



EVALUATION DU COÛT DES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DE L'ADAPTATION EN FRANCE
Rapport de la deuxième phase
Partie II – Rapports des groupes transversaux

Table des matières

I	Rapport du Groupe Eau.....	3
I.1	Introduction	4
I.2	La ressource en eau : état des connaissances et impacts observés	6
I.3	Impacts du changement climatique futur sur la ressource en eau	31
I.4	L'adaptation au changement climatique appliquée au cas de l'eau	52
II	Rapport du Groupe Risques naturels et assurance.....	60
II.1	Introduction	61
II.2	Présentation succincte des risques étudiés (climat actuel)	65
II.3	Préalable méthodologique : l'évaluation de la vulnérabilité	68
II.4	Le risque de retrait-gonflement des sols argileux	69
II.5	Le risque d'inondation	74
II.6	Le risque côtier	79
II.7	Le risque gravitaire : impact du changement climatique	83
II.8	Analyse et discussion des résultats	85
II.9	Besoins spécifiques et pistes identifiées pour poursuivre l'analyse.....	91
III	Rapport du Groupe Biodiversité.....	93
III.1	Introduction.....	94
III.2	Chapitre I - Impacts actuels du changement climatique sur la biodiversité .	103
III.3	Chapitre II- Incidences futures du changement climatique sur la biodiversité	114
III.4	Chapitre III- Quelques clés de compréhension des changements observés et prévisibles de la biodiversité.....	132
III.5	Chapitre IV- Éléments d'évaluation économique des impacts.....	138
III.6	Chapitre V - Effets croisés entre adaptation au changement climatique de différents secteurs, atténuation et conservation-utilisation de la biodiversité	149
III.7	Chapitre VI- Stratégies d'adaptation au changement climatique favorables à la biodiversité.....	155
III.8	Conclusion générale	172
IV	Rapport du Groupe Territoires.....	174
IV.1	Introduction	175
IV.2	Les objectifs - la problématique territoriale dans l'adaptation au changement climatique	177
IV.3	Éléments de compréhension de la vulnérabilité des territoires au changement climatique	181
IV.4	Gestion de la transition vers une politique territoriale de l'adaptation	198
IV.5	Conclusion	213

I Rapport du Groupe Eau

I.1 Introduction

I.1.1 Composition du groupe

Le groupe thématique, présidé par MM. Michel Le Quentrec (CGEDD) et Jean-Luc Redaud (CGAAER), s'est réuni à cinq reprises entre février et juin 2009. Le secrétariat de ce groupe a été assuré par la Direction de l'eau et la biodiversité. Du fait du délai très court imposé pour le rendu de ce rapport, seuls des experts ou personnes qualifiées des autres groupes thématiques interministériels ont été systématiquement mobilisés.

Un certain nombre d'experts du domaine de l'eau ont été interviewés :

- Représentants des bassins (Agence de l'eau et DIREN) Seine Normandie, Loire Bretagne, Adour Garonne et Rhône Méditerranée ;
- CEMAGREF : unité hydrométrie-hydrologie de Lyon ;
- INRA : N. Brisson (centre d'Avignon) et B. Itier (INRA Grignon) ;
- Météo-France : CNRM à Toulouse ;
- CERFACS ;
- EDF R&D, laboratoire du LNHE ;
- Etablissement public Loire.

I.1.2 Objectifs

La mission confiée au groupe thématique « Eau et impacts du changement climatique » était de recenser et d'évaluer les impacts du changement climatique sur les différents aspects de la gestion de la ressource en eau en France métropolitaine, aux horizons 2030, 2050 et 2100.

L'exercice de quantification visait à déterminer les coûts pour les gestionnaires de la ressource et leurs usagers. Selon les disponibilités de données et de temps, l'ensemble des impacts n'a pas été systématiquement traité à ce stade. Un certain nombre de lacunes ont été identifiées à l'occasion de cette étude.

I.1.3 Synthèse et résultats

La détection d'une modification notable dans les différentes chroniques de température et de précipitation des dernières décennies n'est à ce jour pas aisée. Les observations sur la température montrent une rupture nette dans les années 1980. Pour les autres paramètres, du fait de la densité du réseau de mesures, de la nature influencée des stations, des incertitudes importantes de mesure, il n'a pas été possible de déterminer si des changements significatifs avaient déjà eu lieu ou non.

Afin de caler au mieux les modèles de projection d'impact du changement climatique, un travail important est encore nécessaire en particulier au travers de l'analyse des chroniques passées, en s'efforçant de « gommer » les pressions anthropiques : approfondissement de l'expertise sur les impacts constatés sur les rivières et les milieux hydrauliques, renforcement et exploitation du réseau hydrométrique, amélioration de la connaissance relative à l'évapotranspiration (ETP et ETR), généralisation d'études du type « imagine 2030 ». Cela nécessitera de réviser certaines méthodes d'analyse qui n'ont jusqu'à présent pas permis de montrer une rupture et de prendre en compte le caractère influencé des prélèvements.

Sur la question de la quantification des impacts du changement climatique sur le cycle de l'eau, la mobilisation des gestionnaires de l'eau est encore faible. L'enjeu est encore peu traité dans les projets de Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE). La mobilisation des comités de bassin sur le sujet impliquera de replacer le changement climatique dans un ensemble d'enjeux auxquels ils sont d'ores et déjà confrontés : déficit quantitatif des ressources en eau en Adour-Garonne, problèmes de contamination par les toxiques des eaux superficielles et souterraines en Seine-Normandie, pollutions agricoles en Bretagne, protection des milieux littoraux sur la Méditerranée, etc.

Aujourd'hui, la plupart des stratégies engagées sont « sans regret », prioritaires et concourront à réduire les effets du changement climatique. La capacité des acteurs de l'eau à faire face aux enjeux de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) est déjà un enjeu majeur. La capacité à faire « plus » en raison du changement climatique constitue un défi supplémentaire à relever.

Les premières projections en termes d'impacts sur la France métropolitaine montrent que le travail à effectuer dans le cadre de la DCE est très important et que les premiers programmes de mesures à adopter d'ici la fin de l'année 2009 risquent de ne pas être suffisants pour faire face aux impacts du changement climatique. Une étude menée sur la Seine montre par exemple que les effets positifs attendus d'une mutation de l'agriculture conventionnelle vers une agriculture raisonnée ne permettraient que de maintenir la qualité actuelle des eaux souterraines. Les premières projections indiquent qu'il est nécessaire de réduire les incertitudes sur les modèles prévisionnels et d'élaborer un corps d'hypothèses communes afin de pouvoir renforcer le dialogue entre les équipes de recherche travaillant sur ces sujets. Ceci permettra en plus de comparer les résultats obtenus dans différents bassins versants. Un pilotage centralisé de ces questions et la coordination des actions locales apparaissent indispensables. Un outil tel qu'un GIP « eau et climat » pourrait permettre de fédérer les différentes équipes de recherche.

De nombreux secteurs économiques seront impactés par une modification du cycle de l'eau : l'agriculture, qu'il s'agisse des cultures sèches ou irriguées ; la production d'énergie pour le refroidissement des unités de production ou les volumes turbinables ; l'alimentation en eau potable ; l'alimentation des canaux, etc.

Les principaux impacts seraient :

- une augmentation de la demande en eau du fait de la hausse des températures : besoin pour l'approvisionnement en eau potable des populations et en eau des animaux, pour l'irrigation, pour le refroidissement des usines de production d'énergie, pour les transports fluviaux, etc. ;
- une modification de la ressource disponible : diminution, voire disparition des apports estivaux des glaciers et du stockage d'eau dans le manteau neigeux, modification de la distribution spatiale et temporelle des pluies, modification du débit des cours d'eau et de la recharge des aquifères, dégradation de la qualité des eaux (diffus, ponctuels), etc. ;
- une augmentation de la vulnérabilité de certains écosystèmes du fait de l'augmentation des températures et des modifications de répartition spatio-temporelle des pluies (augmentation des assecs par exemple) ;
- une augmentation du coût d'accès à l'eau, des conflits d'usage, etc.

Une extrapolation de ces projections nous permet d'évaluer un déficit, par rapport à nos besoins actuels de 2 milliards de m³. Les zones les plus touchées seraient les zones déjà concernées par des déficits structurels. Le coût du déficit atteindrait plusieurs milliards d'euros si les volumes d'eau devaient être complètement compensés et des traitements

complémentaires mis en œuvre. D'autres scénarios comprenant l'adaptation des activités économiques sont envisageables et peuvent s'avérer moins coûteux.

Les territoires ne seront pas touchés de manière uniforme par les impacts du changement climatique. La réponse aux impacts devra engager une solidarité locale dans chaque bassin entre les différents usagers et, selon des modalités encore à définir, certainement entre les bassins qui ne seront pas soumis aux mêmes contraintes climatiques.

En ce qui concerne les mesures d'adaptation, elles seront locales, toucheront les écosystèmes, l'agriculture, l'eau potable, la gestion des inondations, la démographie, l'énergie, etc. et reposeront sur une alchimie complexe entre adaptation des besoins et adaptation de l'offre.

Les mesures locales devront nécessairement prendre en compte des objectifs nationaux voir supra nationaux tels que les engagements communautaires (bon état des masses d'eau de surface et souterraines issu de la directive cadre sur l'eau, objectifs européens en matière de développement des énergies renouvelables, enjeux de production agricole destinée à l'alimentation, etc.). Localement des réallocations de la ressource entre usagers pourront être envisagées par les instances locales de gestion de l'eau.

Il faudra veiller à ne pas aggraver les impacts du changement climatique par un « déficit d'adaptation » : pour cela, les conséquences projetées du changement climatique et les objectifs d'aménagement du territoire devront être partagés par tous les usagers.

L'adaptation des usagers de l'eau devra se faire à travers les outils de planification disponibles dans le cadre de la mise en œuvre de la DCE tels que les SDAGE en s'appuyant sur les comités de bassins, assemblées regroupant les différents acteurs, publics ou privés, agissant dans le domaine de l'eau. Il conviendra pour cela de mieux évaluer à l'échelle du bassin les impacts du changement climatique et les mesures d'adaptation les plus appropriées sur la base d'une analyse coûts-bénéfices (y compris les coûts et bénéfices environnementaux). Un certain nombre d'hypothèses communes à tous les bassins pourra être arrêté afin de rendre comparables au niveau national ces évaluations et identifications.

Ce rapport n'a pas pu traiter de tous les secteurs environnementaux ou économiques liés au cycle de l'eau. Néanmoins, il s'avère que les besoins en recherches complémentaires sont importants, en particulier sur la connaissance des milieux (zones littorales, humides, etc.), la vulnérabilité des activités économiques vis à vis du manque d'eau (agriculture, production d'énergie, etc.) ou le développement de nouvelles technologies (économies d'eau, réserves, traitement, recyclage, etc.).

I.2 La ressource en eau : état des connaissances et impacts observés

I.2.1 État quantitatif de la ressource en eau en France

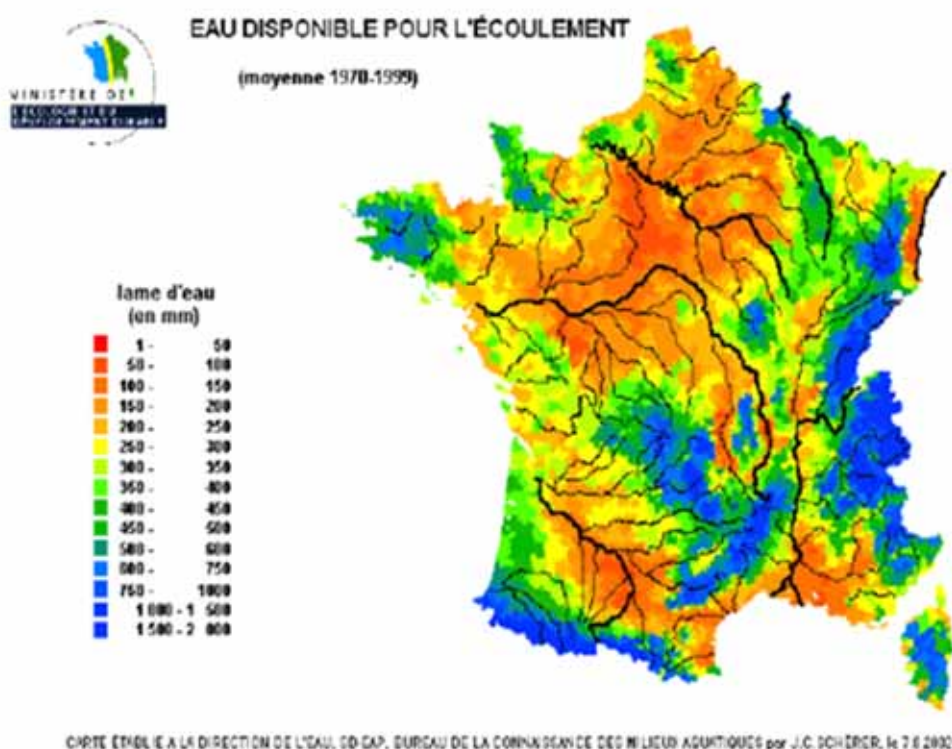
La ressource en eau douce est indispensable à la vie de la faune et de la flore aquatique et non-aquatique, à la vie quotidienne de tout individu, comme à la plupart des activités économiques. Les usages économiques les plus dépendants de la ressource en eau sont l'irrigation des cultures, la production d'énergie (hydroélectricité et refroidissement des centrales de production), certains processus industriels, le transport fluvial, l'évacuation et le traitement des effluents. La ressource en eau est également souvent utilisée pour ses capacités épuratoires. La ressource en eau permet donc de satisfaire plusieurs

fonctions : approvisionnement, productivité trophique, épuration, transport, activités récréatives et patrimoniales.

1.2.1.1 Les précipitations

En France métropolitaine, la moyenne annuelle des précipitations depuis 50 ans est estimée à 486 milliards de m³, soit une hauteur d'eau d'environ 889mm. Sur ce volume, 311 milliards de m³ rejoignent l'atmosphère par évapotranspiration. Seulement 175 milliards de m³ de pluies efficaces en moyenne alimentent réellement les ressources en eau continentale : 75 milliards s'écoulent en surface et 100 milliards s'infiltrent en eau souterraine. Pour réaliser un bilan hydrique national, il convient de tenir compte de l'eau provenant des pays voisins (11 milliards de m³) et de l'eau s'écoulant de la France vers ces pays (18 milliards de m³). Le bilan annuel moyen total des ressources en eau s'élève ainsi à 168 milliards de m³ pour la France métropolitaine.

Les quantités de pluie efficace moyennes sont variables selon les régions comme le montre la Carte 1. De plus, elles sont très variables d'une année sur l'autre. A la période 1999-2002 plutôt pluvieuse, ont succédé des années aux cumuls pluviométriques médiocres et parfois très inférieurs à la moyenne depuis 50 ans, comme en 2003 et 2005. Les dernières années 2006 et 2007 ont retrouvé des niveaux plus proches de la normale, sans pourtant être excédentaires.



Carte 1 - Pluie efficace, moyenne entre 1970 et 1999 (MEDDAT, 2002)

1.2.1.2 Les prélèvements en eau douce

Pour 2004, le SOeS estime que les prélèvements en eau douce en France représentent 34 milliards de m³, dont 28 en eaux superficielles et 6 en eaux souterraines. Les eaux

prélevées dans les aquifères sont restituées dans les eaux de surface et les eaux prélevées en surface ne sont pas forcément restituées dans leur bassin versant d'origine. De plus, aucun des usages ne laissant l'eau dans son état originel, l'eau restituée subit une dégradation sur les plans physique (température), chimique (macro ou micropolluants) ou biologique (bactéries, virus ou protozoaires), ou les trois à la fois.

La Figure 1 montre que la différence entre eau consommée et eau prélevée peut être importante selon les bassins et selon le poids des différents usages.

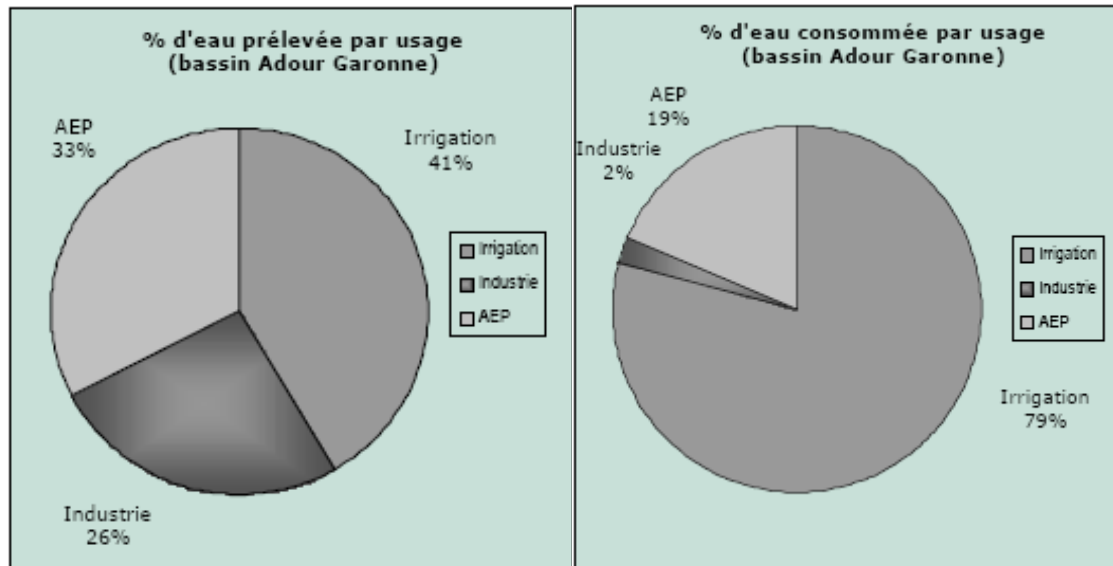


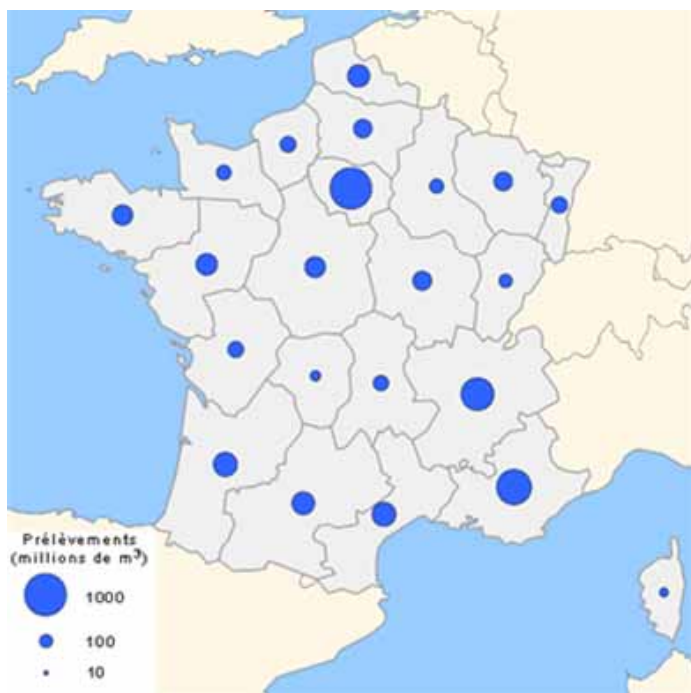
Figure 1 - Comparaison pour un même bassin versant de la répartition des prélèvements et des consommations en eau (IMAGINE 2030)

Ce chiffre de 34 milliards de m³ est certainement sous-estimé, surtout pour la partie eaux souterraines.

Les volumes d'eau prélevés sont très variables selon les usages, les périodes et les régions. Par exemple, les prélèvements pour les irrigations sont concentrés sur une courte période de l'année, ce qui en terme relatif accroît encore leurs impacts sur les étiages des rivières concernées.

Les prélèvements pour l'approvisionnement en eau potable

Sur les 6 milliards de m³ prélevés pour l'AEP, 62% proviennent des eaux souterraines. La croissance des volumes prélevés s'est fortement ralentie au cours des dernières décennies mais elle reste cependant en légère progression. Ni l'augmentation de la population, ni la réduction des pertes en réseau ne permettent d'expliquer totalement ces évolutions. Chaque année, environ 100m³ par habitant sont prélevés pour la production d'eau potable. Les prélèvements sont plus importants dans les régions à forte densité de population et à fort potentiel touristique (Ile-de-France, PACA, Rhône-Alpes) comme le montre la Carte 2.



Carte 2 - Prélèvements d'eau pour l'eau potable par région en 2006 (SOeS, 2008)

Les prélèvements destinés au secteur industriel

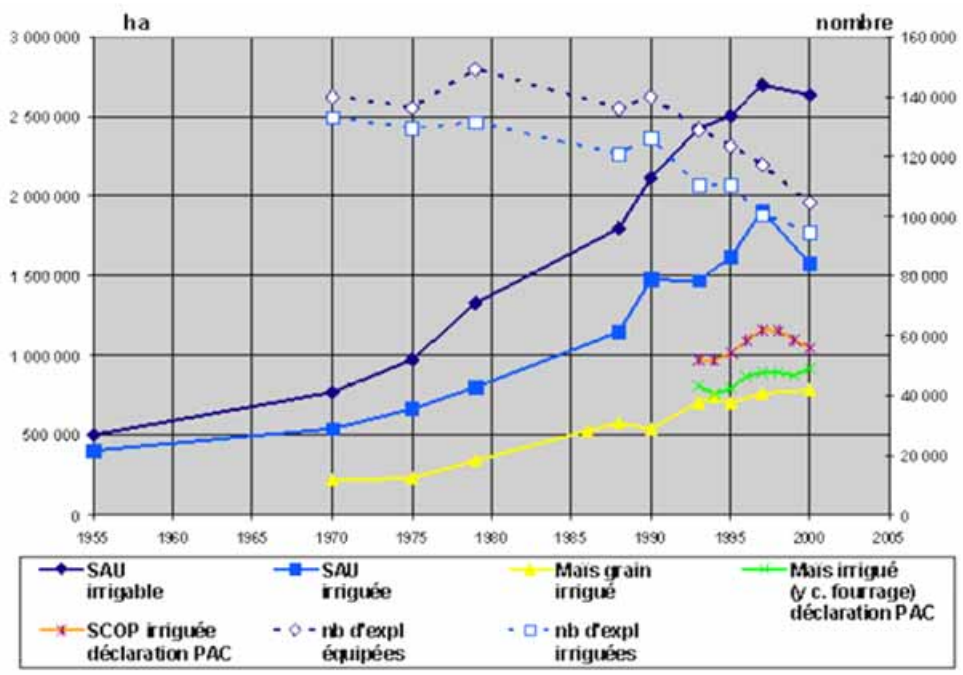
Le secteur industriel représente un prélèvement annuel de 3,5 milliards de m³, les régions de l'Est, du Nord, de la vallée du Rhône ou encore du Sud-ouest sont marquées par des prélèvements plus importants que dans des régions moins industrialisées, comme l'Auvergne ou le Limousin.

Les prélèvements agricoles

Les volumes prélevés pour l'irrigation sont fonction de la nature des cultures, de l'importance des activités agricoles, du climat et aussi du mode d'irrigation.

L'agriculture est le plus gros consommateur d'eau avec 48% de la consommation totale. L'irrigation, avec environ 60% de la surface irriguée occupée par le maïs, a connu une forte progression entre 1988 et 1997 (+66% de surfaces irriguées). Sur les 4,7 milliards de m³ prélevés pour l'irrigation, 77% proviennent des eaux superficielles.

Ces prélèvements peuvent avoir des impacts saisonniers ou chroniques très importants (perturbation de l'équilibre des milieux aquatiques et des habitats piscicoles) car ils ont lieu à 80% lors des périodes d'étiage des cours d'eau et des nappes phréatiques.



Source : AGPM 2006

Figure 2 - évolution des surfaces irriguées en France (AGPM, 2006)

La progression des surfaces irriguées (voir Figure 2) a été très forte des années 1970 à 1995 sur l'ouest de la France (Aquitaine, Midi-Pyrénées, Poitou-Charentes, Pays de la Loire et Centre) qui regroupe plus de la moitié de la sole irriguée avec une culture dominante de maïs. En 2007, les sept premiers départements dépassant les 40 000 hectares irrigués (céréales, oléagineux et protéagineux) sont les Landes, le Gers, le Lot et Garonne, la Charente Maritime, la Vendée et la Haute Garonne.

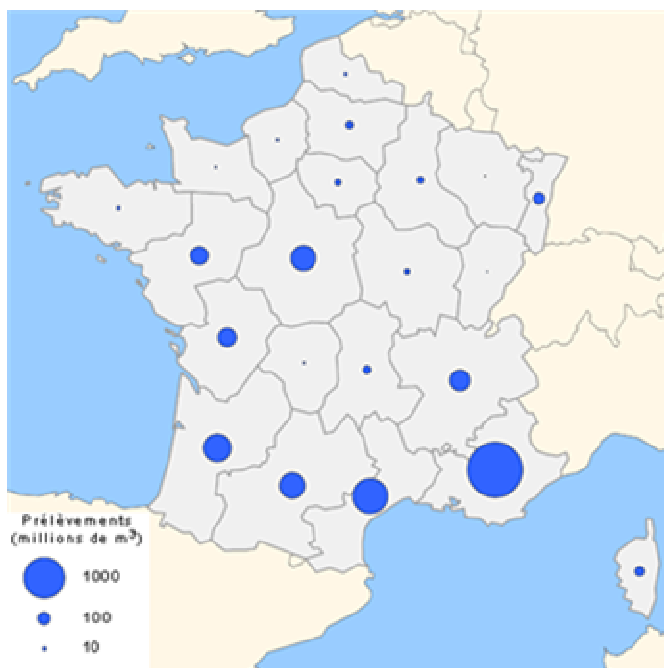
Depuis 1995, le niveau des surfaces irriguées en France (1,4 millions d'hectares) est désormais stable. Au cours des dernières années, les agriculteurs ont été conduits à adapter les quantités d'eau apportées aux cultures irriguées aux besoins des cultures. Dans le Sud-ouest qui a connu plusieurs années de sécheresse estivale (2003 et 2005), le choix des producteurs de maïs a été d'augmenter la consommation d'eau pour maintenir les rendements et réduire la sole irriguée compte tenu d'une disponibilité en eau limitée.

Le Tableau 1 illustre les besoins en eau du maïs par région pédoclimatique.

Tableau 1 - Besoin en eau d'irrigation par zone pédoclimatique : maïs consommation (Arvalis - Institut du végétal)

Régions	Type de sol	Réserve Utile mm	Moyens d'irrigation nécessaires pour couvrir les besoins de 8 ans sur 10		
			Débit mm/jour	Exemple dose/fréquence	Volume mm
Alsace	Hardt superficielle	40 à 50	5	30 mm tous les 6 jours	240
	Plaine de l'III	> 140	3.5	35 mm tous les 10 jours	180
Centre	Limons argileux profonds	> 130	3	30 mm tous les 10 jours	180
	Limons moyens	80 à 130	3.5	25 mm tous les 7 jours	200
	Argilo-calcaires	60 à 120	4 à 4.5	30 mm tous les 7 jours	240
Poitou-Charentes et Pays de la Loire	Limons profonds	> 150	3 à 3.5	30 mm tous les 10 jours	160 à 190
	Limons moyens	100 à 150	3.5 à 4	25 mm tous les 7 jours	190 à 220
	Groies moyennes	70 à 130	4 à 4.5	30 mm tous les 7 jours	230 à 270
Aquitaine	Boulbènes sableuses moyennes	140			170 à 240
	Sables du Marsan	90			190 à 260
	Alluvions de l'Adour	120	-	-	190 à 240
	Champagne moyenne	120			260 à 310
Nord Midi-Pyrénées	Boulbènes moyennes à profondes	120 à 160	4.3	30 mm tous les 7 jours	240
	Boulbènes superficielles	80 à 120	5	25 mm tous les 5 jours	270
Sud Midi-Pyrénées	Boulbènes moyennes à profondes	120 à 160	3.8	27 mm tous les 7 jours	200
	Boulbènes superficielles	80 à 120	4.5	23 mm tous les 5 jours	240
Rhône-Alpes	Graviers profonds plaine de Lyon	130 à 150	4.5	35 mm tous les 8 jours	250
	Graviers superficiels plaine de l'Ain	70 à 80	5	25 mm tous les 5 jours	300
	Graviers superficiels Drôme	70 à 80	5.5	28 mm tous les 5 jours	350 à 400
	Limons sableux terrasses Drôme	130 à 150	4.5	32 mm tous les 7 jours	320

Les plus grands volumes sont mobilisés dans le Sud de la France (avec certaines régions qui pratiquent l'irrigation par ruissellement, plus consommatrice) même si plus au nord, les prélèvements sont également importants dans certaines régions de grandes cultures (Poitou-Charentes, Centre). En Picardie ou en Alsace, malgré une activité agricole assez forte, le régime pluviométrique rend les besoins en eau moins importants. La Carte 3 reflète la répartition régionale des prélèvements.



Carte 3 - Prélèvements d'eau pour l'irrigation par région en 2006 (SOeS, 2008)

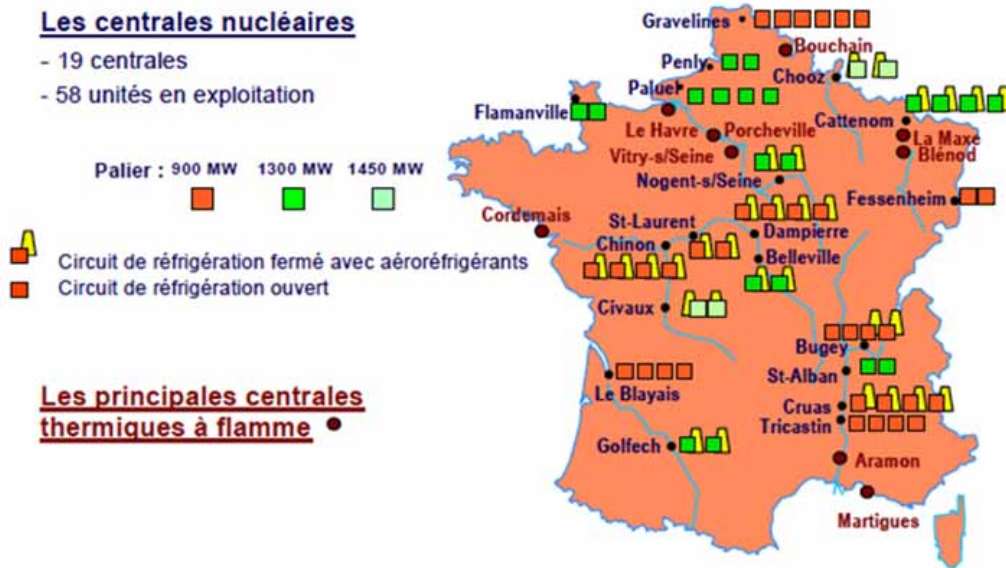
Les prélèvements destinés à la production énergétique

Les eaux utilisées pour la production d'énergie sont présentées séparément des prélèvements pour les autres usages car leurs impacts ne sont pas comparables. Ces prélèvements pour le refroidissement sont très élevés puisqu'ils s'élèvent à 19 milliards de m³, soit 57% du volume total prélevé, mais le volume consommé représente 1,3 milliard de m³, c'est-à-dire 22% du volume consommé en France tous usages confondus (6 milliards de m³).

Les volumes prélevés n'ont pratiquement pas évolué depuis les dix dernières années. L'impact quantitatif de ces prélèvements est relativement modéré puisqu'ils ne concernent qu'un court tronçon de rivière, mais leur impact qualitatif n'est pas négligeable. Les eaux de refroidissement qui retournent au milieu ont une température plus élevée. Elles ne sont, sauf accident, pas contaminées en radioéléments. Mais elles sont contaminées par les biocides ajoutés pour empêcher l'obstruction des conduites de refroidissement par le développement des larves de mollusques qui pourraient s'y fixer et causer des accidents graves.

La répartition géographique des prélèvements liés à la production d'énergie suit celle des centrales, notamment des centrales nucléaires (voir Carte 4) : les régions du Centre, des Pays de la Loire, de la Lorraine, de l'Alsace et surtout la région Rhône-Alpes présentent ainsi les volumes les plus importants.

Le parc de production thermique EDF en France



Carte 4 - Le parc de centrales de production d'électricité d'EDF (EDF, 2009)

Le débit prélevé dans le milieu naturel dépend directement de la puissance thermique à évacuer. Vicaud (2008) précise que les besoins pour le refroidissement en circuit ouvert est de l'ordre de $10\text{m}^3/\text{s}$ pour une centrale thermique de 250MWe , de 40 à $50\text{m}^3/\text{s}$ pour les centrales nucléaires de 900 à 1300MWe .

