



EVALUATION DU COÛT DES IMPACTS DU CHANGEMENT
CLIMATIQUE ET DE L'ADAPTATION EN FRANCE
Rapport de la seconde phase

Partie III – Rapports des groupes
sectoriels

Table des matières

I Rapport du Groupe Agriculture	4
I.1 Introduction	5
I.2 Le changement climatique et l'adaptation dans le secteur agricole	6
I.3 Cadre de l'analyse : les cultures retenues pour la quantification	9
I.4 Analyses détaillée sur les grandes cultures	14
I.5 Analyse détaillée pour la viticulture	27
I.6 Analyse détaillée sur les prairies	35
I.7 Analyse et discussion des résultats	45
I.8 Besoins et pistes identifiées pour favoriser l'adaptation en agriculture	46
II Rapport du Groupe Forêt	46
II.1 Introduction	52
II.2 Les valeurs de la forêt française	53
II.3 Les impacts du changement climatique sur la forêt.....	57
II.4 L'adaptation dans la forêt	66
II.5 Evaluation quantifiée des impacts du changement climatique et de l'adaptation .	69
II.6 Analyse et discussion des résultats	91
II.7 Besoins spécifiques et pistes identifiées pour poursuivre l'analyse.....	92
III Rapport du Groupe Santé	86
III.1 Introduction.....	96
III.2 Phénomènes climatiques étudiés.....	97
III.3 Évaluation économique de l'impact des dégradations de l'environnement sur la santé	98
III.4 Évaluation du coût pour l'assurance maladie.....	101
III.5 Données manquantes : discussion.....	120
Conclusion et synthèse	123
IV Rapport du Groupe Energie	115
IV.1 Introduction	127
IV.2 Liste des impacts et des mesures d'adaptation retenus pour la quantification ...	129
IV.3 Evaluation quantifiée des impacts du changement climatique et de l'adaptation	139

IV.4	Analyse et discussion des résultats	168
IV.5	Besoins spécifiques et pistes identifiées pour poursuivre l'analyse.....	171
V	Rapport du Groupe Tourisme.....	160
V.1	Introduction	174
V.2	Rappel des résultats de la phase 1 : parti méthodologique adopté en phase 2 ..	175
V.3	Principaux points de vulnérabilité touristiques.....	175
V.4	Climat et tourisme : quelques rappels	179
V.5	Evaluation quantifiée de l'impact du changement climatique sur le tourisme : l'approche de l'ITC.....	181
V.6	Les préférences climatiques exprimées par les touristes	189
V.7	Conclusions et pistes de travail.....	196
VI	Rapport du Groupe Infrastructures de transport et cadre bâti.....	198
VI.1	Introduction	199
VI.2	Liste des impacts étudiés.....	201
VI.3	Les infrastructures routières en France	203
VI.4	Analyse détaillée sur le cas des canicules	207
VI.5	Analyse détaillée sur le cas des submersions	215
VI.6	Analyse et discussion	225
VI.7	Eclairage complémentaire : l'impact du changement climatique sur le cadre bâti	226
VI.8	Besoins spécifiques et pistes identifiées pour poursuivre l'analyse.....	230

I Rapport du groupe Agriculture

I.1 Introduction

I.1.1 Objectifs et organisation des travaux

Le groupe « Agriculture et forêt » a produit un rapport d'analyse qualitative lors de la première phase des travaux du Groupe interministériel en 2008¹. Cette première étape a permis de cerner les principaux impacts du changement climatique sur les secteurs agricole et forestier. Pour la seconde phase des travaux, dont l'objectif est d'évaluer des premiers éléments de coûts de certains impacts du changement climatique et de quelques mesures d'adaptation, le groupe a été scindé en deux sous-groupes, l'un dédié à la forêt et l'autre à l'agriculture. Le travail prospectif sur le secteur agricole a été confié au bureau d'études ECOFYS/SOGREAH.

La méthode de travail s'est fondée sur une analyse bibliographique², complétée par des entretiens avec des experts de chaque filière :

- Nadine Brisson, Unité Agroclimatique, INRA Avignon
- Xavier Cassedanne, Arvalis-Institut du Végétal
- Patrice Dumas, Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement
- Inaki García de Cortázar-Atauri, Unité Agroclimatique, INRA Avignon
- Eric Duchêne, unité mixte de recherche INRA - Université Louis Pasteur « Vigne et vins d'Alsace », Colmar
- Philippe Gate, Arvalis-Institut du Végétal
- Jean-Michel Legave, INRA Montpellier
- François Lelièvre, INRA Montpellier
- Jean-Paul Renoux, Arvalis-Institut du Végétal
- Françoise Ruget, UMR 1114 EMMAH, INRA Avignon
- Bernard Seguin, coordinateur de la Mission Changement climatique et effet de serre, Unité Agroclimatique, INRA Avignon

Les entretiens avec les experts ont porté sur les impacts observés dans la région, les principaux impacts attendus - dans l'état actuel de la science -, les travaux (études et modèles) existants en France et/ou dans la région étudiée permettant de qualifier et de quantifier l'impact physique des changements climatiques, les mesures d'adaptation observées ainsi que celles jugées nécessaires dès aujourd'hui et à l'avenir ; et enfin les besoins de recherche et les manques de connaissances, besoins de suivi et d'observation identifiés.

¹ D4E / ONERC. 2008

² Bibliographie présentée en Annexe B.2.5

I.1.2 Synthèse des résultats

Les résultats de l'analyse pour les grandes cultures montrent un impact différencié selon les cultures étudiées (blé et maïs), masquant des disparités régionales potentiellement significatives. Un facteur « eau » limitant qui remettra certainement en cause les effets « positifs » de la concentration en CO₂ atmosphérique a également été mis au jour. Dans l'hypothèse d'une hausse de fréquence des canicules du type 2003, le coût, sans adaptation, pour les grandes cultures pourrait atteindre plusieurs centaines de millions d'euros par an.

En viticulture, l'étude montre un impact contrasté selon les régions, qui peut se transformer en opportunité grâce à l'adaptation, si l'évolution de la disponibilité de l'eau le permet.

Concernant l'étude des prairies, elle a montré une possible hausse des rendements dans la partie Nord, une vulnérabilité accrue de l'arc périméditerranéen et la montée en latitude de la bande de transition.

I.2 Le changement climatique et l'adaptation dans le secteur agricole

I.2.1 Relevé de quelques impacts du changement climatique sur le secteur agricole

Les évolutions climatiques graduelles (augmentation des températures, modifications de la pluviométrie et augmentation de la teneur en CO₂) risquent d'influer sur les rendements agricoles. Au niveau global, les derniers travaux en date basés sur les scénarios futurs³ concluent à une augmentation des rendements agricoles pour les zones de moyennes et hautes latitudes lorsque l'augmentation locale de température est inférieure à 3°C à la fin du XXI^{ème} siècle (dans ce cas, l'effet positif de la concentration du CO₂ sur l'activité photosynthétique compenserait l'effet négatif lié à l'augmentation de température) ; pour les latitudes plus basses (zones tropicales ; DOM-COM), les rendements baisseraient dans tous les scénarios.

L'impact d'une hausse de fréquence des événements extrêmes est également à considérer. On peut relever par exemple l'impact des mouvements de terrain sur les terres cultivées et sur les vignobles ; une fragilisation de l'agriculture littorale du fait de l'accroissement des risques côtiers (salinisation des terres arables et des pâturages, submersion des terres et vignobles) ; et enfin, les conséquences néfastes de canicules sur l'ensemble des productions.

A ce titre, le retour d'expérience de la canicule de 2003 fournit des indications intéressantes sur la vulnérabilité du secteur au changement climatique. En Europe, le coût de la canicule pour l'agriculture est estimé à plusieurs milliards d'euros⁴. En France, suite à la sécheresse de 2003, la facture s'est élevée à 590 millions d'euros pour le secteur agricole⁵. Le secteur de l'élevage est notamment apparu comme particulièrement vulnérable (comme cela avait été également le cas lors de la sécheresse de 1976), avec au niveau national, une perte de production fourragère estimée entre 20 et 30% et un affaiblissement des espèces prairiales pérennes. La dépendance à la production

³ GIEC, 2007

⁴ COPA-COGECA, 2004

⁵ Reynaud A., 2008, pp 6-13.

fourragère pour l'alimentation des troupeaux peut ainsi être considérée comme un point spécifique de vulnérabilité de l'activité au changement climatique⁶.

D'autres impacts spécifiques peuvent également être soulignés : impacts des hivers doux pour l'arboriculture (levée de dormance, avancée de la phénologie et risques de gel conséquents) ; baisse de qualité des produits et modifications de techniques de production, posant la question des productions liées au terroir (AOC). Cette question touche l'ensemble de l'activité agricole.

