infiltration alimentant les eaux souterraines sont prises en compte.
Hypothèse 2 – Le modèle prend en compte les ouvrages de stockage au travers de a) leur volume de stockage total à l'échelle d'un bassin versant et b) d'une règle de gestion simplifiée de remplissage, prenant en compte les demandes potentielles du bassin versant, sous contrainte de volume de stockage disponible ou maximum. Bien que cela s'éloigne de la réalité pour les ouvrages de stockage importants, seuls les demandes potentielles du bassin versant dans lequel l'ouvrage est localisé sont prises en compte, et non pas les demandes des différents bassins versants reliés à l'ouvrage et potentiellement impactées.
Hypothèse 3 – Les règles d'allocation entre usages sont prises en compte par a) des ordres de priorités de prélèvements pour les usages préleveurs, b) une règle de satisfaction des demandes des usages préleveurs entre eau souterraine et eau de surface et c) la satisfaction de débits seuils pour les écosystèmes aquatiques et certaines activités économiques (transport et production d'énergie).
Hypothèse 4 – L'impact du changement climatique et de stratégies d'adaptation sur l'état des eaux souterraines est appréhendé par la confrontation entre la recharge des nappes et les prélèvements dans ces nappes. Cette confrontation est effectuée au pas de temps annuel et pour l'ensemble des nappes sous-jacentes à un bassin versant et permet d'identifier des nappes souterraines en déficit.
Hypothèse 5 – Les transferts d'eau entre bassins versants sont pris en compte. Pour la situation actuelle de référence, les transferts entre bassins ont été estimés par la différence entre prélèvements observés (données des agences de l'eau) et prélèvements reconstitués par les modèles de prévision du BIPE. Ces transferts peuvent être modifiés dans le cadre de stratégies d'adaptation en précisant les volumes concernés ainsi que les bassins d'origine et destinataires.
Hypothèse 6 – Les assolements à l'horizon 2070 sont définis pour chaque bassin versant à partir des évolutions de données régionales entre aujourd'hui et 2070 fournies par le BIPE et appliquées aux données actuelles de cultures à l'échelle cantonale.

– Etape 7.2 : Évaluation de l'impact du changement climatique sur les écosystèmes aquatiques

Il est aujourd'hui évident que le changement climatique, à travers une diminution des débits ou l'augmentation de la température, affectera la biodiversité aquatique. Les études réalisées ces vingt dernières années ont permis de mettre en exergue les effets actuels du changement climatique sur la biodiversité aquatique. Ces réponses sont généralement classées en trois groupes :

- **Effets sur la phénologie et la physiologie des organismes** : modifications phénologiques associées à un impact direct des CC (CO₂, température, débit etc ..) ou à un impact indirect (modification des rythmes synchroniques entre espèces)
- **Changements de distribution des espèces** : les espèces se distribuent dans les zones qui leur sont favorables d'un point de vue biotique et abiotique. Les pressions climatiques ou anthropiques peuvent amener les espèces à modifier leur distribution dans le cas où la capacité de dispersion des espèces et la disponibilité des ressources le permettent.
- **Changements dans la composition et la structure des communautés** : les communautés écologiques sont des assemblages d'espèces présentes simultanément dans l'espace et dans le temps. Les espèces répondant de manière individuelle aux CC, la structure des communautés au sein des mêmes réseaux trophiques ou entre réseau trophique pourrait être largement affectée.

Illustration avec Explore 2070

Le projet Explore 2070 a cherché à évaluer :

- **La vulnérabilité des zones humides et des services écosystémiques qu'elles rendent à la société face au changement climatique en France métropolitaine.** Cette étude a été complétée pour l'Outre-Mer par un travail portant sur les étangs du Gol et de St Paul situés sur l'île de la Réunion ;
- **La vulnérabilité des poissons d'eau douce au changement climatique en France métropolitaine.** Cette étude a été complétée pour l'Outre-Mer par une synthèse bibliographique de l'existant concernant l'impact du changement climatique sur les écosystèmes d'eau douce Guyanais.

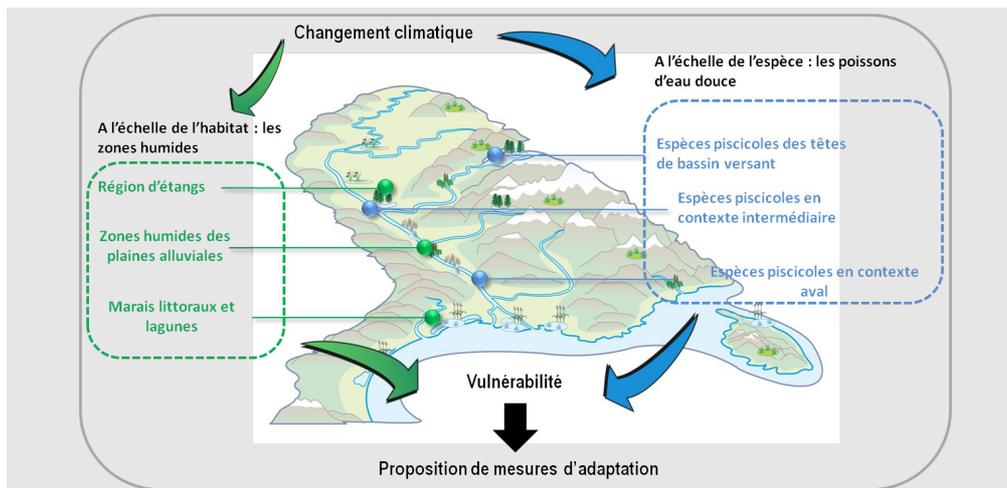


Schéma présentant les deux axes d'étude développés dans le cadre du projet Explore 2070

Afin de préciser l'impact du changement climatique sur ces différents milieux et ainsi proposer des mesures d'adaptation permettant la préservation de la biodiversité mais également des services qui en découlent, un échantillon de treize zones humides d'importance nationale a été sélectionné. Elles ont été regroupées sur la base de leur fonctionnement hydrologique (nomenclature de l'Observatoire National des Zones Humides) :

- Les zones humides des plaines intérieures caractérisées par un régime pluvial ;
- Les zones humides des vallées alluviales de type nival, pluvio-nival, ou pluvial océanique ;
- Les zones humides côtières.