En circuit fermé, le débit d'eau prélevé pour une tranche nucléaire de 1300MWe est de $2\text{m}^3/\text{s}$.

En termes d'échauffement, la variation de température de l'eau rejetée en aval d'un système de refroidissement en circuit ouvert est de l'ordre de 10°C , ce qui, après dilution, engendre localement un échauffement de l'ordre du degré. A l'aval d'un système de refroidissement en circuit fermé, la variation est de l'ordre du degré, soit après dilution, un échauffement local de l'ordre du dixième de degrés.

Le Tableau 2 compare la consommation en eau de différents types d'énergie. L'énergie hydroélectrique fait partie des énergies les plus consommatrices en eau, derrière la production d'agrocultures.

Tableau 2 - Consommation d'eau par type d'énergie aux USA (CERES 2009)

Type d'énergie	Volume total d'eau consommé par MWh (m^3/MWh)	Consommation d'eau requise pour la production énergétique journalière aux Etats-Unis (millions de m^3)
Solaire	0,0001	0,011
Eolienne	0,0001	0,011
Gaz	1	11
Charbon	2	22
Nucléaire	2,5	27,5
Fioul	4	44

Hydroélectricité	68	748
Biocarburants (1ere génération)	178	1958

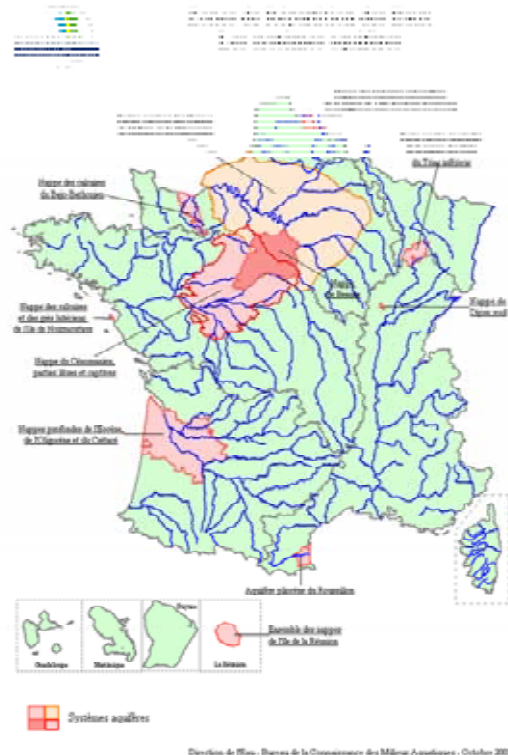
Pour la France, Vicaud (2008) évalue l'eau évaporée (donc consommée) à $1,7\text{m}^3/\text{MWh}$, soit du même ordre de grandeur que la valeur de CERES (2009).

Il est difficile d'envisager d'étudier, à partir de ces grands chiffres de prélèvement ou de consommation, les éventuelles modifications de la demande en eau, notamment en fonction des évolutions des paramètres climatiques car :

- les réductions de prélèvement sont parfois le résultat de considérations financières (prix du m^3 d'eau) ;
- les prélèvements sont très souvent mal connus (un prélèvement pour l'eau potable, il y a des usages industriels raccordés aux réseaux communaux ; la connaissance des prélèvements pour l'irrigation risque de se limiter aux zones de répartition des eaux, etc.) ;
- les augmentations de prélèvement, notamment pour l'irrigation, peuvent être induites par d'autres considérations que les seules conditions climatiques, comme par exemple l'évolution des marchés.

De plus, des prélèvements importants sont pratiquement inconnus aujourd'hui tels que ceux pour le transport fluvial et ne sont pas comptabilisés dans les synthèses nationales.

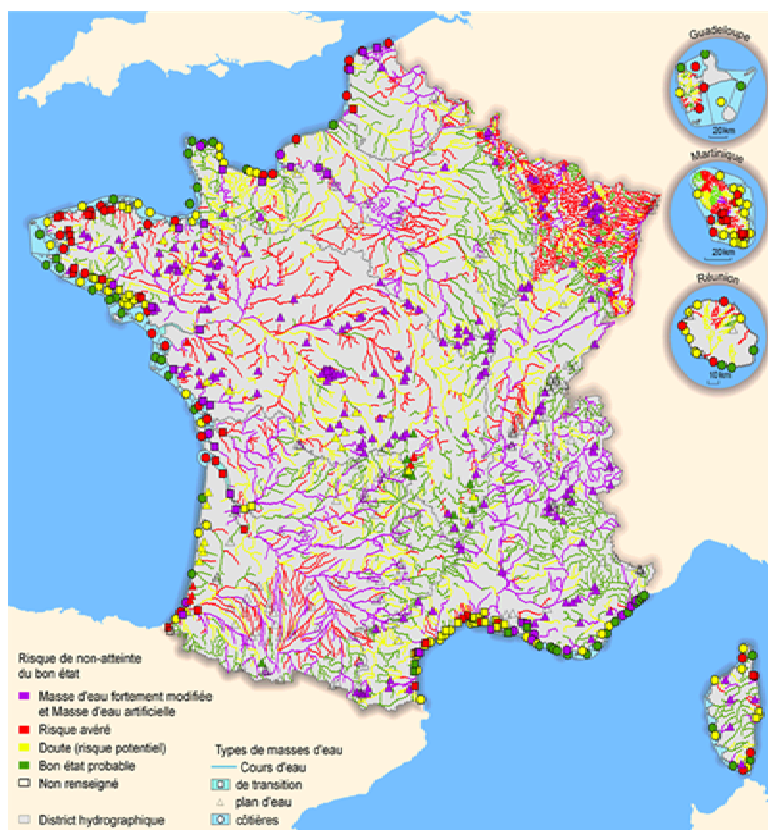
Sur le volet quantitatif, la forte pression sur la ressource en eau se résume par des zonages administratifs : les « zones de répartition des eaux » (ZRE). Elles se définissent comme des secteurs caractérisés par une insuffisance autre qu'exceptionnelle des ressources en eau par rapport aux besoins. Ce sont des zones en situation de déséquilibre structurel. Les deux cartes de la Carte 5 montrent les bassins hydrographiques et les systèmes aquifères en zone de répartition des eaux.



Carte 5 - Zones de répartition des eaux (à gauche, eaux superficielles et souterraines, à droite, eaux souterraines uniquement)

De même, la forte pression sur la ressource en eau peut se traduire par de nombreux effets sur la qualité de l'eau. Pour illustration, on peut se référer aux résultats des états des lieux réalisés dans le cadre de la mise en œuvre de la DCE (cf. Carte 6)¹.

¹ Pour plus de précisions, le lecteur pourra se reporter aux projets de Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) qui ont été mis à la consultation du public au printemps 2008 et à la synthèse des états des lieux disponibles sur http://www.eaufrance.fr/document.php?id_article=459



Carte 6 - Etat des lieux DCE, risque de non atteinte du bon état en 2015 pour les eaux superficielles (SOeS)

1.2.2 État des connaissances sur les impacts observés du cycle de l'eau et sur certaines fonctions

La disponibilité de la ressource en eau est fonction d'un certain nombre de variables dont celles pilotant le cycle de l'eau (ou cycle hydrologique) qui comprend les flux entre les grands réservoirs d'eau liquide, solide et gazeuse sur Terre. Ce cycle se décompose en précipitations (liquide et solide), évaporation (et sublimation), évapotranspiration, ruissellement, infiltration. La pluie est un facteur majeur dans ce cycle.

L'attention portée aux impacts du changement climatique étant relativement récente, peu de tentatives de détection de signal ont eu lieu jusqu'à présent. En effet, pour la détection des impacts du changement climatique, il faut également avoir à l'esprit que le cycle de l'eau peut être très court dans une rivière, 2 semaines environ et très long dans la mer où l'eau peut rester plus de 3 000 ans. Dans une nappe souterraine alluviale, le temps de séjour de l'eau va de quelques jours à quelques mois. Il est de plusieurs centaines d'années dans les nappes des bassins sédimentaires et peut atteindre 10 000 ans ou plus dans certaines nappes profondes. Il est pratiquement infini dans les nappes fossiles. Il est de quelques mois dans les sols.

1.2.2.1 Évolution des précipitations au cours du XX^{ème} siècle

Les analyses de plusieurs indices climatiques, calculés par la Direction de la Climatologie de Météo-France à partir des Séries Quotidiennes de Référence (SQR), ont été

présentées dans le rapport final du projet IMFREX soutenu par le programme GICC coordonné par le MEEDDM².

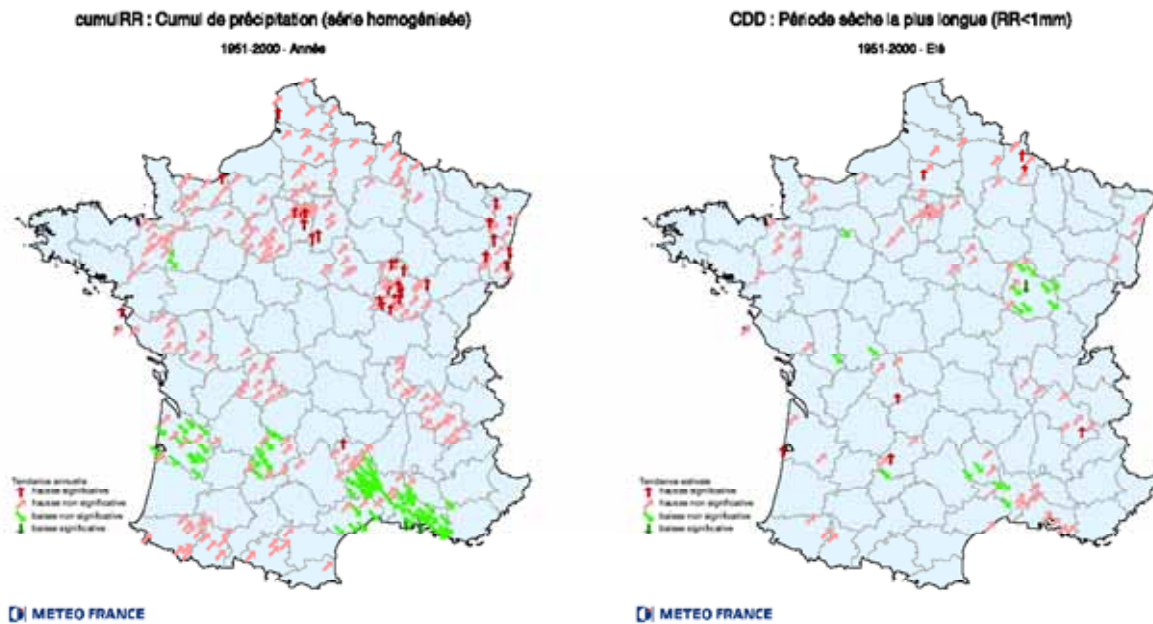
Les principaux indices de précipitation montrent généralement peu d'évolutions significatives.

Les séries mensuelles de précipitation disponibles montrent une évolution des précipitations en France au cours du XX^{ème} siècle caractérisée par une pluviométrie annuelle globalement à la hausse, à l'exception des stations situées dans une zone allant des Landes au bassin méditerranéen où le cumul annuel des précipitations présente une tendance à la baisse. Les indices présentent donc généralement un contraste nord-sud avec une pluviométrie plutôt en hausse sur une grande partie nord.

La tendance à la hausse est moins marquée sur la période 1951-2000 que sur l'ensemble du XX^{ème} siècle. Ces résultats sont cohérents avec ceux du GIEC, à savoir une augmentation de 0,5 à 1% par décennie du cumul annuel sur le XX^{ème} siècle aux moyennes et hautes latitudes continentales de l'hémisphère nord.

La Carte 7 montre l'évolution de la pluviométrie moyenne annuelle et du nombre de jours sans pluie sur la période 1951-2000.

² Voir le site : <http://medias.dsi.cnrs.fr/imfrex>



Carte 7 - Variation de la pluviométrie moyenne annuelle et variation du nombre de jours sans pluie observées entre 1951 et 2000. (in PROJET IMFREX)

Les observations présentent également un net contraste saisonnier été-hiver sur la période 1951-2000 avec des sécheresses estivales en augmentation :

- les précipitations hivernales sont en hausse sur les 2/3 nord du pays et en baisse sur le tiers sud ;
- le maximum des précipitations cumulées sur 5 jours consécutifs et le cumul de pluie moyen des jours pluvieux sont plutôt en baisse en été et le nombre maximal de jours secs consécutifs est plutôt en hausse en été ;
- les cumuls de précipitation en automne et au printemps sont en augmentation générale et en baisse sur le pourtour méditerranéen.

D'après Dubuisson *et al.*, une augmentation du nombre annuel de journées pluvieuses³ a été observée. Cette hausse s'observe sur l'ensemble des saisons à l'exception de l'été où le nombre de journées pluvieuses est en baisse sur la majorité des stations traitées. Les périodes sèches sont plutôt en baisse annuelle (surtout au printemps) et en assez nette augmentation estivale. Leur pendant « humide » montre des évolutions nettement plus marquées sur l'année et traduisent un allongement des périodes pluvieuses. Les hausses les plus nettes se situent à l'automne et au printemps. Le signal est inversé en été.

Sécheresse

³ Les journées pluvieuses étant définies par un cumul de précipitation (rr) supérieur ou égal à 1 mm

L'Expertise Scientifique Collective (ESCo) sécheresse coordonnée par l'INRA en 2006 a étudié si la multiplication apparente des épisodes de sécheresse depuis 1976 pouvait être considérée comme significative et résulter du changement climatique.

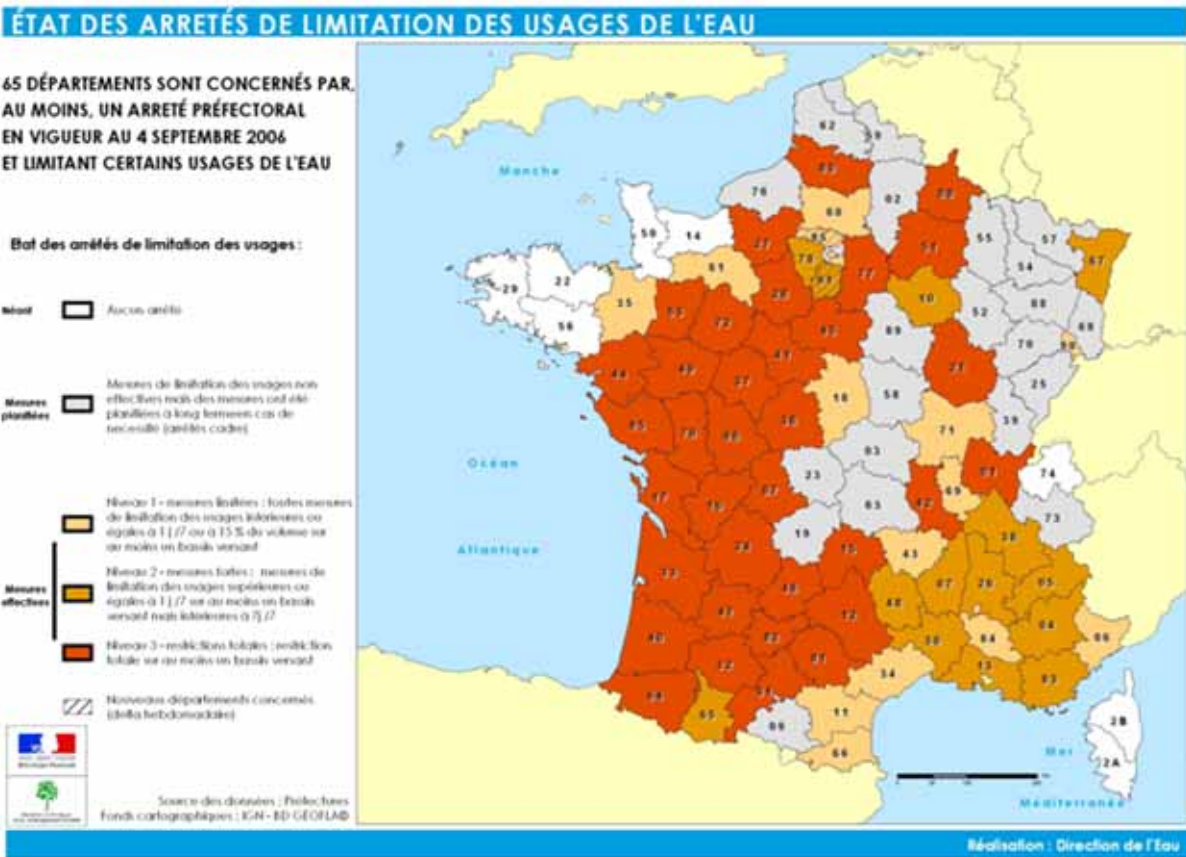
Tableau 3 - catégories des principales sécheresses depuis 1976 (ESCo Sécheresse)

Type	1976	1979	1985	1986	1989	1990	1991	1992	1996	2003	2004	2005
Hydrologique								X				
Agricole		X médit.	X centre et sud	X centre et sud		X ouest et sud	X nord			X 2/3 du territoire		
Combinée	X nord				X ouest				X nord et ouest		X sud	X 2/3 du territoire

Si les résultats du projet IMPact des changements anthropiques sur la FRéquence des phénomènes EXtrêmes de vent, de température et de précipitations (IMFREX) montrent une tendance à une légère augmentation de la durée des épisodes sans pluie, c'est encore une indication insuffisante pour porter un jugement avéré. De plus, des sécheresses ont été observées avant 1976. L'ESCo cite, en se limitant au XX^{ème} siècle, sur tout ou partie de la France métropolitaine, les épisodes de 1906, 1911, 1921 très marquée et déjà qualifiée de sécheresse du siècle (278 mm seulement sur l'année à Paris), puis de 1932 à 1934, 1938, de 1942 à 1948, 1949, 1953, 1955, 1957, 1959, 1961, 1962, 1964 et 1969.

Météo-France commence tout juste à caractériser les épisodes de sécheresse passés : début, fin, longueur et intensité des épisodes afin de pouvoir les comparer.

Pour les derniers évènements, les subventions pour pertes de récoltes ont été en 2003 de 590 millions d'euros et de 250 millions d'euros en 2006. Pour EDF, les pertes de production d'électricité induites par les baisses de charges du fait des températures des cours d'eau élevées à l'amont des installations de production se sont élevées à 5,5TWh en 2003, à 0,9TWh en 2004, à 2,5TWh en 2005 et à autant (*i.e.* 2,5TWh) en 2006, soit une douzaine de TWh sur la période 2003-2006. Au cours de la canicule 2003, le coût de rachat d'énergie (à des tarifs très élevés, compte tenu de la situation de pénurie) par EDF sur les marchés européens pour satisfaire la demande sur le marché français s'est élevé à un peu plus de 310 millions d'euros. En 2003, 77 départements ont été en restrictions d'usage. Ils ont été 65 en 2006 (cf. Carte 8).



Carte 8 - Etat des restrictions temporaires d'usage de l'eau au 4 septembre 2006 (Direction de l'Eau, 2006)

La neige

Le manteau neigeux, véritable stockage naturel, joue un rôle important pour la ressource en eau puisqu'il permet de stocker de l'eau pendant une partie du printemps et de l'été le cas échéant. Au Col de Porte (cf. Figure 3), Météo-France assure un suivi continu du niveau de ce manteau neigeux. Sur cette unique station, il est observé une diminution de la pluviométrie hivernale et une diminution de la hauteur de neige moyenne.

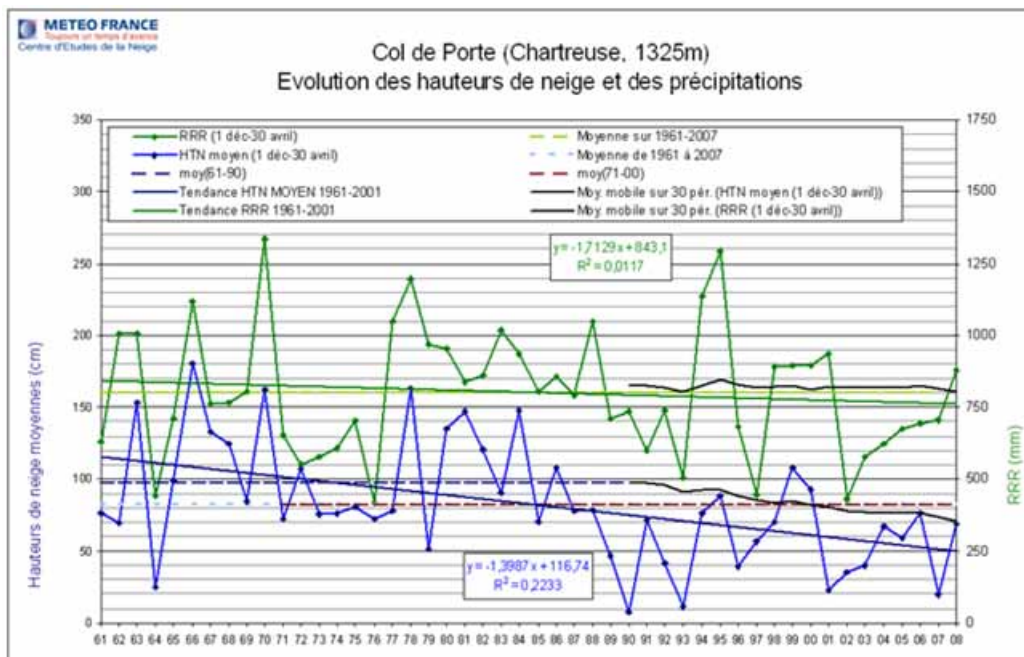


Figure 3 - Evolution des hauteurs de neige au Col de Porte (Météo-France, 2009)

Sur les Pyrénées, une régression générale des glaciers est constatée : de petite taille, les glaciers abrités par le massif pyrénéen sont particulièrement vulnérables aux variations climatiques et accusent un recul important. En effet, comme l'indique le tableau ci-dessous, la surface englacée du massif des Pyrénées ne représente aujourd'hui plus que 5km² (année 2000), alors qu'elle atteignait environ 45km² en 1870.

Tableau 4 - Evolution des surfaces englacées pyrénéennes depuis 1870 (<http://climat.sig-pyrenees.net>)

Année	Surface (en km ²)	Auteur(s)
1870	40 à 45	<u>Schrader F.</u>
1890	34	<u>Schrader F.</u>
1905	25	<u>Eydoux D.</u> , <u>Maury L.</u> , <u>Gaurier L.</u>
1939	20	-
1968	15	<u>Höllerman P.</u>
1988	8,1	<u>Serrat D.</u> , <u>Ventura J.</u>
2000	5	<u>Martinez de Pison E.</u> et al., <u>René P.</u>

Source : Association. MORAINÉ

Le potentiel hydraulique utilisé en hydroélectricité

Peu de chiffres sont disponibles. Dans le cadre de l'élaboration des SDAGE, il a été réalisé une étude des potentialités d'équipement en usine de production hydroélectrique. La Figure 4 montre la production d'EDF.

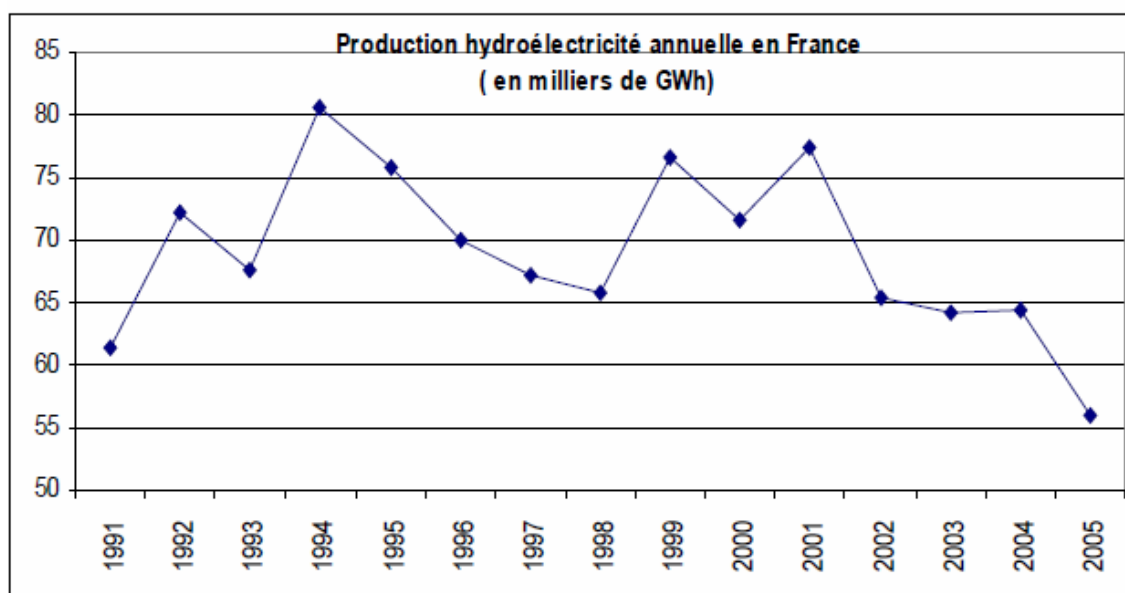
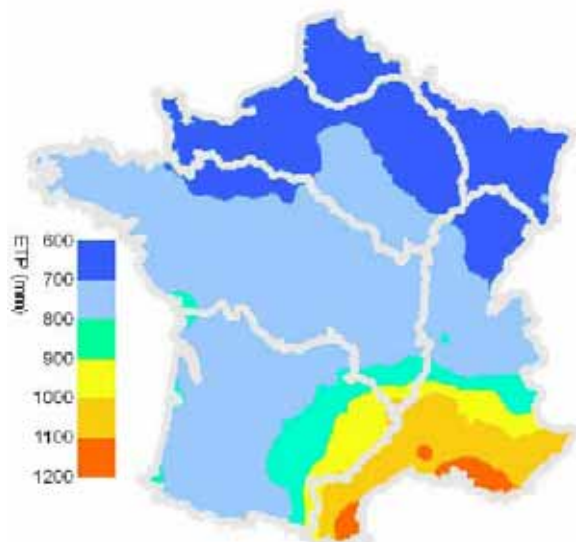


Figure 4 : Production hydroélectrique annuelle en France (source EDF)

Les réserves hydroélectriques représentent un potentiel très important de volumes d'eaux stockées comparativement à celui des réserves de soutien d'étiage. D'ores et déjà, des révisions des règles de gestion de ces réserves ont été négociées sur certains bassins versants sensibles pour soutenir les étiages de rivières déficitaires (Garonne, Ariège, Tarn, Durance, etc.).

I.2.2.2 Evaporation et évapotranspiration : transferts de l'eau du sol vers l'atmosphère à partir du sol, des surfaces d'eau et des plantes

Evaporation et évapotranspiration représentent le déficit d'écoulement entre les précipitations et les écoulements des rivières et des eaux souterraines. Ce sont des phénomènes souvent très importants. Ils peuvent atteindre 2/3 des précipitations. Les évapotranspirations potentielles (ETP) en France varient de 600mm au nord du pays à plus de 1000mm en zone méditerranéenne (cf. Carte 9).

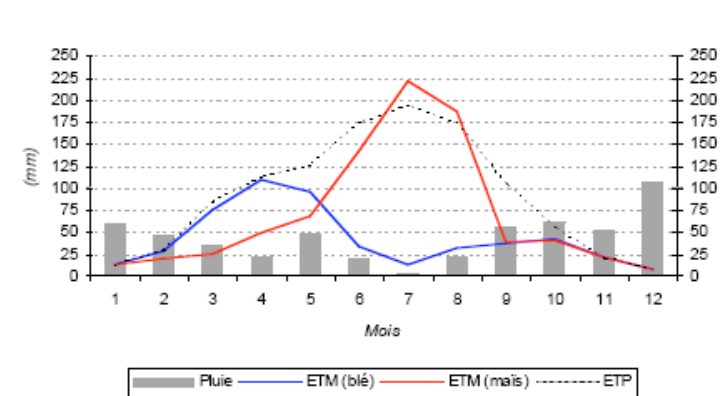


Carte 9 - Evapotranspiration potentielle (ETP) exprimée en millimètres d'eau (LEVY, 2005)

En hiver et au printemps, l'évaporation est principalement contrôlée par l'énergie radiative disponible en surface. Cette dernière étant faible en hiver, l'évaporation est limitée et le ruissellement total est important. Au cours du printemps, l'évaporation croît rapidement en raison de l'augmentation de l'énergie radiative disponible en surface et du développement de l'activité de la végétation. En outre, de l'eau est encore largement disponible dans le sol, en raison du stockage qui a eu lieu au cours de l'hiver et de l'automne précédents. L'évaporation peut d'ailleurs ainsi être supérieure aux précipitations. En réponse à l'évaporation, le réservoir d'eau du sol diminue peu à peu au cours du printemps. Au début de l'été, l'eau disponible dans le sol devient un facteur limitant de l'évaporation et la contrôle dans une large mesure. Les débits sont minimums au cours de l'été. Le stock d'eau du sol se reconstitue ensuite au cours de l'automne.

En agriculture, les besoins des plantes peuvent être très variables selon les périodes de l'année ce qui explique que certaines cultures peuvent être conduites en culture pluviale alors que d'autres nécessitent des irrigations à des périodes sensibles de leur végétation.

Evolution des valeurs mensuelles des variables climatiques (pluie et ETP) et des besoins en eau (ETM) d'une culture d'hiver (blé) et d'été (maïs), pour Toulouse en 2003



Les besoins en eau des cultures d'été (maïs) sont maximaux en été (juillet-août) avec des valeurs de 6 à 7 mm/jour alors que la pluviométrie est faible.

Par contre, les cultures d'hiver (blé) voient leur ETM culminer en fin de printemps, avec des valeurs nettement plus faibles (3 à 4 mm/jour), qui coïncident par ailleurs avec une période de bon apport pluviométrique.

Figure 5 - Comparaison de la demande en eau du blé d'hiver et du maïs

Les facteurs importants pour l'évapotranspiration sont : la température de l'air, le vent, l'hygrométrie et le rayonnement. Cette évapotranspiration dépend également du type de végétation (cf. Figure 5), de la saison et de l'état hydrique du sol. Ce paramètre est difficilement mesurable localement (bacs d'évaporation, lysimètres, etc.). Diverses études ont été menées à l'échelle régionale en utilisant des modèles de calcul de l'ETR plus ou moins sophistiqués et en calant ces modèles sur des données de bilans hydriques mesurés *in situ*. Elle est évaluée par différents modèles. Avec le modèle Turc qui établit une formule pour la zone méditerranéenne et l'Afrique du Nord, elle est peu sensible à la température moyenne mais varie linéairement avec le rayonnement moyen mensuel. Avec la méthode de Penman, elle dépend du rayonnement net.

L'ESCo Sécheresse (2006) rappelle que l'approche par simulation est incontournable pour l'évaluation de ces données à l'échelle régionale, très importantes dans le bilan de masse du cycle de l'eau, puisqu'elles sont totalement inaccessibles à l'expérimentation, contrairement aux données à l'échelle de la parcelle (tel le réseau de stations agroclimatiques de l'INRA). Dans ces conditions, envisager la détection d'une variation de ce paramètre est alors difficile.

Boé (2007) affirme que des tendances intéressantes dans le cadre du changement global sont détectées sur la période 1970-2005 pour l'évaporation et l'humidité des sols. L'évaporation augmente ainsi en hiver et au printemps en raison de la tendance positive de l'énergie radiative disponible, pour diminuer brutalement au début de l'été en raison de la diminution de l'humidité des sols. Ces changements sont cohérents avec ceux que l'on pourrait attendre du changement climatique, même si rien ne permet de le démontrer rigoureusement. Il précise que ces résultats sont issus de la modélisation et qu'il n'existe pas d'observations de l'évaporation et de l'humidité des sols pour les confirmer sinon quelques stations agroclimatiques de l'INRA ou d'instituts techniques.

I.2.2.3 Ruissellement : variation du régime hydrologique des rivières ?