Il est difficile d'étudier directement les impacts du changement climatique sur l'agriculture car à cette échelle de temps, les effets des tendances climatiques se mélangent intimement avec ceux du progrès technologique et des changements sociaux ou économiques, dont la politique agricole commune.

Encadré 1 - L'eau : un facteur limitant (Extrait de l'Expertise Scientifique Collective Sécheresse, INRA, 2006)

La sécheresse de 1976 avait été vécue comme un événement exceptionnel. Les sécheresses plus récentes, du début des années 1990 et surtout celles de 2003 et de 2005, ont été davantage perçues comme une des manifestations possibles du « changement climatique » annonçant un retour plus fréquent de ces « anomalies » qui, de statut de catastrophe exceptionnelle, pourraient passer au statut de phénomène récurrent.

Le GIEC prévoit en effet une augmentation de la variabilité du climat et de certains phénomènes extrêmes et considère comme probable l'accroissement des risques de sécheresse estivale sur la plupart des zones terrestres continentales à moyenne latitude [...].

Sur les 8 dernières années, une vingtaine de départements connaissent des limitations de consommation d'eau en année normale ; ce chiffre est doublé les années relativement sèches (1998, 2004) et atteint plus de 60 les années les plus sèches (2003, 2005). Même en année humide (2001), environ 6 départements connaissent des limitations d'usage de l'eau [...].

Les surfaces irriguées sont concentrées dans 5 grandes régions : sud-est, sud-ouest mais aussi régions Centre, Poitou-Charentes et Pays de Loire. Cette concentration sur un espace géographique limité génère des situations de concurrence entre différents usagers de l'eau, avec une mobilisation accrue des citoyens dans le cadre associatif et des élus. L'eau destinée à l'irrigation représente en moyenne annuelle environ 50% de l'eau consommée en France et peut atteindre dans certaines régions 80% des prélèvements effectués en période estivale. L'équilibre entre l'offre et la demande nécessite dans certains cas des mesures relatives à l'irrigation, les agriculteurs étant les principaux consommateurs d'eau en période d'étiage.

En 2005, l'anticipation dès le mois de février de la réduction de la ressource a conduit à la mise en place d'assolements intégrant cette perspective et à une réduction des surfaces en maïs grain de 8% en moyenne nationale. Au plan national, il était attendu un rendement inférieur d'environ 10% pour le maïs irrigué. Sur l'ensemble des cultures irriguées, la sécheresse a pu entraîner des pertes allant jusqu'à 30 à 40% dans certains départements et 40 départements ont été reconnus éligibles aux calamités agricoles concernant les récoltes fourragères. »

I.2.2 L'adaptation dans le secteur agricole

La réflexion en cours sur l'adaptation de l'agriculture au changement climatique s'inscrit dans un cadre global, tenant compte de l'ensemble des exigences environnementales, telles que la préservation de la biodiversité, la qualité de l'eau, de l'air, des paysages. C'est dans cette perspective que s'organisent les travaux du groupe « Agriculture face au changement climatique à l'horizon 2020-2030 ; Adaptation » mis en place depuis novembre 2007 au sein du Ministère de l'alimentation, de l'agriculture et de la pêche, en concertation avec des instituts de recherche et les organismes professionnels agricoles

⁶ INRA, 2006

(OPA). Dans la même optique, le plan « Objectif Terres 2020 : pour un nouveau modèle agricole français » formalise l'état des réflexions sur la réponse du secteur agricole aux défis environnementaux des prochaines décennies. Le document, publié en février 2009, identifie cinq défis majeurs que le secteur agricole doit relever pour valoriser les ressources naturelles et autant de voies pour repenser le modèle agricole français dans ce sens. Les défis sont les suivants :

- une meilleure utilisation d'une eau qui se raréfie ;
- la contribution à la restauration du bon état écologique de l'eau ;
- la contribution à la richesse de la biodiversité et des paysages ;
- la protection des sols agricoles ;
- une meilleure maîtrise de l'énergie pour lutter contre le changement climatique.

Le changement climatique est directement ou indirectement lié à chacun de ces enjeux et la problématique – qu'il s'agisse d'atténuation ou d'adaptation – doit être intégrée à l'ensemble des réponses du secteur agricole à ces nouveaux défis.

Depuis plusieurs années, le monde de la recherche se mobilise pour une meilleure compréhension des impacts du changement climatique sur l'agriculture et afin de préparer l'adaptation du secteur à ces évolutions. Les connaissances sur la réponse des cultures au climat, enrichies des données recueillies sur les sites expérimentaux, ont permis aux équipes de l'INRA de développer des modèles de culture et des outils de modélisation. Plus de détails sur les programmes de recherche en cours figurent en Annexe H.2.

Le projet CLIMATOR coordonné par l'INRA est particulièrement intéressant, notamment du fait de sa transversalité, de son actualité et du nombre de modèles de culture et outils de simulation utilisés. Ses résultats pourront très certainement alimenter les travaux futurs de quantification des impacts en France. Ce projet a pour but d'étudier le changement climatique sur les agrosystèmes et d'élaborer des outils et des références pour analyser la vulnérabilité des agrosystèmes face au changement climatique, à partir de l'utilisation d'un nombre important de modèles agronomiques et forestiers éprouvés (STICS, CERES, ...). L'adaptation des systèmes (cultures, prairies, vigne, forêts) et des pratiques (semis, irrigation, fertilisation, choix variétaux...) aux climats futurs y est en particulier étudiée. Réunissant 7 partenaires (dont Arvalis-Institut du végétal, Météo-France, CERFACS, Chambre d'Agriculture Poitou-Charentes, AgroParisTech, Supagro) de 2007 à 2010, il s'appuie sur 11 localisations et fera l'objet de la publication d'un Livre Vert qui devrait être disponible fin 2010, avec des fiches par filière et par grandes régions. Les études régionales issues du projet CLIMATOR pourraient d'ailleurs constituer une base de travail intéressante pour une prochaine phase d'évaluation des coûts de l'adaptation pour les différents acteurs. De même, dans une perspective transversale intégrant agriculture, écosystèmes anthropisés et milieux aquatiques, le projet ADAGE, atelier de réflexion prospective (ARP) coordonné par l'INRA, vise à identifier les recherches nécessaires pour adapter au changement climatique l'agriculture et les écosystèmes gérés par l'homme. Les recommandations issues de ce projet seront publiées en 2010.

En raison notamment du grand nombre de productions ayant chacune leur problématique propre, l'adaptation à long terme au changement climatique est une question particulièrement complexe. La mise en œuvre à grande échelle de certaines options d'adaptation telles que l'implantation de nouvelles cultures ou l'adoption de nouvelles pratiques culturelles pose de nombreuses questions, notamment celle de leur acceptation par les agriculteurs ou encore des débouchés.

Certaines mesures d'adaptation pourraient impliquer une réorganisation des filières, voire une redistribution des cartes de production.

L'adaptation du secteur agricole suppose une diversification des productions et des systèmes, qui présente par ailleurs l'avantage d'offrir une meilleure protection des exploitants agricoles vis-à-vis des aléas climatiques. Néanmoins, elles soulèvent des questions d'ordre économique liées au marché et à l'organisation des filières. Il sera alors nécessaire d'accompagner efficacement les exploitants agricoles dans l'adaptation pérenne de leurs pratiques agricoles, pour qu'elles soient viables économiquement. Il est par ailleurs certains que la question de l'adaptation à la baisse de la ressource en eau est centrale pour l'agriculture (voir Encadré 1). En effet, 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 d'ici 2050 pour un territoire, qui est déjà pour l'essentiel en ZRE⁷. Cette évaluation a été obtenue en considérant les ressources en eau qui devraient être disponibles en 2050 avec les conditions agronomiques d'aujourd'hui. Pourtant, d'après les premières estimations obtenues via Climator, les besoins en eau des plantes futurs devraient se modifier. Les calculs devront donc être ajustés en conséquence, dès que l'on disposera d'éléments plus précis, pour mieux approcher la quantité d'eau nécessaire.

La réflexion sur l'adaptation de l'agriculture au changement climatique implique ainsi un raisonnement au-delà du champ purement agricole, intégrant l'ensemble des problématiques mentionnées plus haut (filière, acceptabilité, débouchés...).

I.3 Cadre de l'analyse : les cultures retenues pour la quantification

I.3.1 Eléments de définition : produit, culture, filière

« L'analyse économique par filière, c'est l'analyse de l'organisation, à la fois sur un plan linéaire et complémentaire, du système économique d'un produit ou d'un groupe de produits. C'est l'analyse de la succession d'actions menées par des acteurs pour produire, transformer, vendre et consommer un produit »⁸.

Dans ce travail, nous quantifions l'impact du changement climatique sur les cultures et donc sur la production du produit brut : le blé et le maïs, le raisin, l'herbe. Si le rendement de la production brute est un élément incontournable de l'analyse économique de la filière, des travaux ultérieurs seront nécessaires pour qualifier et quantifier les impacts du changement climatique sur les filières dans leur ensemble (intégrant la transformation, la vente et la consommation du produit).