Pour chacune d'elles, une analyse multicritères a permis d'évaluer le niveau de vulnérabilité, sur la base d'indices de sensibilité, d'exposition et de capacité d'adaptation.

Pour évaluer la vulnérabilité des poissons d'eau douce en France métropolitaine, deux approches ont été privilégiées. La première s'est intéressée à évaluer, à l'aide d'outils de modélisation, l'évolution de l'aire des habitats favorables à l'échelle nationale de 38 espèces de poissons d'eau douce sous l'hypothèse du scénario de changement climatique A1B du GIEC à l'horizon 2070. Cette étude a été complétée par une analyse des impacts du changement climatique et des pressions anthropiques (évolution de la demande en eau à l'horizon 2070) sur les poissons au sein du bassin versant de l'Hérault.

– Évaluer l'impact du changement climatique sur le littoral

Les zones côtières sont soumises à une pression anthropique croissante du fait de leur attractivité. En 50 ans, la pression démographique s'y est considérablement accrue, la population des communes côtières européennes ayant doublé au cours de cette période, pour atteindre 70 millions d'habitants en 2001 (Eurosion, 2004). En France, la densité de population des zones côtières est 2,5 fois supérieure à la moyenne. Ainsi, les enjeux (industriels, touristiques, agricoles et environnementaux) se sont concentrés dans ces zones fragiles.

Illustration avec Explore 2070

Trois types d'aléas et leur évolution avec le changement climatique ont été traités dans le cadre du projet EXPLORE 2070 : l'érosion, la submersion permanente et temporaire et les biseaux salés.

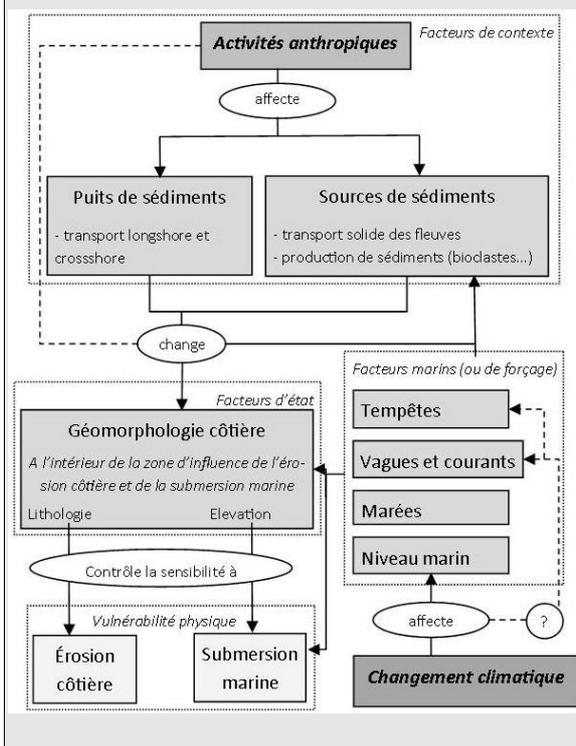
L'objectif a été d'évaluer les effets du changement climatique sur la vulnérabilité des territoires à l'érosion côtière et la submersion marine à deux échelles : nationale et régionale (Languedoc-Roussillon et La Réunion).

Dans son volet méthodologique, le projet a exploré les apports d'une cartographie décisionnelle multicritères (Analytical Hierarchy Process) pour l'évaluation de la vulnérabilité physique de la zone côtière.

Quelque soit le scénario de changement climatique retenu, les résultats mettent en évidence la vulnérabilité plus importante des flèches sableuses, des estuaires, des zones basses, et d'une fine bande au sommet de falaises côtières sujettes à l'érosion. Dans le scénario avec élévation du niveau marin, les aléas érosion côtière et submersion marine dans ces zones sont aggravés.

« Zoom » Languedoc-Roussillon

La figure suivante montre les facteurs qui ont été pris en compte pour élaborer les cartes représentant la vulnérabilité physique des systèmes côtiers à l'érosion et à la submersion marine dans le contexte de l'élévation du niveau marin. A l'échelle régionale, deux scénarios extrêmes ont été pris en compte : l'un avec élévation du niveau marin (1m), l'autre sans élévation.