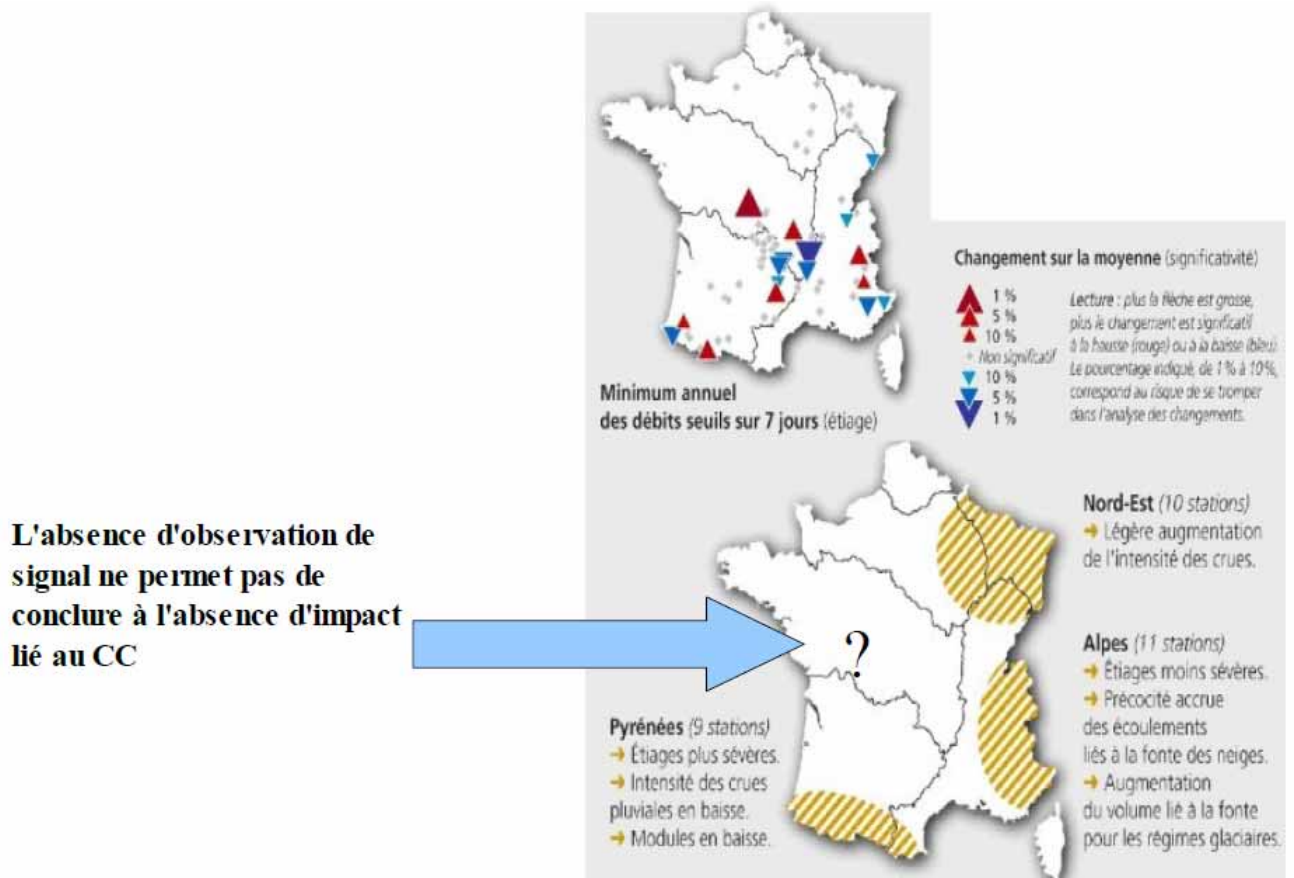
Le CEMAGREF⁴ a cherché à mettre en évidence d'éventuelles modifications des écoulements, des crues et des étiages en France entre 1961 et 2000, liées au changement climatique. Une méthodologie a été mise au point pour détecter des

⁴ Renard, 2006

changements dans les séries chronologiques, d'abord à une échelle locale, puis à une échelle régionale en s'intéressant à la signification et à la cohérence régionale des résultats.

Sur un millier de stations du réseau hydrométrique, 195 stations ont été retenues de part la qualité des données sur 40 ans. Après une première élimination des stations réputées influencées par des prélèvements ou des opérations de soutien d'étiage, seules 128 ont été retenues en étiage et 179 en crue.

De nombreuses évolutions ont pu être mises en évidence sur plus de 100 longues séries hydrométriques. Cependant, il s'est avéré, après examen et visite de toutes les stations de mesure concernées, que près de la moitié des évolutions provenaient de problèmes métrologiques. Pour l'autre moitié, le nombre de changements détectés n'était pas suffisant pour mettre en évidence une tendance cohérente à l'échelle de la France.



Carte 10 - Résultats des tests de détection d'évolutions sur des longues séries hydrométriques en France métropolitaine (Renard, 2006)

Pour une station prise isolément, aujourd'hui, il n'est pas possible de distinguer ce qui relève de la variabilité naturelle du climat, de problèmes métrologiques ou du changement climatique. Un signal cohérent permettant d'exclure la métrologie n'apparaît que si l'on s'intéresse à un groupe de stations voisines dans une même zone hydroclimatique. Mais le signal reste faible et on ne peut garantir qu'il s'agisse de l'effet du changement climatique, à l'exception de trois régions montagneuses où l'impact de l'augmentation de température sur la fonte nivale est assez intuitif : le Nord-est avec deux sous-zones : les Vosges et le plateau lorrain, les Alpes avec des nuances entre le nord, le centre et le sud, les Pyrénées avec deux sous-zones : une légère augmentation

du débit des rivières glaciaires en zone centrale et une diminution du débit d'étiage des rivières basques ont pu être établies sans ambiguïté. Ces sous-zones n'ont que 3 à 5 stations de mesure.

Ce faible signal ne peut pas être interprété comme une preuve de l'absence d'effet du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques sur la majeure partie du territoire. Il n'est pas possible aujourd'hui de lever l'incertitude sans poursuivre la surveillance des extrêmes de débits.

On peut en effet remarquer le taux important de stations qui n'ont pu être exploitées dès lors que des séries relativement longues, homogènes et non perturbées sont nécessaires. Aucune station n'a pu être retenue dans l'Ouest. Très peu de stations ont pu être retenues en plaine et en étiage sur les grands fleuves et leurs affluents les plus importants. Cette absence de prise en compte des rivières influencées pénalise les conclusions du travail de Renard (2006).

Tardieu (2008) compare deux bassins du Sud Ouest : le système Neste et la Midouze. Le premier est aménagé depuis 150 ans, les écoulements paraissent stables, mais une baisse des débits d'étiage est observée. De la conjonction de ces deux constats, il en conclut que le principe de l'aménagement peut être conservé. Mais pour le bassin de la Midouze, il en est autrement. Le bassin est peu aménagé, une diminution des écoulements est observée ainsi qu'une forte baisse des débits d'étiage. Or Tardieu rapporte une stabilité de l'irrigation depuis 15 ans sur ce bassin versant, il se demande alors si l'augmentation de la biomasse de la forêt ne serait pas responsable de la baisse des écoulements (il faut cependant bien noter que les forêts et prairies consomment de l'eau pendant des périodes moins critiques que certaines cultures irriguées telles que le maïs).

Cette capacité de réguler des écoulements est un critère très important à considérer avant d'envisager d'éventuels programmes d'aménagement (barrages ou transferts). Tardieu cite l'exemple d'un bassin au Maroc pour lequel les perspectives de réduction annuelle des écoulements rendraient une stratégie de création de nouvelles ressources en eau inutile ; il en est de même sur des rivières telles que l'Ebre en Espagne. Ce point mériterait un examen complémentaire pour le cas de la France, au moins au niveau de bassins déclarés dès aujourd'hui déficitaires.

1.2.2.4 Infiltration : transfert de l'eau de la surface du sol vers les nappes

L'eau infiltrée, généralement à partir de la surface du sol, permet d'alimenter les nappes d'eaux souterraines et de constituer des réserves d'eau au niveau des racines des plantes.

L'infiltration est souvent supérieure aux précipitations peu intenses, ce qui explique la rareté du ruissellement superficiel.

L'eau souterraine est un compartiment invisible mais qui joue cependant un rôle majeur : il constitue une grande réserve d'eau et il entretient un lien étroit avec les eaux de surface. Les eaux souterraines contribuent à l'alimentation des sources et des cours d'eau et régulent les mouvements des eaux de surface.

Le travail réalisé sur le ruissellement d'eau de surface n'a pas encore été fait pour les eaux souterraines. Il devrait être réalisé par le BRGM en 2009 dans le cadre d'une convention avec l'ONEMA. Il pourrait être complété par un volet d'observation de la zone de transition entre eaux douces et eaux salées dans les rivières ainsi que de la position

du biseau salé. Le BRGM entend également mettre en place un réseau spécifique de suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines (inscrit au projet de convention 2010-2012 DEB-BRGM).

De même, un volet très important sur l'alimentation des zones humides devrait également être réalisé.

I.2.2.5 Au delà du cycle hydrologique : l'aspect qualitatif

La ressource en eau qui assure un certain nombre de fonctions est également suivie avec d'autres paramètres physico-chimiques.

La qualité et la quantité des eaux sont interdépendantes. Différents exemples illustrent les liens étroits entre les aspects quantitatifs et qualitatifs. Ainsi, le développement important des prélèvements depuis une trentaine d'années a parfois significativement modifié le fonctionnement des écosystèmes naturels : diminution de leur capacité d'autoépuration, détérioration de la qualité de l'eau et perte des habitats.

La prolifération des plans d'eau artificiels entraîne un accroissement de l'évaporation, une augmentation de la température de l'eau, des déficits d'oxygène dissous et souvent la pollution des milieux aquatiques par des espèces exotiques envahissantes.

La baisse du niveau des nappes phréatiques provoque un assèchement des sols et une diminution de leur capacité d'autoépuration : disparition de zones forestières, mortalité des micro-organismes et de la petite faune du sol qui permettent le bon fonctionnement des cycles des éléments. Elle peut donc compromettre la qualité des eaux souterraines.

Dans les régions côtières où les taux de pompage sont trop élevés, l'intrusion d'eau salée dans les aquifères peut poser un grave problème de potabilité.

La baisse du débit d'étiage dans un cours d'eau, à cause d'une sécheresse occasionnelle ou de la surexploitation, provoque automatiquement l'augmentation des concentrations des polluants provenant notamment des rejets des stations d'épuration. Il s'ensuit une dégradation de la qualité de l'eau qui est souvent responsable de la disparition des espèces aquatiques sensibles.

L'abaissement du niveau d'une nappe alluviale, en période d'étiage ou à cause de la surexploitation, peut entraîner une inversion du sens d'écoulement : la rivière alimente alors la nappe, avec risque de la polluer.

L'impact anthropique sur la qualité de l'eau est très important. La détection d'un signal de variation de la qualité de l'eau due à une modification du climat est donc très difficile et ne semble pas avoir été tentée pour le moment.

La présence des poissons

Les « migrateurs amphihalins », poissons qui se déplacent sur de longues distances afin d'effectuer leur cycle de vie entre la mer et la rivière, qui sont relativement bien observés pour certains, pourraient être considérés comme les témoins d'éventuels changements sur les bassins versants.

Le réseau européen Diadfish1 a retenu qu'outre la température de l'air, quatre autres facteurs connus influencent la distribution des poissons d'eau douce : la longitude à

l'embouchure du bassin versant, la superficie du bassin versant, l'altitude à la source et les précipitations.

Lassale (2008) rapporte un certain nombre de modifications d'aires de répartition d'espèces :

- L'éperlan *Osmerus eperlanus* avait, il y a encore quelques années, la Gironde pour limite méridionale de distribution. Aujourd'hui, La Loire, 3° plus au nord est la limite sud actuelle de l'espèce ;
- L'abondance du flet a diminué sur la Gironde ces 25 dernières années, entre 1979 et 2005, avec un réchauffement des eaux de l'estuaire. Parallèlement, dans le canal de Bristol (estuaire du Severn - mer Celtique), le flet fait partie des 10 espèces dont l'abondance, fortement corrélée à la température, a augmenté entre 1981 et 2002.

Lassale (2008) rapporte également des changements dans la phénologie de migration, particulièrement chez les salmonidés pour lesquels de longues séries de données existent.

Cet aspect est étudié plus en détail dans le cadre du rapport du groupe Biodiversité.

La température de l'eau des rivières

Plusieurs études indiquent un réchauffement estival des rivières de plus d'un degré en 30 ans avec une rupture depuis 1988. Ce réchauffement de l'eau des rivières est corrélé significativement au réchauffement de l'air et varie avec l'altitude⁵.

Les recherches menées lors des 50 dernières années par l'INRA autour du Lac Léman, ont permis de mesurer dans cette région une augmentation de la température de l'air et une diminution des jours de gel. Un accroissement de l'ordre de 1°C de la température au fond du Lac Léman a pu être observé depuis 40 ans. L'inertie du Lac Léman est telle que des hivers froids ne permettent pas le retour à la situation thermique des années 60. La température annuelle moyenne de l'eau de surface a subi un accroissement de température du même ordre. Cette modification a une conséquence sur le démarrage printanier de la pousse du phytoplancton et du zooplancton, sur les périodes de reproduction de certains poissons. Des risques pèsent sur la biodiversité.

Daufresne *et al.* (2004) ont montré une augmentation de 1,5°C sur le haut Rhône entre 1979 et 1999 au niveau du Bugey. Rochart (2007) a signalé pour l'estuaire de la Gironde une augmentation de la température de 1°C sur la période 1983-2005.

En 2003, 2004 et 2006, des autorisations exceptionnelles de rejets ont du être mises en place afin d'éviter un arrêt de la production d'énergie du fait de la forte température au niveau des rejets des centrales de production d'énergie (la limite étant à 28°C). En 2003 : respectivement 19 jours à Tricastin, 14 jours à Golfech, 2 jours à Bugey de dépassement des conditions normales de rejets. En 2006, le dépassement a été respectivement de 10 jours à Tricastin, 19 jours à Golfech et 3 jours à Bugey.

Les centrales équipées de système de refroidissement en circuit fermé (cf. I.2.1.2 – Les prélèvements destinés à la production énergétique) sont moins soumis aux contraintes de variation de température entre la prise d'eau et le rejet du fait du faible échauffement

⁵ Gerdeaux 2007

engendré. Néanmoins, elles sont soumises aux contraintes de température maximale de rejet (28°C). A noter que les températures de l'eau en amont des centrales dépassaient déjà dans certains cas cette limite (températures d'eau supérieures à 28°C) : il est probable que des températures en amont des installations supérieures à 28°C soient de plus en plus souvent observées et sur des périodes plus longues. Pour les fleuves et rivières peu profonds à courant relativement lent, les échanges eau-atmosphère ramènent la température de l'eau à ce qu'elle aurait été sans centrale en quelques kilomètres, une dizaine de kilomètres au plus. L'effet se fait sentir beaucoup plus loin en aval sur les fleuves à courant rapide.

I.2.3 Nécessité d'améliorer la connaissance des impacts observés

La question de l'établissement de l'état zéro afin d'apprécier les effets d'un éventuel changement climatique pose la question des réseaux d'observations et de la capacité à obtenir des chroniques de bonne qualité sur des durées les plus longues possibles, principalement avant les années 1980, période de rupture des tendances de températures.

En tentant de répondre à cette question, un certain nombre de manques de connaissances ou de moyens se sont révélés importants. On les classera en deux types respectivement liés à un développement de la recherche et au questionnement sur les réseaux de mesures.

Axes de recherche

Caractérisation d'hydro-éco-régions

Afin de pouvoir établir des scénarios pour les gestionnaires de ressources, la caractérisation du territoire en quelques régions homogènes (selon le type de fonctionnement des rivières, des eaux souterraines, du climat, etc.) permettrait de simplifier les hypothèses dans le cadre d'études sur les impacts projetés du changement climatique.

Caractérisation des évènements de fréquence faible (sécheresse, variation de la période de retour d'un même événement, etc.)

Le mot sécheresse est aujourd'hui pour la France trop utilisé (pour certains, c'est pratiquement tous les ans !). Souvent, des territoires sont déclarés en situation de sécheresse (météorologique, agronomique ou hydraulique), alors que ces territoires souffrent plutôt d'une surexploitation de sa ressource en eau.

Un travail de caractérisation des sécheresses (durée*intensité) permettrait d'évaluer des périodes de retour et donc d'observer plus finement l'aggravation ou non de ces phénomènes.

Météo-France a présenté ses travaux sur ce sujet au groupe Eau.

Complément sur la détection des effets du climat passé sur l'hydrologie :

Les travaux de Renard (2006) devraient être complétés, en particulier sur les cours d'eau influencés et être lancés pour les aquifères.

Quel est le lien entre climat et qualité de l'eau ?

Quel est le lien entre climat et capacité épuratoire de l'eau, quelles sont les capacités d'une modification du climat à faire varier les différentes réactions physico-chimiques, etc. ? Des études méritent d'être menées sur ce sujet non exploré à ce jour.

Réseaux de mesure

Métrologie des bas débits et des crues

Les travaux du CEMAGREF ont montré que le réseau de mesures ne permettait pas de montrer de ruptures dans les chroniques. De nombreux points de mesures se sont révélés inadaptés (trop influencés, problèmes de métrologie, etc.).

Un travail de réflexion sur la représentativité du réseau, sur les conditions de fonctionnement des stations, serait à relancer.

La surveillance de la température des rivières

Les travaux de l'ONEMA relatifs à la création d'un réseau de mesure de la température des tronçons du réseau hydrographique français est à prolonger de manière à pouvoir bénéficier de plus d'information sur ce paramètre que celles issues des seules obligations réglementaires imposées aux producteurs d'énergie électrique.

La surveillance des eaux souterraines

Une réflexion telle que celle de Renard (2006) sur les eaux superficielles est à lancer pour les eaux souterraines. Elle porterait sur la qualité du réseau d'observation et la représentativité des points de mesures par rapport à des aquifères potentiellement très importants.

La connaissance des pressions

Afin de pouvoir corriger les chroniques de débits ou de piézométrie pour tenir compte des prélèvements, une cartographie de ceux-ci est à réaliser. Cette cartographie devra s'étendre à des usages tels que le transport fluvial qui est un préleveur mal connu et non répertorié dans les synthèses nationales actuelles. Cette connaissance permettra d'évaluer des indices de pression sur la ressource renouvelable

La compréhension du fonctionnement hydraulique des zones humides

Les zones humides jouent un rôle essentiel d'infrastructures naturelles et doivent être pleinement intégrées dans les stratégies d'adaptation au changement climatique. Les zones humides peuvent améliorer la qualité de l'eau et limiter l'ampleur et les effets néfastes des crues et des étiages. Les ripisylves peuvent également améliorer l'ombrage des cours d'eau et limiter l'augmentation de la température de l'eau dans les rivières.

Or les zones humides sont, aujourd'hui en France, globalement en forte régression car menacées par des pressions de toutes sortes : disparition des prairies, développement des infrastructures, pression de l'urbanisation, etc. Le changement climatique va créer des contraintes supplémentaires notamment par les risques liés aux difficultés de maintenir les régimes d'écoulement et de lutter contre les effets d'une remontée du niveau de la mer. Ces problèmes sont déjà d'actualité pour les Wateringues du Nord, le delta de la Camargue, les étangs du littoral Languedoc-Roussillon et les marais de la côte Atlantique. L'impact d'un réchauffement des eaux sur ces milieux écologiquement très sensibles est mal connu. Un travail d'inventaire et de caractérisation est à réaliser.

I.2.4 Conclusions du chapitre

La détection d'un changement dans les chroniques passées n'est pas aisée. Les observations sur la température montrent une rupture nette dans les années 1980. Pour les autres paramètres, du fait de la densité du réseau de mesures, de la nature influencée des stations, des incertitudes importantes de mesure, (...), il n'a pas été possible de détecter la présence ou non de ruptures dans les chroniques de relevé de données.

Afin de caler au mieux les modèles de projection, un travail important sur les chroniques passées reste nécessaire. Cela nécessitera de revoir certaines méthodes qui n'ont pas permis jusqu'à présent de trouver de rupture.

I.3 Impacts du changement climatique futur sur la ressource en eau

I.3.1 Incidences ESTIMEES/PROBABLES du changement climatique dans les prochaines décennies (moyen à long terme et extrêmes)

La gestion de la ressource en eau est à considérer dans un contexte difficile comme on l'a vu dans la partie I.2, où elle doit tenir compte de déséquilibres importants liés à une répartition géographique inégale des ressources (cf. Carte 1), des conditions climatiques et des variations saisonnières. Par ailleurs, la pollution, quant à elle, tend à devenir un facteur compromettant de la qualité de l'eau. Dans ce contexte, le changement climatique devrait accroître la pression exercée sur les ressources en eau, en raison de l'aggravation de l'intensité et de la périodicité de phénomènes tels que la pénurie d'eau et les sécheresses.

Au vu des observations et des simulations, le dernier rapport du GIEC (2007) conclut sur un réchauffement sans équivoque du climat actuel, se traduisant par l'augmentation des températures (océan et atmosphère), sur le recul des surfaces occupées par la neige et les glaciers et l'élévation du niveau de la mer accompagnée par une nette diminution des précipitations en été sur la France. Les conséquences sur le régime hydrologique des rivières sont loin d'être aussi nettes. Elles sont difficiles à évaluer du fait de la forte non-linéarité des processus et des rétroactions possibles, notamment par la végétation.

Les utilisations de l'eau par l'homme sont multiples (besoin vital, hygiène, énergie, production industrielle et agricole...) et la gestion des ressources est d'ores et déjà un enjeu critique de nos sociétés.

Si le changement climatique n'est pas la seule ni même peut-être la principale source d'inquiétude pour la gestion de la ressource en eau, il ne fait guère de doute que les modifications du cycle hydrologique dues au changement climatique compliqueront encore davantage sa gestion.

I.3.1.1 Quantification des impacts et vulnérabilité de la ressource en eau au changement climatique

Les ressources en eau sont à l'évidence fortement dépendantes de variables climatiques qui en déterminent les apports (précipitations, températures). Consécutivement à l'augmentation de la température et du rayonnement, l'évaporation plus importante des masses d'eau participera à la diminution des quantités de ressources disponibles et

exploitables. Si les tendances proposées pour les précipitations par les modèles climatiques globaux ou régionaux, sont encore relativement incertaines pour des applications à l'échelle des bassins français, ces modèles sont en revanche robustes pour les prédictions de la température. Il en résulte les conséquences suivantes pour la gestion des eaux :

- l'accroissement des températures stimulera l'évaporation ;
- même dans les régions où les précipitations ne diminuent pas, voire même augmentent légèrement, la disponibilité en eau pourra cependant reculer ;
- les tendances saisonnières jouent un rôle important. En été, notamment, le renforcement de la transpiration pourra provoquer une pénurie d'eau dans des régions qui n'en souffrent pas actuellement.

D'importantes incertitudes existent sur les changements du cycle hydrologique dans le climat futur, même dans les modèles les plus récents. Néanmoins, l'Europe est une zone où les modèles s'accordent relativement bien, avec une augmentation des précipitations au nord et une diminution au sud du continent. La limite est variable selon les saisons (plus au nord en été et plus au sud en hiver). La France se situant dans la zone de changement de signe, les incertitudes y sont fortes. Les impacts les plus importants auront lieu en été avec une importante diminution des précipitations sur le sud de l'Europe, France incluse, une forte diminution du ruissellement ainsi qu'un assèchement des sols. Ceci n'exclut pas une augmentation d'intensité des événements extrêmes : crues de type cévenoles et ruissellement urbain sous orages intenses.

Puisque les modèles climatiques permettent désormais de constituer une climatologie complète sur le siècle à venir, tout en lui donnant une perspective régionale, Météo-France a réalisé, pour le compte de l'ONERC, une étude qui présente un certain nombre d'indices climatologiques concernant les gelées, les fortes précipitations ou les vents maximums pour les scénarios A2 et B2 aux échéances 2030, 2050 et 2090. En valeur absolue, les pluies seront plus importantes au nord qu'au sud, mais, en valeur relative, les diminutions seront plus importantes à l'ouest qu'à l'est⁶.

I.3.1.2 Études réalisées

Différentes études des impacts du changement climatique sur le cycle hydrologique de grands bassins versant français ont déjà été réalisées. On peut notamment mentionner les projets du programme « Gestion des Impacts du Changement Climatique » (GICC) pour la Seine et le Rhône. Les principaux résultats sont présentés dans Ducharne *et al.* (2004) pour la Seine et Etchevers *et al.* (2002) pour le Rhône.

Pour la Seine, l'étude conclut principalement à une diminution très probable de l'humidité des sols et des débits d'étiage en été. En hiver, la situation est moins claire. La majorité des modèles prévoit une augmentation des précipitations, mais celle-ci ne se traduit que rarement par une augmentation des débits en raison notamment d'une augmentation d'évaporation. Ainsi, dans la majorité des cas, l'écoulement diminue en hiver. Cette étude souligne l'impact de la grande dispersion des scénarios de précipitations sur les débits simulés. Elle montre qu'une forte incertitude existe et qu'il est donc absolument nécessaire de considérer un ensemble de scénarios climatiques. Cette étude est sur le point d'être réactualisée (projet Rexhyss). Les premiers résultats confirmeraient une diminution généralisée des débits en hiver et des baisses très importantes du niveau des

⁶ Les résultats sont disponibles sur <http://www.ecologie.gouv.fr/-Climat-futur-en-France-.html>

eaux souterraines (de l'ordre de plusieurs mètres). L'étude a aussi montré une diminution systématique de l'humidité de la zone racinaire (-31mm soit -9%, en moyenne annuelle sur les 12 scénarios retenus), qui est plus prononcée en été. L'étude initiale est la seule à s'être intéressée au volet qualitatif de l'eau. Sous condition de mise en œuvre d'une politique de progrès visant à une généralisation « d'une agriculture raisonnée », l'étude montre que les effets négatifs du changement climatique (scénario A2) annulent en grande partie l'influence positive de l'agriculture raisonnée sur la pollution azotée des aquifères du bassin, les impacts de l'agriculture raisonnée et du changement climatique étant opposés et de même ordre de grandeur.

En ce qui concerne le Rhône, où le relief et la composante neigeuse jouent un rôle important, Etchevers *et al.* (2002) notent une grande variabilité spatiale des résultats. Dans le nord du bassin, une augmentation relative importante des débits annuels (40%) due en partie à l'augmentation des précipitations (+25%) et à une plus faible augmentation de l'évapotranspiration (+13%) est constatée. Dans le sud du domaine, on note par contre une diminution de 10% à 30% des débits, associée à une faible augmentation de l'évapotranspiration due à un sol très sec. Cette étude met aussi en avant la diminution importante du couvert neigeux (en quantité et en durée) dans les régions de moyenne et basse altitudes, ce qui a évidemment un impact sur les régimes hydrologiques neigeux, avec un pic de débit au printemps avancé d'un mois.

Pour le bassin de la Garonne, plusieurs études menées par Météo-France et le CERFACS sont disponibles et montrent une forte sensibilité des étiages liée à la fragilité de la ressource en eau que constitue le massif pyrénéen (anticipation des étiages et forte réduction des apports de juin à septembre).

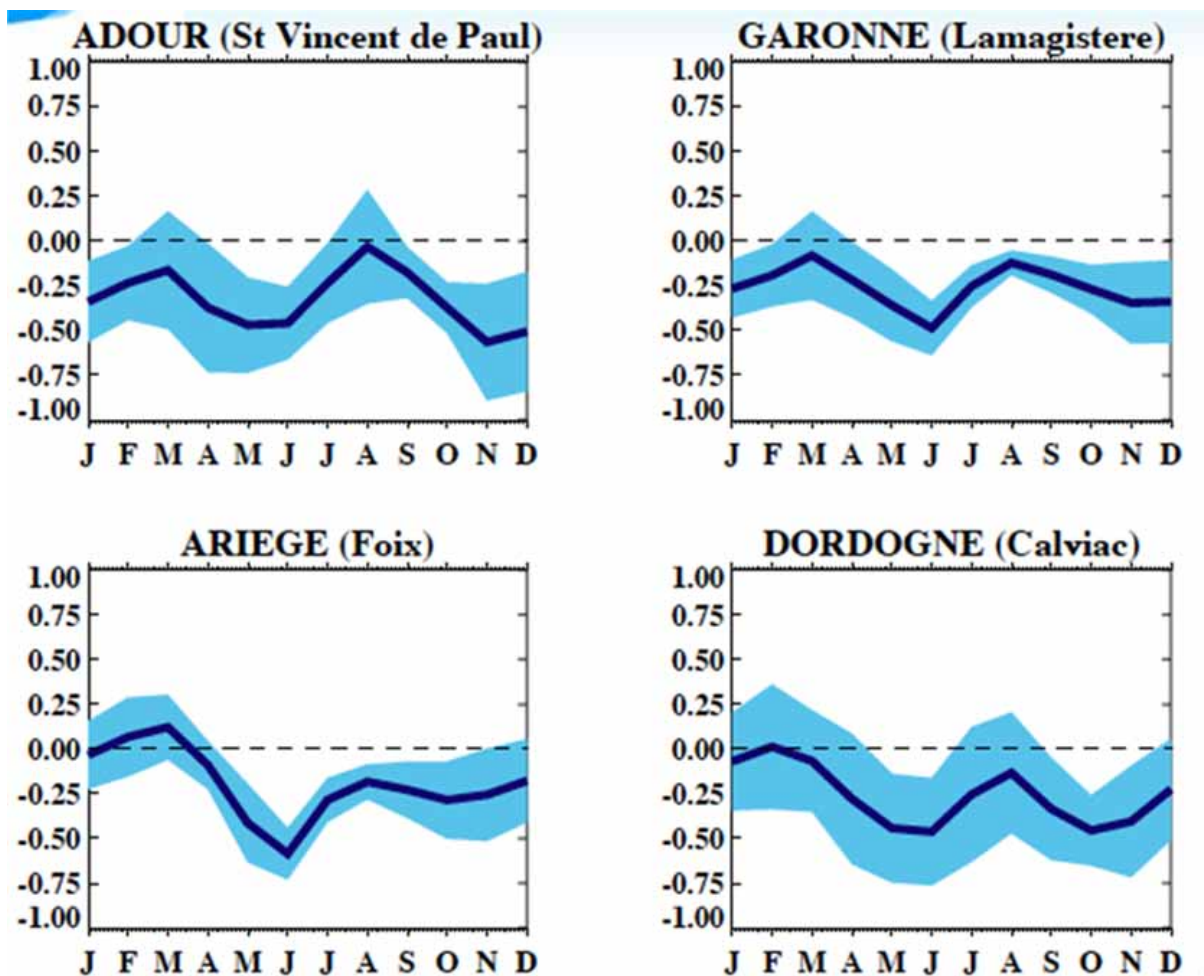


Figure 6 - Rapport entre les débits projetés à l'échéance 2050 et ceux actuels (TERRAY, 2007)

Les projections pour le sud ouest de la France indiquent qu'en 2050 les débits de nombreuses rivières en été pourraient être de l'ordre de 25% inférieurs à ceux d'aujourd'hui (cf. Figure 6), que la fréquence et la durée des périodes d'étiages sévères pourraient doubler. Les étiages seraient anticipés d'un mois avec des baisses de débit très marquées dès le printemps, de l'ordre de 36%. Le nombre de jours de canicule serait aussi doublé avec des étés beaucoup plus secs.

1.3.1.3 Impacts sur les écoulements

Pour la France métropolitaine, Boé (2007) a proposé un travail assez complet en hydraulique de surface :

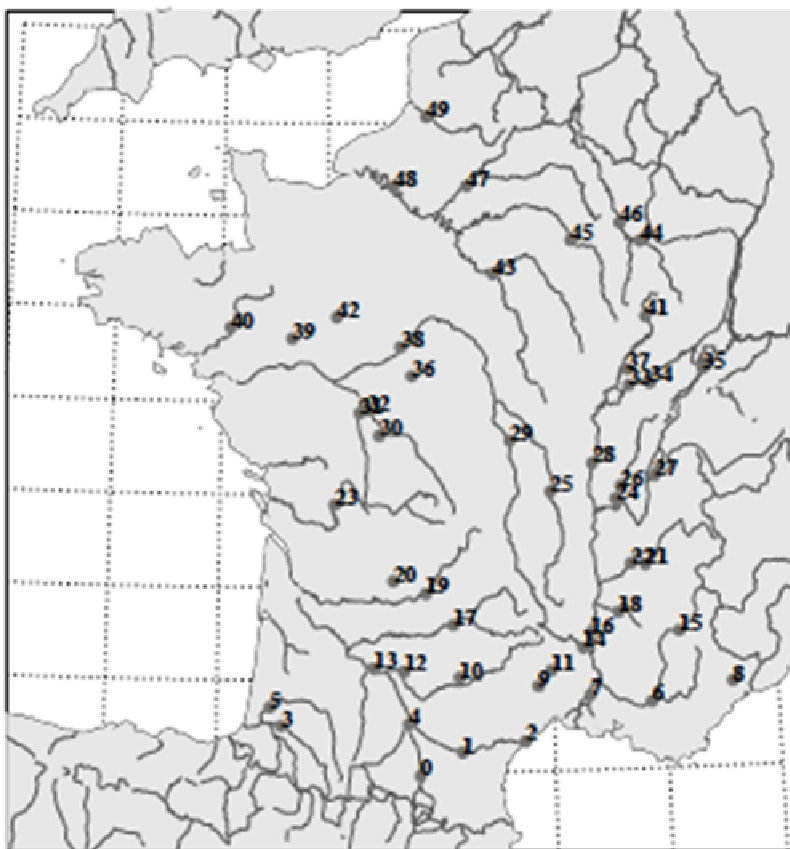
- Traitement de l'ensemble du territoire français métropolitain (à l'exception de la Corse) de façon homogène ;
- Les études précédentes se sont attachées à des bassins versant particuliers ;
- Développement et utilisation de nouvelles méthodes de régionalisation ;
- Utilisation de plusieurs modèles de climat ;
- Prise en compte et analyse de l'incertitude.