I.3.2 Cultures retenues pour l'étude

Trois cultures ont été retenues dans le cadre de notre étude, choisies tant pour des questions de représentativité que de disponibilité des données pour une évaluation.

I.3.2.1 Les grandes cultures (blé et maïs)

Les productions de blé et de maïs constituent un grand enjeu économique et leur surface cultivée en France n'a cessé d'augmenter depuis les années 1970⁹, jusqu'en 1984 pour le blé tendre et plus récemment pour le maïs (la surface de blé tendre atteint plus de 5

⁷ Le lecteur est invité à se reporter au rapport du groupe Eau pour plus d'information sur l'eau et l'agriculture.

⁸ Terpend, 1997

⁹ AGRESTE CAHIERS N° 3 - JUILLET 2003

millions d'hectares en France en 2008 et les surfaces semées en maïs grain **1,55 million d'hectares**). Les augmentations les plus fortes concernent les régions Poitou-Charentes, Midi-Pyrénées, Pays de la Loire et Bretagne et seraient moins marquées en Aquitaine et en Alsace¹⁰. Si ces deux filières ont connu une augmentation de leurs rendements au long du XX^{ème} siècle, on observe un plafonnement des rendements depuis les années 1990, qui serait directement lié au facteur climat. Pour le blé tendre par exemple, l'augmentation des rendements est estimée en moyenne à 1,2 quintal/ha/an depuis le milieu du XX^{ème} siècle (1956 est la première année pour laquelle des données concernant l'ensemble des récoltes sont disponibles). La pente diminue progressivement depuis les années 1980 et de manière plus importante depuis le milieu des années 1990 pour aujourd'hui tendre vers 0 (absence de progression)¹¹.

I.3.2.2 La viticulture

La production viticole est un enjeu économique crucial en France : en 2007, parmi les 507 000 exploitations agricoles recensées en France, 95 000 ont des vignes et exploitent 835 805 hectares de vignoble¹² ; la valeur de la production (hors subventions) est estimée par l'INSEE pour 2007 à 9,5 milliards d'euros, soit 15% des 64,3 milliards d'euros de production agricole totale¹³. Cette culture est particulièrement vulnérable au changement climatique dans la mesure où les vins de qualité (Appellations d'origine contrôlée) répondent à des critères très précis directement liés aux terroirs, qui seront probablement amenés à évoluer.

I.3.2.3 Les prairies

L'impact du changement climatique sur les cultures fourragères devient une problématique majeure de la recherche agronomique : avec environ **13 millions d'hectares** en France en 2007 (10 toujours en herbe et 3 de prairies temporaires ou artificielles, Agreste - Statistique agricole annuelle), soit 45% de la surface agricole utile en France. Indispensable à l'alimentation du bétail et donc à la production de viande et de divers produits, mais aussi très importante pour son caractère d'occupation et d'entretien de nombreuses zones difficiles, les prairies deviennent un enjeu majeur de l'adaptation au changement climatique. La recherche a pour le moment surtout étudié la problématique « prairies - changement climatique » en analysant les opportunités de stockage du carbone dans les sols agricoles ; la séquestration étant une technique relevant de l'atténuation. Les chercheurs tentent aujourd'hui de démontrer les impacts que pourrait avoir une diminution des rendements dans les zones les plus sensibles. Le projet « Effets du changement climatique sur les systèmes d'élevage et les grandes cultures », financé par l'ACTA, montre les évolutions probables des productions et de leurs calendriers et tente de proposer des évolutions des systèmes d'élevage adaptées aux régions, donc aux systèmes en place.

I.3.3 Scénarios d'adaptation retenus

Le cadre méthodologique commun à l'ensemble des groupes thématiques composant le Groupe interministériel propose d'analyser deux types d'adaptation : l'adaptation spontanée et l'adaptation planifiée.

¹⁰ Agreste, mai 2008

¹¹ Perspectives agricoles N°355

¹² Agreste, Enquête structure 2007 et recensement agricole 2000 - même échantillon

¹³ Comptes nationaux de l'Agriculture

I.3.3.1 Adaptation spontanée

Dans le cadre de notre analyse, on considèrera que relève de l'adaptation spontanée l'ensemble des mesures relativement peu coûteuses ou dont la mise en œuvre est déjà observée en réponse aux évolutions climatiques constatées, par exemple l'évolution des calendriers de semis ou encore les changements de variétés parmi celles déjà disponibles.

Notons que la faisabilité de certaines mesures d'adaptation spontanée intégrées aux évaluations n'est pas vérifiée. C'est le cas notamment pour celles qui reposent sur l'utilisation de la ressource en eau, dont on craint une baisse de disponibilité liée au changement climatique.

I.3.3.2 Adaptation planifiée

On considère que relèvent de l'adaptation planifiée des mesures telles que les investissements dans la recherche génétique ou encore l'implantation de cultures pour lesquelles les filières sont actuellement peu structurées ou dont les bénéfices à court terme ne justifiaient pas leur choix.

Notons que, compte tenu du manque de données disponibles et du temps imparti, l'évaluation quantifiée des bénéfices de ces deux types d'adaptation n'a pas pu être réalisée pour chacune des filières étudiées. De même, le coût de mise en œuvre des mesures d'adaptation considérées n'a pas fait l'objet d'une évaluation à ce stade.

I.3.4 Méthode

Le travail d'évaluation s'est fondé sur une analyse bibliographique¹⁴, complétée par des entretiens avec des experts de chaque filière. Une grille d'entretien¹⁵ type a permis de conduire ces interviews. Les questions ont porté sur les impacts observés dans la région, les principaux impacts attendus - dans l'état actuel de la science -, les travaux (études et modèles) existants en France et/ou dans la région étudiée permettant de qualifier et de quantifier l'impact physique des changements climatiques, les mesures d'adaptation observées ainsi que celles jugées nécessaires dès aujourd'hui et à l'avenir ; et enfin les besoins de recherche et les manques de connaissances, besoins de suivi et d'observation identifiés.

La méthode générale de quantification est la suivante :

- Dans une première étape, l'évolution des rendements est estimée, à partir de la littérature ou à dire d'experts. Selon les filières, ces estimations ont résulté de l'utilisation de modèles de croissance des plantes (grandes cultures, viticulture) ou de raisonnement à partir d'analogues climatiques¹⁶ (prairies), en tenant compte de l'adaptation.
- Dans une seconde étape, ces résultats sont traduits en termes monétaires, à partir de données de prix actuels (conformément à l'hypothèse d'économie constante)¹⁷.

¹⁴ Bibliographie présentée en Annexe B.2.5

¹⁵ Voir Grille d'entretien en Annexe H.5

¹⁶ Voir les parties I.4.3, I.5.3 et I.6.3 pour une présentation détaillée des méthodes utilisées respectivement pour les grandes cultures, la viticulture et les prairies.

¹⁷ La quantification monétaire n'a pas été réalisée pour la viticulture pour des raisons exposées en partie I.5.3.6

I.3.5 Analyse des limites et incertitudes

Le travail de quantification présenté dans ce rapport comporte un certain nombre de limites. Celles-ci tiennent aux hypothèses posées dans le cadre de cet exercice, mais également aux incertitudes quant aux évolutions climatiques et à la réponse des productions agricoles à ces évolutions. Ces incertitudes affectent non seulement les valeurs, mais aussi le sens de variation des résultats (augmentation ou diminution) en interaction en particulier avec la variabilité régionale des impacts du changement climatique.

De manière générale, étant donné ces limites et incertitudes, les résultats présentés dans ce rapport doivent être considérés uniquement comme des **ordres de grandeur**.

I.3.5.1 Une cascade d'incertitudes

En cohérence avec les choix méthodologiques du Groupe interministériel, nous privilégions ici les scénarios socioéconomiques A2 (continuité des tendances actuelles) et B2 (scénario plus optimiste) du GIEC (Troisième rapport datant de 2001). Or d'après les récentes conclusions du Congrès International sur le Changement Climatique organisé à Copenhague par l'IARU en mars 2009¹⁸, il semblerait que nous nous dirigeons vers les scénarios les plus pessimistes du GIEC, voire au-delà. Les conclusions de ce travail doivent donc être interprétées à la lumière de ces dernières informations : elles ne valent que pour les scénarios considérés.