Scénario: avec 1m d'élévation du niveau marin

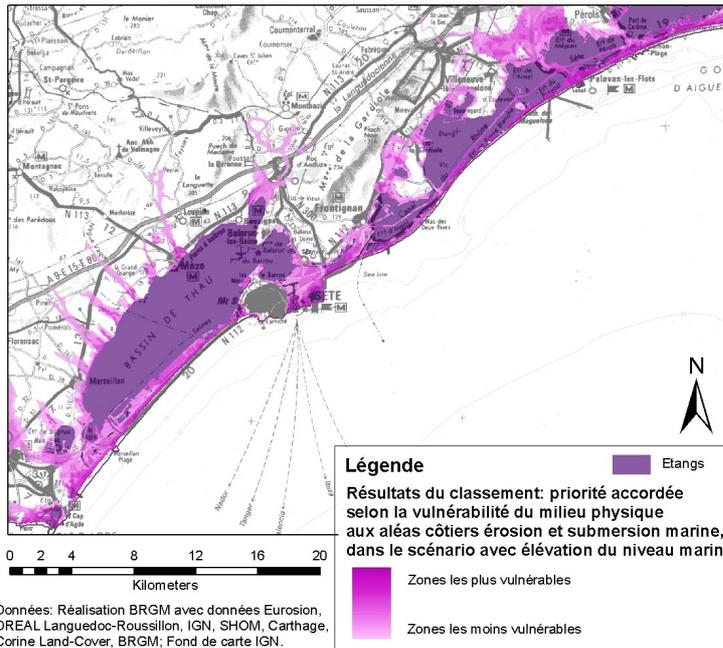


Figure à gauche : modèle simplifié des relations entre les différents facteurs et processus contrôlant la vulnérabilité physique du littoral ; ce modèle simplifié conduit à sélectionner un certain nombre de critères qui sont utilisés ultérieurement pour procéder à l'évaluation multicritères de la composante physique de la vulnérabilité du littoral ; à droite : extrait de résultat pour la région Languedoc-Roussillon, pour la zone du Lido de Sète, Languedoc-Roussillon.

La méthode proposée (analyse cartographique multicritères) est une alternative aux projections déterministes de l'évolution des aléas dans la zone côtière qui se heurtent à des incertitudes très importantes. Avec la méthode proposée, des incertitudes demeurent mais elles peuvent être évaluées qualitativement.

Récapitulatif des sept étapes

L'étape 1 consiste à sélectionner un scénario d'émission de gaz à effet de serre. Les scénarios disponibles sont la résultante de facteurs socio-économiques considérés à l'échelle du globe : démographie, choix énergétique, croissance économique, politiques agricoles, etc.

L'étape 2 vise à modéliser les changements climatiques avec des modèles globaux (planétaires) à large maille. Ces modèles simulent le système global de circulation atmosphérique (avec ses interactions végétation-sols/océans/atmosphère) et l'impact des gaz à effet de serre sur ce système.

L'étape 3 revient à effectuer une descente d'échelle. Il s'agit d'obtenir, à partir des données de sortie des modèles globaux, par diverses méthodes possibles, des résultats de projections climatiques à un pas d'espace plus fin, compatible avec les bassins versants sur lesquels les impacts du changement climatique vont être étudiés.

L'étape 4 permet de modéliser les impacts du changement climatique par l'utilisation de modèles transformant les signaux climatiques en signaux hydrologiques, hydrogéologiques, autres. Différentes familles de modèles peuvent être utilisées et comparées : modèles conceptuels ou modèles à base physique.

L'étape 5 consiste à modéliser l'évolution de la demande en eau sous climat constant puis climat changeant.

L'étape 6 vise à quantifier les incertitudes.

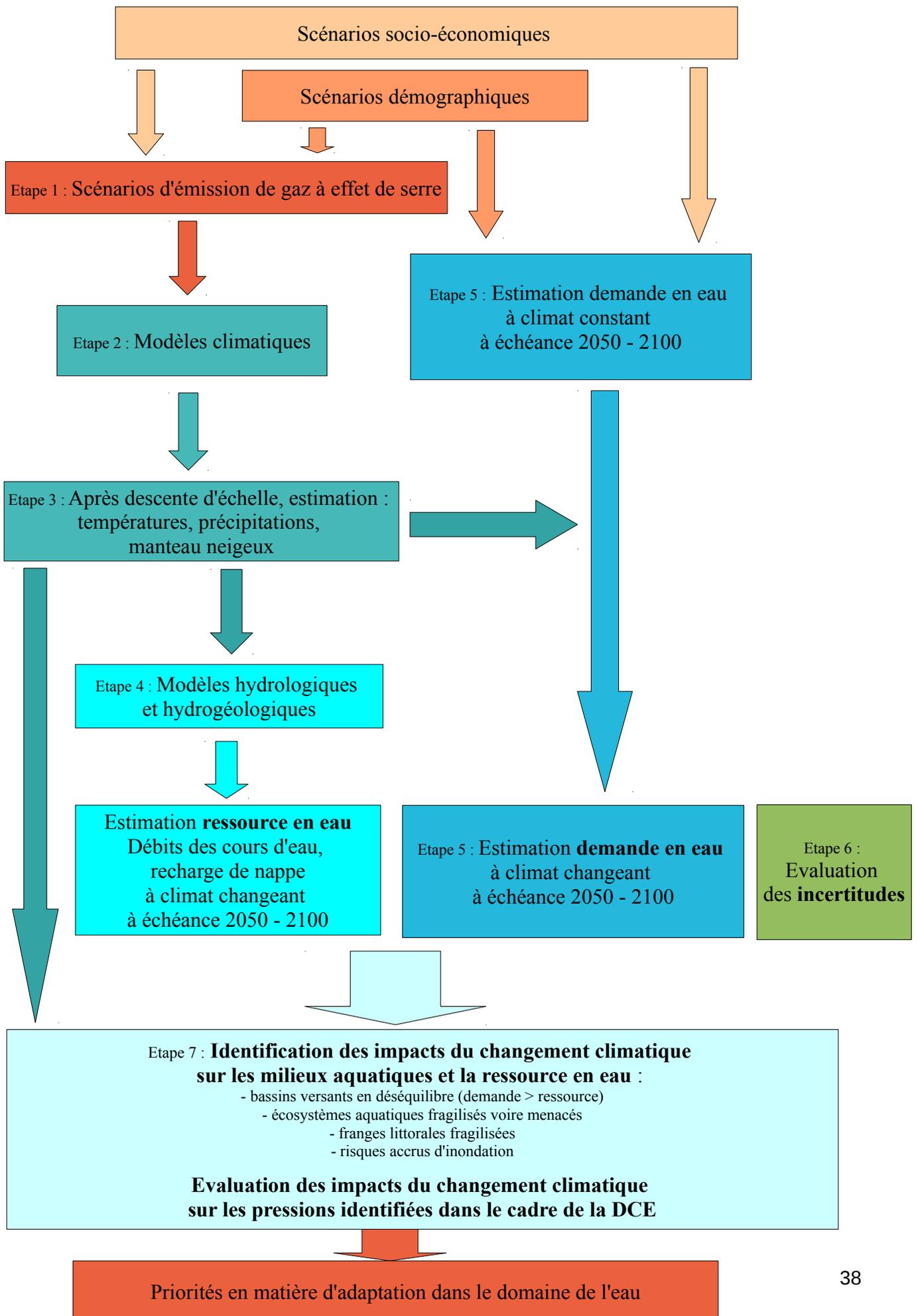
L'étape 7 a pour objectif, sur la base de l'ensemble des résultats des dernières étapes, d'évaluer l'impact du changement climatique sur :