Il a utilisé le système de modélisation hydro-météorologique SAFRAN-ISBA-MODCOU (SIM en abrégé). Ce système fonctionne maintenant sur l'intégralité du territoire français métropolitain. SIM est notamment utilisé pour l'estimation en temps réel de l'humidité

des sols, pour des études rétrospectives du bilan en eau et en énergie, ou bien dans le cadre d'études des impacts du changement climatique.

Avec MODSCOU dans la version de SIM utilisée, les aquifères sont simulés sur uniquement deux bassins. On retrouve l'aquifère à trois couches du bassin de la Seine et l'aquifère à une couche du bassin du Rhône. Pour les écoulements superficiels, BOÉ précise que l'erreur sur le débit moyen de SIM, à l'exutoire des quatre principaux bassins français (Seine, Rhône, Loire, Garonne), se situe entre -10% et +6%.

La Carte 11 présente les stations de mesures de débits utilisées par la suite. Elles ont été sélectionnées dans la banque de données HYDRO pour couvrir le territoire et les principaux cours d'eau français, en prenant en compte la durée des séries et les différents régimes hydrologiques.



Carte 11 - Localisation géographique des stations utilisées dans l'étude Boé (Boé, 2007)

Boé (2007) s'est focalisé plus particulièrement sur la période 2046-2065. Le choix de la période est justifié par la demande sociétale qui concerne surtout les prochaines décennies. Il a préféré se focaliser sur un seul scénario d'émission, intermédiaire (SRES-A1B), sur la période 2046-2065 et maximiser le nombre de modèles climatiques traités, source majeure d'incertitude sur cette période. Sur la période 2046-2065 les concentrations en GES associées aux scénarios SRES-A1B et SRES-A2 sont encore assez similaires.

Ses principales conclusions sont :

- En hiver, en moyenne d'ensemble, les débits diminuent modérément, excepté sur le sud-est du pays et les Alpes où ils augmentent. Au printemps, les changements sont en général faibles ;
- En été et en automne, des impacts forts sont à attendre sur les débits, même dès le milieu du XXI^{ème} siècle, avec des diminutions importantes ;
- Il faut s'attendre à une forte augmentation du nombre de jours d'étiage. Les débits intenses diminuent bien moins que la moyenne, voire augmentent dans certains cas. Le bilan environnemental négatif lié aux étiages plus sévères ne sera donc vraisemblablement pas « compensé » par le bilan environnemental lui aussi négatif, lié aux inondations (cf. Figure 6) ;
- L'évaporation diminue en été mais augmente durant les autres saisons ;
- L'humidité des sols diminue quelle que soit la saison, excepté sur des zones de montagnes en hiver et/ou printemps ;
- Les précipitations neigeuses diminuent fortement à basse altitude et moins à mesure que l'on s'élève, voire augmentent dans certains modèles en haute altitude, sur certaines zones géographiques. Les hauteurs maximales de neige accumulée diminuent à toutes les altitudes, mais les diminutions sont aussi de moins en moins fortes à mesure que l'on s'élève (cf. Figure 7).

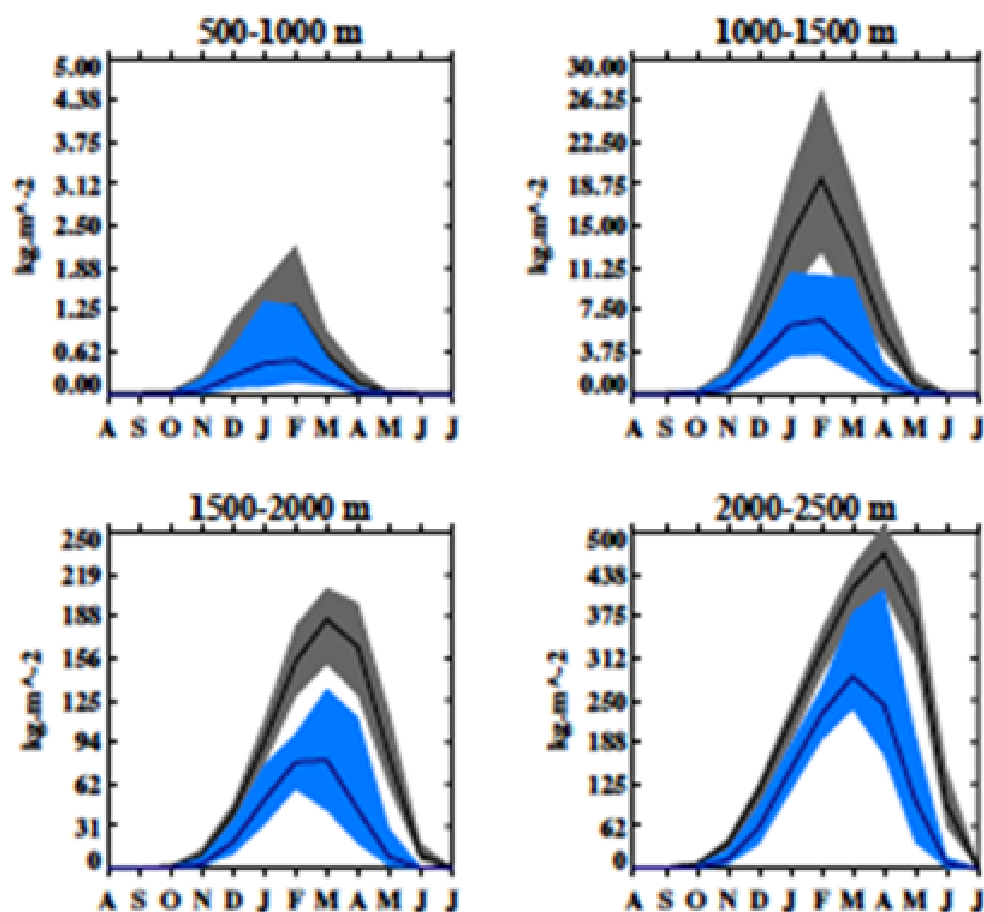


Figure 7 - Cycle saisonnier de la quantité d'eau du manteau neigeux (kg/m^2) dans les Pyrénées par tranches d'altitude de 500m pour le climat présent (1970/1999, gris et noir) et le climat futur (2046/2065 bleu clair et bleu foncé) (Boé, 2007)

Dans le domaine de l'hydrologie, l'incertitude liée au modèle d'impact est souvent considérée comme limitée. La simulation climatique constitue le plus souvent l'étape où l'incertitude est la plus forte. Si on considère en plus l'étape de régionalisation où l'incertitude est importante, il est clair que les changements du climat régional sont très incertains. Ces incertitudes du forçage hydro-météorologique sont ensuite transmises aux indicateurs d'impact par le modèle d'impact (les débits et autres variables hydrologiques simulées dans notre cas). Quintana Segui (2008) précise que les différences entre méthodes de régionalisation sont importantes et donc que les résultats peuvent être très différents : par exemple, sur la Saône, la diminution peut être de 10% pour une méthode et de 50% pour l'autre.

Les résultats de Boé seront utilisés par la suite. Néanmoins, il faut souligner qu'outre le fait que MODCOU ne simule que les aquifères de la Seine et du Rhône, de nombreuses rivières étudiées par Boe sont en fait fortement modifiées par la main de l'homme et sont déjà équipées de nombreux ouvrages de régulation de débit par exemple.

I.3.1.4 Extrapolation des résultats de BOE

Dans cette partie, les changements relatifs mensuels des débits, établis par Boe (2007), entre les périodes 2046/2065 et 1970/1999 pour les cinquante stations sélectionnées ont été utilisés. Les 14 modèles du GIEC ont été considérés.

Variation de la ressource disponible

La ressource disponible est considérée arbitrairement ici comme étant la différence entre le débit moyen mensuel et le débit biologique minimum pour la survie piscicole. En l'absence de Débit d'Objectif d'Étiage (DOE), il a été pris égal au 1/10ème du module observé (cette valeur est celle qui en l'absence d'étude est retenue par le code de l'environnement, article R 214-18).

Cet objectif environnemental de préservation des milieux est supposé maintenu entre 2009 et l'échéance de 2050 prise par Boe. En effet, la demande environnementale en eau, destinée au bon fonctionnement des écosystèmes, est une composante importante de la directive cadre sur l'eau (DCE). Les prélèvements dans le milieu naturel doivent respecter le maintien d'un « niveau minimum acceptable » pour la préservation des écosystèmes.

Les débits moyens mensuels et les modules ont été extraits de la banque HYDRO aux points initialement sélectionnés par Boe.

De cet exercice de comparaison de la ressource disponible, en année moyenne, entre maintenant et 2050, on peut observer :

- qu'à l'automne et en hiver, périodes où les précipitations contribuent fortement à la reconstitution des stocks dans l'année hydrologique, les rapports sont rarement supérieurs à 1 ;
- que les résultats moyens sont en automne, soit juste à la fin de l'étiage actuel, de l'ordre de 2/3, avec des valeurs minimales atteignant 0,30, soit un déficit de 70% par rapport à maintenant, mais des valeurs maximales proches de 1 ;
- qu'en moyenne, la ressource en eau en hiver serait très proche de celle que l'on connaît actuellement, le rapport étant de l'ordre de 0,95. Les rivières de la moitié nord de la métropole montreraient potentiellement des déficits pouvant atteindre 50% ;
- qu'au printemps, le déficit serait, pour les valeurs moyennes, de 30% mais pourrait dépasser 50% sur certaines rivières. Les résultats les plus optimistes montrent un déficit de l'ordre de 20% et mêmes des situations plus favorables que maintenant pour des rivières de la moitié nord de la métropole ;
- qu'en été, tous les résultats montrent des déficits en moyenne qui peuvent atteindre 50%. La situation moyenne future serait comparable aux situations exceptionnelles actuelles.

Tentative d'évaluation du déficit pour les usages de l'eau

Certains usages sont décrits, selon les grandes catégories « alimentation en eau potable », « industries », « irrigation » et « énergie », en termes de prélèvements d'eau grâce aux déclarations faites par les préleveurs auprès des agences de l'eau dans le cadre de la perception de la redevance prélèvement.

En supposant que les ressources en eau soient aujourd'hui totalement exploitées en zones de répartition des eaux (ZRE) durant le printemps et l'été et que partout ailleurs,

la ressource permette de doubler les prélèvements, il a été estimé, en utilisant les résultats précédents, que le déficit en eau pour satisfaire les besoins actuels des usages eau potable, industries et irrigation serait de 2 milliards de mètres cube (500 millions de m³ en hypothèse basse et 3 milliards de m³ en hypothèse haute). L'évaluation pour l'énergie n'a pas été faite, cet usage ayant une consommation relativement faible et un besoin non pas en volume mais en débit⁷. Il est bien évident que ce chiffre aggloméré à l'échelle nationale ne représente pas les inégalités territoriales. Une grande difficulté pour établir ce type de bilan vient du fait que les ressources en eau sont peu connues, peut être du fait du sentiment d'abondance vis à vis de cette ressource naturelle. La généralisation de l'évaluation de la ressource disponible, pour les territoires en stress, a été demandée aux agences de l'eau par circulaire en juin 2008.

Ce déficit de l'ordre de 2 milliards de m³ par rapport au prélèvement actuel à économie constante est :

- à comparer aux prélèvements actuels cumulés de ces secteurs, à savoir 14 milliards de m³ (respectivement 6 pour la distribution des collectivités, 5 pour l'irrigation, 3 pour les usages industriels) ;
- à reconsidérer en fonction d'une prise en compte de la réalité de la future demande végétale en eau d'irrigation des cultures.

Encadré 1 - Exemple du Sud-ouest

Pour le bassin Adour-Garonne :

- La valeur du déficit structurel actuel est estimée à 250Mm³ ;
- Le déficit prévisionnel complémentaire à long terme d'alimentation des rivières sur la période d'étiage que l'on peut estimer à partir des simulations de BOE (débit moyen d'été de référence de la Garonne réduit de 25m³/s à Toulouse voire plus à l'aval, 40m³/s à Lamagistère, soit respectivement sur 3 mois 250 à 400Mm³) ;
- Le volume 2006 des prélèvements est de l'ordre de 850 millions de m³ tous usages confondus (dont pour 600 000 ha irrigués, soit plus de 80% des prélèvements totaux en période d'étiage et 40% des prélèvements annuels) ;
- Maintenir une sole de maïs de 600 000ha en Adour -Garonne impliquerait, au vu des simulations INRA, de mobiliser environ 500Mm³ d'eau en plus d'aujourd'hui.

Pour le sud-ouest, le besoin en eau moyen annuel des cultures est de l'ordre de 500mm/an. Dans les conditions actuelles climatiques, un maïs doit recevoir en situation de moyenne vallée de la Garonne un apport de 150mm en irrigation pour accomplir son cycle végétatif (valeur cohérente avec les doses d'irrigation de 2000 à 3000m³/ha selon efficacité des systèmes constatées régionalement).

Les simulations conduisent sur un maïs irrigué à un déficit supplémentaire de 50mm à 2030 et 80mm au delà de 2050 qui devra être compensé par des irrigations complémentaires.

Au total ces études convergent pour conduire à penser que le déficit actuel du bassin Adour-Garonne de 250Mm³ pourrait être porté à 500 voire 800Mm³ au delà de 2050 dans les conditions de maintien d'un système actuel prenant pour base la monoculture de maïs.

(Source : Agence de l'eau Adour Garonne)

⁷ Le rapport du groupe Energie propose une estimation de l'impact de l'évolution des débits sur la production hydroélectrique, sur la base des travaux de Boe (2007)

I.3.1.5 Impacts sur la qualité de l'eau

Pour Ducharne *et al.* (2004), le changement climatique entraîne une minéralisation accrue de l'azote du sol en nitrates, qui contribue à l'augmentation d'une part des rendements et d'autre part du flux de nitrates du sol vers les nappes, modulée par les changements de pluviométrie et par l'activité agricole. Le couplage du modèle agricole STICS spatialisé avec le modèle de transport souterrain MODCOU/NEWSAM a permis de quantifier l'influence de ces changements sur la concentration en nitrates dans les nappes. Le Tableau 5 présente leurs résultats. En moyenne sur les nappes libres, celle-ci augmente à l'horizon 2100, de 0 à 33% par rapport à la concentration actuelle selon les scénarios de changement climatique. Sous scénario A2, la concentration moyenne atteint 77 mgNO₃/l en moyenne sur les nappes libres.

Tableau 5 - Synthèse des simulations STICS/MODCOU/NEWSAM en termes de pollution nitrique des aquifères (Ducharne *et al.*, 2004)

Simulations STICS/MODCOU/Newsam	Caractéristiques des simulations			Concentration moyenne en nitrates (mg/l)	Fraction (%) où la concentration dépasse 50 mg/l
	Climat	Agriculture	Horizon		
« état zéro »	Actuel	Actuelle	2000	39	30
Référence	Actuel	Actuelle	2100	60	48
CC A2	Arp new A2	Actuelle	2100	77	65
CC B2	Arp new B2	Actuelle	2100	67	57
AR	Actuel	Raisonnée	2100	38	28
AR + CC A2	Arp new A2	Raisonnée	2100	53	47

Les résultats sont relatifs aux aquifères modélisés les plus proches de la surface et donc les plus accessibles par forage (Craie sauf où recouvert par Eocène sauf où recouvert par Oligocène)

Cet impact du changement climatique a été comparé à celui du scénario d'agriculture raisonnée. Celui-ci présente un réel intérêt du point de vue environnemental, car il permet de réduire notablement la concentration nitrique moyenne de l'eau infiltrée (-32% en climat actuel) et d'obtenir une concentration inférieure à la norme (50 mg/l) en zone cultivée. Il entraîne donc une diminution de la concentration en nitrates dans les aquifères à l'horizon 2100, de 37% en moyenne sur les nappes libres, pouvant localement atteindre plus de 50% par rapport à la simulation de référence en 2100 sans modification des pratiques agricoles ni modification du climat.

Les impacts de l'agriculture raisonnée et du scénario A2 sont donc opposés et de même ordre de grandeur : le changement climatique annihile en grande part l'influence positive de l'agriculture raisonnée sur la pollution azotée des aquifères du bassin (elle n'est plus réduite que de 12% par rapport à la simulation de référence à l'horizon 2100, qui présente une concentration moyenne dans les nappes libres de 60 mgNO₃/l donc largement supérieure à la norme).

Ducharne (2004) s'est également intéressée aux rejets ponctuels : la réduction générale des rejets ponctuels venant de la poursuite de la politique de réduction des rejets et de l'amélioration des techniques d'épuration projeté à l'horizon 2050 doit en effet entraîner une amélioration drastique de la qualité des cours d'eau. Cette hypothèse de progrès

technologique pèse pour beaucoup dans l'amélioration de la qualité annoncée. Une question se pose pour les nouvelles substances et toxiques pour lesquels cette hypothèse technologique n'est peut être pas fondée : la diminution des débits entraînera une augmentation des concentrations.

En ce qui concerne la teneur en nitrates dans les cours d'eau, le changement climatique exerce son impact via les apports diffus depuis les nappes et le bassin versant agricole (modulés par la rétention dans les zones ripariennes). L'impact du changement climatique se traduit donc par une augmentation de la concentration, mais moins importante que dans les aquifères. A l'horizon 2100, le scénario de changement climatique entraîne ainsi une augmentation de la teneur en nitrates, qui passe de 31 à 40 mgNO₃/l en moyenne annuelle à Poses (sur la Seine, en amont de Rouen) et atteint 50 mgNO₃/l, *i.e.* la norme de potabilité, en hiver. Cette augmentation est supérieure à celle qui résulte de l'inertie des aquifères et de la zone saturée entre 2000 et 2100 (+7 mgNO₃/l). L'agriculture raisonnée et la réduction des rejets ponctuels ont un impact du même ordre de grandeur (10 mgNO₃/l environ), mais opposé et comme dans les aquifères, l'impact du CC (scénario A2) limite fortement celui de l'agriculture raisonnée.

En ce qui concerne le fonctionnement des zones humides, il semble que, pour la France, seuls les aspects submersion marine et inondations aient été étudiés pour le moment pour la Camargue et les Wateringues du Nord de la France⁸.

I.3.1.6 Les impacts sur les usages de l'eau dans le scénario de référence (sans mesures d'adaptation)

Rappel des aléas :

- Tous les bassins versants devraient faire l'expérience de changements dans la recharge des rivières et dans le stress hydrique ;
- L'écoulement fluvial et l'alimentation des nappes souterraines seraient réduits ;
- Les étiages seraient plus prononcés en automne et plus prolongés, augmentant les problèmes d'utilisation de l'eau ;
- La diminution du niveau et du débit des rivières associée à une hausse du niveau de la mer pourrait favoriser la pénétration saline dans les aquifères d'eau douce ;
- Une baisse de la qualité de l'eau : elle serait affectée par la concentration des polluants notamment d'origine agricole (ruissellement des pesticides) et par l'affaiblissement des capacités d'auto-épuration dû au réchauffement et à la moindre dilution (réduction des débits des cours d'eau, eutrophisation).

L'évolution socio-économique comme la croissance démographique et/ou l'augmentation de la prospérité et du niveau de vie, les modifications de l'occupation du sol et le changement climatique (provoqué par l'homme) conduiront à une augmentation du besoin en eau et, ainsi, à une pénurie d'eau dans certains bassins versants. La variabilité climatique et les changements du climat peuvent encore renforcer la pénurie d'eau en rendant les ressources moins exploitables.

Un premier recensement des impacts sur les usages de l'eau a été tenté. Selon les secteurs environnementaux, ou économiques, ils sont potentiellement très importants.

⁸ <http://pagesperso-orange.fr/institutionwateringuesnpc/Page%20Web/Etudes.htm>

Encadré 2 - Les principaux impacts recensés dans le scénario de référence (sans mesures d'adaptation)

- Augmentation de la demande en eau due à l'augmentation des températures et à la réduction dans certains cas des précipitations : alimentation en eau potable de la population et en eau des animaux, pour l'irrigation, pour le refroidissement des usines de production d'énergie, pour les transports fluviaux, etc. ;
- Modification de la ressource disponible : diminution, voire disparition des apports estivaux des glaciers et du stockage d'eau dans le manteau neigeux, modification de la distribution spatiale et temporelle des pluies, modification du débit des cours d'eau et de la recharge des aquifères, dégradation de la qualité des eaux (diffus, ponctuels), etc. ;
- Augmentation de la vulnérabilité de certains écosystèmes du fait de l'augmentation des températures et des modifications de répartition spatio-temporelle des pluies (augmentation des assecs par exemple) ;
- Augmentation du coût d'accès à l'eau, des conflits d'usage, etc.

Des contraintes pour l'agriculture

La ressource en eau est très fortement dépendante de l'aménagement des sols. Pour l'agriculture, Brisson (2008) rapporte que les sécheresses estivales et l'augmentation des températures entraîneront des fins de cycle végétatif difficiles pour les cultures d'hiver, avec une occurrence de températures échaudantes accrue et une moindre satisfaction des besoins en eau. Les cultures pluviales seront plus difficiles dans le sud de la France dans un contexte de ressources en eau limitées.

Les premiers résultats du programme Climator de l'INRA⁹ (voir Encadré 3) sur le blé et le maïs montrent que la plus grande partie de la baisse des pluies va se traduire pour l'essentiel par une sécheresse hydrologique (ruissellement et alimentation des nappes) et pour partie par une sécheresse édaphique en culture pluviale (blé) comme irriguée (maïs). Selon certains scénarios, les rapports de réductions pluviométriques estivales pourraient être particulièrement marqués sur la partie ouest de la France où se trouvent une grande partie des zones déficitaires en ressources en eau aujourd'hui. Le confort hydrique des plantes baissera quelque soit le système, annuel ou pérenne, pluvial ou irrigué. Pour le maïs le maintien des besoins de la plante à 80% de l'ETM impliquerait une augmentation des doses de l'ordre de 40 à 60 mm dans le sud-ouest et l'ouest de la France. Cela donne un ordre de grandeur de ce que pourraient être les besoins supplémentaires en eau liés à un maintien de la sole de maïs du grand-ouest (environ 750 000 ha) dans les conditions actuelles de culture. Il ne s'agit là que d'une hypothèse car d'une part les tendances pour les scénarios pluviométriques sont encore relativement incertaines pour des applications régionales et d'autre part de nombreuses alternatives culturelles à des systèmes de monoculture à base de céréales sont possibles et peuvent, même être facilitées par le changement climatique¹⁰.

La demande agricole est beaucoup plus sensible au changement climatique que les autres demandes.

Pour Brisson et Caubel (2008), les conséquences agricoles des changements annoncés sont multiples et parfois antagonistes¹¹.

⁹ Brisson et Itier, 2009

¹⁰ cf. ESCo Sécheresse

¹¹ Voir le rapport du groupe Agriculture pour plus d'éléments sur les impacts du changement climatique pour le secteur

- Si l'augmentation des températures tendra à accélérer la phénologie des cultures (chronologie des étapes biologiques des plantes), ce qui se traduirait par exemple pour les cultures de printemps par un raccourcissement de leur phase de remplissage des grains (donc possible baisse des rendements), la moindre satisfaction des besoins en froid (vernalisation) des cultures d'hiver pourra limiter cette accélération.
- Les sécheresses estivales et l'augmentation des températures entraineront des fins de cycle végétatif difficiles pour les cultures d'hiver, avec une occurrence de températures échaudantes accrue et une moindre satisfaction des besoins en eau. Néanmoins, l'augmentation de la teneur en CO₂ atmosphérique aurait pour effet une fermeture stomatique et donc une diminution de la demande climatique des cultures à long terme (le besoin en eau des cultures pourrait diminuer).
- Le nombre de jours disponibles pour réaliser les semis des cultures d'été ou d'hiver et les récoltes des cultures d'été pourrait avoir tendance à diminuer du fait de l'augmentation des pluies hivernales. En effet, le passage d'engins sur des sols trop humides risque de tasser les sols, et compromet, de ce fait, la réussite de la culture et la qualité des sols (érosion des sols).
- En ce qui concerne les maladies des cultures, la tendance à plus de sécheresse pendant le cycle végétatif diminuerait les durées d'humectation et donc les fréquences d'infestation. Par contre, les températures douces représenteraient des conditions favorables au développement des populations de pathogènes et favoriseraient les « développements explosifs » au cours d'événements pluvieux. Ce type de perspective peut s'étendre à la relation culture/adventices.

Encadré 3 - Résultats préliminaires du projet CLIMATOR sur le comportement hydrique à l'horizon 2035 de deux cultures emblématiques : blé pluvial et maïs irrigué en monocultures (Nadine Brisson et Bernard Itier, INRA)

Demain, s'il fait plus chaud et si la pluie diminue, on peut s'attendre, d'une part, à une évolution de la demande climatique (ETo : effets antagonistes des augmentations de température et de CO₂), et d'autre part à une diminution de l'offre en eau, tant pour le sol, et donc les cultures, que pour les aquifères.

Pour étudier ces phénomènes, on s'intéresse :

- d'une part à la restitution d'eau aux aquifères ;
- et d'autre part à la différence entre l'évapotranspiration maximale d'une culture (ETM) et son évapotranspiration réelle (ETR).

1. Evolution de la restitution d'eau aux aquifères

La restitution d'eau au milieu est calculée comme le bilan entre le ruissellement, le drainage et l'irrigation, comptée négativement.

Même si les différentes méthodes de projection du climat dans le futur produisent des résultats différents en termes d'évolution de la pluviométrie, on constate que les relations obtenues par modélisation agro-environnementale entre la baisse de restitution au milieu et la baisse de pluie sont robustes :

- pour le blé, de l'ordre de 75% à 80% de la baisse de pluie contribue à la sécheresse hydrologique et de 20 à 25% à la sécheresse édaphique (valeurs obtenues par le modèle STICS et confirmées par l'utilisation du modèle CERES) ;
- pour le maïs, de l'ordre de 90% de la baisse de pluie contribue à la sécheresse hydrologique et de 10% à la sécheresse édaphique malgré l'irrigation ; il en résulte que sans modifications de doses d'irrigation, la baisse de pluviométrie va se traduire par une baisse d'alimentation des nappes conséquente.

Ainsi, une combinaison de cultures d'hiver (pluvial) et de cultures irriguées d'été, conduit à des baisses de l'ordre de 80mm de restitution aux nappes pour 100mm de baisse de pluie.

2. Evolution du confort hydrique des plantes

Le confort hydrique pendant la période de production baisse de façon générale pour tous les systèmes, qu'ils soient annuels ou pérennes, pluviaux ou irrigués.

Cette baisse du confort hydrique peut être mise en relation avec l'augmentation du déficit hydrique climatique (P - ETo). Pour l'ensemble du territoire français, une augmentation du déficit climatique P-ETo de 100mm conduit à une augmentation de l'ordre de 5mm du déficit (ETM - ETR) tant pour le blé malgré l'esquive phénologique que pour le maïs malgré une irrigation à 80% de l'ETM (il s'agit d'une moyenne sur 30 ans qui cache une grande variabilité interannuelle).

En matière d'irrigation, la Figure A indique l'augmentation moyenne de la dose qui permet d'atteindre ces 80% d'ETM. On note qu'il peut exister jusqu'à 20mm d'écart entre valeurs résultant de l'application de différentes méthodes de régionalisation climatique (CERFACS et CNRM) ; c'est le cas de Dijon. Il faut signaler par ailleurs que, pour ce futur proche, et comme pour d'autres variables, la variabilité interannuelle des besoins en irrigation est du même ordre de grandeur que la valeur absolue.

Ceci étant, pour le Sud Ouest où la tension sur la ressource est déjà élevée, les deux méthodes de régionalisation conduisent à des valeurs moyennes proches de 40mm supplémentaires par an, à l'horizon 2035 (Bordeaux 30-44, Lusignan 45-47, Toulouse 44-54).

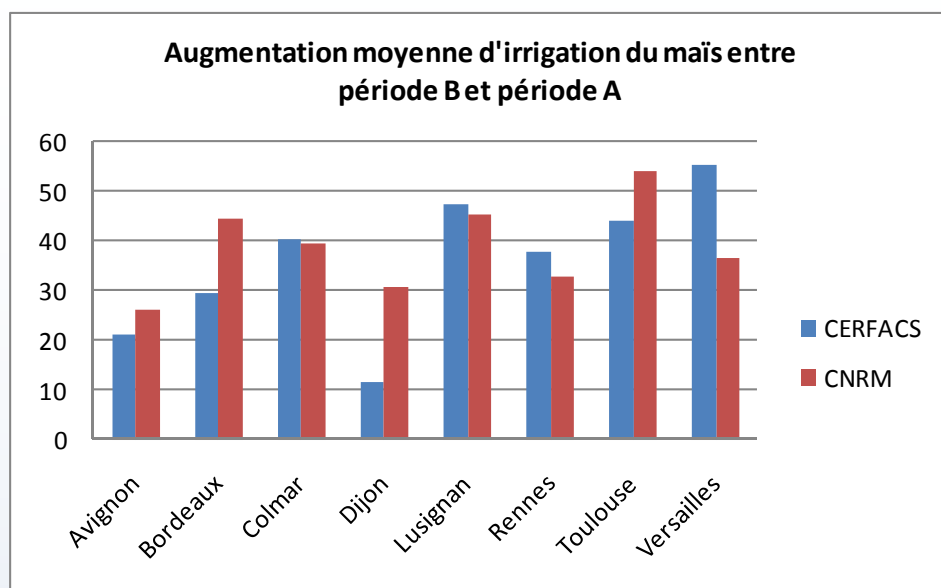


Figure A : Augmentation moyenne des besoins en irrigation du maïs pour parvenir à 80% ETM, entre la période 1970-2000 (A) et la période 2020-2050 (B) pour deux méthodes de régionalisation climatique : CERFACS et CNRM

Conclusion

Ces résultats ont été obtenus avec le modèle STICS à partir des valeurs de variables climatiques résultant de la simulation grande échelle du modèle ARPEGE de Météo-France, pour le scénario socio-économique A1B (version du projet « ENSEMBLE »). Comme nos résultats sont robustes aux méthodes de régionalisation et, sur les quelques cas testés, aux scénarios retenus (A1B, B1, A2), tout changement dans les prévisions des modèles climatologiques pourrait être pris en compte rapidement, pour ce qui concerne les ordres de grandeurs, via la correspondance établie avec les indicateurs climatiques. Pour les besoins d'irrigation, c'est un peu moins précis comme le montre la Figure B : on peut dire très grossièrement, que le besoin d'irrigation supplémentaire prévisible pour conduire le maïs à 80% de l'ETM correspond au moins à la moitié de la baisse prévue de (P-ETo) (droite marquée sur chacune des figures B a&b).