A l'incertitude quant aux scénarios d'émission de gaz à effet de serre s'ajoutent celles sur les modèles climatiques et les méthodes de descente d'échelle. Si le changement climatique est relativement bien appréhendé, le haut niveau d'incertitude des résultats ne doit cependant pas être oublié, comme en témoignent les différences notables de résultats entre les modèles climatiques. De manière générale, c'est sur les précipitations et la représentation de la variabilité que l'incertitude est la plus forte. Or la plupart des travaux indiquent que les variabilités inter saisonnière ou interannuelle ont probablement un impact fort sur le secteur agricole ; ainsi, le fait de voir se modifier les probabilités associées aux températures très basses ou très fortes, à moyenne relativement inchangée, peut influencer durablement les décisions de production ou d'investissement des agriculteurs ou éleveurs¹⁹.

Au-delà de l'incertitude sur les évolutions climatiques, la réponse des cultures à ces changements reste incertaine et ce, quelle que soit la méthode d'estimation ou de modélisation. A titre d'exemple, si les modèles de croissance de plantes permettent d'intégrer à l'analyse un nombre croissant de paramètres, ils représentent une vision relativement simplifiée de la réalité : ils ne reproduisent notamment pas à ce jour l'impact du changement climatique sur les bio-agresseurs (insectes, maladies) et ses répercussions sur les rendements agricoles.

Il est impératif de garder ces éléments à l'esprit lors de la lecture des résultats de l'exercice de quantification.

¹⁸ IARU (International Alliance of Research Universities), 2009

¹⁹ D4E / ONERC, 2008

I.3.5.2 Les limites d'un scénario à économie constante

En cohérence avec les choix méthodologiques du Groupe interministériel²⁰, l'évaluation est réalisée à économie constante. Si ce choix permet d'isoler les impacts du changement climatique des évolutions autres, dans le secteur agricole comme pour l'ensemble des secteurs étudiés dans le cadre des travaux du groupe, cette hypothèse comporte des limites significatives. On peut en effet penser que les modifications profondes ou à court terme concernant les politiques agricoles ou environnementales (réforme de la PAC, évolution des AOC, directive-cadre sur l'eau, etc.) et les évolutions de la demande mondiale auront un impact important sur le secteur agricole français en termes de spécialisation ou de diversification des productions et d'allocation des surfaces utiles²¹. De plus, cette hypothèse ne permet pas de considérer l'évolution des prix ou des comportements des consommateurs face au changement climatique. Enfin, ces résultats sont à assolement et système cultural constants, les évolutions nécessaires des systèmes de culture n'étant donc pas considérées. A ce stade, l'étude reste théorique, mais permet notamment de faire un premier état des lieux des possibilités de chiffrage des coûts des impacts du changement climatique pour le secteur agricole.

I.3.5.3 Une évaluation partielle

L'évaluation présentée dans cette étude est une évaluation partielle, tant en termes de périmètres choisis (géographique, cultures), que d'impacts et de mesures d'adaptation considérés. Dans cette première étape d'évaluation de coûts, les hypothèses sont volontairement simplificatrices et le nombre de paramètres étudiés restreint.

Les régions étudiées ont été choisies notamment en fonction de la disponibilité des données et ne sont pas nécessairement représentatives de la France. Même au sein d'une région étudiée, les résultats valent pour un certain contexte pédoclimatique choisi et ne sont pas forcément extrapolables au reste de la région.

Les cultures étudiées ne sont pas exhaustives, de même que les impacts du changement climatique considérés. A titre d'exemple, si l'évaluation des impacts du changement climatique sur les prairies permet de cerner les effets intermédiaires sur l'élevage du fait des modifications de la disponibilité de fourrage et de pâturages, les effets finaux sur la productivité animale n'ont pas été estimés. S'agissant des grandes cultures ou la viticulture, si on a étudié l'impact de l'évolution des températures sur le rendement, l'impact des ravageurs n'est pas pris en compte. Par ailleurs, certains risques tels que gel précoce, orages violents ou encore tempêtes ne sont pas intégrés à l'analyse, car l'influence du changement climatique sur ces phénomènes n'est pas encore bien connue. Enfin, pour les trois cultures étudiées, l'impact du changement climatique sur la qualité des produits n'est pas évalué.

Notons finalement que la **contrainte de la disponibilité en eau** n'est pas suffisamment intégrée à ce stade. Or des modifications majeures sont à attendre, notamment au niveau des systèmes culturaux privilégiant des cultures économes en eau. Des investissements importants (recherche, révision au niveau des filières, etc.) seront donc à envisager, mais il n'a pas été possible de les chiffrer à ce jour. Une meilleure prise en compte de ces aspects sera nécessaire dans les étapes ultérieures de ces travaux. **La thématique des impacts du changement climatique sur la ressource en eau et les conséquences pour l'agriculture est abordée de manière plus détaillée dans le rapport du groupe Eau.**

²⁰ Pour plus de précisions, se reporter au rapport de la première phase du Groupe interministériel (D4E / ONERC, 2008)

²¹ D4E / ONERC, 2008

I.3.5.4 En attendant la deuxième génération d'études sur les impacts...

Aussi bien en termes de modèles climatiques (résolution, variabilité, extrêmes) que d'analyse de l'incertitude, la deuxième génération d'études sur les impacts, que représentent par exemple les projets CLIMATOR et ACTA²², devrait permettre de proposer des estimations prenant mieux en compte certaines contraintes comme celle liée à la disponibilité en eau (voir rapport du groupe Eau). En effet, les simulations STICS utilisées dans ce cadre considèrent le double effet CO₂ : hausse de l'efficacité de la photosynthèse et diminution de la conductance stomatique (qui a pour effet de réduire la transpiration et donc d'économiser l'eau). Les premiers résultats du projet CLIMATOR soulignent par ailleurs l'importance de l'interaction climat / stress hydrique ; effet qui n'est certainement pas suffisamment retranscrit ici.

I.4 Analyses détaillée sur les grandes cultures

De manière générale, l'évolution climatique attendue aurait des effets contrastés, mais globalement modérés sur le rendement des grandes cultures blé et maïs : 10 à 20% de différence, à la hausse ou à la baisse, dans l'hypothèse d'une augmentation de 2 à 3°C. Au-delà de 4°C environ, les rendements seraient affectés dans tous les cas, notamment à cause du raccourcissement du cycle qui induit une durée moins longue du fonctionnement photosynthétique²³. L'impact du stress hydrique, en nette accentuation dans les scénarios récents²⁴, aurait tendance à limiter l'effet bénéfique de la fertilisation carbonée atmosphérique de la fin du siècle.

Experts consultés

- Nadine Brisson, Unité Agroclimatique INRA, Avignon
- Patrice Dumas, Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement
- Philippe Gate, Arvalis-Institut du végétal
- Jean-Paul Renoux, Arvalis-Institut du végétal
- Bernard Seguin, coordinateur de la Mission Changement climatique et effet de serre, Unité Agroclimatique INRA, Avignon

I.4.1 Etat de connaissance des impacts sur la culture

I.4.1.1 Les impacts observés

Les principaux facteurs climatiques influençant les grandes cultures sont l'augmentation des températures (action continue sur la durée du cycle et ponctuelle en fin de cycle provoquant l'échaudage), la hausse des concentrations en CO₂ de l'atmosphère, ainsi que les conditions limitantes d'alimentation en eau²⁵. Depuis le milieu des années 1990, les impacts du changement climatique sur les grandes cultures sont visibles : on observe

²² Projet 06/09 : Etude de la sensibilité des systèmes de grandes cultures et d'élevages herbivores aux changements climatiques

²³ Seguin, réunion groupe PV, 2008

²⁴ GIEC, 2007

²⁵ Seguin, réunion groupe PV, 2008).

une accélération du cycle des plantes directement liée à l'augmentation des températures moyennes. Les impacts sont toutefois différenciés selon les cultures : à mode cultural équivalent, les rendements de maïs augmentent, tandis que ceux du blé plafonnent, en raison de la sensibilité différente du blé à l'échaudage (à partir de 25°C de température maximale) et de la détérioration de son confort hydrique, puisque généralement non irrigué, contrairement au maïs. L'impact varie également selon la zone géographique : pour le maïs, si les hausses de rendement sont importantes dans le Nord de la France (augmentation de la photosynthèse et pluviométrie suffisante), le rendement du Sud progresse beaucoup plus lentement du fait d'étés plus secs et de restrictions d'irrigation²⁶.

On observe un déplacement géographique de la culture de maïs depuis une vingtaine d'années à l'échelle de l'Europe : le Danemark a ainsi connu une explosion des surfaces cultivées en maïs²⁷. En France, l'aire de culture du maïs se déplace lentement vers le Nord-ouest. Par ailleurs, la migration d'insectes vers le nord constitue également un bon indicateur de l'impact du changement climatique sur les grandes cultures : alors qu'il y a vingt ans, la limite nord de l'aire de répartition de la pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis*) se situait au niveau d'Orléans, on constate aujourd'hui sa présence en Belgique²⁸.