- l'équilibre entre la disponibilité et la demande en eau à l'échelle des bassins versants,
- les écosystèmes aquatiques
- le littoral
- les inondations
- autres.

Les résultats obtenus à l'issue de l'étape 7 doivent permettre :

- d'une part de préciser la vulnérabilité du bassin au changement climatique et d'identifier en particulier les bassins versants susceptibles d'être davantage ou nouvellement concernés par des déficits structurels en eau, les écosystèmes aquatiques qui risquent d'être fragilisés voire menacés du fait du changement climatique, les impacts potentiels sur la frange littorale, les risques potentiellement accrus d'inondation, etc.
- d'autre part, d'évaluer les impacts potentiels du changement climatique sur les types de pressions identifiés à l'échelle du bassin dans le cadre de la mise en œuvre de la DCE.

Le schéma suivant récapitule les sept étapes de cette démarche générale des études d'impact.



ANNEXE 3

Le projet EXPLORE 2070 et les données mises à disposition des bassins

Le projet Explore 2070 « Élaboration et évaluation de stratégies d'adaptation au changement climatique en France face à l'évolution des hydrosystèmes et des milieux côtiers à l'horizon 2050-2070 » a été initié par la direction de l'eau et de la biodiversité en mai 2010 et a livré ses résultats en octobre 2012.

Il a couvert des domaines aussi variés que l'hydrologie ou les risques littoraux en passant par les écosystèmes aquatiques, l'hydrogéologie ou la prospective socio-économique dans le but de consolider une vision systémique des impacts liés au changement climatique et de construire les stratégies d'adaptation possible à l'horizon 2070.

Pour cela, le projet s'est basé sur les projections issues de sept modèles climatiques globaux (ARPV3, CCCMA, ECHAM5, GFDL20, GFDL21, GISS, MRI) pour le scénario d'émissions A1B du GIEC à l'horizon 2046-2065, de deux modèles hydrologiques (MODCOU de Météo France et GR4J d'Irstea) et des modèles hydrogéologiques du BRGM et d'Armines, des modèles socio-économiques du BIPE, des modèles de calcul de la répartition des espèces de poissons de l'Université de Toulouse qui a collaboré avec le bureau d'études Biotope.

A partir d'un scénario climatique modérément optimiste (A1B du GIEC) et d'un horizon de projection de moyen-long terme (2050-2070), ces résultats apportent un éclairage sur l'adaptation au changement climatique et soulignent les défis à relever en matière de gestion quantitative de la ressource en eau.

L'ensemble des résultats produits permet de mettre à disposition des instances de bassin une grande partie des données issues de ces différentes modélisations.

Explore 2070 a découpé la métropole en 100 bassins versants. Ce découpage s'appuie sur celui qui est utilisé dans les SDAGE pour la gestion de la ressource en eau en France. Les données produites et mises à disposition par le projet suivent ce découpage et sont donc disponibles pour chacun des cent bassins versants. **Elles peuvent être librement réutilisées que ce soit pour construire ou compléter un scénario de référence ou pour travailler sur des stratégies d'adaptation.**

Les **données mises à disposition des bassins** sont les suivantes :

Ressources en eaux de surface

Résultats issus des 1500 points modélisés pour la période de référence (1961-1990) et la période projetée (2046-2065).

Principaux indicateurs calculés (liste non exhaustive) et mis à disposition pour chacun des sept modèles climatiques et des deux modèles hydrologiques utilisés :

- Température, Précipitation et ETP moyens mensuels
- Débits moyens mensuels et QMNA5 mensuels
- Indicateurs « précipitation » :
 - PJXA2, PJXA10, PJXA20
- Indicateurs « étiage » :
 - VCN 10, VCN 30, QMNA pour les périodes de retour 2, 5 et 10 ans
- Indicateurs « crue » :
 - QJXA2, QJXA10, QJXA20

Ressources en eaux souterraines

Recharge annuelle calculée en mm sur chacun des 100 bassins versants du projet pour la période de référence (1961-1990) et la période projetée (2046-2065)

Demande en eau⁴

Demande en eau pour l'année de référence (2006) et l'année projetée (2070) pour chacun des secteurs / usages suivants :

- AEP ;
- Agriculture ;
- Énergie (centrales nucléaires fluviales) ;
- Industrie ;
- Transferts inter-bassins.