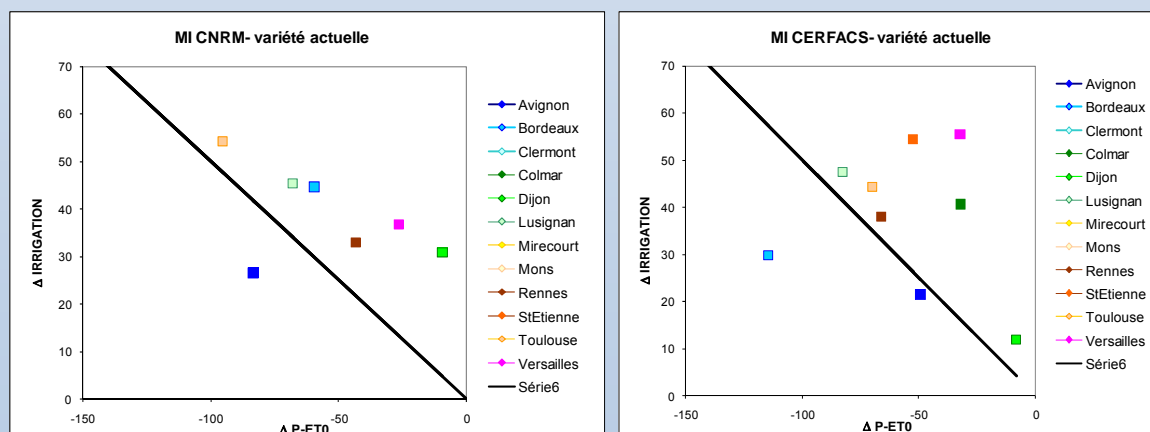


Figure B : Variation des besoins en irrigation du maïs pour parvenir à 80% ETM, entre aujourd'hui et la période 2020-2050, en fonction de l'augmentation du déficit hydrique climatique $\Delta(P-ET_0)$. La droite représente les valeurs 1 :0.5 pour a) CNRM et b) CERFACS

Les modifications du régime des pluies pourraient accentuer les risques de sécheresse aux périodes cruciales des cycles des cultures.

Les besoins nets et globaux en irrigation pourraient augmenter, par rapport à une situation sans changement climatique.

L'efficacité des barrages-réservoirs serait réduite par la forte évaporation.

Le facteur pluviométrique constitue une contrainte forte pour les calendriers culturaux et les pratiques agricoles.

Parallèlement, la réduction des disponibilités en eau devrait engendrer des contraintes de prélèvement plus importantes pour l'ensemble des usagers, particulièrement en période d'étiage. Cela implique une évolution encore plus défavorable pour l'agriculture irriguée et des contraintes financières dues aux politiques de sécurisation de la ressource mises en place pour s'adapter. La surexploitation des ressources risque de s'intensifier alors qu'elle est déjà importante dans certains bassins.

Aujourd'hui seuls 10% de la surface agricole utile (SAU) sont irrigués. Il se peut que les cultures « en sec » soient plus touchées que celles irriguées. Il est probable que le nombre de préleveurs d'eau augmente : en plus des systèmes totalement irrigués, l'irrigation de complément pourrait se développer sur des surfaces importantes.

Des contraintes pour l'eau potable

Aujourd'hui, il n'y a pas de problèmes majeurs d'alimentation en eau potable. Depuis 1976, de nombreux projets d'interconnexion ou de sécurisation pour l'accès à la ressource ont été faits. Depuis 1987 en France plus de 5,3 milliards d'euros ont été investis sur les « déséquilibres de long terme » (260 millions/an), 30% environ financés par les agences de l'eau. Néanmoins, les projections sous tendent une augmentation des conflits d'usages. Aujourd'hui, l'eau potable est considérée comme l'usage prioritaire de la ressource en eau avec les milieux aquatiques¹².

Les bassins vont être confrontés à de plus fréquentes pénuries d'eau en raison du changement climatique même en l'absence d'une hausse de la demande. Satisfaire les besoins en eau potable des populations devrait être plus difficile. Les restrictions des usages de l'eau touchant plus ou moins directement le tourisme (piscine, espaces verts) devraient être de plus en plus fréquentes pour satisfaire l'accès à l'eau potable. Une mobilisation moins évidente des ressources en eau pourrait avoir des répercussions sur le prix de l'eau. L'augmentation des prix pourrait déboucher sur des prélèvements plus importants sur des ressources alternatives : développement de citernes privées, recours aux eaux souterraines (forages individuels). La dégradation de la qualité de la ressource, accentuée par le changement climatique (dont l'augmentation de la température de l'eau qui entraînera un développement de cyanobactéries par exemple), réduirait encore l'offre en eau douce utilisable à des fins domestiques et pourrait accroître le coût du traitement. Un traitement de potabilisation plus poussé serait alors nécessaire, pour répondre à des exigences de qualité et au renforcement des normes. Or les pollutions régresseront peu, voire s'aggraveront et tendront aussi à faire croître les coûts de production de l'eau potable. L'efficacité des barrages-réservoirs serait réduite par la forte évaporation qui affecte les plans d'eau, réduisant les ressources en eau potable.

¹² art L 211-1 du code de l'environnement

Dans certaines conditions locales et en particulier dans des contextes de forts stress hydriques répétés, l'approvisionnement en eau au niveau local conduira à mettre en balance les ressources traditionnelles (eaux de surface et eaux souterraines) avec l'intérêt de développer des ressources alternatives (recyclage d'eaux usées à un niveau adapté aux usages qui en sont faits, récupération d'eaux de pluie, recharge d'aquifère, dessalement, etc.).

Du point de vue quantitatif :	
Le niveau des eaux souterraines diminue	Des puits ne sont plus alimentés. Le fonctionnement des exhaures sont modifiés (perte de production)
Le débit des rivières diminue	Des prises d'eau sont dénoyées, des arrêtés de restrictions sont plus fréquents.
Du point de vue qualitatif :	
La qualité des cours d'eau diminue (voir 1.7.2.), de nouveaux polluants apparaissent (cf. Santé)	Les traitements de potabilisation ne sont plus suffisants
La température de l'eau de surface augmente	En été, la température de l'eau est supérieure aux normes de potabilisation de l'eau (arrêté du 11 janvier 2007: 25°C).

Des contraintes pour l'assainissement des eaux usées

Les normes de rejet pour le traitement des eaux usées dépendent de l'affluent dans lequel les eaux usées vont être rejetées. Si le régime des cours d'eau baisse, le traitement devra être intensifié pour maintenir les mêmes standards environnementaux. La collecte et le traitement des eaux usées sont l'investissement le plus coûteux pour les municipalités ou collectivités. Le coût du traitement augmente exponentiellement avec le degré de traitement attendu. Ainsi, pour maintenir les concentrations à leur niveau actuel, à l'endroit où les eaux usées sont rejetées dans une rivière, si le débit du cours d'eau est réduit de 30%, la quantité de polluant rejeté devra être réduite de 30%.

Hédouit *et al.* (2007) ont examiné les répercussions du changement climatique sur les systèmes d'assainissement : certaines seront positives (réactions biologiques accélérées), d'autres négatives (consommations énergétiques supplémentaires). Ils considèrent que le réseau d'assainissement sera plus affecté que les stations d'épuration, en particulier au niveau de la gestion des temps de pluie. Les problèmes liés aux odeurs et à une accélération des phénomènes de corrosion se poseront également avec acuité. Enfin, les politiques de gestion des crises (préservation du patrimoine et des équipements, sécurité, prévention des risques sanitaires) devront être mises en place localement pour faire face à des accidents météorologiques plus aigus et plus fréquents.

Les débits des rivières diminuent	Les objectifs de rendement épuratoire des stations de traitement des eaux usées sont aujourd'hui définis sur la base du QMNA5. La modification de ce débit caractéristique entraînera une modification des conditions du rejet et donc de la dilution en aval de la station de traitement des eaux usées.
Augmentation des orages violents	Les agglomérations qui sont encore en unitaire sont sensibles aux coups hydrauliques. Des rejets directs sont possibles.
Si la quantité d'eau potable mise en distribution diminue, les rejets d'eaux usées vont diminuer.	Les effluents seront plus concentrés. Les modifications de fonctionnement entraîneront un vieillissement prématuré de certains équipements (suppresseurs d'air...). formation de dépôts dans les réseaux, la septicité des eaux donc les émissions d'odeurs en période de sécheresse associée à la canicule augmentent.

Des contraintes sur assainissement pluvial

Le ruissellement urbain, une préoccupation des rapports des groupes « Risque naturels et Assurance » et « Infrastructures de transport et cadre bâti », se manifeste lorsque l'eau de pluie ne peut s'infiltrer du fait de l'imperméabilisation des sols et lorsque le réseau d'évacuation des eaux pluviales est engorgé. L'eau reflue alors dans les rues, le courant emporte des véhicules et divers objets qui forment des embâcles. Les points bas sont submergés, l'eau boueuse envahit le rez-de-chaussée des bâtiments où elle provoque des dégâts et parfois des victimes. Ce phénomène, non étudié dans le présent document, aura certainement un coût très important dans le futur du fait de la densité de population dans les zones fortement urbanisées et du changement climatique.

Il sera nécessaire et ceci sans regret, de revoir les règles de dimensionnement des ouvrages d'évacuation et de récupération des eaux pluviales. Ceci est à coordonner avec la révision des règles d'urbanisation et de construction des infrastructures. Quelques villes, telles que Bordeaux et Nancy, ont déjà pris en compte ces enjeux.

Des contraintes pour industries et production d'énergie

Ce thème est traité par le groupe Energie. En cas d'augmentation combinée de la température de l'air et de la température de l'eau, associée à un faible débit, le rendement du refroidissement sera diminué. En 2003, 2004 et 2006, des autorisations exceptionnelles de rejet ont dû être délivrées afin d'éviter un arrêt de la production d'énergie.

Les unités de refroidissement en circuit ouvert doivent être améliorées afin de minimiser les conditions de rejets dans les conditions futures. L'augmentation de température des cours d'eau nécessitera également de renforcer les systèmes de traitement sur les unités de refroidissement ; algues, légionelles, etc. L'hypothèse d'une installation de tranches supplémentaires de centrales nucléaires de production, y compris les tranches initialement prévues mais non réalisées, le long des cours d'eau sera à étudier finement en fonction des projections de débits. EDF R&D met en œuvre un important potentiel de recherche sur les perspectives de ressource en eau (Impact du Changement Climatique (ICE)) et sur les perspectives d'usage de l'eau (Partage de la Ressource en Eau : Scénarios d'Avenir de Gestion (PRESAGE)). Pour ce faire, il s'appuie sur plusieurs modèles de climat et de méthodes de désagrégation en liaison avec la communauté scientifique. Il s'intéresse également aux méthodes de refroidissement, au potentiel et aux disponibilités de sources froides alternatives ou complémentaire à l'eau.

Les conflits d'usage auront des répercussions sur la gestion des ouvrages hydroélectriques. Les règlements d'eau seront un outil d'adaptation.

Des contraintes pour la gestion des grands ouvrages

La modification des écoulements et des débits extrêmes est susceptible d'affecter la gestion des grands barrages. Ceci nécessiterait une prospective spécifique.

Le potentiel hydro-électrique pourrait être conduit à évoluer avec le changement climatique en fonction des contraintes de remplissage des retenues et de nouveaux accords de déstockage visant à généraliser des fonctions complémentaires de soutien des étiages aux réserves hydroélectriques.

I.3.1.7 Évaluation du coût induit par le changement climatique dans le scénario de référence

Les coûts dépendront :

- De l'ampleur de la diminution de la ressource moyenne ;
- De la fréquence, de l'intensité et de la durée, des événements climatiques du type sécheresse ou inondation ;
- De la capacité de stockage existante (sur les eaux superficielles ou dans les eaux souterraines) ;
- De la réaffectation des « quotas » d'eau ;
- Des modifications des pratiques de la part des acteurs dont il n'est plus possible de satisfaire les besoins en eau ;
- De la vulnérabilité des secteurs économiques vis à vis de l'eau ;
- Du besoin de développement de nouvelles ressources ;
- Des capacités à « perdurer » pendant les périodes de restriction.

A économie constante et sans adaptation, selon les principaux impacts recensés au I.3.1.6, les différents usages sont touchés de manières différentes.

Discussion méthodologique

La partie basse de la fourchette du coût de la non-action sera estimée en calculant les volumes nécessaires à chaque catégorie de consommateurs et en leur affectant les coûts de production et accession propres à chacune des catégories.

La partie haute de la fourchette sera elle calculée en considérant le coût moyen d'une fourniture alternative du volume d'eau déficitaire, par exemple un coût de stockage. Dans le cas où ce coût de stockage serait considéré comme non-représentatif du maximum possible (pour des raisons locales, par exemple saturation du bassin versant en équipement de retenues d'eau), on pourra se référer à d'autres pratiques comme le dessalement ou le pompage d'eaux souterraines.

Ce calcul très simple permet d'obtenir un ordre de grandeur des coûts et ne permettra en aucun cas :

- De donner les coûts exacts, bassins par bassin, des impacts du changement climatique ;
- De prendre en compte, même à une échelle très large, les coûts imputables aux modifications qualitatives de l'eau ;
- De donner les mesures exactes à prendre pour gérer les conséquences du changement climatique.

Une hypothèse supplémentaire est que les prises d'eau actuelles auront accès à la ressource future. Cette hypothèse ne sera certainement pas vérifiée du fait de la forte variation attendue de la piézométrie des eaux souterraines et de la baisse du tirant d'eau attendu du fait de la baisse des débits des rivières. En l'absence de connaissances précises de la situation de chaque ouvrage, il est impossible d'évaluer le nombre de points d'eau où il serait nécessaire d'investir afin de pouvoir à nouveau accéder à la ressource en eau.

Répartition des efforts

Le coût unitaire d'investissement pour la création de barrage : 3 euros par m³ stocké (pour le barrage sur l'Auzance (2008), le coût des travaux a été estimé à 60 millions d'euros et le coût environnemental entre 28 et 47 millions d'euros). A ces coûts, il faut rajouter :

- Les frais pour les réseaux d'adduction entre les barrages et le point d'usage ;
- Les frais de fonctionnement.

Le coût d'accès à de l'eau dû à la non-action, pour un déficit de l'ordre de 2 milliards de m³, serait de l'ordre de 5 à 10 milliards d'euros.

Mais la question de la quantité d'eau n'est pas le seul aspect à considérer. A ces coûts, il faudrait donc pouvoir rajouter ceux induits par la qualité dégradée de l'eau qui concernera principalement les collectivités et les industries pour l'alimentation en eau potable et les process industriels.

En ce qui concerne l'évaluation du coût pour le ruissellement urbain, l'évaluation du patrimoine « eau » des collectivités territoriales réalisée en 2007 pour la DEB montre que la valeur du réseau unitaire d'évacuation est comprise entre 25 et 30 milliards d'euros. Ces coûts sont nettement supérieurs à ceux de l'accès à la ressource.

I.3.2 Moyens de la connaissance des impacts prévus

Les projections des changements de températures ou de précipitation calculées par les modèles régionaux s'accompagnent de nombreuses incertitudes (choix des modèles, choix du scénario d'émission des gaz à effet de serre, rétroaction des systèmes...) qui s'ajoutent à la variabilité naturelle du climat. Une ou deux décennies peuvent montrer une évolution régionale en sens contraire à l'évolution générale à l'échelle globale et séculaire. Ces incertitudes montrent l'intérêt de progresser dans la modélisation du système climatique. Cela apparaît essentiel pour améliorer la compréhension des observations récentes et pour affiner les scénarios d'évolution future, notamment par le développement de la prévision décennale.

Un certain nombre de besoins d'acquisition de connaissances supplémentaires ou de manques de moyens se sont révélés importants dans l'étude des impacts induits par le changement climatique.

Axes de recherche

Amélioration de la prévision des bas débits

Les travaux de régionalisation de la pluviométrie ne permettent pas actuellement de fournir des gammes de faibles précipitations avec des notions de variabilités interannuelles suffisamment fines pour que les gestionnaires des ressources puissent étudier les impacts induits par le changement climatique. Un effort doit être fait en ce sens.

Amélioration des modèles de transformation pluie-débit et prise en compte des transferts vers les eaux souterraines

Les premiers résultats des impacts sur l'hydrologie montrent des projections dont les valeurs moyennes sont régulièrement en dehors des plages de la variabilité interannuelle (des baisses de piézométrie comprises entre 5 et 25m pour les bassins de la Seine et de la Somme pour Rexhyss par exemple). Un travail de réflexion sur le calage des modèles

utilisés est à envisager avec une contrainte forte puisque les conditions projetées ne seront observables que dans un futur plus ou moins proche.

La prise en compte des transferts vers les eaux souterraines doit être améliorée. Pour mémoire, le modèle MODCOU utilisé par Boe (2007) ne simule que le fonctionnement des aquifères de la Seine et du Rhône.

Régionalisation des études d'impacts

Le territoire français n'est pas encore totalement couvert par des projections. De plus, les études existantes ne sont pas coordonnées (hypothèses, modèles, objectifs, etc.). La fourniture pour un certain nombre de territoires à enjeux (tel le pourtour méditerranéen qui est protégé des pénuries aujourd'hui grâce à l'apport des eaux des Alpes), de données climatiques simulées pour un nombre de scénarios finis (?) serait à privilégier de façon à ce que les acteurs de terrain puissent étudier les conditions de prise en compte de ces changements. Un pilotage national permettrait de vérifier la bonne prise en compte des grands engagements nationaux ou supranationaux tels la directive cadre sur l'eau ou les engagements en terme d'agriculture ou d'énergie renouvelable.

Connaissance des usages de l'eau

Afin de pouvoir envisager la mise en œuvre d'un plan d'adaptation réaliste, une amélioration de la connaissance de la vulnérabilité des usagers de l'eau est à améliorer. « Quel est l'impact d'une diminution de l'offre en eau pour chaque usage économique (dont les entreprises agro-alimentaires qui dépendent de l'activité agricole) ? », « quels sont les seuils de rupture qui pourront entraîner des changements? »... sont des questions qui mériteront d'être abordées plus finement.

I.3.3 Conclusions du chapitre

Une mobilisation encore faible des gestionnaires de l'eau est constatée dans le contenu actuel des SDAGE en préparation. La mobilisation de ces partenaires impliquerait de replacer le changement climatique en rapport avec un ensemble de changements globaux auxquels ils sont confrontés dès aujourd'hui ; déficit des ressources en eau en Adour-Garonne, réduction des contaminations par les toxiques des eaux superficielles et souterraines en Seine-Normandie, pollutions agricoles en Bretagne, protection des milieux littoraux sur la méditerranée, etc.

De ce point de vue la plupart des stratégies actuelles engagées sont « sans regret » et prioritaires et concourront à réduire les effets du changement climatique. La capacité des acteurs de l'eau à faire face aux enjeux de la DCE est déjà un enjeu majeur. La capacité de faire « plus » en raison du changement climatique constitue un autre défi à relever.

Ces premières projections montrent que le travail à effectuer dans le cadre de la DCE est très important et que si l'on n'y prend pas garde, les programmes de mesure risquent de ne pas être suffisants à la vue des effets du changement climatique.

I.4 L'adaptation au changement climatique appliquée au cas de l'eau

I.4.1 Stratégie d'adaptation

I.4.1.1 Rappel

Rappel des phénomènes

Tableau 6 - Récapitulatif

▲ ▼	Précipitations annuelles
▼	précipitations estivales
▲	Évènements type orage soudain
▲	Périodes sans pluie
▼	durée, extension et quantité d'eau du manteau neigeux
▲ ▼	écoulements annuels
▼	débits moyens estivaux
▼	niveau des eaux souterraines

▲ : augmentation, ▼ : diminution, ▲ ▼ : incertitudes régionales

Rappel des principaux impacts estimés dans le scénario de référence (sans mesures d'adaptation)

La tendance générale est à l'augmentation des besoins et la diminution de la ressource disponible :

- Augmentation de la demande en eau du fait de l'augmentation des températures : besoin pour l'approvisionnement en eau potable des populations et en eau des animaux (pour se désaltérer), pour l'irrigation, pour le refroidissement des usines de production d'énergie, pour les transports fluviaux, etc. ;
- Modification de la ressource disponible : diminution, voire disparition des apports estivaux des glaciers et du stockage d'eau dans le manteau neigeux, modification de la distribution spatiale et temporelle des pluies, modification du débit des cours d'eau et de la recharge des aquifères, dégradation de la qualité des eaux (diffus, ponctuels), etc. ;
- Augmentation de la vulnérabilité de certains écosystèmes du fait de l'augmentation des températures et des modifications de répartition spatio-temporelle des pluies (augmentation des assecs par exemple) ;
- Augmentation du coût d'accès à l'eau, des conflits d'usage, etc.

Les changements globaux

Dans le futur, il n'y aura pas que les effets du changement climatique qui pourront avoir des conséquences sur notre mode de vie en général et sur la ressource en eau en particulier.

Une augmentation de la démographie associée à des mouvements de population principalement vers les zones littorales sont annoncés, il y aura l'apparition de nouvelles substances toxiques, etc. Les impacts de ces changements s'ajouteront à ceux du changement climatique.

Néanmoins, un certain nombre de politiques sont engagées afin d'essayer de limiter les impacts de ces changements globaux: la directive cadre sur l'eau, les engagements de l'agriculture (Objectifs terres 2020 : pour un nouveau modèle agricole français), etc.

I.4.1.2 Quelles sont les réponses possibles ?

Plusieurs options d'adaptation sont envisageables :

- Adaptation des besoins en modifiant nos pratiques ;
- Adaptation de l'offre en agissant sur la ressource.

Les mesures locales devront nécessairement prendre en compte des objectifs nationaux voir supra nationaux tels que les engagements communautaires (bon état des masses d'eau de surface et souterraines, énergie renouvelable, alimentation, etc.).

Localement des réallocations de la ressource pourront être envisagées par les instances locales entre les usagers.

Il faudra veiller à ne pas aggraver les impacts du changement climatique par un « déficit d'adaptation » : pour cela, les conséquences projetées du changement climatique et les objectifs d'aménagement du territoire devront être partagés par tous les usagers.

Les pistes de réflexion

Nous devons privilégier des orientations mixtes, éviter les aggravations, favoriser la sobriété et l'optimisation des équipements. La reconnaissance de la divergence des intérêts des différents acteurs concernés permettra d'avancer dans la recherche de gains mutuels. Cependant, Laurans (2007) met en garde de ne pas réitérer l'erreur des accords de Yalta : il n'y a pas que l'eau potable, l'agriculture et l'énergie qui se partagent les ressources en eau. N'oublions pas dans nos réflexions, l'aménagement de l'espace et la gestion des milieux naturels.

Une adaptation du besoin en eau

Les mesures d'adaptation peuvent se classer selon la typologie suivante :

- Diminution du besoin des activités par économie d'eau ;
- Modification des activités ;
- Substitution à une ressource d'une autre qualité.

Les économies d'eau sont des mesures sans regret, les autres doivent être planifiées.

Les mesures d'adaptation doivent être compatibles avec les dispositions de la DCE. Les mesures de la DCE sont généralement sans regret.

Une gestion économe de la demande permettra de dégager de nouveaux volumes d'eau disponibles qui pourront compenser les déficits projetés. Cette démarche doit s'appliquer à tous les acteurs et prioritairement aux plus importants consommateurs d'eau en période de sécheresse. Lorsque les besoins en eau potable ne pourront être satisfaits autrement, une réattribution de volumes actuellement consacrés à différentes activités économiques pourra être faite en faveur de l'eau potable. Néanmoins, l'alimentation en eau potable devra elle même faire un effort de rationalisation de son usage. La réponse aux impacts du changement climatique nécessite une solidarité locale entre les différents

usagers d'un même bassin et, selon des modalités à définir, certainement entre les bassins qui ne seront pas soumis aux mêmes contraintes climatiques.

Le principal défi sera de faire converger une offre qui va diminuer avec une demande, qui par endroit, n'est déjà pas satisfaite.

Tous les secteurs économiques devront mettre en place des pratiques et des technologies permettant une utilisation rationnelle de l'eau. Cette utilisation pourrait encore être considérablement améliorée. Dans certaines régions, jusqu'à 30% du volume d'eau consommé dans les bâtiments pourrait être économisé. Dans certaines villes, les pertes au niveau des réseaux publics de distribution d'eau peuvent dépasser les 50%. Des gaspillages d'eau similaires ont été constatés dans les réseaux d'irrigation. Outre l'amélioration des technologies, la modernisation des pratiques de gestion de l'eau est nécessaire dans tous les secteurs où de grandes quantités d'eau sont utilisées (par exemple, agriculture, industrie ou tourisme).

Aménagement du territoire

L'aménagement du territoire est certainement l'un des facteurs déterminants de l'utilisation de l'eau. Une répartition inadéquate de l'eau entre les secteurs économiques se solde par des déséquilibres entre les besoins en eau et les ressources en eau existantes. Un changement pragmatique s'imposera pour modifier les schémas d'élaboration des politiques et promouvoir une planification efficace de l'aménagement du territoire aux niveaux appropriés.

Adaptation de la demande domestique

C'est certainement celle où l'action peut être la plus aisée. La consultation du public réalisée au printemps 2008 à l'occasion de la préparation des SDAGE (devant être adoptés d'ici fin 2009) a montré que de nombreux particuliers sont prêts à mettre en place des mesures de réduction de leur consommation.

Entre économies actives (écogestes) et économies passives (réducteurs de débits, etc.), des économies importantes sont réalisables à très faible coût. Une modification des standards de fabrication pourrait très simplement répondre à la demande.

Adaptation de la demande agricole en eau

L'ESCo Sécheresse (2006) a classé les stratégies d'adaptation au stress hydrique pour l'agriculture en 4 groupes d'intérêt décroissant (efficacité potentielle et probabilité d'obtenir le résultat voulu par rapport à l'objectif de conservation de l'eau pour la culture) :

- Esquive (cultures d'hiver) ;
- Tolérance (cultures d'été) ;
- Esquive (variétés de cultures d'été précoces) ;
- Evitement (rationnement de la culture), cette dernière étant la plus aléatoire et d'efficacité réduite.

Plusieurs voies peuvent être explorées pour adapter la nature des systèmes de culture et leur conduite à des disponibilités en eau d'irrigation limitées ou pour réaliser des économies d'eau même là où la ressource est aujourd'hui encore accessible :

- Réduire le besoin en eau d'irrigation de la culture, en acceptant une perte de rendement (mais pas obligatoirement de revenu) moins que proportionnelle à la réduction du volume apporté ;
- Réduire le volume d'irrigation en ne satisfaisant pas complètement le besoin de la culture ;
- Optimiser la valorisation de l'eau disponible en diversifiant les calendriers d'arrosage et les cultures irriguées ;
- Optimiser l'efficacité de l'eau apportée dès lors que l'arrosage est justifié.

L'efficacité des propositions de l'ESCo Sécheresse est caractérisée dans le Tableau 7.

Tableau 7 - palette de mesures agronomiques d'efficacité variable par rapport à la réduction du besoin en irrigation (INRA, 2009)

Objectifs	Méthodes	Efficacité
Mieux utiliser l'eau d'irrigation disponible (assolement inchangé)	Limiter les pertes par évaporation	+
	Choix des matériels + réglages	++
	Suivi des avertissements irrigation (tactique)	+
	Outils d'aide à la décision (stratégie pilotage)	++
Réduire le besoin en irrigation (assolement inchangé)	Calendriers restrictifs	++
	Variétés précoces	++
Diversifier l'assolement	Cultures d'été à plus faible besoin	+++
	Cultures d'hiver à irrigation décalée	++++

Le système agricole actuel, s'il est maintenu en l'état conduira à afficher un besoin supplémentaire en eau de l'ordre de 1 à 1,5 milliards de m³ comme vu en partie I.3, sur un territoire qui est déjà pour l'essentiel en ZRE (cf. Carte 5). Une variante est d'imaginer des systèmes agricoles alternatifs plus robustes et moins exigeants en ressources en eau tels que proposés par l'ESCo Sécheresse.

Une solution technologique pour l'irrigation serait d'augmenter la durabilité des systèmes de micro-irrigation, pour la rendre équivalente à celle des autres techniques d'irrigation : cela permettrait d'en développer la pratique et d'aller vers une meilleure maîtrise des apports. Des travaux réalisés au Cemagref montrent que des techniques d'irrigation innovantes comme le goutte à goutte enterré sur grande culture peuvent générer de substantielles économies d'eau de l'ordre de l'ordre de 10 à 20% par rapport à l'aspersion conduite dans des conditions supposées quasi optimales¹³.

L'ESCo Sécheresse conclut qu'il ne faut pas attendre de « miracles » de la génétique pour obtenir une production abondante en situation de sécheresse bien que des marges de manœuvre existent pour conférer à des espèces existantes des caractéristiques de tolérance.

Adaptation des pratiques agricoles

Les travaux de Ducharne *et al.* (2004) sur la Seine ont montré que les efforts du type « mise en œuvre d'une agriculture raisonnée » ne seront certainement pas suffisants pour reconquérir la qualité des eaux souterraines.

¹³ Mailhol *et al.*, 2009

La politique de diminution des intrants azotés est une politique sans regret vers laquelle il faut continuer à avancer.

Les efforts à réaliser en termes de diminution des usages des intrants dans le cadre des programmes de mesures de la DCE devront être prolongés afin d'éviter une nouvelle dégradation de la qualité des eaux.

Adaptation de la demande énergétique

Énergie et eau sont intimement liées : la production d'électricité nécessite de l'eau (cf. Tableau 2) et l'exhaure, le traitement et la distribution d'eau pour la consommation humaine par exemple nécessite de l'énergie, voire énormément d'énergie dans le cas du dessalement de l'eau de mer (autour de 4kW/h/m³, DG ENV 2008).

Une amélioration des rendements des centrales de production pourrait être recherchée (environ un tiers pour les centrales nucléaires d'après Vicaud, 2007). Une gestion par chaîne d'ouvrage hydro-électrique serait à envisager. L'éventualité d'une installation systématique des nouvelles centrales thermiques ou nucléaires de production d'électricité dans les zones littorales avec des prélèvements et rejets en mer serait à étudier (mais il faudrait également dans cette hypothèse mener un bilan environnemental global intégrant la consommation d'énergie).

Une adaptation de l'offre en eau

Développement de nouvelles infrastructures : la solution miracle ?

Dans les régions où toutes les mesures d'adaptation des besoins ont été mises en œuvre conformément à la hiérarchisation des solutions possibles (des économies d'eau à la politique de tarification de l'eau et autres solutions) en tenant dûment compte de l'aspect coût-avantage et où la demande reste supérieure aux ressources hydriques disponibles, la mise en place d'infrastructures supplémentaires d'approvisionnement en eau pourra, dans certaines circonstances, être aussi envisagée pour atténuer les effets de sécheresses sévères.

Il existe plusieurs façons de concevoir des infrastructures supplémentaires d'approvisionnement en eau (par exemple le stockage des eaux de surface ou souterraines, les transferts d'eau ou le recours à d'autres sources).

La construction de nouveaux barrages pour l'approvisionnement en eau et les transferts d'eau auront un impact sur le bon état des eaux. L'interruption du débit d'un cours d'eau ou les transferts d'eau modifient inévitablement l'état des masses d'eau et sont soumis en tant que tels à des critères spécifiques et stricts. Par ailleurs, les grands projets provoquent souvent des conflits sociaux et politiques entre les bassins donateurs et récepteurs, qui compromettent leur durabilité. Ces infrastructures ne pourront pas être envisagées comme seule solution. En effet, on a vu en partie I.3 que de nombreux bassins verront certainement leurs écoulements annuels diminuer. Même si on arrivait à compenser les impacts environnementaux de tels ouvrages, le risque de ne pas réussir à les remplir est fort. De plus, il se peut que la grande majorité des sites facilement utilisables aient déjà été équipés.

Des options alternatives telles que le dessalement de l'eau de mer ou la réutilisation des eaux usées apparaissent de plus en plus comme des solutions envisageables localement en Europe. Il faudra veiller à ce que tous les effets préjudiciables liés à des infrastructures d'approvisionnement en eau supplémentaires telles que barrages ou

installations de dessalement soient pleinement pris en compte dans l'évaluation environnementale. Les modifications susceptibles de découler du changement climatique et les objectifs à atteindre dans le cadre de la politique énergétique devront être parfaitement pris en considération pour éviter toute incompatibilité.

Il faudra être vigilant : si l'adaptation de l'offre est retenue, elle ne doit pas être spontanée mais planifiée.

Intervention sur les débits d'objectif

Les SDAGE des principaux bassins déficitaires s'appuient dès aujourd'hui sur des débits objectifs d'étiage et de crise (en vigueur dans les bassins Adour-Garonne et Loire-Bretagne, en cours de définition dans le bassin Rhône-Méditerranée-Corse).