1.4.1.2 Les impacts attendus d'ici la fin du XXI^{ème} siècle

Les travaux combinant études écophysiologicals sur l'influence du doublement du CO₂ et des analyses à partir des modèles de simulation (CERES, puis STICS développés à l'INRA²⁹) ont permis d'obtenir des ordres de grandeur des effets attendus sur le rendement du blé et maïs pour des situations climatiques variées. L'hypothèse d'un doublement de la concentration en CO₂ pour la fin de ce siècle conduirait à une stimulation de la photosynthèse (de l'ordre de 30% pour les plantes en C3 et 15% pour les plantes en C4³⁰) et donc une augmentation de la production potentielle de biomasse (conditionnée toutefois par les autres facteurs limitants potentiels³¹)³². Une application du

²⁶ Communication J.-P. Renoux

²⁷ De 43 000ha en 1997 à plus de 120 000ha en 2008 (source Gil Rivière-Wekstein revue Agriculture & Environnement, n°58, avril 2008)

²⁸ Communication J.-P. Renoux

²⁹ Brisson, 1998

³⁰ C3 et C4 : Il y a deux principales voies métaboliques d'assimilation du gaz carbonique atmosphérique par les végétaux. Cette synthèse peut se dérouler selon plusieurs mécanismes caractérisés par le nombre d'atomes de carbone de l'intermédiaire métabolique. Ainsi, on est amené à différencier la voie passant par l'intermédiaire à 3 atomes de carbone, notée C3, de celle faisant intervenir un intermédiaire à 4 atomes de carbone et qui sera notée C4. On parle alors de plante en C3 (céréales à paille, colza, tournesol, soja...) ou de plante en C4 (sorgho, canne à sucre ou maïs). L'appareil photosynthétique des plantes en C4, d'origine tropicale, est plus complexe que celui des plantes en C3. Chez les plantes en C4, la fixation initiale de gaz carbonique à la lumière entraîne la formation d'acides à quatre carbones sous l'épiderme des feuilles (cycle C4). Cette « réserve » de carbone permet ensuite la synthèse continue d'acides à trois carbones, puis de sucres, dans les tissus foliaires plus profonds entourant les vaisseaux (cycle C3). Les plantes en C3 fabriquent directement des acides à trois carbones et des sucres à partir du gaz carbonique de l'air (cycle C3 uniquement). Les plantes en C4 sont capables de photosynthétiser à des teneurs atmosphériques en CO₂ plus faibles que les plantes en C3, mais répondent plus mal à une augmentation de la teneur en CO₂.

³¹ Par exemple la nutrition en azote et l'aptitude de la plante à valoriser en « rendement utile » cette augmentation : la production primaire peut en effet être augmentée sans que le rendement ne le soit, faute d'augmentation des nombres de grains (Ruguet *et al.*, 1996).

modèle est présentée par Galko (2007), qui propose une estimation de l'évolution des rendements de blé tendre et de maïs, puis une traduction en termes de marge brute des agriculteurs via le modèle économique AROPAj, selon le scénario B2. L'étude conclut en un effet positif du changement climatique, lorsque l'on tient compte de l'effet fertilisant du CO₂ (+9% de marge brute) pour une année « moyenne » ; négatif si cet effet est exclu (-2%). L'effet fertilisant du CO₂ apparaît donc être un facteur déterminant. Pour une année « sèche », l'analyse fait état d'une réduction de la marge brute des agriculteurs de l'ordre de -1 à -5% selon la prise en compte de l'effet CO₂.

La tendance claire à l'accentuation des problèmes de sécheresse viendrait ainsi atténuer les effets positifs du changement climatique sur la photosynthèse, remettant en cause notamment la viabilité des cultures dépendant fortement de l'irrigation. Les bilans des sécheresses de 1976 et de 2003 nous donnent des éléments sur la vulnérabilité des cultures. Ainsi, on a observé en France pour le blé une perte de rendement de 10 à 30% selon les régions, de 10 à 55% sur le maïs (dépendant notamment de l'irrigation), de 5 à 20% sur le tournesol (en 2003) et de 14 à 37% sur le sorgho³³.

Enfin, une émergence et un changement de cartographie des maladies virales, bactériennes ou parasitaires seraient à envisager.

I.4.2 L'adaptation

Adapter les pratiques agricoles permettrait, en particulier pour les cultures annuelles, de tirer parti du changement climatique : grâce aux diverses mesures d'adaptation spontanée, les rendements du maïs continuent d'ailleurs de progresser notamment dans le Sud de la France, sur un rythme un peu plus faible ces quinze dernières années³⁴.

I.4.2.1 L'adaptation spontanée

L'agriculteur peut prendre en compte les effets du changement climatique dans ses décisions stratégiques (choix de systèmes de cultures, adéquation culture/sol, politique de conduite) ou tactiques (semis, choix variétaux, irrigation, fertilisation, gestion de l'interculture)³⁵. Des adaptations ont déjà été opérées par les agriculteurs comme l'avancée des dates de semis des cultures d'été³⁶ ou encore le choix de variétés à cycle plus court, qui constitue une esquivé à la fois aux insectes ravageurs et au besoin accru d'irrigation.

Adapter les modes d'utilisation de l'eau d'irrigation est l'une des pistes majeures à envisager.

³² Seguin, 2007

³³ INRA, 2006

³⁴ Communication J.P. Renoux

³⁵ Brisson et Caubel, 2008

³⁶ Brisson et Caubel, 2008

Encadré 2 - Impacts des sécheresses de 2003 et 2005 sur le Sud-ouest de la France : vers une irrigation localisée

De 2003 à 2006, les besoins en eau d'irrigation des cultures de maïs ont été de 30% supérieurs à la moyenne de la décennie précédente (Agreste Primeur, n°194, mars 2007). La stratégie des producteurs de maïs en France, face à la baisse de la pluviométrie et aux restrictions d'irrigation (notamment dans le Sud Ouest qui a connu d'importantes sécheresses estivales ces dernières années), consiste à augmenter les doses d'eau, mais sur des surfaces irriguées réduites. On observe en effet que les superficies de maïs irrigué ont fortement diminué, notamment lors des étés secs 2003 et 2005 (-13% entre 2003 et 2005, dont la plupart dans le Sud-ouest de la France : 26% en Poitou-Charentes, 12% en Midi-Pyrénées et 10% en Aquitaine). Dans le même temps, les apports en eau à l'hectare ont progressé, pour compenser les déficits de précipitations, en moyenne de 2 400m³ d'apport en eau par hectare en 2003 et à 2 700m³ à l'hectare en 2005 (en 2005, la zone d'impact de la sécheresse était concentrée en Aquitaine, où les besoins en eau sont toujours élevés) (Agreste Primeur, n°194, mars 2007).

Une possibilité identifiée serait d'irriguer plus de cultures en limitant cette pratique aux stades sensibles (parmi lesquels la levée)³⁷ ou encore remplacer, lorsque cela s'avère possible, des cultures fortement consommatrices en eau par des cultures plus adaptées à la disponibilité de la ressource : des systèmes de culture avec des légumineuses pourraient par exemple être envisagés pour l'alimentation animale, à la place du maïs ensilage³⁸.

1.4.2.2 L'adaptation planifiée

Des investissements massifs sont d'ores et déjà consacrés à la recherche génétique permettant la récupération de la plante après un stress climatique (notamment pour le maïs)³⁹, ainsi que la résilience face aux insectes ravageurs du maïs.

La diversification des systèmes de culture est nécessaire, permettant de combiner « esquivage », « évitement » (stratégies dites « conservatrices », visant à limiter les risques de perte de rendement en échange d'une diminution du rendement potentiel) et « tolérance » (consistant à choisir des espèces intrinsèquement tolérantes à la sécheresse comme par exemple le tournesol et le sorgho ; avec un potentiel de rendement maximal les années favorables, mais un risque augmenté de perte totale de rendement)⁴⁰. L'augmentation de la durée de végétation pourrait rendre possible la succession de cultures été-hiver là où jusqu'ici, seules des monocultures étaient possibles⁴¹. La réflexion sur la pertinence de l'implantation de nouvelles cultures, comme le sorgho qui conviendrait particulièrement aux nouvelles conditions climatiques à la fois s'agissant de la digestibilité animale, de résistance à la sécheresse ainsi qu'au plan thermique, est également à l'ordre du jour⁴².

³⁷ Amigues *et al.*, 2006, in: Brisson et Caubel, 2008

³⁸ Réunion transversale, 2008

³⁹ Communication J.P. Renoux

⁴⁰ INRA, 2006

⁴¹ Brisson et Caubel, 2008

⁴² Réunion groupe PV, 2008

I.4.3 Evaluation quantifiée de l'impact du changement climatique et de l'adaptation sur les grandes cultures

Nous proposons ci-après une évaluation du coût des impacts du changement climatique pour le maïs et le blé.

I.4.3.1 Périmètre de l'évaluation

L'évaluation porte sur les cultures de blé et de maïs en France métropolitaine. Les horizons étudiés sont 2030, 2050 et 2100.