⁴ Calculs faits pour les années de référence (2006) et de projection (2070) suivant les deux scénarios d'étalement et de concentration urbaines. Les demandes en eau de l'agriculture ont été reconstituées à partir des données du RGA 2000 et du besoin.

Principaux résultats du projet Explore 2070

Impacts du changement climatique

Évolution attendue entre la période de référence (1961-1990) et la période projetée (2046-2065).

Eaux de surface

- Réduction du débit des cours d'eau de **20%** en moyenne annuelle (+5% à –60%)
 - Baisses les plus fortes : Garonne, Seine et Loire.
- Réduction des débits d'étiage (Août) de **30 à 60%**

Eaux souterraines

- Réduction de la recharge des nappes de **30%** en moyenne annuelle (0% à –60%)
 - Baisses les plus fortes : Garonne, Seine et Loire.

Ecosystèmes aquatiques

- **Espèces piscicoles :**
 - Espèces des domaines amont menacées par la remontée de celles des domaines intermédiaires et aval et par les périodes d'assecs plus fréquentes ;
 - Communautés piscicoles plus diverses mais moins typiques.
- **Zones humides :**
 - Une vulnérabilité en lien étroit avec leur fonctionnement hydrologique et leur localisation.

Littoral

- **Augmentation de la vulnérabilité des zones littorales** méditerranéenne et atlantique :
 - pression démographique plus forte
 - expansion des zones exposées à l'érosion / submersion

Prospective : scénario tendanciel

- Réduction des prélèvements AEP de **7% à 12 %**
- Réduction des prélèvements AEP de **56%**
- Stabilité des prélèvements énergétiques (centrales nucléaires fluviales)
- Augmentation des prélèvements agricoles de **42 % à 66%**
- Stabilité des prélèvements totaux (**0% à – 2%**)

Principaux résultats du projet Explore 2070

Stratégies d'adaptation au changement climatique

Evolution attendue entre la période de référence (1961-1990) et la période projetée (2046-2065).

Stratégies d'adaptation évaluées au niveau national

- Stratégie « Sobriété dans les usages » :
 - Substitution de 100% du maïs irrigué par des cultures moins consommatrices en eau
 - Baisse supplémentaire de 20 % de la consommation AEP et industrie
- Stratégie « Augmentation des besoins en eau » :
 - Augmentation des surfaces irriguées au nord et au sud de la Loire
 - Pas de baisse supplémentaire de la consommation AEP et industrie
- Stratégie « intermédiaire » :
 - Substitution de 50% du maïs irrigué par des cultures moins consommatrices en eau
 - Augmentation des surfaces irriguées au nord de la Loire
 - Baisse supplémentaire de 20 % de la consommation AEP et industrie:

Principaux enseignements

- **Aucune stratégie ne parvient à contrebalancer totalement les impacts du changement climatique et à revenir à une situation comparable à la situation actuelle :**
 - La stratégie « Sobriété » permet de maîtriser les prélèvements sans pour autant suffire à résorber les déficits.
 - La stratégie « Augmentation des besoins » accentue les déséquilibres.
 - La stratégie « intermédiaire » permet dans une certaine mesure de maîtriser les prélèvements agricoles mais y parvient moins bien que la stratégie « Sobriété ».
- **Les bassins qui seraient concernés par des déficits structurels sont ceux qui le sont déjà aujourd'hui et auxquels s'ajouteraient de nouveaux bassins.**
- **La diminution des débits estivaux devrait accroître fortement la vulnérabilité des écosystèmes aquatiques.**
 - Les eaux souterraines, notamment au niveau du bassin parisien, devraient être soumises à des pressions plus fortes qu'aujourd'hui, à cause de l'effet de cisaillement entre une recharge naturelle en forte baisse et des besoins en irrigation en forte hausse.
 - Dans certains bassins, les sites industriels et les centrales nucléaires pourraient faire face des pénuries à cause de débits estivaux trop faibles.

ANNEXE 4

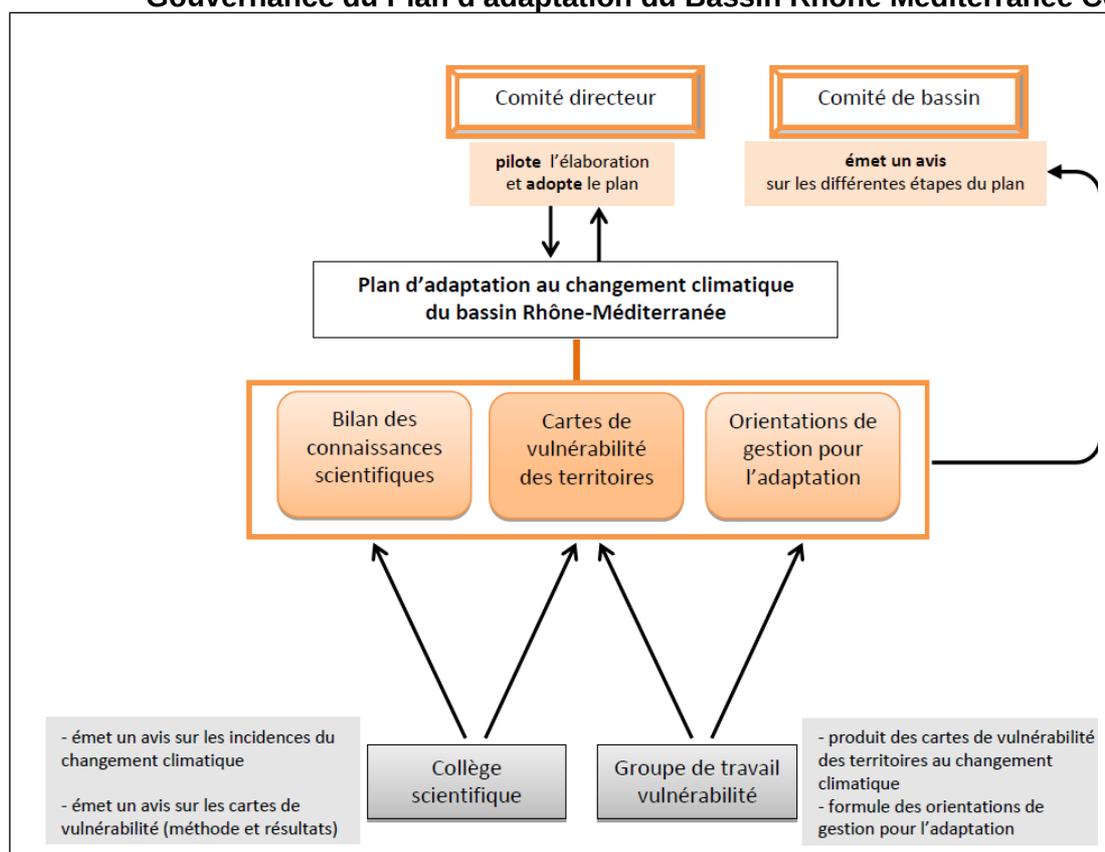
Exemples de démarches initiées dans les bassins