L'augmentation de la température des cours d'eau, la modification de la répartition des poissons, l'augmentation des besoins en prélèvements, le besoin de dilution des eaux de rejets des stations d'épuration, (...), nécessitent de stabiliser au niveau national des lignes directrices claires pour la définition des objectifs de débit en période d'étiage d'autant plus que la discussion locale sur la ressource exploitable fera certainement resurgir cette question. Les impacts du changement climatique sur les ressources en eau pourraient imposer de réviser à la hausse ces objectifs de débit en période d'étiage afin de réduire la pression sur les milieux aquatiques et de respecter les dispositions de la directive-cadre sur l'eau. A l'inverse, toute réduction des débits objectifs d'étiage associée au maintien voire à l'augmentation des prélèvements d'eau ne peut à ce stade être considérée comme une option d'adaptation au changement climatique, du fait de son incidence sur la mise en œuvre de la directive-cadre sur l'eau (risque de non atteinte des objectifs de la DCE) et en particulier des impacts environnementaux qu'elle engendrerait. Les objectifs de débit en période d'étiage devant être des outils efficaces de gestion durable des ressources en eau en période de stress hydrique, il serait pertinent de mener une évaluation des méthodes retenues au niveau des bassins pour la définition et le suivi de ces objectifs.

Les recherches liées à l'évaluation des débits environnementaux doivent être prolongées.

I.4.2 Moyens de la connaissance

La politique d'adaptation nécessitera de lancer un certain nombre de programmes de recherche dans des domaines très variés et en particulier technologiques pour la réalisation d'économies d'eau.

Néanmoins un certain nombre de points peuvent d'ores et déjà être mis au programme des investigations.

I.4.2.1 Prolongement des études spécifiques croisant les distributions climat x sols x systèmes de culture

Afin de donner une visibilité à la profession agricole, en prolongement des travaux de l'ESCo Sécheresse, des études du type CLIMATOR de l'INRA, devront être poursuivies au fur et à mesure de l'amélioration de la connaissance climatique de manière à réorienter la politique agricole locale en fonction des capacités de production (sol, eau, etc.).

I.4.2.2 Connaissance des réactions des milieux au changement climatique

Des programmes d'études ont été engagés récemment sur quelques bassins importants (Meuse Loire, Garonne amont, Gironde) ou se poursuivent dans le cadre de programmes anciens (Piren Seine, GICC Rhône). Ces programmes devraient être multipliés à l'avenir en ciblant les milieux déficitaires en ressources en eau mal connus (zones humides littorales).

I.4.2.3 Évaluation des gains des milieux aquatiques

Les évaluations financières des gains des milieux (selon les fonctions de ceux-ci) devront être prolongées de manière à pouvoir comparer le plus justement possible les différents scénarios d'adaptation.

I.4.2.4 Évaluation des débits d'objectifs

Pour pouvoir répondre aux demandes de révision des classes de qualité, débits d'objectifs, minimum biologique, etc., il est nécessaire de stabiliser au niveau national des lignes directrices claires pour la définition des objectifs de débit en période d'étiage d'autant plus que la discussion locale sur la ressource exploitable fera ressortir cette question. Les recherches liées à l'évaluation des débits réservés doivent être renforcées.

I.4.2.5 Prise en compte de la non-stationnarité du climat dans les projets

Les procédures administratives ne prennent pas encore en compte la non-stationnarité du climat. L'évaluation des projets devra prendre en compte les changements projetés. Les modalités de cette prise en compte devront être insérées dans la réglementation environnementale.

I.4.3 Conclusions du chapitre

Les territoires ne seront pas touchés de manière uniforme par les impacts du changement climatique (et même ceux des changements globaux). La réponse aux impacts devra engager d'une certaine manière une solidarité locale dans chaque bassin entre les différents usagers et, selon des modalités à définir, certainement entre les bassins qui ne seront pas soumis aux mêmes contraintes climatiques.

L'adaptation des usagers de l'eau devra se faire à travers les outils de planification disponibles tels les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE).

Ces derniers sont élaborés par les comités de bassin, assemblées regroupant les différents acteurs, publics ou privés, agissant dans le domaine de l'eau. L'objet de ces assemblées est de débattre et de définir de façon concertée les grands axes de la politique de gestion de la ressource en eau et de protection des milieux naturels aquatiques, à l'échelle de grand bassin versant hydrographique.



Carte 12 - découpage territorial des comités de bassin
((http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/france/02_instances_carte.htm))

La mise en œuvre de la DCE nécessitera une révision des SDAGE en 2015 puis en 2021. Ces révisions s'accompagneront d'une prise en compte accrue du changement climatique dans les documents de planification. Elles seront l'occasion d'un débat sur les objectifs de répartition des ressources en fonction des demandes et des capacités des milieux dans un contexte de changement climatique.

Aujourd'hui, la mobilisation des gestionnaires de l'eau est encore faible vu le contenu actuel des SDAGE en préparation. Leur mobilisation impliquera de lier le changement climatique avec un ensemble de changements globaux auxquels ils sont confrontés dès aujourd'hui: déficit de ressources en eau en Adour-Garonne, problème de contaminations par les toxiques des eaux superficielles et souterraines en Seine-Normandie, pollutions agricoles en Bretagne, protection des milieux littoraux sur la méditerranée, etc.

De ce point de vue on peut observer que la plupart des stratégies actuellement engagées sont « sans regret », prioritaires et concourent à réduire les effets du changement climatique. Il faudra néanmoins s'assurer de la capacité des acteurs de l'eau à faire face aux enjeux de la DCE tout en répondant avec cohérence au défi de l'adaptation au changement climatique.

Les incertitudes actuelles liées au changement climatique, en particulier à horizon 2030 plutôt qu'au delà de 2050 expliquent, aussi en partie, la difficulté de mobiliser aujourd'hui les acteurs de l'eau. La capacité de répondre avec des outils de planification pour le monde de l'eau supposerait que les prévisions à long terme soient rapidement complétées par des prévisions à moyen terme.

II Rapport du Groupe Risques naturels et assurance

II.1 Introduction

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) définit un événement météorologique extrême comme un événement rare à un endroit donné et une période de l'année donnée (en-deçà du 10ème ou au-delà du 90ème quantile de la fonction de distribution de probabilité observée). Quand on observe une certaine persistance dudit événement (sur une saison par exemple), il devient un événement climatique extrême, notamment quand sa moyenne ou son cumul sont également extrêmes (sécheresse, cumul de précipitations).

Selon le 4ème rapport du GIEC, le changement climatique aura une incidence sur la fréquence, l'intensité et/ou la durée de nombreux événements météorologiques ou climatiques extrêmes, tels que inondations, sécheresses hydriques, tempêtes, canicules. La qualification de cette incidence (positive ou négative, significative ou non) dépend de la région concernée¹⁴. Des effets dérivés comme les changements progressifs et non linéaires dans les écosystèmes ainsi que l'augmentation de la vulnérabilité pourront aggraver les conséquences des événements extrêmes.

Le GIEC a également retenu, lors de son assemblée générale d'avril 2009, la proposition de la Norvège d'un rapport spécial sur la gestion des risques d'événements climatiques extrêmes et de catastrophes avec l'objectif identifié de faire avancer la question de l'adaptation au changement climatique. Les stratégies et les pratiques actuelles dans le domaine de la gestion des risques de catastrophes sont en effet les premières approches de réduction de l'exposition ou de la vulnérabilité et d'augmentation de la résilience face aux événements climatiques extrêmes actuels et futurs. La proposition, élaborée par un panel d'experts pluri-disciplinaires, prévoit en premier lieu de comprendre les facteurs qui rendent les personnes et les infrastructures vulnérables aux événements extrêmes, avant d'aborder les changements récents et futurs dans la relation entre climat et événements extrêmes et enfin la gestion des risques de catastrophes à différentes échelles spatiales et temporelles.

Par ailleurs, le rapport norvégien « Disaster Risk Reduction, Climate Change Adaptation and Human Security »¹⁵ met en avant le rôle critique de facteurs tels que le niveau de développement, les inégalités et les pratiques culturelles dans la gestion des risques et l'adaptation au changement climatique et souligne que la sécurité des hommes est liée au niveau de développement de leur capacité à être confronté au changement et à l'incertitude. La question de l'adaptation au changement climatique est notamment prise en compte par l'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE) dans le cadre de l'orientation de la coopération pour le développement¹⁶.

Le groupe thématique « Risques naturels et assurances » du Groupe interministériel sur « impacts du changement climatique, adaptation et coûts associés » (GT RNACC) se trouve donc au cœur des préoccupations internationales actuelles à la fois comme récepteur (les aléas tels que les événements météorologiques extrêmes sont une composante essentielle des risques naturels, la vulnérabilité et les enjeux étant l'autre)

¹⁴ Les impacts du changement climatique sur les aléas inondation, retrait-gonflement des sols argileux, submersion marine et érosion et gravitaires en France seront décrits brièvement dans les chapitres suivants sur la base des connaissances disponibles.

¹⁵ O'Brien *et al.*, 2008

¹⁶ OCDE, avril 2009

et comme source de stratégies et bonnes pratiques en matière de gestion des risques. Il se focalise sur l'étude de l'impact du changement climatique sur les risques naturels, combinaison d'un aléa météorologique et d'enjeux exposés et sur les dommages associés. Les aléas, résultant « d'agent naturel présentant une intensité anormale », qui correspondent à un événement météorologique ou climatique extrême tel que défini par le GIEC, retiennent particulièrement l'attention. Cette définition de l'aléa est inscrite dans le code des assurances (cf. Encadré 4), assurances qui, en France, assurent le « portage » de la politique d'indemnisation et de solidarité des catastrophes naturelles. Les systèmes assuranciers et de mutualisation/solidarité constituent par ailleurs un des moyens possibles de la gestion des impacts du changement climatique. C'est pourquoi le groupe a été chargé d'étendre sa réflexion aux conséquences en matière d'assurances. Sa réflexion est d'ailleurs aidée par l'existence de données économiques liées à ce « marché du risque ».

Encadré 4 : le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles

Le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles est institué en métropole par la loi du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles. Sont considérées comme des catastrophes naturelles au sens du régime CatNat les « dommages matériels directs non assurables ayant eu pour cause déterminante l'intensité anormale d'un agent naturel » (article L.125-1 du code des assurances). Ce régime est dit « à péril non dénommé » : il n'existe pas de liste exhaustive des périls qu'il couvre.

Ce régime est financé par une prime additionnelle (surprime) appliquée à tout contrat d'assurance de dommages aux biens dont le taux est uniforme et fixé par l'Etat. Les assureurs ont la possibilité de se réassurer auprès de la Caisse Centrale de Réassurance (CCR), qui peut faire appel à la garantie de l'Etat lorsque ses provisions accumulées ne lui permettent pas de faire face à la totalité des sinistres.

L'objectif du groupe va être de caractériser, en France métropolitaine uniquement¹⁷, les variations en fréquence et/ou en intensité des aléas introduites par le changement climatique et d'évaluer l'impact de ce « delta » sur les enjeux exposés et les coûts associés en termes de dommages ; puis de proposer, en conséquence et si nécessaire, des mesures d'adaptation pertinentes, notamment de la politique actuelle de prévention des risques naturels et de les évaluer. Dans la suite, l'hypothèse de non évolution voire de réduction d'un aléa donné sous l'effet du changement climatique n'est pas *a priori* écartée, mais évaluée au vu des connaissances disponibles.

II.1.1 Quels sont les aléas étudiés par le groupe ?

Le GT RNACC étudie donc en particulier le risque d'inondation, le risque côtier (submersion et érosion) et le risque lié au retrait-gonflement des sols argileux sous l'effet de la sécheresse (RGA). Il n'a pas retenu, au-delà de la phase 1 et à ce stade, le risque de tempête, considérant, au vu de la connaissance actuelle sur le sujet, une hypothèse de non évolution de l'aléa considéré (cf. Encadré 5 p. 1). Il a en revanche porté une attention particulière aux aléas gravitaires¹⁸ (les avalanches, les crues et laves torrentielles, les coulées boueuses ainsi que les glissements et mouvements de pentes

¹⁷ Les départements d'Outre-mer sont dans un premier temps écartés même si les risques naturels catastrophiques y sont élevés : la prise en compte correcte de leurs spécificités n'est pas envisageable dans les temps impartis.

¹⁸ Voir le rapport général (Partie I) pour une présentation détaillée de la méthode

constituées de sols, les éboulements de masses rocheuses, les effondrements d'origine souterraine) concernant en particulier les zones de montagne. En effet, malgré des difficultés d'évaluation certaines liées à la nature des aléas en jeu et notamment leur caractère très discontinu dans le temps et dans l'espace, compte tenu de leur importance socio-économique, l'objectif était de faire le point sur les interactions possibles entre changement climatique et aléa gravitaire, sans à ce stade envisager de quantification.

L'impact du changement climatique sur les incendies de forêt a fait l'objet d'un échange avec le groupe thématique « Forêt ». Les travaux en cours seront présentés, dans le cadre de ce groupe. Il apparaît que cet aléa est lié à la sécheresse hydrique et à l'extension de l'écosystème méditerranéen qui lui-même pourrait évoluer.

La question des extrêmes de température et canicules associées est abordée dans ce rapport uniquement sous l'angle de son impact sur l'aléa RGA : les groupes santé, énergie et territoire l'abordent sous des angles qui leur sont propres, avec cependant cohérence dans le choix des hypothèses. Enfin, la question de la sécheresse au sens de pénurie d'eau n'est pas traitée dans ce rapport; elle est abordée dans les groupes eau et agriculture notamment.

Sont exclus du travail présenté ci-après les inondations par remontées de nappes et le ruissellement. Les inondations urbaines liées au ruissellement pluvial pourraient voir leur fréquence et leur intensité augmenter comme conséquence du changement climatique. Or très peu de données économiques relatives à ce type d'événements, qui peuvent pourtant créer des dommages importants pour des occurrences décennales ou vingtennales (précipitation), sont disponibles. Il est donc difficile, dans l'état actuel de la connaissance, de les intégrer dans l'évaluation de l'évolution des coûts, alors qu'ils pourraient avoir un impact significatif. Pour le ruissellement urbain, un scénario est présenté uniquement à titre expérimental dans le rapport du sous-groupe inondation.

Encadré 5 - Pourquoi n'avons-nous pas retenu l'aléa tempête ?

La survenue de la tempête Klaus du 24 janvier 2009 dans le sud-est de la France et en Espagne, presque dix ans après les deux tempêtes Lothar et Martin qui ont marqué la fin de l'année 1999, a soulevé la question de l'augmentation de la fréquence sur la France des événements de ce type liée au changement climatique.

Le 4ème rapport du GIEC indique que l'on pourrait assister à un déplacement vers le nord des trajectoires des dépressions mais sans donner d'indication sur l'augmentation des intensités des vents associés. Les travaux menés récemment en France dans le cadre du projet IMFREX sont assez concordants avec les résultats précédents et montrent une augmentation faible du risque de tempête sur la partie Nord de la France et aucune modification sur la partie Sud.

Il paraît donc légitime, au vu de ces résultats, de ne pas prendre en compte cet aléa dans le cadre de cette étude sur les impacts du changement climatique sur le territoire métropolitain.

II.1.2 Objectifs et organisation des travaux

La commande repose sur un objectif d'estimation des coûts (des impacts et de l'adaptation au changement climatique) à fournir dans un délai réduit. Le sujet lui-même du changement climatique repose sur le 4ème rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) dont les hypothèses ont pu être nourries au cours du travail.

Compte tenu des marges d'incertitude, de la multiplicité des hypothèses et de la diversité des débats et discussions relatifs aux impacts du changement climatique, aux échelles d'observation, à l'évolution probable mais imprévisible des enjeux, à la difficulté de retenir une méthode spécifique d'évaluation, le groupe de travail a fait des choix sans doute réducteurs par rapport à l'ampleur de la question, mais nécessaires pour formuler une réponse cohérente dans un cadre bien défini.

Ont ainsi été retenus :

- le cadre de travail fixé par le groupe plénier ;
- en l'absence d'une prospective socio-économique de long terme (2100), régionalisée et par secteur en France, le travail est effectué en conservant la situation socio-économique française actuelle (scénario dit à économie constante). Ainsi l'effet « changement climatique » peut être isolé ;
- sont utilisés principalement deux scénarios de changement climatique issus du 4ème rapport du GIEC présentant deux visions contrastées (A2 et B2) et deux simulations (Météo-France et Institut Pierre-Simon-Laplace), à trois horizons différents : 2030, 2050 et 2100 ;
- l'utilisation des données de dommages des assureurs ;
- la détermination des principaux aléas concernés par une aggravation potentielle en conséquence du changement climatique ;
- une méthode d'évaluation par grandes tendances du « delta » introduit par le changement climatique sur les aléas naturels.

Le groupe de travail aboutit ainsi à une première estimation du coût des dommages, pour les aléas principaux concernés par le changement climatique, qui permet de déterminer des tendances d'évolution qui ne devront être exploitées qu'en tenant compte des hypothèses retenues.

Pour ce faire, les travaux du groupe ont été organisés comme suit. Des sous-groupes par aléa (inondation, risque côtier, RGA et aléas gravitaires) ont été constitués. Dans un premier temps, chaque sous-groupe a établi une synthèse des résultats existants :

- d'une part en termes d'impacts du changement climatique sur les aléas considérés ;
- d'autre part sur les enjeux actuellement exposés (population, logements, entreprises) et sur les coûts actuels des dommages correspondant.

Dans un deuxième temps, des scénarios ou des hypothèses « raisonnables » d'impacts du changement climatique sur les aléas naturels sont proposés et appliqués à des territoires d'échelles variées selon les aléas (France, région Languedoc-Roussillon, bassins versants). L'objectif est *in fine* de proposer des éléments méthodologiques permettant d'arriver à terme à l'estimation du coût du « delta » introduit par le changement climatique sur les aléas naturels.

L'établissement de résultats chiffrés à l'échelle du territoire national s'avère souvent trop incertain compte tenu des connaissances actuelles sur les impacts du changement climatique sur les aléas et sur les aléas et les enjeux eux-mêmes. Il est important de souligner ici plusieurs limites de l'exercice :

- les scénarios de changement climatique fournissent des indications relativement claires sur des tendances globales et régionales, mais qui sont très difficilement applicables à l'échelle très locale de certains aléas ;
- les scénarios de changement climatique n'ont pas le même niveau d'incertitude en fonction de la région considérée et de la variable choisie : ainsi l'analyse des

simulations réalisées pour le 4ème rapport du GIEC montre sur la France une bonne cohérence des modèles dans leur simulation de l'évolution des températures ; les modèles sont beaucoup plus divergents pour les précipitations, une variable pourtant essentielle pour les aléas étudiés ici.

Les travaux réalisés enfin sur le volet « mesures d'adaptation et coûts associés » sont en premier lieu méthodologiques et sont partis d'un examen des différents volets de la politique actuelle de prévention des risques naturels.

Le groupe plénier RNACC s'est réuni régulièrement pour suivre et coordonner et, en tant que de besoin, orienter les travaux des sous-groupes.

II.1.3 Composition du groupe

Le GT RNACC associe notamment les établissements publics compétents (BRGM, INERIS, CEMAGREF, Météo-France, ONF, CSTB), les administrations concernées (CNRS, DGPR/SRNH, CGDD, CETMEF, CETE Lyon et Méditerranée, Direction régionale de l'équipement Languedoc-Roussillon), la Mission risques naturels (MRN), l'Association française de prévention des catastrophes naturelles (AFPCN), le Centre européen de la prévention du risque d'inondation (CEPRI) et des Établissements publics territoriaux de bassin (EPTB).

La composition des 4 sous-groupes est présentée en Annexe D.2.

Après un rapide panorama des risques étudiés, en climat actuel, le rapport présente l'évaluation du coût des impacts du changement climatique sur chaque risque (RGA, inondation, côtier et de manière plus restreinte, gravitaire) pris séparément. Il s'attache ensuite à analyser et discuter les résultats notamment en questionnant la durabilité de la politique actuelle de gestion et en dressant des perspectives relatives à l'adaptation au changement climatique. Il présente enfin les besoins et pistes identifiées pour poursuivre la démarche.

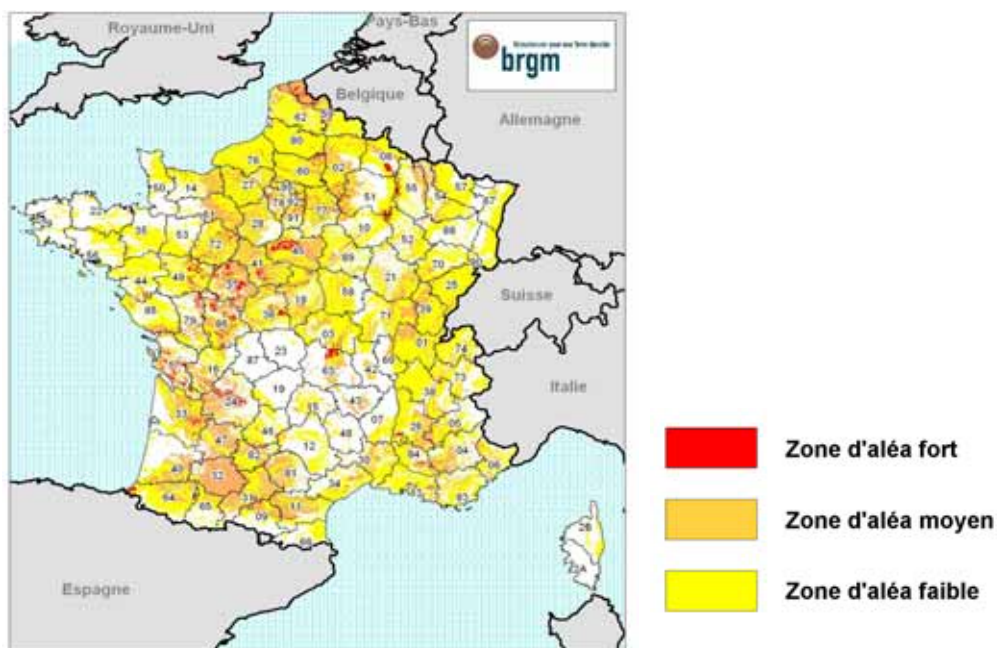
II.2Présentation succincte des risques étudiés (climat actuel)

On présente ici quelques éléments généraux de contexte sur l'exposition actuelle de la France aux différents aléas naturels étudiés puis une rapide présentation de ce que l'on entend par vulnérabilité.

II.2.1 Retrait-gonflement des sols argileux

L'aléa retrait-gonflement des sols argileux est un phénomène naturel dû pour l'essentiel à des variations de volume de sols argileux sous l'effet de l'évolution de leur teneur en eau. Ces variations de volume, hétérogènes au niveau du sol d'assise des bâtiments, se traduisent notamment, en période de sécheresse, par des tassements différentiels susceptibles de provoquer des dommages affectant principalement le bâti individuel.

En climat tempéré, le phénomène peut se déclencher, sous certaines conditions préalables concernant la nature du sol, le contexte hydrogéomorphologique, la végétation et la qualité de la construction, notamment lors des sécheresses estivales qui sont responsables de la majorité des sinistres liés au RGA. La quasi-totalité des départements sont concernés à des degrés divers (cf. Carte 13) et près de 400 000 maisons individuelles (sur un total de 16 millions) sont situées en zone d'aléa fort.



Carte 13 - Carte provisoire de l'aléa retrait-gonflement des argiles (BRGM)

Le coût d'indemnisation de ces sinistres (CatNat) s'élève à près 3,9 milliards d'euros sur la période 1989-2003, dont 1,3 milliard en 2003 (source : Caisse centrale de réassurance, septembre 2008) ; selon le rapport de la FFSA, ce coût représente environ 18% du montant total des indemnisations versées par les assurances pour des catastrophes naturelles (50% de ce montant est dû aux tempêtes, aléa hors système CatNat).

II.2.2 Inondations

L'aléa inondation concerne des surfaces relativement modestes mais très attractives (les vallées sont des axes de développement et d'échanges) ; 5 à 6 millions de personnes y résideraient. Au-delà de la typologie physique des écoulements facteurs d'aléas, il faut prendre en considération aussi bien des phénomènes locaux que des événements globaux touchant un ou plusieurs bassins. Le potentiel catastrophique de cette deuxième catégorie d'événements est insuffisamment connu et estimé.

Le coût CatNat d'indemnisation des sinistres liés aux inondations s'élève à près de 11 milliards d'euros sur la période 1988-2007¹⁹ ; il représente un tiers du montant total des indemnisations versées par les assurances pour des catastrophes naturelles sur cette période.

II.2.3 Submersion et érosion

L'aléa côtier concerne par définition les zones côtières. Il regroupe les submersions marines et l'érosion. Les submersions marines sont des inondations temporaires de la zone côtière, conséquences de la concomitance de phénomènes météorologiques et

¹⁹ rapport FFSA

marins défavorables. L'érosion des côtes est un phénomène naturel répandu qui à certains endroits est aggravé par les activités humaines. Les côtes sableuses sont les plus affectées par ce phénomène ainsi que les falaises de roche tendre. Un quart du littoral métropolitain recule en conséquence d'un phénomène d'érosion.

La pression démographique est très forte sur les zones côtières. Sur un peu plus de 4% du territoire se concentre près de 10% de la population, soit environ 6 millions d'habitants. A cela, il faut ajouter une très forte pression touristique.

A cette forte densité humaine, correspond un haut niveau d'artificialisation des territoires. Les terres urbanisées représentent près de 10% du territoire des communes littorales contre un peu moins de 4% sur l'ensemble de la métropole. Plus on se rapproche de la mer, plus ces territoires artificialisés occupent une part importante du territoire : près de 30% à moins de 500 mètres contre 6% entre 5 et 10 kilomètres.

Ces territoires artificialisés jouxtent des milieux naturels ouverts et des zones humides très présents en bord de mer alors que les terres agricoles sont sous-représentées par rapport à la moyenne métropolitaine.

Il s'agit donc d'un espace où se concentrent des enjeux économiques, des infrastructures de transport et une urbanisation importante et des milieux très riches sur le plan écologique. Il est donc largement vulnérable aux aléas côtiers (cf. l'étude de la vulnérabilité du territoire national aux risques littoraux pilotée par le CETMEF).

Lors des tempêtes, le choc mécanique des vagues ou les submersions temporaires induisent des dégâts et des dommages sur les installations et les activités humaines. A titre d'illustration, le Tableau 8 ci-après reprend l'évaluation financière des dommages réalisée par la DRE Languedoc-Roussillon pour deux événements significatifs à l'échelle du Golfe du Lion (tempêtes de 1997 et 2003).

Tableau 8 - Evaluation financière des dommages des tempêtes de 1997 et 2003 (DRE Languedoc-Roussillon).

Catégories de dommages	Tempête 1997 (en millions d'€ 2007)	Tempête 2003 (en millions d'€ 2007)
Cordon dunaire	5,3	3,7
Digues	4,2	0,3
Embâcles	1,3	0,6
Infrastructures portuaires	6	7,1
Ouvrages de protection en mer	1,8	1,6
total	18,6	13,4

Les estimations ont été réalisées peu de temps après les événements et ont été ramenés en euros valeur 2007 en utilisant l'évolution de l'indicateur du pouvoir d'achat. Les données ne donnent en aucun cas les investissements réellement réalisés.

II.2.4 Aléas gravitaires

Concernant principalement les territoires de montagne, les aléas gravitaires n'ont pas le caractère destructeur et l'ampleur territoriale d'une inondation majeure ou une tempête. Cependant la France métropolitaine a, depuis le début du vingtième siècle, été le lieu d'une vingtaine d'événements qualifiés de « très graves » et plus ou moins directement associés à des aléas gravitaires (notamment les crues torrentielles du Gard en 2001, les avalanches de Montroc en 1999 et Val d'Isère en 1970, la coulée boueuse du plateau d'Assy en 1970, l'effondrement de Clamart en 1961). Ces événements ont soit causé plus de 10 victimes, soit engendré plus de 30 millions d'euros de dommages matériels.

A ces désordres importants, ayant marqué la mémoire collective régionale, s'ajoute l'aspect récurrent de nombreux événements de gravité moindre mais pouvant faire des victimes ou des dégâts matériels conséquents.

II.3 Préalable méthodologique : l'évaluation de la vulnérabilité

II.3.1 L'évaluation de la vulnérabilité : une approche simplifiée pour des résultats de référence

Sur quoi s'appuie dans ces travaux l'évaluation de la vulnérabilité ? Les enjeux considérés dans la suite sont les personnes, les logements et les entreprises. Une évaluation quantitative des enjeux exposés (nombre) est effectuée ensuite pour les territoires concernés (pour chaque aléa). Concernant les dommages associés aux différents risques étudiés, ils concernent uniquement les coûts directs aux logements, évalués à partir des données CatNat. Les coûts directs aux entreprises et aux infrastructures, ainsi que les coûts indirects ne sont pas pris en compte.

Conformément à l'hypothèse d'économie constante, l'évolution temporelle des enjeux n'est pas prise en compte, en termes quantitatifs, à l'exception d'une étude relative à l'impact du changement climatique sur le risque de retrait-gonflement des sols argileux à l'horizon 2030, qui concerne les maisons individuelles et prend en compte l'évolution de l'urbanisation. Il faut souligner cependant que, dans bien des cas, on s'attend à ce que cette évolution des enjeux ait un impact plus conséquent sur l'évolution des risques que celui du changement climatique ; c'est ce que l'on observe ces dernières années (cf. « Le point sur : Croissance du nombre de logements en zone inondable »). Ce point sera abordé dans la partie II.9.

II.3.2 Méthode employée

Le modèle d'estimation du nombre d'habitants et de logements soumis aux aléas considérés²⁰ utilise des données nationales de l'IGN (Corine Land Cover, BD Carto) et de l'INSEE (contours Iris 1999 et BDCOM 1999). Différentes données cartographiques (occupation du sol, population des communes, administratives) sont croisées pour estimer, au moyen d'un modèle linéaire, la population et le nombre de logements dans chaque zone délimitée. Ce modèle ne tient pas compte du caractère principal ou secondaire de la résidence, ni de la hauteur des immeubles, ni de la hauteur des planchers des bâtiments, ni des protections locales.

Le modèle d'évaluation du nombre d'établissements publics et privés soumis aux aléas considérés utilise notamment le répertoire SIRENE 2008 de l'INSEE : les établissements publics et privés sont géocodés et leur position est croisée avec les couches géographiques utilisées, lorsqu'elles existent, pour caractériser l'aléa. Les principales incertitudes des résultats tiennent au caractère non exhaustif et imprécis de la base de données utilisée.

²⁰ Dorelon et Poupat, 2008

II.4 Le risque de retrait-gonflement des sols argileux

II.4.1 Les impacts du changement climatique sur l'aléa

Les sécheresses estivales, responsables en climat tempéré de la majorité des sinistres liés au RGA, risquent de devenir plus fréquentes en raison du changement climatique ce qui devrait conduire à une augmentation du nombre des années présentant une sinistralité importante. Par ailleurs, du fait des épisodes de sécheresse estivale supposés plus longs et plus intenses, la profondeur du sol affectée par le phénomène de RGA pourrait être plus importante ce qui serait de nature à amplifier encore l'intensité du phénomène en termes de sinistralité voire à provoquer des modifications plus durables de l'état du sol (par exemple densification) dont les conséquences sont difficilement prévisibles.

II.4.2 Évaluation quantifiée des impacts

II.4.2.1 Périmètre

L'évaluation quantifiée des impacts du changement climatique sur le risque de retrait-gonflement des sols argileux a été réalisée à l'échelle départementale et à l'échelle de la France entière ; les horizons temporels 2030, 2050 et 2100 ont été étudiés avec des enjeux supposés constants. On considère ici uniquement l'impact de l'évolution du risque de retrait-gonflement des sols argileux sur les logements individuels. La France compte environ 11,2 millions de maisons individuelles exposées au risque de RGA sur un total de 15,9 millions, dont près de 400 000 en aléa fort ; 2,5 millions en aléa moyen et 8,2 millions en aléa faible.

Une évolution du nombre de logements individuels a également été modélisée pour l'horizon temporel 2030.

II.4.2.2 Scénarios

Au vu des connaissances actuelles sur le phénomène, il est supposé que l'extension géographique du phénomène telle que délimitée par la carte d'aléas (cf. Carte 1) n'évoluera pas.

En l'absence de modélisation hydro-météorologique permettant de comprendre plus précisément l'évolution du front de dessiccation et ses conséquences sur l'amplitude des mouvements du sol disponible dans le cadre de cette étude, il est supposé que le changement climatique ne modifie pas l'intensité du phénomène.

L'approche retenue consiste à tenter de déterminer l'évolution de la période de retour d'une sécheresse géotechnique de type 2003 au cours du XXI^{ème} siècle et ce, en se basant uniquement sur l'évolution de la fréquence des épisodes caniculaires. La température est donc la seule variable climatique prise en compte, même si notamment l'humidité du sol joue sans doute un rôle important.