I.4.3.2 Scénarios et hypothèses climatiques

On se base ici sur les scénarios A2 et B2 du GIEC. Le niveau de concentration en CO₂ correspondant à ces scénarios constitue la principale donnée d'entrée pour les calculs présentés plus bas. Le tableau suivant présente ces données, ainsi que les écarts de températures par rapport à la période de référence obtenus par le modèle Arpège-Climat de Météo-France pour les différents scénarios et horizons considérés.

Tableau 1 – Ecart de températures en France et niveaux de concentration en CO₂ atmosphérique correspondant aux scénarios A2 et B2, Arpège-Climat et Modèle ISAM⁴³ (Dequé et GIEC⁴⁴)

Scénario	Paramètre	2030	2050	2100
A2	Températures (°C)	0,83	1,37	3,23
	Concentration CO ₂ (ppm)	451	532	856
B2	Températures (°C)	1,09	0,99	2,22
	Concentration CO ₂ (ppm)	429	478	621

I.4.3.3 Présentation de la méthodologie

Etapes de l'analyse

La méthode de quantification des coûts comporte deux étapes principales :

- La première consiste en l'estimation de fourchettes d'évolution de rendement des productions de blé et de maïs, aux différents horizons considérés par rapport à la période de référence 1951-1980. Ces fourchettes sont estimées à partir de résultats issus d'une étude de Rosenzweig et Iglesias⁴⁵. Ils portent sur l'Europe ;
- Dans un second temps, les évolutions de rendements obtenues sont traduites en termes d'évolution du volume de production, puis de coûts (ou gains) monétaires à partir de données sur les prix de vente des biens agricoles (impact sur le chiffre d'affaire des agriculteurs).

Hypothèses principales

Conformément aux choix méthodologiques adoptés par le Groupe interministériel, cette analyse est réalisée à économie constante. L'évaluation est donc réalisée à conditions technologiques constantes, à prix constant et à surface cultivée constante (assolement constant). Par ailleurs, l'évolution de l'occupation des sols n'est pas prise en compte. Si

⁴³ Une présentation des modèles de cycle du carbone est proposée en Annexe H.3

⁴⁴ (<http://www.ipcc-data.org/ancillary/tar-isam.txt>)

⁴⁵ Rosenzweig et Iglesias, « Potential Impacts of Climate Change on World Food Supply ».

cette hypothèse permet d'isoler les effets du changement climatique, elle comporte de nombreuses limites qu'il convient de garder à l'esprit dans l'interprétation des résultats.

Les données d'évolution de rendement utilisées dans cette analyse correspondent à des données agrégées sur la région Europe. On supposera qu'elles sont représentatives de la France.

Les mesures d'adaptation considérées dans cette évaluation relèvent de l'adaptation spontanée. Elles concernent :

- La modification de la date de semis (+/- un mois) ;
- L'augmentation des apports en eau ponctuels pour les cultures déjà irriguées ;
- Les changements de variété, pour utiliser des variétés déjà disponibles mieux adaptées au climat futur.

Analyse des limites et de l'incertitude

Incertaineté quant aux scénarios climatiques : L'incertitude sur les évolutions climatiques, notamment aux horizons lointains – et sur les résultats des simulations doit être prise en compte lors de l'interprétation des résultats. La variabilité climatique, particulièrement la multiplication des épisodes de sécheresses n'est pas intégrée dans l'analyse de Rosenzweig et Iglesias.

Economie constante : L'hypothèse d'économie constante comporte des limites importantes qu'il convient de souligner. On considère ainsi que les prix des productions restent stables et que les surfaces cultivées restent constantes. De la même manière, cette hypothèse ne permet pas la prise en compte de la contribution des grandes cultures aux nouveaux débouchés (biocarburants, biomatériaux, biomasse) ou encore les réformes de la PAC susceptibles d'avoir des impacts significatifs sur l'évolution des productions.

Echelle des données : Comme indiqué précédemment, les données d'évolution du rendement utilisées dans cet exercice sont des données agrégées sur la zone Europe, masquant des différences régionales potentiellement significatives.

Incertaineté sur les simulations : Ces données résultent de l'utilisation de différents modèles de croissance des plantes. Si la précision de ces modèles est relativement importante, ceux-ci comportent des limites notables. Certains paramètres tels que l'impact des bio-agresseurs ne sont pas considérés. Par ailleurs, le nombre limité de sites de modélisation ne permet pas de représenter la variabilité des zones agricoles à l'intérieur des régions (). Notons de nouveau qu'il s'agit d'une étude relativement ancienne : si les résultats sont mis à jour régulièrement et présentent un intérêt en termes de tendances, des travaux de modélisation sont en cours (CLIMATOR, ACTA), qui devront être pris en compte dans les travaux ultérieurs.

Options d'adaptation : Les options d'adaptation proposées dans cette étude restent majoritairement théoriques : par exemple, le potentiel de substitution des variétés n'est pas vérifié sur tous les sites. Par ailleurs, lorsque l'adaptation implique un apport en eau accru, les problèmes de disponibilité de l'eau n'ont pas été considérés, ce qui constitue une limite majeure aux résultats obtenus. De même, l'acceptabilité de certaines mesures, ainsi que les possibilités techniques de leur mise en œuvre ne sont pas spécifiquement traitées⁴⁶.

⁴⁶ Rosenzweig et Iglesias, 1996

Enfin, nous ne considérons pas dans cette étude les coûts de mise en œuvre des mesures d'adaptation.

I.4.3.4 Etape 1 : Evaluation de l'impact physique du changement climatique

Les données d'entrée

Les données sur lesquelles se fonde l'estimation des évolutions de rendement du blé et du maïs aux horizons 2030, 2050 et 2100 ont été compilées par Rosenzweig et Iglesias, dans le cadre d'une vaste étude financée par l'EPA⁴⁷, débutée en 1990 et dont les résultats sont mis à jour régulièrement⁴⁸. L'étude ne reflète pas forcément pour autant l'état des dernières connaissances sur le domaine : de nouveaux scénarios climatiques ont depuis été élaborés et de nombreux programmes de recherche sont aujourd'hui en cours, qui sont susceptibles de remettre en cause les résultats présentés ici.

Les modèles de croissance des plantes utilisés

Les modèles de croissance des plantes utilisés dans le cadre de l'étude de Rosenzweig et Iglesias sont les modèles CERES-Wheat et CERES-Maize, développés dans l'IBSNAT. Ces modèles permettent une prise en compte de l'effet fertilisant du CO₂.

Les simulations ont été réalisées sur 112 sites répartis sur 18 pays et les résultats ont ensuite été agrégés par région. Les données reprises ici concernent la zone Europe.

Notons que les résultats de simulations sont extrêmement dépendants du site et du contexte pédo-climatique : les résultats ci-dessous ne peuvent être considérés que comme des **TENDANCES** à l'échelle de la France.

Les données climatiques

Les données climatiques paramétrant les modèles de croissance résultent de deux types de scénarios : des scénarios de stabilisation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère (à 550 et 770 ppm) avec des résultats dérivés des modèles climatiques développés par le GISS, UKMO et GFDL ; et des scénarios « transitoires » (IS95A), issus du Troisième rapport du GIEC, dont les résultats en termes de climat sont dérivés du modèle climatique HadCM3⁴⁹. Les évolutions de rendements sont calculées par rapport à la période de référence 1951-1980.

Résultats pour le blé

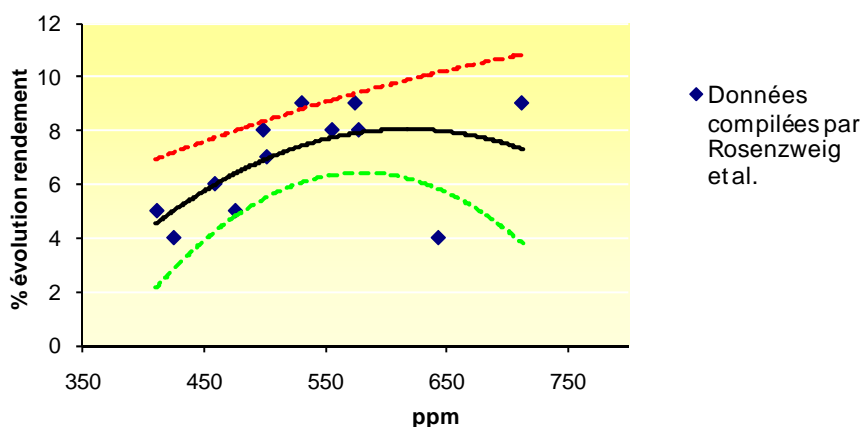
La courbe noire présentée dans la Figure 1 présente les niveaux d'évolution du rendement du blé en fonction des niveaux de concentration de CO₂ dans l'atmosphère par rapport à la période de référence 1951-1980, tels qu'obtenus dans l'étude de Rosenzweig et Iglesias. Les courbes en vert et rouge représentent respectivement les bornes basse et haute de l'intervalle de confiance 95%⁵⁰.