1. Le plan d'adaptation au changement climatique du bassin Rhône Méditerranée & Corse

L'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse a adopté, au Comité de bassin de décembre 2011, le principe d'un plan de bassin d'adaptation au changement climatique assurant une déclinaison territoriale adaptée du plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC) 2011-2015. Ce plan doit permettre d'élaborer les éléments de stratégie à intégrer dans le futur SDAGE 2016-2021 et d'assurer une première mise en oeuvre des mesures d'adaptation dans le cadre du 10ème programme de l'Agence. Il reprend les objectifs du PNACC et traite des enjeux spécifiques à la gestion de l'eau dans le bassin Rhône-Méditerranée.

Dans ce contexte, le préfet coordonnateur de bassin et le président du comité de bassin ont mis en place un groupe de travail animé par l'agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse. Ce groupe de travail réunit des représentants des cinq DREAL et conseils régionaux du bassin, des ARS et DRAAF, du Ministère de l'écologie et de l'ONEMA.

Gouvernance du Plan d'adaptation du Bassin Rhône Méditerranée Corse



Source : Agence de l'eau RMC

L'agence a ainsi lancé une étude intitulée "Vulnérabilités du bassin Rhône-Méditerranée aux incidences du changement climatique dans le domaine de l'eau". Son principal objectif était d'exprimer les incidences du changement climatique sur des fonctions des milieux qui

soutiennent ou supportent des usages de l'eau. Les résultats de l'étude doivent désormais permettre de définir les enjeux prioritaires pour l'adaptation dans le domaine de l'eau sur le bassin Rhône-Méditerranée et de déterminer, par groupes de sous-bassins, ceux qui nécessitent un investissement particulier pour l'adaptation.

Le changement climatique y est abordé à travers trois étapes pour ce plan :

- un bilan des connaissances scientifiques sur les impacts du changement climatique sur le bassin, qui identifie les phénomènes qui auront une incidence sur la gestion de l'eau ;
- une étude sur la vulnérabilité des territoires au changement climatique, incluant une cartographie de ces vulnérabilités ;
- des études prospectives à deux échelles :
 - o A l'échelle du bassin Rhône Méditerranée ;
 - o A l'échelle territoriale : à partir de la cartographie des vulnérabilités au changement climatique, les territoires sont interpellés pour lancer des études courant 2013 pour réfléchir à des stratégies d'adaptation au changement climatique et orienter les politiques d'aménagement.

La vulnérabilité des territoires est définie comme le croisement entre exposition et sensibilité, la capacité d'adaptation étant volontairement laissée de côté dans un premier temps. Les principales caractéristiques de l'étude sont les suivantes :

- L'échelle spatiale est celle des sous-bassins d'Explore 2070, pour le territoire Rhône Méditerranée Corse
- Les impacts du changement climatique sur la ressource en eau sont issus des travaux d'Explore 2070.
- Les usages considérés sont les usages actuels dans le but d'établir un diagnostic pour évaluer les marges de manœuvre de la situation présente. La démarche ne prend pas en compte les évolutions socio-économiques et démographiques du bassin, ni la hausse mécanique de la demande en eau agricole liée au changement climatique.
- Une approche indicielle a été choisie pour permettre une vision homogène des sous-bassins et donner la possibilité d'une hiérarchisation entre les enjeux.
- La vulnérabilité d'un territoire est représentée au travers d'un ensemble de six enjeux (ressources en eau, biodiversité, bilan hydrique des sols, enneigement, eutrophisation et inondation).
- Dans le volet ressource en eau, l'indice est obtenu en confrontant la pression prélèvement d'eau avec le débit d'étiage de référence (une correction intégrant le diagnostic étude volume prélevable pourra être ajoutée si nécessaire).