Une méthode générale et commune²¹ de dénombrement des canicules (ou de leur fréquence), basée sur l'utilisation d'une seule simulation du modèle Arpège pour chaque scénario (A2 et B2), a été retenue. Les événements de type « canicule 2003 » sont d'abord comptés dans chaque simulation. Pour palier le manque de définition

²¹ Voir le rapport général pour une présentation détaillée de la méthode

standardisée de la canicule, un critère fondé sur une restriction de l'indice Stardex²², incluant la canicule 2003, a été retenu : une canicule correspond à une période de 12 jours continus où les températures ont dépassé d'au moins 5°C la moyenne.

Ensuite, à partir de ce comptage, deux types de régressions ont été effectuées, en partant du principe que l'incertitude sur les résultats d'Arpège est d'autant plus faible que le nombre d'épisodes de canicule est important :

- une régression linéaire entre la fréquence moyenne actuelle de canicule et celle calculée sur la période 2071-2100, simplificatrice mais présentant l'avantage de se baser sur les données d'incertitude minimale (en fin de siècle) ;
- une régression non linéaire entre les fréquences sur 20 ans à trois horizons (2070, 2080 et 2090) et la fréquence moyenne actuelle, permettant d'avoir une courbe de croissance plus progressive mais s'appuyant sur des moyennes sur 20 ans, plus incertaines que celle sur 30 ans.

Ces deux types de régression à partir des comptages Arpège sont utilisés pour borner le nombre de canicules (hypothèse de travail) aux horizons 2030, 2050 et 2100. Le Tableau 9 présente les résultats obtenus en fonction du scénario.

Tableau 9 - Nombre de canicules sur la période indiquée

Scénario	2000-2030	2000-2050	2000-2100
A2	(0-3)	(2-11)	(32-51)
B2	(0-1)	(1-4)	(18-25)

II.4.2.3 Méthodologie

(1) La répartition des maisons individuelles par zone d'aléa et par département est établie en utilisant la méthode présentée au paragraphe II.3.2.

(2) L'estimation du nombre (et du pourcentage) de sinistres par zone d'aléa est effectuée à l'échelle départementale à partir des coûts d'indemnisation comptabilisés par la Caisse centrale de réassurance (CCR) et du recensement des sinistres par le BRGM dans le cadre de sa cartographie de l'aléa. L'année 2003 est distinguée des autres.

(3) Les données (1) et (2) ci-dessus (répartition des maisons et estimation du nombre de sinistres par zone d'aléa) permettent de calculer le pourcentage de maisons individuelles sinistrées dans chaque zone d'aléa. On supposera qu'il reste constant.

On suppose que, pour la modélisation du coût moyen des dommages annuels, chaque année peut se décrire comme la combinaison linéaire de deux années-type : une année de type « bruit de fond » (caractérisée par un coût annuel moyen de 200 millions d'euros) et une année exceptionnelle de type 2003 (caractérisée par un coût annuel de 1350 millions d'euros). On suppose également que le paramètre lié à la température (fréquence des canicules) permet de quantifier, chaque année, la probabilité d'avoir une année type « bruit de fond » et la probabilité d'avoir une année de type 2003. Le coût CatNat moyen d'un sinistre est fixé à 10 200€ et 1 500€ de franchise²³.

²² Une forte chaleur selon Stardex correspond à 5 jours consécutifs dépassant d'au moins 5°C la moyenne.

²³ source CCR

Deux évaluations du coût de l'impact du changement climatique à différents horizons temporels sont effectuées :

1 - Évaluation à l'échelle nationale selon une méthode calquée sur la méthode mise en œuvre dans l'annexe technique du rapport « Financial risk of climate change » (ABI),

2 - Évaluation à l'échelle départementale s'appuyant sur les données aléas à cette échelle (susceptibilité au retrait-gonflement, nombre de sinistres et localisation, nombre de maisons individuelles et évolution du nombre de maisons individuelles selon des données INSEE 1990-99).

L'évaluation à enjeux constants est effectuée aux horizons 2030, 2050 et 2100.

Des simulations prenant en compte une hypothèse d'évolution du nombre de maisons individuelles sont réalisées à l'horizon 2030 (selon des données INSEE 1990-99). On pose alors l'hypothèse que le nombre de maisons individuelles croît de 0,925% par an dans l'estimation à l'échelle nationale. A l'échelle départementale, on considère une poursuite linéaire de l'urbanisation par extrapolation de la croissance observée entre 1990 et 1999, sans distinction de la zone d'aléa.

II.4.2.4 Limites

Les effets cumulatifs de sécheresses successives rapprochées qui pourraient se traduire par une intensification du phénomène sont négligés et l'évolution de la fréquence des canicules est le seul facteur considéré pour évaluer le « delta » des dommages dû au changement climatique (et pas par exemple les précipitations). Enfin, il est important de souligner la rusticité d'un modèle à deux états (2003 ou « bruit de fond ») et l'incertitude importante concernant l'évolution du bruit de fond (qui pourrait modifier les résultats de manière significative).

L'évolution de l'urbanisation est supposée soit homogène à l'échelle nationale, soit de progression linéaire à l'échelle départementale, ce qui constitue des approximations fortes. Par ailleurs, le fait de supposer que la fraction de maisons sinistrées par zone d'aléa et par département est constante (3), permet d'avancer parmi les multiples hypothèses mais conditionne largement les résultats.

II.4.2.5 Résultats

Coûts à enjeux constants (2030, 2050, 2100)

Si on fait l'hypothèse de l'absence d'urbanisation nouvelle, le coût moyen annuel des dommages (exprimé en millions d'euros) passe environ de 220 (référence sur la période 1989-2003) à 700 (B2) ou 1300 (A2) en 2100 ; il est donc multiplié par un facteur compris entre 3 et 6. Il est important de souligner que les départements ne connaissent pas tous la même évolution du nombre de sinistres et ce, en fonction de leur situation initiale (notamment de la différence en nombre de sinistres entre 2003 et les autres années).

Coût avec évolution de l'urbanisation (2030)

Si on prend en compte une évolution des enjeux d'ici 2030 (urbanisation) et donc une augmentation de l'exposition à l'aléa RGA, malgré les efforts d'adaptation, on s'aperçoit que les coûts augmentent significativement. Le coût augmente d'environ 17% sur la période 2010-2030 lorsque le nombre de maisons individuelles croît de 0,925% (évaluation à l'échelle nationale quelle que soit l'hypothèse retenue). Avec une évolution de l'urbanisation différenciée selon les départements, le coût des dommages pourrait être multiplié par 10 sur certains départements, plus couramment par 4 ou 5 dans l'hypothèse de changement climatique la plus défavorable.

II.4.3 Évaluation quantifiée de scénarios d'adaptation à ces impacts

L'objectif de cette étude vise à comparer les coûts relatifs à deux types d'adaptation au changement climatique envisagés, en dehors de toute considération de leur efficacité, au coût des dommages potentiels « sans adaptation » et ce afin d'identifier les zones sur lesquelles une telle adaptation se justifie.

Les deux types d'adaptation étudiés sont :

- une adaptation des fondations des maisons individuelles ;
- des dispositions plus globales telles que celles préconisées dans les règlements des Plans de prévention des risques naturels (PPRN).

Ces deux voies complémentaires sont explorées car elles ne se traduisent pas nécessairement par le même type d'approche en termes de stratégie d'adaptation au changement climatique.

Dans l'optique d'un traitement purement géotechnique du problème de RGA, qui consiste à concevoir le mode de fondation le plus adapté pour permettre à la construction de résister quelle que soit l'amplitude des mouvements du sol d'assise, la connaissance de l'augmentation de l'amplitude des mouvements du sol est effectivement cruciale. Différentes solutions techniques d'adaptation des modes de fondation des habitations individuelles sont comparées et leurs coûts et conditions de mise en œuvre évalués. Elles consistent à concevoir des fondations superficielles différemment, réaliser un sous-sol complet ou utiliser des fondations profondes protégées. Ces propositions n'en sont pas au même stade de maturité ; elles sont brièvement présentées en Annexe E.1

Dans le cas d'une démarche préventive plus globale, conforme à celles préconisées par les mesures forfaitaires des actuels PPRN sécheresse géotechnique qui prévoient à la fois l'amélioration de la qualité de la construction, fondations et structure et la diminution de

l'ampleur des sollicitations par une meilleure maîtrise des variations hydriques du sol, l'adaptation des fondations est accompagnée de diverses mesures préventives pour que les bâtiments résistent aux effets du retrait-gonflement.

II.4.3.1 Méthodologie

On s'intéresse ici à une nouvelle maison individuelle construite en France entre 2010 et 2030. Le coût moyen de la construction considéré s'élève à 100 000€ et le coût moyen d'un sinistre est considéré égal à 11 700€. Pour ces nouvelles maisons individuelles, il est considéré que le surcoût de l'adaptation s'élève à 15% dans l'hypothèse d'adaptation des fondations et de 8%, dans l'hypothèse de dispositions globales (ce surcoût demanderait à être réévalué). Aucune actualisation des coûts n'a été considérée pour la période 2010-2040.

La méthode employée consiste à définir un seuil (niveau d'aléa) au-dessus duquel les mesures se justifient en termes de coût.

Il convient de bien garder à l'esprit que le recul manque pour juger de la validité et de l'efficacité en termes de rapport coûts/bénéfices des mesures constructives préventives actuellement préconisées, ce qui incite à une certaine prudence quant à leur extrapolation ou leur adaptation éventuelle.

L'étude concernant les mesures d'adaptation ne s'intéresse qu'aux constructions futures (aux maisons individuelles dont les fondations sont souvent plus légères et qui subissent le plus souvent les conséquences du risque de RGA) et aux mesures planifiées. Elle ne prend pas non plus en compte les avantages générés par les mesures de prévention du risque de RGA, comme par exemple une meilleure résistance aux tempêtes ou à d'autres sollicitations mécaniques.

II.4.3.2 Résultats

En climat actuel

Pour un coût moyen des sinistres d'environ 11 700€, il faut descendre à des sous-zones de la carte, par exemple « les Alpes de Haute-Provence en zone d'aléa fort », pour trouver des périmètres au sein desquels la prévention systématique serait rentable (pour la prévention « dispositions globales » et « adaptation des fondations »).

Par contre, si le coût moyen d'indemnisation d'un sinistre lié au RGA augmente (en raison de la valeur du bâti ou si des désordres structurels cachés apparaissent), la mise en œuvre des mesures d'adaptation se justifie sur des zones plus vastes, comme la zone d'aléa modéré (pour la prévention « dispositions globales », avec un sinistre moyen à 60 000 euros correspondant à une reprise en sous-œuvre par pieu ou micro-pieu en Ile-de-France d'après Arbizzi et Kreziak, 2009).

Avec changement climatique

Ces zones sont encore élargies si on prend en compte le changement climatique et l'accroissement du nombre de sinistres potentiels qu'il engendrera. Dans le cas d'un

scénario de type « B2 max²⁴ », l'approfondissement des fondations, sous l'hypothèse d'un sinistre moyen à 60 000 euros, devient rentable en zone d'aléa « fort ».

II.5 Le risque d'inondation

II.5.1 Les impacts du changement climatique sur les inondations

II.5.1.1 Précipitations

A la fin du XXI^{ème} siècle, selon les simulations réalisées dans le cadre du 4^{ème} rapport du GIEC, les précipitations diminueront (en valeur moyenne) sur les régions du sud de l'Europe et augmenteront au nord de l'Europe. La France se situerait dans la zone de transition présentant une incertitude sur le signe des changements prévus. Toutefois, en été, il ressort un bon accord des modèles sur un futur assèchement estival.

L'impact du changement climatique sur les précipitations extrêmes est plus délicat à évaluer à partir de simulations de modèles climatiques. Il est cependant attendu une augmentation de la variabilité des précipitations.

II.5.1.2 Débits

Les évolutions du régime hydrologique dépendent de la nature des précipitations (pluie ou neige), de l'évapotranspiration et de l'aménagement du territoire (occupation du sol, infrastructures hydrauliques). La plupart des études existantes ont été réalisées à l'échelle de bassins versants, par application de scénarios climatiques, élaborés à partir de simulations désagrégées de modèles de circulation générale, alimentant un modèle hydrologique. On présente ci-après les principales conclusions de ces projets, sur lesquelles se basera la définition des scénarios raisonnables d'évolution des crues et des inondations.

Une étude multi-modèles et globale à l'échelle de la France²⁵ prévoit²⁶ :

- Une diminution de la moyenne des débits avec plus précisément une faible diminution des débits en hiver excepté sur le sud-est et une diminution importante en été et en automne, plus marquée sur le sud du pays ;
- Des changements moins clairs pour les débits intenses qui diminuent bien plus faiblement que la moyenne et peuvent même augmenter dans certains modèles, voire en moyenne d'ensemble.

Une étude sur la zone méditerranéenne française²⁷ a confirmé le fait que, même dans un climat plus sec, les précipitations et les débits extrêmes pouvaient augmenter en automne, sans qu'il soit possible de localiser précisément les zones concernées.

Le projet en cours sur les bassins versants de la Seine et de la Somme (Rexhyss) montre un assèchement prononcé des deux bassins au cours du XXI^{ème} siècle, qui s'exprime sur les débits et les niveaux piézométriques, en période d'étiage et de crue. Ces résultats suggèrent notamment une réduction importante de la fréquence des crues débordantes.

²⁴ Borne supérieure de l'intervalle du comptage du nombre de canicules

²⁵ Boé, 2007

²⁶ Voir le rapport du groupe Eau pour plus de précisions

²⁷ Quintana-Seguí, 2008

L'impact du changement climatique sur les rivières à caractère nival a été discuté dans les projets « Rhône » et « Garonne ». La température étant le paramètre le plus influent pour l'évolution du manteau neigeux, les résultats présentés dépendent peu de l'évolution des précipitations. Il apparaît notamment que :

- Le pic printanier de débit dû à la fonte de la neige sera avancé d'un mois environ, le volume total étant constant ou en légère baisse (pour des rivières de moyenne montagne, le caractère nival pourrait disparaître complètement).
- De par la réduction des précipitations sous forme de neige et du manteau neigeux, le risque de crues pourrait être augmenté en automne (crues liées à des précipitations intenses méditerranéennes par exemple), les débits d'étiages estivaux réduits et les débits d'étiages hivernaux augmentés.
- Pour des petits bassins versants englacés, il est possible d'avoir temporairement une forte augmentation des débits moyens et de crue en été liées à la fonte accélérée des glaciers.

II.5.2 Évaluation quantifiée des impacts

II.5.2.1 Périmètre

L'horizon temporel considéré est 2100 uniquement : aux autres horizons (2030 ou 2050) pour cet aléa, le signal du changement climatique se distingue mal du bruit.

L'évaluation quantifiée est effectuée sur les bassins versants sur lesquels des données relatives aux dommages observés existent, choisis à titre d'illustration : la Seine en Ile-de-France, la Meuse dans le département des Ardennes, la Loire moyenne entre Nevers et Angers, le Rhône et l'Orb.

On se concentre ici sur les impacts des inondations sur les logements et les établissements publics et privés. Les impacts « intangibles », tels que ceux sur la santé humaine ne sont pas considérés²⁸.

II.5.2.2 Scénarios

On cherche des relations locales entre fréquence et débit maximum des crues « avec ou sans changement climatique », sachant que :

- 1 - Les impacts hydrologiques du changement climatique sont *a priori* variables selon les climats et présentent des incertitudes importantes ;
- 2 - Au vu des impacts prévus notamment sur la température de l'air, il convient de distinguer les rivières où la composante neige est importante ;
- 3 - Les impacts seront également différents selon les bassins versants et les processus à l'origine des événements susceptibles de les affecter (pluies convectives) ;
- 4 - Les corrélations existant entre bassins voisins pour les événements océaniques et convectifs sont difficiles à quantifier²⁹.

²⁸ Le lecteur est invité à se reporter au rapport du groupe Santé pour une évaluation de l'impact de l'inondation du Gard (2002) sur la santé.

Le sous-groupe propose donc de définir, à dire d'experts et au vu de la connaissance actuelle, des scénarios raisonnables d'impacts du changement climatique sur l'hydrologie, à l'échelle de quelques bassins versants choisis à titre d'illustration.

Des hypothèses d'évolution sont donc proposées, pour les crues de périodes de retour actuelles 10 et 100 ans (Q10 et Q100), sur les bassins versants (ou secteurs) choisis. Ces hypothèses permettent de faire, sur les bassins versants choisis, des tests de sensibilité « orientés ».

II.5.2.3 Méthodologie

Une synthèse de l'existant en matière d'évaluation des dommages a été réalisée³⁰. Il n'existe pas de méthode standardisée d'évaluation des dommages et de recensement des enjeux en France. Parmi la trentaine d'études répertoriées dans le manuel sus-cité, sept fournissent des résultats à peu près comparables. Elles ne couvrent pas l'ensemble du territoire, sont plus ou moins anciennes, prenant en compte des hypothèses variées et générant un certain niveau d'incertitude inhérent à toute évaluation.

On utilise le critère du dommage moyen annuel (DMA), espérance statistique qui, par construction, « atténue » fortement les événements très rares et leur potentiel catastrophique, au bénéfice des crues plus fréquentes. Ce critère intégrateur et représentatif est fort utile, mais il ne permet pas d'aborder la question spécifique des événements très rares.

On suppose également que le référentiel typologique des crues n'évolue pas, c'est-à-dire que l'effet du changement climatique se traduit uniquement par une translation de la relation entre débit maximum et période de retour d'une crue.

Trois cas vont être analysés, tels que présentés dans le Tableau 10.

Tableau 10 - Hypothèses basse, moyenne et haute retenues sur les bassins versants d'illustration

	Hypothèse basse	Hypothèse moyenne	Hypothèse haute
Loire	+ 5%	+ 10%	+ 20%
Seine	- 10% (à partir de Q100)	+ 10% (à partir de Q100)	
Rhône	5% (à partir de Q100)	10% (à partir de Q100)	20% (à partir de Q100)
Meuse	10%		
Orb	10%	25%	50%

La méthode de travail a consisté à partir des variations de débit (Q10 et Q100), à déterminer les variations de périodes de retour de crue. Ces nouvelles périodes de retour ont ensuite été associées aux dommages calculés dans les études.

Le fait de constituer une hypothèse basse par juxtaposition des hypothèses basses sur les bassins versants et une hypothèse haute par juxtaposition des hypothèses hautes, conduit mécaniquement à minorer le résultat global d'une hypothèse basse et à majorer le résultat global d'une hypothèse haute.

²⁹ Cette quantification et la modélisation des cohérences entre événements sur des bassins versants différents seraient indispensables pour établir une statistique nationale des impacts des inondations, respectivement en l'absence et en présence du changement climatique.

³⁰ Manuel des pratiques existantes, Centre européen de la prévention des inondations - CEPRI

II.5.2.4 Limites

Dans les études considérées, l'enjeu « réseau »³¹ est peu analysé et les dommages subis par celui-ci ne sont que très rarement estimés. Pourtant, cet enjeu est essentiel dans le retour à la normale et serait une source très importante de dommages indirects, y compris en dehors de la zone inondable. Ces derniers devraient également être évalués pour approcher un DMA plus conforme à la réalité. Cette prise en compte passe certainement, dans un premier temps, par l'intégration d'éléments qualitatifs, permettant une mise en lumière des dommages difficilement monétarisables à l'heure actuelle.

La connaissance imprécise des dommages liés aux inondations limite l'évaluation de leur évolution liée au changement climatique. A moyen et long terme, ce type d'étude devra intégrer les inondations généralisées sur les grands bassins fluviaux qui sont survenues au XVIII^{ème}, XIX^{ème} et XX^{ème} siècles sur la Seine, la Loire, le Rhône ou la Garonne, l'identification qualitative et l'estimation quantitative de leur potentiel catastrophique et des effets macroéconomiques. Or si nous disposons aujourd'hui d'outils – certes imparfaits – pour évaluer les dommages correspondant à des événements localisés d'inondation, nous ne savons pas prendre en compte dans cette évaluation l'amplification des dommages que représente un événement généralisé.

Par ailleurs, on dispose de très peu de données sur les inondations urbaines consécutives au ruissellement pluvial qui peuvent déjà créer de très forts dommages pour des occurrences décennales ou vicennales et qui en conséquence modifient la « géographie », la typologie et la structure de coûts des inondations. Nous avons rencontré des difficultés, compte tenu de l'état actuel de la connaissance, à intégrer ce type de scénario dans l'évaluation de l'évolution des coûts, alors qu'il peut profondément influencer sur cette évaluation.

Pour de multiples raisons, il n'est pas aujourd'hui possible d'obtenir de données de dommages sur l'ensemble du territoire français. Le recours à des illustrations issues d'études locales apparaît donc incontournable. Cependant, comme le montre le manuel des bonnes pratiques sus-cité, les méthodes d'évaluation des enjeux et des dommages sont très variables selon les études considérées. Il convient donc de rappeler qu'il demeure non pertinent de comparer les résultats obtenus.

Enfin, les dommages intangibles (atteinte à la vie humaine, perte de qualité de vie) n'ont pas été évalués³².

II.5.2.5 Résultats

Plus de 390 000 établissements publics et privés (hors habitat) sont exposés à l'aléa inondation (par débordement de cours d'eau) en France métropolitaine, soit 8% du nombre total. Les bassins versants côtiers du sud de la France et des grandes fleuves (Garonne amont, Seine et Marne, Loire, Rhône) concentrent près de 80% du nombre total d'établissements exposés.

Des études existantes ont chiffré les dommages pour les logements, les entreprises et selon les cas l'agriculture, les établissements recevant du public, les campings, les réseaux (diversité des champs considérés ; les valeurs sont réactualisées).

³¹ Il s'agit des enjeux en termes d'interruption de service pour les réseaux d'eau, d'électricité, de communication et de transport.

³² Ils le sont partiellement dans le cadre du travail effectué par le groupe « santé ».

Tableau 11 - Les dommages moyens annuels (arrondis)³³ exprimés en millions euros 2007 – sans changement climatique

	Dommmages moyens annuels
Loire moyenne	35,00
Rhône	77,00
Seine	174,00
Meuse	11,00
Charente	0,54
Orb	12,00
Labergement-lès-Auxonne	0,08

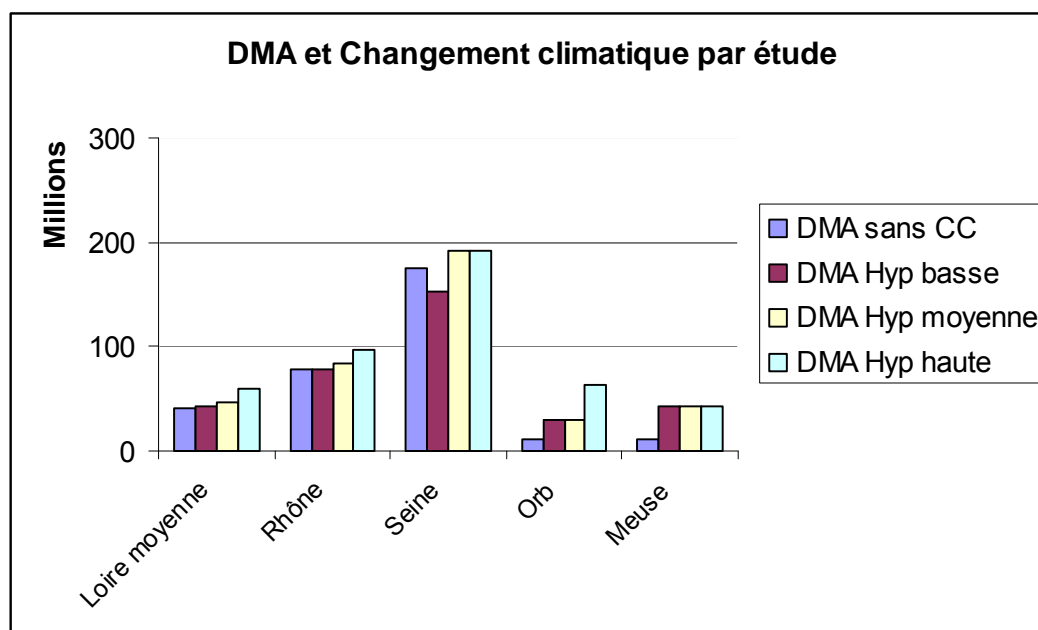


Figure 8 - Somme des DMA sur les sept bassins versants et changement climatique par étude (millions d'euros 2007)

On constate le poids non négligeable du DMA de petits bassins tels que l'Orb (cf. Tableau 11), ce qui met l'accent sur la difficulté d'évaluer un DMA national.

³³ Trois principales hypothèses ont été formulées :

- Entre deux niveaux de crue pour lesquels nous disposons de dommages, nous supposons que la courbe de dommage est linéaire ;
- En fonction de notre connaissance des bassins versants et de l'exposition des biens à l'inondation, nous supposons que le niveau de dommage est nul pour une crue de période de retour 5 ans, 10 ans ou 25 ans ;
- Nous supposons que le dommage maximal se produit pour la crue la plus importante dont on dispose de données (centennale ou cincentennale en fonction des études), on suppose que ce dommage maximal reste constant jusqu'à la crue de période de retour millennale (dernière crue considérée pour les calculs) ;
- Les enjeux habitat, entreprise, agriculture, ERP et établissements publics, camping et/ou réseaux sont pris en compte par les études retenues.

L'évolution relative des DMA sur la Seine, comme conséquence du changement climatique, serait comprise entre -12 et +10%. Le changement climatique fait en revanche évoluer les DMA sur la Loire moyenne entre 6% et 46% et sur le Rhône entre 1% et 23%. Ces résultats sont à prendre avec précaution.

En effet, les bassins versants ne réagissent pas de la même façon en fonction de la structuration des dommages associés à chaque période de retour. De plus, une crue de période de retour 100 ans est en réalité peu distinguable par un hydrologue d'une crue de période de retour 80 ans ou 120 ans. Pour autant, le DMA calculé sera fortement influencé par le choix de cette période de retour (le calcul du DMA prend en compte l'expression « 1/période de retour »).

Les fortes croissances des DMA sur l'Orb (comprise entre 150 et 450 %) et sur la Meuse (+285%) dépendent très fortement des hypothèses des hydrologues pour les raisons suivantes concernant :

- le choix de la période de retour : suivant que les hydrologues décalent une crue décennale vers une crue de période de retour 2, 3, 4 ou 5 ans, le DMA évolue dans un rapport allant de 1 à 4 ;
- la répartition des dommages sur le bassin versant : une décennale génère sur ces deux bassins des dommages comparables à une centennale.

Ces résultats montrent ici les précautions qu'il est indispensable de prendre pour l'interprétation des évolutions des DMA consécutives aux évolutions des débits. Il serait nécessaire d'affiner ce travail avec un panel d'experts de chacun de ces bassins pour mesurer la pertinence de certaines périodes de retour considérées et de leurs niveaux de dommage.

La question de la défaillance des systèmes de protection (rupture de digues) a été abordée par le groupe, mais n'est pas traitée de manière développée ici. Il apparaît que les ruptures de digues n'ont pas d'impact significatif sur le DMA (variations de moins de 10%), mais il est essentiel de souligner qu'elles pourront devenir importantes voire essentielles si d'autres critères sont considérés (probabilité de dépassement d'un seuil critique par exemple) pour l'étude spécifique des événements extrêmes.

II.6 Le risque côtier

II.6.1 Les impacts du changement climatique sur l'aléa côtier

Au cours du XXI^{ème} siècle, le changement climatique jouera un rôle prépondérant sur l'évolution de la morphologie et de la dynamique côtière et partant, des aléas côtiers (érosion et submersion). En effet, la morphologie des systèmes côtiers dépend des courants, des marées, de la géomorphologie de la côte, des sédiments à disposition, mais aussi d'un certain nombre de paramètres hydro-climatiques qui influent sur le niveau moyen de la mer, les régimes de tempêtes, le climat des vagues, le régime des surcotes et des précipitations, l'acidité et la température des océans. Ces paramètres sont susceptibles d'évoluer en conséquence du changement climatique.

A partir d'observations à l'échelle globale, le GIEC (2007) estime qu'à la fin du siècle l'élévation du niveau moyen de la mer sera comprise entre 18 et 59 cm. Ces estimations ne tiennent pas compte des incertitudes liées à la dynamique de la fonte des calottes polaires continentales. De nouvelles publications plus récentes et étayées par des observations préoccupantes de l'accélération de la fonte des glaces continentales au Groenland et en Antarctique, indiquent que le niveau moyen des océans pourrait augmenter de 80 à 150 cm, estimation qui se situe donc au-delà du consensus de 2007.

Sous l'hypothèse d'une élévation du niveau marin de 1 mètre, les aléas côtiers s'aggraveront sensiblement notamment pour les côtes sableuses et les falaises de roches tendres. Les côtes basses subiront une érosion ou des submersions définitives (liées à la hausse du niveau marin) et de nouvelles zones seront l'objet de submersions temporaires.

II.6.2 Liste des impacts retenus pour la quantification

Les aléas étudiés ensuite sont l'érosion marine (dite « irréversible, car causant la destruction des enjeux dans la zone érodée), la submersion permanente (nouvel aléa consistant en l'élévation du plan d'eau subi par le littoral de manière passive, dit « irréversible ») due à l'élévation du niveau de la mer et la submersion temporaire (hauteur d'eau, durée de submersion et choc des vagues) lors des tempêtes.

II.6.3 Évaluation quantifiée des impacts du changement climatique

II.6.3.1 Périmètre de l'évaluation

L'évaluation est réalisée à l'échelle de la région Languedoc-Roussillon ; des éléments sont proposés pour un passage à une évaluation à l'échelle nationale.

Seuls les impacts sur les logements sont considérés. Enfin, compte tenu des connaissances actuelles, on ne s'intéresse qu'à l'horizon 2100.

II.6.3.2 Scénarios et hypothèses climatiques

Les hypothèses suivantes d'évolution des forçages côtiers en conséquence du changement climatique ont été retenues :

- Pour des raisons de faisabilité, on considère une élévation du niveau de la mer de 1 mètre en 2100. Ce choix s'appuie notamment sur les travaux du GIEC mais aussi sur des publications plus récentes, les incertitudes associées et les limites des données topographiques disponibles ;
- Le régime des tempêtes, les climats de vagues³⁴, le régime des précipitations sont inchangés en 2100 ;
- Le régime des surcotes (élévation temporaire du niveau de la mer lors des tempêtes) est principalement affecté par l'élévation du niveau marin en 2100, les effets du changement climatique sur les régimes de temps sont négligés.

II.6.3.3 Méthodologie

Aléas

Les données utilisées sont le trait de côte Corine Land Cover sur lequel ont été reportées les données EuroSION, la BD Topo ALTI et la BD Carto de l'IGN. Ces données sont publiques et disponibles sur l'ensemble du territoire national. La plupart ne sont utilisables qu'à l'échelle régionale et ne conviennent pas pour des études locales.

³⁴ Le climat de vagues est un forçage morphogène important des systèmes côtiers, dont les paramètres (période, hauteur et direction des vagues) dépendent du régime des vents en Atlantique Nord pour les façades atlantique et nord de la France. Sa modification peut entraîner des réorientations de plages, des changements dans leurs profils et des franchissements de défenses côtières artificielles (digues) ou naturelles (dunes).

La méthodologie développée dans le cadre du projet EuroSION a été utilisée, une fois adaptée, pour identifier les enjeux actuellement localisés dans les nouvelles zones qui seraient exposées aux aléas côtiers futurs.

La zone d'aléa pour l'érosion en 2100 est représentée par une zone tampon de 500 mètres autour des côtes susceptibles d'être érodées, cette valeur étant fixée arbitrairement au vu d'un certain nombre de paramètres.

Par ailleurs, on suppose que les zones situées en-deçà de la cote 1m NGF seront submergées de manière permanente en 2100, c'est-à-dire que le littoral n'est pas en mesure de s'adapter et que les ouvrages de défense côtière sont défectueux. Enfin, on suppose que l'aléa submersion temporaire, atteignant actuellement en Languedoc-Roussillon +1m NGF avec une occurrence décennale et +2m NGF avec une occurrence centennale, se translate verticalement de 1m en 2100.

Enjeux (exposition aux aléas) : la méthode employée est présentée au paragraphe II.3.2.

Évaluation des coûts

L'estimation concerne les coûts liés aux dommages (directs et tangibles) aux logements (poste principal de dommages économiques privés lors des inondations). Le coût moyen d'un sinistre (submersion temporaire), estimé à partir du coût moyen d'un sinistre inondation (eau douce), est supposé de 5000€.

Pour les aléas submersion définitive et érosion, on ne tient pas compte d'une possible anticipation/adaptation (si l'adaptation est parfaite, en effet, le coût est nul) ; on utilise soit le coût de reconstruction (100 000€) si phénomène de compensation perte/augmentation de valeur, soit le coût du logement et du terrain si le terrain érodé constitue une perte financière pour son propriétaire (valeur vénale logement + terrain estimée à 250 000€).