⁴⁷ Données disponibles en ligne : http://sedac.ciesin.columbia.edu/giss_crop_study/index.html

⁴⁸ voir notamment Parry *et al.*, 2005

⁴⁹ Voir Annexe H.4

⁵⁰ Régression polynomiale de degré 2 et intervalle de confiance estimés à l'aide du logiciel « R »



Source des données : Rosenzweig et Iglesias

Figure 1 – Evolution du rendement du blé (% d'évolution par rapport à la période de référence 1951-1980)

En remplaçant dans la courbe « Blé » le niveau de concentration en CO₂ par ceux que l'on observe pour les scénarios A2 et B2 aux trois horizons considérés, on obtient une estimation – **en ordre de grandeur** – de l'évolution du rendement de la production. Les estimations ainsi obtenues de même que les bornes basses et hautes correspondant à l'intervalle de confiance 95% sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2 – Evolutions de rendements du blé en 2030, 2050 et 2100 (% d'évolution, par rapport à la période de référence 1951-80)

Scénario	2030			2050			2100		
	Basse	Estim.	Haute	Basse	Estim.	Haute	Basse	Estim.	Haute
A2	4,1	5,8	7,4	5,9	7,4	9,0	-1,2	3,4	12,9
B2	3,0	5,1	7,2	5,1	6,4	7,8	6,2	8,0	9,8

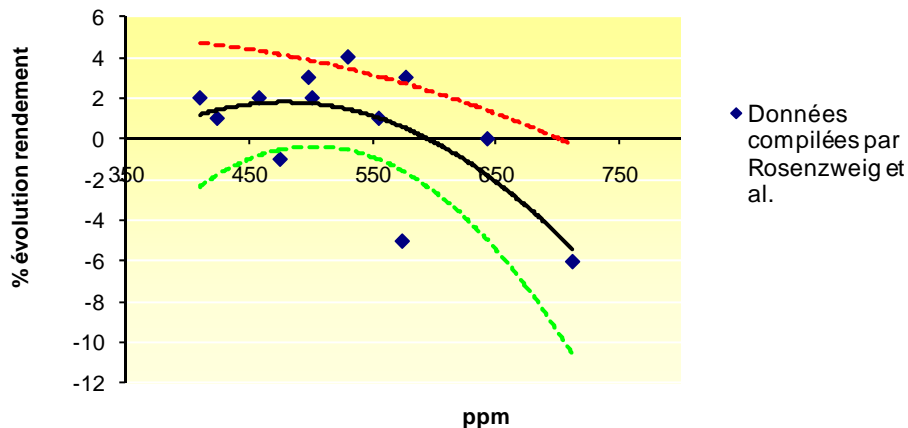
D'après cette analyse, l'augmentation des rendements est nette, jusqu'à un certain seuil (autour de 650 ppm) qui serait atteint entre 2050 et 2100 pour le scénario A2. Au-delà, la courbe d'évolution s'inverse, si bien qu'en 2100 selon le scénario A2, la borne basse de l'intervalle de confiance 95% correspond à une baisse de rendement de 1,2% par rapport à la période de référence (1951-1980). Dans le scénario B2, ce seuil n'est pas encore atteint en 2100.

Ces résultats sont à relativiser, car les extrêmes climatiques ainsi que le facteur limitant de l'eau ne sont pas explicitement considérés.

Résultats pour le maïs

Le même procédé est appliqué pour la filière maïs. La Figure 2 présente l'évolution du rendement du maïs en fonction du niveau de concentration en CO₂ dans l'atmosphère⁵¹.

⁵¹ Régression polynomiale de degré 2 et intervalle de confiance estimés à l'aide du logiciel « R »



Source des données : Rosenzweig et Iglesias

Figure 2 – Evolution du rendement du maïs (% d'évolution par rapport à la période de référence 1951-1980)

L'évolution du rendement du maïs est positive jusqu'à un seuil de concentration en CO₂ d'environ 475 ppm, puis décroît. Cet effet est probablement lié à une plus faible réponse aux effets physiologiques du CO₂ sur la croissance que pour le blé.

En remplaçant dans la courbe « Maïs » le niveau de concentration en CO₂ par ceux que l'on observe pour les scénarios A2 et B2 aux trois horizons considérés, on obtient une estimation – **en ordre de grandeur** – de l'évolution du rendement de la production.

Le Tableau 3 présente les estimations obtenues ainsi que les bornes correspondant à l'intervalle de confiance 95%.

Tableau 3 – Evolutions de rendements du maïs en 2030, 2050 et 2100 (% d'évolution, par rapport à la période de référence 1951-80)

Scénario	2030			2050			2100		
	Basse	Estim.	Haute	Basse	Estim.	Haute	Basse	Estim.	Haute
A2	-0,7	2,1	4,1	-0,8	0,5	3,6	-23,4	-6,0	3,5
B2	-1,6	2,5	4,5	-0,2	1,5	3,8	-3,7	-1,3	1,6

L'analyse réalisée conduit, pour le maïs, à des résultats tendant vers le positif jusqu'à 2050. Néanmoins, entre 2030 et 2050, une diminution des rendements s'amorce et on obtient des résultats tendant largement vers le négatif en 2100, quel que soit le scénario. On remarquera que les bornes de l'intervalle de confiance sont particulièrement larges pour le scénario A2, avec des résultats compris dans une fourchette de -23,4 à +3,5% de rendement.

Encadré 3 - Des résultats qui pourraient évoluer...

Les modèles de simulation climatiques et les modèles de croissance évoluent constamment. Ainsi, des recherches menées il y a deux ans peuvent s'avérer obsolètes aujourd'hui (Communication N. Brisson). Les résultats obtenus à partir de l'étude Rozensweig et Iglesias (intéressants en termes de tendances) découlent de travaux issus d'un consensus international. Ces travaux sont toutefois relativement anciens et n'ont pas été renouvelés sur la base des nouvelles connaissances (scénarios du GIEC, modèles). Les courbes de rendement construites à partir de ces nouvelles entrées climatiques pourraient être bien plus pessimistes.

En effet, les prévisions des tendances futures de précipitations ont évolué entre le troisième et le quatrième rapport du GIEC : les prévisions d'augmentation des précipitations en hiver devraient être moins optimistes (la baisse des précipitations pourrait concerner à la fois l'été et l'hiver, contrairement à ce que l'on prévoyait jusqu'à présent : baisse des précipitations limitée à l'été). Ainsi, la question de la disponibilité en eau pourrait remettre en cause le relatif optimisme de ces résultats, notamment pour le blé (pour lequel on constate d'ores et déjà un effet de plafonnement de rendement lié aux facteurs climatiques depuis le milieu des années 1990). En France, les premiers résultats du projet CLIMATOR montrent que l'interaction climat / stress hydrique est extrêmement importante.

L'étude ACTA fait état quant à elle de prévisions plus optimistes que celles de l'étude de Rosenzweig et Iglesias concernant l'évolution future de la production de maïs ensilage.

Sans modification des itinéraires techniques et en culture sèche, la tendance pour un sol à réserve utile assez élevée est à une hausse du rendement dans le futur proche (horizon 2030), hausse cependant assez modérée dans le Nord-Ouest. A plus long-terme (horizon 2080), on observerait des baisses sensibles de rendement dans le quart Nord-Ouest de la France, plus marquées dans le scénario A2 que dans le scénario B1. En culture irriguée, on retrouve à peu près le même schéma, mais avec des écarts géographiques et entre scénarios très atténués.

Il est intéressant de noter que l'adaptation des itinéraires techniques (en l'occurrence avec semis plus précoces de variétés plus tardives) sur la production de maïs ensilage s'avèrerait favorable, quel que soit le site retenu, avec pour les sites de la moitié Ouest une espérance de gain de rendement, là où sans adaptation, ceux-ci diminueraient. En condition de culture irriguée, cette adaptation s'avèrerait également profitable, avec là aussi un écrasement de la variabilité géographique et entre scénarios.

I.4.3.5 Etape 2 : Traduction en termes monétaires

Données d'entrée

Afin d'obtenir des résultats en termes de coûts monétaires, ces évolutions de rendements ont tout d'abord été traduites en évolution des volumes de production. Les données utilisées ici sont les moyennes sur 2001-2006 des volumes de maïs et de blé produits en France, soit respectivement 14 642 et 33 714 milliers de tonnes annuellement⁵².

Les prix de vente des produits agricoles sont ensuite utilisés, sur base d'une moyenne des prix pour les seules années disponibles (1995-2002), afin de tenir compte au mieux de la forte volatilité des prix. Les prix considérés dans cette analyse sont les suivants : 128,4€ la tonne pour le maïs ; 121,3€ la tonne pour le blé tendre.