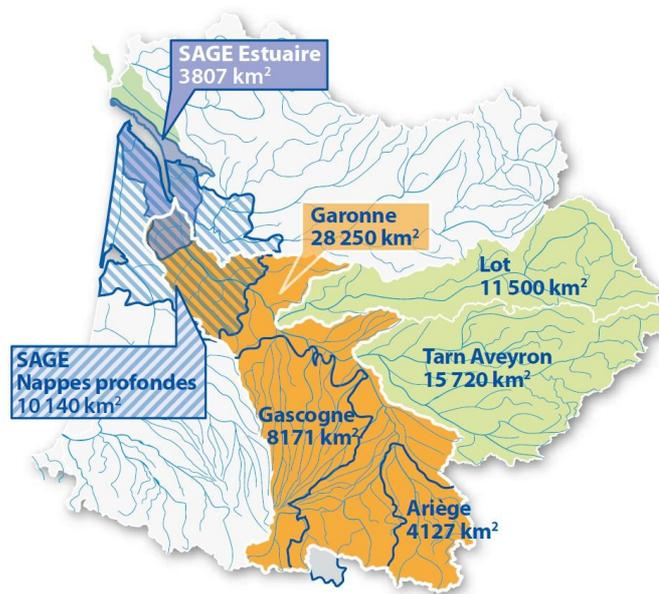
Cette étude est un point de départ qui doit permettre d'engager le dialogue pour l'adaptation. Il illustre bien la nécessité de retravailler avec les acteurs locaux.

2. Le projet Garonne 2050 du bassin Adour Garonne

Face aux changements globaux, le renforcement des connaissances et la sensibilisation des décideurs sont devenus une mission stratégique de l'agence de l'eau Adour-Garonne. C'est la

raison pour laquelle l'agence a lancé le projet « Garonne 2050 » dont l'objectif est d'anticiper les changements globaux à l'horizon 2050 à l'aide d'une démarche prospective participative avec les acteurs du bassin de la Garonne pour éviter les ruptures entre besoins et ressources en eau.

Bassin versant de la Garonne, Sud-ouest de la France (zone d'étude de 65 000 km²)



Les premiers résultats des simulations hydrologiques au regard du climat futur montrent, à l'échéance 2050, une réduction des apports naturels d'eau au fleuve et des débits d'étiages. Les écoulements seraient diminués, principalement du fait d'une évapotranspiration accrue. S'ajouteraient probablement les effets d'une fonte plus précoce de la neige. Ces éléments, territorialisés, malgré les incertitudes liées aux modèles, sont une base pour que s'engage la réflexion sur les stratégies d'adaptation possibles.

La prospective « Garonne 2050 » prend en compte ces évolutions climatiques et hydrologiques et construit parallèlement plusieurs hypothèses sur l'évolution des consommations en eau potable, sur les activités économiques, sur les productions et consommations énergétiques et sur l'agriculture.

Ces hypothèses ont été établies lors d'ateliers participatifs.

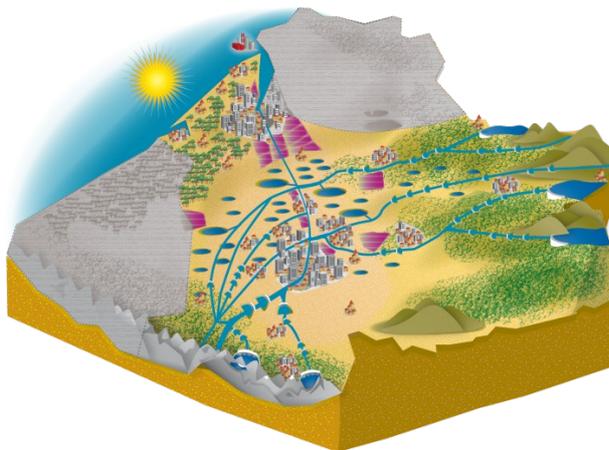
L'approche méthodologique retenue combine la production de scénarios narratifs et leur quantification au travers d'indicateurs et de graphiques.

Les acteurs du bassin ont élaboré cinq scénarios caricaturaux pour donner à voir, en valeur relative, l'étendue des possibles et leurs conséquences probables :

- Un abandon partiel des politiques environnementales, au profit d'une politique économique : il s'agit du scénario qualifié de tendanciel: augmentation du coût de l'énergie, augmentation de la population, étalement urbain, baisse de la SAU, légère évolution des assolements vers des cultures d'hiver. Le déficit en eau se creuse, le bon état écologique prôné par la directive cadre sur l'eau n'est pas atteint ;
- Une adaptation par l'augmentation des ressources disponibles du fait de nouveaux stockages d'eau. L'objectif central est de limiter les émissions de gaz à effet de serre et de garantir un accès à l'énergie (hydroélectricité, biomasse, nucléaire). Les usages anthropiques sont privilégiés, l'objectif de continuité écologique est abandonné et la définition du bon état écologique modifiée ;
- Un contexte économique qui impose une baisse drastique des consommations, notamment domestiques et agricoles. La crise et la prise de conscience de la rareté des ressources poussent à la sobriété en eau et en énergie. L'agriculture locale périclète, les milieux aquatiques et les usages qui ne prélèvent pas en profitent ;

- Une croissance verte décentralisée basée sur du volontarisme très localisé et centré sur l'autonomie énergétique. De petits ouvrages de stockage sont construits pour des usages très locaux (agriculture, eau potable, hydroélectricité). En fonction des priorités territoriales, on peut également avoir recours à des ressources non conventionnelles (eaux usées, dessalement). La solidarité amont/aval est abandonnée ;
- Un développement dit « ultralibéral » où l'eau est devenue un bien marchand. Les politiques publiques sont devenues permissives, la directive cadre est abandonnée et l'agence de l'eau Adour-Garonne ferme ; la croissance démographique sur l'axe de la Garonne est très importante et seules quelques grandes entreprises capitalistiques peuvent valoriser les terres agricoles, assumant les agrandissements fonciers, les droits historiques d'accès à l'eau ou les nouveaux investissements nécessaires.