Limites et incertitudes

Au stade de l'estimation de l'évolution de l'aléa, les incertitudes sont liées :

- Aux hypothèses faites quant aux effets du changement climatique (élévation du niveau de la mer) ;
- Au manque de précision des données altimétriques (résolution, précision) ;
- Aux approximations faites lors de la délimitation de la zone de l'aléa ;
- Aux approximations faites pour l'occurrence de l'aléa submersion temporaire ;
- Aux nécessaires simplifications induites par un traitement semi-automatique ;
- Dans le cas des submersions temporaires, au fait que les protections éventuelles contre l'inondation situées à l'intérieur des terres ne sont pas visibles sur le MNT.

Ces hypothèses correspondant à une ouverture partielle des lidos et à un début d'érosion de certains rivages en arrière des étangs ne correspondent pas nécessairement à un scénario pessimiste.

L'étude porte uniquement sur l'estimation du coût des dommages potentiels aux logements et ne prend pas en compte, entre autres, les coûts aux infrastructures, aux entreprises ainsi que toutes les pertes indirectes et intangibles (pertes d'exploitation, emplois et revenu des taxes pour les collectivités, mais aussi impacts sur la santé, la communauté, le patrimoine historique et culturel, la biodiversité).

II.6.3.4 Résultats

Exposition des personnes et des logements

140 000 logements (80 000 personnes)³⁵ sont situés dans une zone affectée par un aléa submersion définitive ou érosion d'ici 2100 dans la région Languedoc-Roussillon. A titre de comparaison, les submersions temporaires centennales concernent aujourd'hui 15 000 logements (8 000 personnes).

Exposition des établissements publics et privés

10 000 établissements (employant 26 000 salariés) sont situés dans une zone affectée par un aléa submersion définitive ou érosion d'ici 2100 dans la région Languedoc-Roussillon. Il s'agit majoritairement (à 75%) d'artisans, de commerçants et de prestataires de services.

Première estimation des coûts induits (impacts)

Ils sont dominés par les coûts des dommages liés aux aléas « submersion permanente » et érosion. Le coût cumulé sur 100 ans des dommages potentiels aux logements (aléa submersion permanente ou érosion) est évalué entre 15 et 35 milliards d'euros 2008. Ce coût correspond à la destruction des logements de la zone concernée par l'aléa irréversible, en l'absence de politique de défense du trait de côte et ce sur l'ensemble du siècle à venir.

L'estimation des dommages est limitée à la région Languedoc-Roussillon. Pour faire cette estimation à l'échelle de la France, il conviendrait de tenir compte des éléments suivants :

- A l'issue du projet européen EuroSION, quatre régions françaises ont vu leur susceptibilité aux risques côtiers placée au niveau le plus élevé (Nord Pas-de-Calais, Poitou-Charentes, Aquitaine, Languedoc-Roussillon) ; 5 régions étaient au niveau élevé (régions PACA, Pays de la Loire, Bretagne, Basse et Haute Normandie) ;
- Par ailleurs les statistiques établies par le MEEDDAT/CGDD/SOeS montrent que :
 - Le littoral du Languedoc-Roussillon ne représente que 230km sur les 5500km de linéaire côtier de la France métropolitaine, soit 0,5%, mais il s'agit essentiellement de zones basses pouvant être submergées. Les autres zones basses sont assez nombreuses et bien réparties sur les différentes façades maritimes ;
 - Outre les zones basses, les falaises de roches tendres pourraient être fragilisées par une élévation du niveau de la mer qui sapera plus fréquemment le pied de falaises, mais surtout, les plages situées entre des caps rocheux (composés de roche dure) seront affectées par la remontée du niveau de la mer et subiront une accélération de l'érosion voire disparaîtront ;
 - Enfin, la densité de population dans les communes littorales est très variable d'une région à l'autre avec 726 hab./km² pour la région Provence Alpes Côte d'Azur qui représente à elle seule près du tiers de la population

³⁵On remarque que le nombre de logements est supérieur à la population alors que le ratio habituel est de deux habitants par logement. Ce résultat est caractéristique des zones touristiques littorales, où les résidences secondaires sont très nombreuses, surtout en bord de mer.

littoral, la plus forte densité étant enregistrée dans les Alpes-Maritimes avec 2 653 hab./km².

II.7 Le risque gravitaire : impact du changement climatique

II.7.1 Les avalanches

De nombreux facteurs, à la fois liés aux conditions météorologiques (forte chute de neige, redoux,...) et à la qualité du manteau neigeux (liée aux températures et précipitations sur quelques jours, à l'exposition, la pente et le vent,...), interviennent dans le déclenchement des avalanches. Il est difficile de quantifier l'impact du changement climatique sur l'activité avalancheuse : un plus grand nombre d'avalanches de neige humide (difficiles à déclencher préventivement) et une diminution de l'activité aux basses et moyennes altitudes constituent les scénarios les plus probables d'évolution, au vu de la connaissance actuelle.

Les conséquences sur la viabilité des voies de communication pourraient être sensibles, surtout en période de congés, du fait d'une forte pression économique pour la réouverture des routes d'accès aux stations touristiques (et des domaines skiables).

II.7.2 Les crues et laves torrentielles

Les crues et laves torrentielles se distinguent des inondations de plaine par la charge solide qui accompagne leurs écoulements et aggrave significativement les impacts sur les biens et personnes exposés. Quelle que soit la hauteur de l'écoulement, tout déplacement humain est impossible dans une crue ou une lave torrentielle. Les impacts du changement climatique envisagés tels que recul des glaciers, disparition du pergélisol et de glaciers rocheux pourraient augmenter le volume de sédiments disponibles et seraient susceptibles d'aggraver l'aléa. Ce premier effet devra être combiné à l'éventuelle évolution du volume d'eau disponible (si pluies plus intenses, par exemple), autre composante de l'aléa considéré.

II.7.3 Les glissements de terrain

Les glissements de terrain sont des aléas particulièrement complexes, souvent abordés qualitativement, qui dépendent de facteurs de prédisposition (géométrie du versant, caractéristiques mécaniques et géométriques des matériaux et occupation des sols) et de facteurs de déclenchement tels que précipitations, sollicitations sismiques ou actions anthropiques. Les seconds jouent plutôt à court terme (quelques années) sur la fréquence des glissements. Pour les glissements de terrain superficiels, on constate une influence directe et presque immédiate des précipitations ; pour les glissements de grande ampleur, plus profonds, l'impact des précipitations (abondantes, car c'est le volume d'eau qui joue) est différé (retardé, amorti). Le changement climatique pourrait donc avoir un impact négatif sur les glissements superficiels dans le cas où les pluies augmentent en hiver et positif sur les glissements plus profonds, en limitant leur fréquence si le niveau des nappes baisse, mais il convient de rester extrêmement prudent sur le sujet.

II.7.4 Les éboulements rocheux

Les éboulements rocheux d'ampleur très variée proviennent de massifs présentant des facteurs de prédisposition (réseau de fractures, lithologie favorable) et des indices précurseurs de rupture, l'eau étant le principal facteur d'accélération des mouvements jusqu'à la rupture.

L'accroissement attendu des précipitations hivernales devrait être responsable d'une augmentation des chutes de blocs, habituellement plus fréquentes en périodes de pluie intense ou en période de gel/dégel et de l'instabilité de certains massifs rocheux plus prédisposés que d'autres à l'altération.

L'augmentation des températures, que l'on estime plus sensible dans les Alpes qu'ailleurs, sera à l'origine du recul très probable des glaciers, libérant progressivement les blocs emprisonnés dans les glaces et de la remontée du permafrost, qui favorise la décompression des parois rocheuses et la chute de blocs et de pans rocheux importants.

II.7.5 Les effondrements de cavités souterraines

Même si ce ne sont pas des risques liés aux territoires de montagne, les effondrements de cavités souterraines doivent être signalés car ils occasionnent des désordres certes limités mais qui peuvent être meurtriers et dont l'impact psychologique est important.

Pour les cavités peu profondes, très représentées dans le nord et l'ouest de la France, le rôle de la pluviométrie sur leur instabilité est assez clair, même s'il est très peu quantifié. De longues périodes pluvieuses hivernales ont pour conséquences actuelles la remontée du niveau des nappes dans les cavités et la saturation des terrains de recouvrement, facteurs importants d'instabilité.

A l'horizon 2100, la répartition des pluies et le comportement des nappes en hiver, après de fortes périodes de sécheresse, sont les inconnues qui empêchent de juger de l'augmentation ou non du risque d'effondrement. Il convient de se pencher davantage sur ce sujet car de très nombreuses cavités supposées ou avérées concernent des zones de fort potentiel urbain.

II.7.6 Synthèse

L'impact du changement climatique sur les aléas gravitaires est difficile à apprécier, du fait de la nature même des phénomènes en jeu, de la complexité des liens entre les aléas considérés et les divers facteurs de prédisposition et de déclenchement et de la somme des incertitudes relatives :

- Aux scénarios climatiques annoncés, donnant des indications relativement claires sur des tendances globales et régionales, mais qui sont insuffisants dès lors que l'on se penche sur un secteur très localisé où des aléas peuvent se produire (exposition d'un versant en montagne, par exemple) ;
- A la réponse en termes de localisation et de délais des écosystèmes aux variations climatiques saisonnières : on pense notamment au temps de rechargement des nappes pouvant concourir aux instabilités, au temps de transfert dans les terrains géologiques ;
- A la réelle part des variations climatiques sur le changement de composition, l'altération, l'endommagement, la fatigue mécanique du matériau : on peut s'attendre à ce que les phénomènes cycliques soient plus brutaux sur des périodes plus restreintes ; mais encore faut-il tenter de le quantifier.

En première approximation, on peut cependant retenir la possible augmentation des événements superficiels et/ou fréquents les plus directement reliés aux précipitations hivernales (avalanches de neige humide, glissements superficiels, chutes de blocs...) avec celle des précipitations hivernales et les conséquences financières potentiellement importantes en cas de blocage de voies de communication en montagne et en hiver. On peut aussi noter l'influence de l'impact potentiel du changement climatique sur les

glaciers et sur le pergélisol sur l'intensité des crues et laves torrentielles et sur la stabilité des parois rocheuses.

II.8 Analyse et discussion des résultats

Il est important de rappeler ici une des limites de l'exercice réalisé liée à la situation de la France dans une zone de transition climatique, avec en conséquence des impacts du changement climatique sur les précipitations assez incertains et sensibles à la qualité de la descente d'échelle opérée (au contraire des résultats concernant les températures). Il convient également de souligner de manière plus générale la nécessité d'un travail avec des données/prévisions climatiques d'échelles cohérentes entre elles et par rapport aux aléas étudiés.

II.8.1 Synthèse des résultats : qu'est-ce qui attend les acteurs en charge de la prévention et de la gestion des risques naturels d'ici la fin du 21ème siècle ?

A l'échelle de la France entière, l'augmentation significative et bien établie de la fréquence des canicules entrainera l'augmentation des dommages liés au phénomène de RGA, avec un coût moyen des dommages multiplié par un facteur compris entre 3 et 6. Des mesures d'adaptation simples peuvent être envisagées. Le renforcement de la politique actuelle de prévention, notamment l'usage obligatoire de techniques particulières pour les fondations des pavillons, accompagné de mesures intégrées de gestion de l'humidité du sol, pourrait s'avérer rentable si elle est appliquée sur des secteurs particulièrement exposés.

S'agissant des inondations par débordement de cours d'eau, qui concernent des surfaces modestes mais très attractives, de nombreuses incertitudes demeurent quant à l'impact du changement climatique sur l'aléa. Il ne se dégage pas vraiment, dans les exemples retenus à titre d'illustration, de signal très fort sur la variable étudiée (le dommage moyen annuel - DMA), même si, sur certains bassins (Orb, Meuse), l'augmentation des dommages moyens annuels est marquée. Cependant, cette variable (le DMA), très utile par exemple pour l'analyse de l'assurance, ne représente qu'un aspect des dommages, globalement leur niveau moyen. Elle ne permet pas, par exemple, d'isoler les aléas extrêmes au-delà de certains seuils sensibles pour la gestion du risque. Comme il pourrait y avoir une amplification des précipitations extrêmes en conséquence du changement climatique, il convient de souligner l'importance de compléter les travaux menés en introduisant des critères relatifs plus spécifiquement aux événements extrêmes et de prendre en compte l'aléa ruissellement pluvial, ce qui pourrait avoir des conséquences importantes sur l'estimation des coûts. En termes d'adaptation, outre l'amélioration de la connaissance, il est à ce stade uniquement envisagé la poursuite et le renforcement de la politique actuelle par une gestion territoriale prenant en compte le risque et recherchant des compromis acceptables.

Une question essentielle se pose pour les risques côtiers, sachant que l'élévation du niveau de la mer est une prévision robuste même si son ampleur reste à préciser : comment gérer le recul de la côte en conséquence du changement climatique, recul qui devrait concerner *in fine* plusieurs centaines de milliers de personnes (par érosion et/ou submersion définitive) et coûter plusieurs dizaines de milliards d'euros à la société à l'échelle du siècle ? Des mesures sont à choisir et à prendre (recul stratégique, protection localisées,...) pour anticiper l'impact du changement climatique, dans le cadre de l'élaboration d'une stratégie globale et partagée d'adaptation planifiée.

Concernant les aléas gravitaires enfin, l'impact du changement climatique reste incertain, du fait d'un fort besoin de connaissances ; à ce stade, il n'est pas proposé d'évolution de la politique de gestion de ces aléas. Il est cependant à souligner le fort impact sociétal qu'ont les catastrophes associées à ces aléas, entraînant des pertes de vies humaines et des coûts importants très localisés, impact qui justifie la poursuite de la mise en œuvre de mesures de prévention.

Enfin, en regard des travaux internationaux sur le sujet, il est essentiel de souligner une nouvelle fois le caractère crucial de la vulnérabilité et de son évolution à venir, même si les travaux réalisés tentent, en travaillant à économie constante, d'isoler le facteur changement climatique.

En conclusion, un des phénomènes les plus « nouveaux » et délicats à gérer dans les 100 prochaines années semble être le recul généralisé des côtes basses. La sécheresse géotechnique ne doit cependant pas être négligée, en termes de coûts, mais des solutions d'adaptation (coûteuses) existent déjà. Quant aux aléas gravitaires et inondation, un des facteurs-clé semble être l'impact de l'évolution de la variabilité des précipitations (extrêmes) et températures (amplitude journalière) qui reste à approfondir.

II.8.2 Caractérisation de l'incertitude

Les études menées ne donnent pas d'évaluations fines. Elles nous conduisent à des ordres de grandeur, des tendances, des indices de sens d'évolution, d'impacts et de coûts possibles. Les valeurs absolues restent très incertaines et demanderaient des approfondissements divers. Cela dit, il serait illusoire de rechercher une précision extrême compte tenu des éléments par nature complexes et incertains en présence (les aléas naturels, le référentiel des enjeux et des dommages, le changement climatique).

Il ressort cependant que notre référentiel habituel de travail dans le domaine de la gestion des risques naturels n'est, à ce stade, pas remis en cause. Le travail, en univers incertain, se poursuit. Il conviendrait cependant d'envisager une prise en compte plus documentée des événements exceptionnels compte tenu de leur potentielle aggravation comme conséquence du changement climatique.

S'il existe une certaine « robustesse » des projections, en tendance, pour des paramètres comme la température et le niveau de la mer, la concordance entre les modèles pour les tendances pluviométriques est bien moindre et ils ne donnent au mieux que des éléments d'information extrêmement partiels sur l'évolution de la variabilité des aléas fréquents ou rares. Cette incertitude a été traitée comme suit :

- Pour les aléas côtier et RGA, n'ont été considérés respectivement que l'impact d'une élévation du niveau de la mer et d'une élévation des températures sur la fréquence des phénomènes considérés, sans prendre en compte des changements possibles dans l'amplitude des aléas (effets de surcote pour le premier, d'alternances accentuées pour le second) ;
- Pour les inondations, les experts se sont référés aux indications du projet IMFREX relatives à l'accroissement de la variabilité, sans disposer d'éléments sur les configurations météorologiques génératrices de grandes crues.

Il faut aussi noter, comme mentionné en introduction, que des effets indirects du changement climatique comme la diminution de la fonction protectrice et/ou régulatrice d'écosystèmes affaiblis pourraient se révéler significatifs. Ce pourrait être une cause de

sous-estimation des aléas (rares ou imprévus) dont les impacts seraient démultipliés par l'accroissement des vulnérabilités.

II.8.3 Limites

Les études ont été réalisées à des échelles spatiales diverses empêchant toute agrégation à l'échelle de la France. Les connaissances des impacts du changement climatique sont progressivement désagrégées mais restent à des échelles spatiales parfois grossières par rapport aux phénomènes en jeu.

Les études portent uniquement sur l'estimation du coût des dommages potentiels aux logements qui pourraient être imputés aux risques considérés dans le contexte du changement climatique et ne prennent pas en compte, entre autres, les coûts aux entreprises ainsi que toutes les pertes indirectes (pertes d'exploitation, emplois et revenu des taxes pour les collectivités, mais aussi impacts sur la santé, les communautés, le patrimoine historique et culturel, la biodiversité). Les données utilisées sont uniquement les données CatNat. Or les pertes assurées représentent une fraction des pertes économiques totales directes (de l'ordre de 50% dans les économies développées où le taux de couverture par l'assurance est important) et la connaissance des pertes indirectes en France est très limitée.

II.8.4 L'adaptation au changement climatique : un renforcement de la politique actuelle de prévention et de gestion des risques naturels ?

A priori on ne s'intéresse ici, en matière d'adaptation, qu'aux mesures publiques planifiées qui seraient prises par anticipation.

En premier lieu, il apparaît essentiel d'examiner les différents volets de la politique de gestion actuelle des catastrophes naturelles et d'évaluer qualitativement l'opportunité de poursuivre sa mise en œuvre en climat changé. Il ressort des différents travaux menés en sous-groupes qu'il convient de :

- Développer la connaissance des aléas, de la vulnérabilité et des coûts (production et capitalisation de données) ;
- Poursuivre et développer la mise en place de réseaux de mesures pérennes sur des sites représentatifs et d'indicateurs de suivi ;
- Renforcer l'approche multirisques (une zone exposée aux inondations peut également, par exemple, être soumise à la sécheresse géotechnique) ;
- Poursuivre et renforcer la politique actuelle de gestion des risques naturels, par des stratégies « sans regret »³⁶ (exploitant les volets connaissance, surveillance et prévision, information et mémoire, prise en compte dans l'aménagement, réduction de la vulnérabilité et développement de la résilience, gestion de crise) et établir une gestion globale et coordonnée à l'échelle des bassins de risque les plus sensibles.

³⁶ Les mesures dites « sans regret » sont celles qui sont justifiées en toute hypothèse relative au futur. Voir définition dans la Partie générale du rapport.

II.8.4.1 Risque d'inondation

La politique actuelle de gestion de l'aléa inondation par débordement de cours d'eau se traduit par une approche globale et intégrée à l'échelle de bassins versants. Ses différentes composantes sont programmées sur certains territoires, dans des plans du type Programmes d'actions de prévention des inondations, plans grands fleuves (plans de gestion). La volonté de prise en compte des coûts au regard des bénéfices attendus des opérations de prévention des inondations est présente même si elle demande à être davantage et plus largement formalisée.

La politique actuelle de prévention s'intéresse en priorité aux inondations par débordement de cours d'eau ; elle devra s'intéresser de plus en plus au risque de ruissellement urbain dont la connaissance est plus difficile à établir. Cette politique a privilégié de se prémunir contre un aléa de type centennal ; elle devra aussi faire évoluer le « traitement » des aléas extrêmes. Pour les niveaux de crues plus rares, voire exceptionnelles, sont privilégiés la prévision, la gestion de crise, l'information, la réduction de la vulnérabilité et le développement de la résilience.

Cependant, les exigences en matière de prévention d'un événement exceptionnel s'accroissent : ainsi, la directive européenne n°2007/60/CE du 23 octobre 2007 relative à l'évaluation et la gestion des risques d'inondation demande explicitement la représentation des aléas exceptionnels dans la cartographie des aléas sur les territoires présentant un risque important d'inondation et la prise en compte du changement climatique. Cela exige un suivi plus structuré des actions de prévention et de gestion du risque d'inondation, nécessitant des moyens renforcés, compte tenu de la complexité des phénomènes à appréhender.

Le changement climatique est bien susceptible de faire évoluer l'aléa inondation. Compte tenu des fortes incertitudes existant sur les impacts attendus et de la spécificité des phénomènes considérés (variabilité interannuelle importante, aléa « rare »), il convient d'anticiper l'adaptation aux impacts du changement climatique sur cet aléa, par une approche globale et diversifiée.

En premier lieu, il est important de souligner que les réponses adaptées changent en fonction des caractéristiques actuelles de chaque bassin versant. Les politiques actuelles sont souvent liées au choix d'un aléa de *référence*, mais elles sont en général adaptées « par construction » à la prise en compte de son évolution (en termes de connaissance et donc aussi intrinsèque, - en revanche, les éventuelles évolutions « brutales » en lien avec le changement climatique ne sont pas forcément prises en compte à l'heure actuelle), à l'exception des actions de protections des lieux habités et de la réglementation de l'occupation des sols. Elles s'accommoderont donc du contexte du changement climatique. Sauf à ce qu'on observe une extension spatiale sensible des zones exposées à des aléas de référence, un certain nombre de politiques ne devraient pas avoir de surcoûts très sensibles (préparation à la gestion de crise, prévision, sensibilisation...), à l'exception notamment des ouvrages de protection et de la réglementation de l'usage des sols si l'ensemble des PPRN devait être révisé. Sur ces décisions qui engagent fortement le moyen et le long terme, on risque aussi bien « trop » que « trop peu » de prudence. Il faudra avancer, en termes de méthodologie comme de références, sur la question de la prise en compte de projections d'évolution de l'aléa sur la durée de vie des projets.

II.8.4.2 Risque côtier

La politique actuelle de gestion des risques comporte « d'abord » un fort volet aménagement avec :

- Les actions de défense contre la mer, en général conduite par les collectivités locales ;
- La réglementation par les plans de prévention des risques littoraux en nombre encore limité (85 Plans de prévention des risques approuvés, 113 prescrits) ;
- Les outils d'encadrement et mise en perspective de l'aménagement qui permettent une prise en compte du risque dans le développement des territoires : la loi littoral, les schémas de mise en valeur de la mer, les DTA et les SCOT (au titre de la planification on peut aussi citer les schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux).

Le développement des systèmes de vigilance et d'alerte se poursuit, avec un travail de Météo-France avec le Ministère de l'intérieur et le MEEDDM pour développer une vigilance « risques littoraux ».

Parmi les manques et limites des politiques on relèvera en particulier :

- Le besoin d'améliorer encore les connaissances sur les phénomènes, les évolutions générales et locales, l'analyse des impacts des politiques ;
- Une vision encore partielle et morcelée des politiques d'aménagement, qui n'intègrent pas toujours le risque dans leurs considérations stratégiques ;
- Les limites intrinsèques, malgré les progrès en cours, de systèmes d'alerte ;
- Une réflexion encore très orientée « protection contre la mer » avec des protections qui se font le plus souvent à l'échelle administrative et non à l'échelle des phénomènes considérés ;
- Une approche multirisques à développer.

Le changement climatique devrait être pris en compte dans les documents d'aménagement et de planification. La stratégie d'adaptation au changement climatique dépend du contexte local ; il n'existe pas de solution unique à appliquer partout, les enjeux économiques, environnementaux n'étant pas uniformément répartis. Une stratégie pourrait être définie à moyen terme par l'étude globale et partagée de mesures de type recul stratégique³⁷, restauration du fonctionnement naturel et maintien du trait de côte et la combinaison retenue des différentes mesures rendue publique (pour permettre ensuite adaptation, anticipation).

La restauration du fonctionnement naturel (revégétalisation, encadrement de la fréquentation touristique, suppression d'ouvrages de protection) peut être utilisée comme mesure de prévention, là où les enjeux sont peu nombreux et le risque modéré.

Les ouvrages de défense contre la mer maintiennent le trait de côte, mais ils sont à réserver aux zones à forts enjeux car ils modifient le transit sédimentaire.

II.8.4.3 Risque RGA

En partie II.4, une première étude compare les coûts relatifs aux deux types d'adaptation envisagés (adaptation des fondations des maisons individuelles et dispositions plus

³⁷ Le recul stratégique consiste à déplacer des enjeux existants sur une zone où les risques sont plus faibles.

globales qui prévoient à la fois l'amélioration de la qualité de la construction et la diminution de l'ampleur des sollicitations par une meilleure maîtrise des variations hydriques du sol) au coût des dommages potentiels sans adaptation et ce pour une maison individuelle. Il en ressort que le changement climatique renforce le besoin d'une politique de prévention de ce risque et sa mise en œuvre sur des zones plus vastes, avec l'accroissement du nombre de sinistres potentiels.

II.8.4.4 La garantie des dommages dus aux catastrophes naturelles au regard du changement climatique

La Fédération française des sociétés d'assurance (FFSA) et le Groupement des entreprises mutuelles d'assurance (GEMA) ont présenté en avril 2009 les résultats de leur étude relative à « l'impact du changement climatique et de l'aménagement du territoire sur la survenance d'événements naturels en France ». Les principaux résultats avancés pour les trois aléas considérés (inondations, sécheresse géotechnique et tempêtes), à partir de fourchettes d'hypothèses, de leurs évolutions à l'horizon 2030 sont présentés en Annexe E.2.

En raison des différences notamment dans les horizons, les aléas et les hypothèses climatiques retenus, les résultats obtenus ne peuvent être comparés directement. Il s'agit de dégager les points communs dans les recommandations formulées.

Des approches et méthodes sensiblement différentes

Le GT RNACC a choisi de mener une évaluation à enjeux constants³⁸ (approche qualifiée « d'aléa centrée »). Les assureurs ont opté pour l'approche qualifiée « d'enjeux centrée », combinant l'évolution des deux facteurs générateurs de risques, l'aléa et la vulnérabilité des enjeux exposés. En effet, il est avéré que l'accroissement des dommages est actuellement principalement dû à la concentration des richesses dans les zones d'aléa. L'assurance étant le principal outil de financement de ces dommages, cette approche est la plus adaptée aux travaux de cette profession.

Les méthodes de quantification mises en œuvre sont très différentes. A la méthode ex-post de projection statistique de données agrégées sur les sinistres³⁹ réalisée par les assureurs⁴⁰, s'oppose la méthode ex-ante adoptée par le GT RNACC⁴¹ consistant à déterminer à l'aide d'outils géomatiques (SIG), de données socio-économiques et de données géographiques sur les aléas d'une part, l'exposition actuelle des biens des particuliers et des professionnels et d'autre part, cette exposition aux horizons retenus, sous contrainte d'évolution climatique.

Des points communs dans les recommandations formulées

Certaines préconisations pour la poursuite des travaux et la prise en compte du changement climatique dans les politiques publiques de prévention et de gestion des risques naturels sont partagées par les deux rapports :

³⁸ Exception faite de la tentative de mesurer le coût supplémentaire de l'évolution urbaine face au risque de RGA.

³⁹ Fréquences et coûts moyens par département et par année.

⁴⁰ Pour les événements dits « locaux » et une partie des événements dits « extrêmes ». En effet, dans le cas des inondations, une crue de la Seine, de la Loire et de la Garonne a été intégrée à partir d'une méthode d'évaluation fondée sur l'appréciation de l'exposition.

⁴¹ A défaut de données sur les sinistres.

- Développement et partage de la connaissance des phénomènes et du risque ;
- Développement de la prise en compte des risques dans l'aménagement et la construction et évaluation du rapport coût/efficacité des techniques de réparation des constructions existantes sinistrées ;
- Réduction de la vulnérabilité et le développement de la résilience, avec priorisation des dépenses de prévention et notamment l'accélération de la mise en place de PPR sur les territoires le nécessitant vraiment et une meilleure prise en compte de l'existant.

Les assureurs montrent par cette étude l'intérêt qu'ils portent à l'étude de l'impact du changement climatique sur la survenance de catastrophes naturelles et donc sur les dommages à indemniser ensuite. Il est essentiel de souligner à ce stade le rôle important que pourraient jouer les assureurs pour *in fine* garantir les risques naturels en tenant compte de l'impact du changement climatique et auparavant, participer à une éventuelle adaptation du régime CatNat si cela s'avérait nécessaire.

II.8.5 Conclusion

Le changement climatique a un impact certain sur les risques naturels, mais il devrait toucher davantage des territoires spécifiques (littoral, zones d'argiles,...) que l'ensemble du territoire métropolitain. Sur ces territoires, des mesures d'adaptation devront être envisagées.

Les dommages potentiels dus aux risques naturels ne sont pas tous liés au changement climatique. Les inondations, par exemple, sont une question très importante, mais leur gestion ne se justifie pas seulement par la prise en compte du changement climatique, loin s'en faut.

Il convient enfin de rester très prudent sur l'usage des chiffres et résultats produits, compte tenu des nombreuses incertitudes et de poursuivre l'action de prévention, voire la renforcer par la mise en place de stratégies « sans regret ».

II.9 Besoins spécifiques et pistes identifiées pour poursuivre l'analyse

II.9.1 Pour affiner la méthodologie

Ce rapport montre à la fois des manques de données et des incertitudes au niveau :

- De la cartographie de l'aléa ;
- Du recensement des enjeux ;
- De l'évaluation des dommages et des enjeux à protéger ;
- Des hypothèses d'évolution du changement climatique et de ses effets sur les inondations terrestres et marines et sur les dommages associés.

Il est, dans un premier temps, nécessaire de consolider les méthodes de recensement des enjeux et d'évaluation des dommages et leur pérennité. Un cadre commun et partagé par tous aiderait à aboutir à une démarche commune et à une meilleure connaissance du territoire actuel. Des bases de données nationales et évolutives d'enjeux et de dommages, voire un observatoire, devraient notamment être mises en œuvre pour atteindre cet objectif, comme par ailleurs une base de données actualisée régulièrement des études d'évaluation économique des dommages réalisées sur différents secteurs géographiques. Le changement climatique n'est en fait qu'une motivation et un degré de

complexité supplémentaires qui justifie un travail sur l'estimation des dommages dus aux phénomènes naturels.

L'hypothèse d'enjeux constants : elle a le bénéfice certain d'accroître la faisabilité de la démarche et l'on pourrait s'y ranger sans trop d'états d'âme si toute l'économie et l'activité non économique se développait de façon identique entre différents secteurs géographiques d'une part, entre différents types d'actions et de coûts d'autre part. Mais rien ne dit que les zones à risque et leur occupation vont évoluer (en densité, en valeur unitaire exposée...) comme le reste du territoire en moyenne, en particulier dans les plaines alluviales et les zones côtières. De même, rien n'indique que les coûts de prévention et de protection (infrastructures...) vont évoluer comme le reste de l'économie. Les travaux récents ont par ailleurs montré, sur un grand nombre de bassins et sur une durée révolue de 30 ans, que les actions anthropiques locales induisaient autant de cas d'instationnarité avérée des débits de crue ou d'étiage que les évolutions climatiques. Le même constat s'impose pour les risques côtiers.

Il est également important de bien distinguer les adaptations de la prévention et de la protection liées au changement climatique, de l'évolution de la politique publique liée à d'autres causes (« rattrapage » par rapport aux objectifs antérieurs, nouveaux objectifs dans l'absolu...). En d'autres termes, les coûts d'adaptation sont alors ceux qu'il faudrait mettre en œuvre, au travers d'actions de prévention et de protection, pour conserver globalement et individuellement les mêmes niveaux d'exposition aux risques qu'aujourd'hui.

II.9.2 Pour élargir le champ des impacts et des mesures

Les travaux réalisés révèlent la difficulté de connaître clairement l'impact du changement climatique sur les dommages. Il semble indispensable de poursuivre ces réflexions avec l'appui d'un groupe d'experts pour mieux apprécier la pertinence des hypothèses et les disparités du territoire français.

Les phénomènes de ruissellement urbain auraient tendance à augmenter avec l'évolution du changement climatique et l'augmentation d'évènements pluviométriques intenses. Peu de données sont disponibles sur ces phénomènes. Nous savons que, pour certains bassins, ces phénomènes peuvent provoquer autant, sinon plus de dommages que ceux liés aux premiers débordements de crues en milieu urbain. Ils alourdiraient donc les dommages liés uniquement aux inondations et devraient dès aujourd'hui être pris en compte.