Illustration graphique de type bloc-diagramme permettant de visualiser le bassin en 2050



Avec ces scénarios, l'agence de l'eau Adour-Garonne a engagé un débat avec les acteurs locaux : aucun scénario n'est acceptable en l'état mais ils servent de guide pour définir collectivement une image consensuelle du futur (phase ultime de l'étude plus normative avec définition d'une feuille de route ou « backcasting »). La réponse à des problèmes complexes et connectés s'appuie sur les deux piliers qui sont à la fois la connaissance et la concertation. La prospective « Garonne 2050 » associe les deux pour fonder un diagnostic partagé, préalable à la définition d'une politique d'adaptation.

Il est prévu que l'étude se termine courant 2013 et que les conclusions soient présentées fin 2013 au comité de bassin.

ANNEXE 5

Expériences au niveau européen

L'agence européenne de l'environnement a proposé une typologie des stratégies d'adaptation possibles dans le but d'aider les Etats Membres à mieux formuler leurs stratégies d'adaptation au sein de leurs prochains cycles de gestion.

Type de stratégie	Exemples de mesures
A. Accepter les risques et les pertes ("ne rien faire")	<ul style="list-style-type: none"> Lorsque les dommages ne peuvent être évités (disparition de certains aquifères côtiers, zones humides, zones d'agriculture pluviale, inondations de zones péri-fluviales à faibles enjeux)
B. Répartir les risques et les pertes	<ul style="list-style-type: none"> Mise en place de systèmes d'assurances et d'instruments de mutualisation financière contre les risques hydrométéorologiques Diversification des sources d'approvisionnement en eau potable
C. Prévenir les effets : technologies et infrastructures (Hard)	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation de la capacité des retenues Augmentation des transferts interbassins Mise en oeuvre de programmes d'amélioration de l'efficacité des usages Développement de systèmes de réutilisation des eaux usées et de dessalement Amélioration de l'efficacité des systèmes d'irrigation, des réseaux d'AEP (adduction d'eau potable) et d'assainissement Redimensionnement des infrastructures et des ouvrages (rehaussement des digues, etc.) Construction de bâtiments résistants aux inondations
D. Prévenir les effets : réponses politiques, réglementaires et institutionnelles (Soft)	<ul style="list-style-type: none"> Plan de gestion de la sécheresse Programme d'incitations financières à l'économie d'eau d'irrigation Modifications des normes de dimensionnement et de fonctionnement des ouvrages Rationnement Ajustement de la tarification de l'eau Normes réglementaires Adoption de nouveaux modes de décision intégrant la gestion des incertitudes
E. Changer/Réorganiser les usages et les activités	<ul style="list-style-type: none"> Réaffectation de la ressource vers des usages à plus forte valeur ajoutée Introduction de cultures plus économes en eau ou résistantes à la sécheresse Déplacement d'activités économiques et d'habitations en dehors des zones inondables
F. Recherche, valorisation de l'information climatique	<ul style="list-style-type: none"> Amélioration des capacités de modélisation et de prévisions climatiques saisonnières, annuelles et décennales Développement d'outils d'aide à la décision et amélioration des méthodes d'évaluation des risques au niveau des bassins et sous-bassins (couplage modèles climato/hydro) Définition des indicateurs pertinents de vulnérabilité et d'adaptation Mise en place de systèmes d'alerte précoce Production et mise à disposition facilitées de données climatiques auprès des décideurs, des services techniques et du grand public
G. Renforcement des capacités et éducation	<ul style="list-style-type: none"> Elargissement des horizons de planification des décideurs Renforcement des capacités techniques des professionnels du secteur en matière de gestion des risques majeurs Sensibilisation et éducation citoyenne

Source : Modifié d'après Burton I. 1996 ; Agence européenne pour l'environnement, 2009

Le Royaume Uni a fourni l'exemple d'une intégration systématique des problématiques et des enjeux liés au changement climatique dans ses plans de gestion, en y dédiant une annexe « adaptation au changement climatique » qui reprend toutes les grandes thématiques de la DCE.

La prise en compte du changement climatique au niveau français et européen

2008 Union Européenne	Position commune des directeurs de l'eau	
	A retenir	Le niveau de connaissance sur la tendance générale des changements à venir ou déjà en cours est suffisant pour justifier la prise de décision en conséquence et la nécessité d'agir. Il convient en particulier d'intégrer toutes les mesures sans regret et les mesures « gagnant-gagnant » identifiées.
2009 Union Européenne	Adoption du livre blanc européen sur l'adaptation au changement climatique	
	A retenir	Le livre blanc se focalise sur la manière dont le changement climatique devrait être intégré dans les 2 ^{ème} et 3 ^{ème} cycles de la DCE
2011 France	Adoption du Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC)	
	A retenir	Un objectif d'économiser 20% de l'eau prélevée – hors stockage d'eau d'hiver – entre la période 2005-2010 et la période 2015-2020
		Un engagement à intégrer les enjeux du changement climatique dans la planification et la gestion de l'eau, en particulier dans les prochains SDAGE 2016-2021
2012 Union Européenne	Rapport de la Commission européenne sur les plans de gestion	
	A retenir	Aujourd'hui dans les SDAGE, le changement climatique n'est inclus que de façon limitée, et se rapporte essentiellement au contexte de la gestion des inondations, de la disponibilité de l'eau et des situations de rareté de la ressource en eau. Aucune tentative visant à vérifier si les PdM étaient adaptés au changement climatique n'a été effectuée.