⁵² source : INSEE

Résultats pour le blé

Tableau 4 – Estimation des coûts des impacts : Blé (k€)

Scénario	2030			2050			2100		
	Basse	Estim.	Haute	Basse	Estim.	Haute	Basse	Estim.	Haute
A2	46 953	65 622	84 214	67 544	84 562	101 834	-13 151	38 143	147 148
B2	34 542	58 368	82 182	57 909	73 293	88 862	70 114	91 285	111 063

Pour tous les scénarios et tous les horizons (à l'exception de l'horizon 2100 A2, pour lequel le signe est incertain), on observe un gain monétaire. En 2050, pour le scénario A2, celui-ci serait compris entre 67 et 102 millions d'euros ; et entre 57 et 89 millions d'euros sous B2.

Résultats pour le maïs

Tableau 5 - Estimation des coûts des impacts : Maïs (k€)

Scénario	2030			2050			2100		
	Basse	Estim.	Haute	Basse	Estim.	Haute	Basse	Estim.	Haute
A2	-13 610	39 107	76 640	-14 887	8 550	68 169	-438 989	-113 677	65 051
B2	-30 300	47 407	85 092	-3 760	28 922	71 215	-68 717	-25 024	30 468

Quel que soit le scénario climatique considéré, dans un intervalle de confiance de 95%, il est impossible d'identifier si le changement climatique représentera un coût ou un gain pour la filière maïs. On remarque néanmoins une évolution à la baisse dès 2030. Sous le scénario A2, le gain monétaire pour la filière en France se situerait entre -13 et +76 millions d'euros en 2030. Sous ce même scénario, les pertes monétaires pourraient atteindre plus de 113 millions d'euros en 2100 (la variation pouvant aller de -438 à +65 millions d'euros).

I.4.3.6 Eclairage complémentaire au regard des observations actuelles

Depuis le milieu des années 1990, on observe depuis le milieu des années 1990 un plafonnement des rendements des grandes cultures, touchant principalement le blé : le maïs serait relativement épargné.

Ce phénomène est vraisemblablement lié au facteur climatique et notamment :

- A un phénomène d'échaudage particulièrement important pour le blé ;
- Au stress hydrique de plus en plus marqué qui pénalise le blé, moins irrigué que le maïs.

Ces observations semblent contredire les résultats obtenus dans le cadre de l'étude de Rosenzweig et Iglesias. Rappelons que cette étude permet une prise en compte de l'effet fertilisant du CO₂. Comme indiqué précédemment, le blé, plante en C3, est plus réceptive à cet effet que le maïs, plante en C4. Dans les conditions particulières de la modélisation, cet effet CO₂ supprime l'effet échaudage.

Ces éléments soulignent bien le caractère complexe des répercussions du changement climatique sur les rendements et rappelle une fois de plus que **les résultats présentés ici doivent être interprétés avec une extrême précaution**. Les recherches en cours devraient permettre d'apporter des éclairages nouveaux sur les impacts du changement climatique sur les grandes cultures.

Pour aller plus loin...

Dans des étapes ultérieures, on pourrait évaluer le coût des différents moyens de la lutte contre les insectes ravageurs, du séchage, de l'irrigation ou encore du changement de cultures pour les différents acteurs.

Une meilleure prise en compte de la baisse de disponibilité de la ressource en eau sera par ailleurs nécessaire dans les mises à jour de ce travail.

I.4.3.7 Mise en perspective : le coût d'une canicule de type 2003

Comme indiqué précédemment, l'analyse quantifiée réalisée dans le cadre de cet exercice ne prend pas en compte les impacts des épisodes de sécheresse et de canicules sur la production agricole. Or ceux-ci sont significatifs et remettront en cause les résultats relativement optimistes présentés ici.

Si la canicule de 2003 ne peut *a priori* être imputée au changement climatique, elle donne des indications intéressantes sur la réaction des systèmes à ce type d'épisodes, dont la fréquence devrait s'accroître au long du XXI^{ème} siècle.

En France, la canicule de 2003 s'est traduite par des pertes de rendement de l'ordre de -16% pour le blé et de -20% pour le maïs grain, en comparaison à une année « normale » (l'année 2002)⁵³.

En reprenant les données de volumes et de prix « moyens » utilisées pour l'analyse précédente, on aboutit, pour un événement de ce type, à un coût de l'ordre de -654 millions d'€ pour le blé et de -376 millions d'€ pour le maïs.

Dans le cadre des travaux du Groupe interministériel, un exercice de modélisation des occurrences pour les canicules de type 2003 a été réalisé. Les occurrences modélisées sont présentées dans le Tableau 6.

Tableau 6 – Occurrences modélisées des canicules de type 2003 (Groupe Interministériel, 2009)

Scénario	2001-2100
A2	[32 - 51]
B2	[18 - 25]

Dans le scénario A2, on aboutirait sur la période 2001-2100 à un coût pour le blé compris entre -20 et -33 milliards d'€ et entre -12 et -19 milliards d'€ pour le maïs. Le coût annuel moyen serait ainsi compris entre -209 et -334 millions d'€ pour le blé et entre -120 et -192 millions d'€ pour le maïs.

Dans le scénario B2, le coût annuel moyen serait compris entre -118 et -163 millions d'€ pour le blé et entre -68 et -94 millions d'€ pour le maïs.

Ces résultats sont donnés à titre indicatif : au-delà de l'incertitude portant sur la méthode de modélisation des occurrences futures des épisodes de type 2003, ils ne tiennent compte d'aucune adaptation.

⁵³ COPA-COGECA, 2004

I.5 Analyse détaillée pour la viticulture

La vigne apparaît particulièrement sensible au changement climatique. Les impacts potentiels se présentent à différentes échelles : de la parcelle (la phénologie), en passant par le vignoble (les cépages), le terroir (les AOC) et jusqu'à l'échelle mondiale (vers un déplacement des régions viticoles ?)⁵⁴.

Experts consultés

- Eric Duchêne, unité mixte de recherche INRA- université Louis Pasteur « Vigne et vins d'Alsace », Colmar
- Inaki García de Cortázar-Atauri, Unité Agroclimatique INRA Avignon
- Bernard Seguin, coordinateur de la Mission Changement climatique et effet de serre, Unité Agroclimatique INRA, Avignon

I.5.1 Etat de connaissance des impacts sur la filière

I.5.1.1 Les impacts observés

La plupart des changements observés ces dernières années concernent l'évolution de la phénologie et de la date de vendange : avancement généralisé des différents stades en lien avec l'augmentation de la température⁵⁵.

L'augmentation des températures accroît le nombre de jours favorables à la vigne (température au-dessus de 10°C) ; ainsi cette augmentation est d'environ 1,1 jour par an depuis 1970 pour le Riesling en Alsace⁵⁶. Sur les 50 dernières années, cela s'est traduit par un avancement des stades de développement (débourrement, floraison, véraison,...) de l'ordre de trois, voire quatre semaines sur la date de vendange⁵⁷.

Les impacts indirects de cette avancée de la phénologie peuvent résider dans la baisse de qualité des raisins, notamment par l'augmentation du degré alcoolique liée à la précocité de la phase de maturation, soumise à des conditions climatiques de plus en plus chaudes. L'avancée de la date des vendanges peut entraîner des pertes qui peuvent être consécutives à des pluies chaudes en août et septembre, entraînant l'éclatement et la pourriture des raisins mûrs lors des vendanges, comme observé en Bourgogne⁵⁸.

Le rendement est d'ores et déjà pénalisé par la sécheresse. Lors de l'été 2003, on a observé une avancée exceptionnelle de la date de vendange (la plus précoce depuis 1370)⁵⁹, avec des degrés particulièrement élevés d'alcool et des acidités faibles⁶⁰. La qualité globale de chaque terroir a été fortement modifiée, donnant des vins atypiques⁶¹.

⁵⁴ Agenis-Nevers, 2006

⁵⁵ García de Cortázar-Atauri, 2006

⁵⁶ Seguin, réunion groupe PV, 2008

⁵⁷ Seguin, réunion groupe PV, 2008

⁵⁸ Pichery et Bourdon, 2007

⁵⁹ Chuine *et al.*, 2004

⁶⁰ Seguin et García de Cortázar-Atauri, 2004

⁶¹ Voir INRA, 2004 : http://www.inra.fr/presse/impacts_de_la_canicule_2003_sur_la_vigne_et_le_vin

I.5.1.2 Les impacts attendus d'ici la fin du XXI^{ème} siècle

L'avancée des stades et l'élévation des températures pendant la phase de maturation devraient se poursuivre et s'accroître avec le changement climatique.

La phase de maturation se produirait ainsi dans la période la plus chaude de l'année. Des nuits chaudes (minimales supérieures à 18°C) auront des conséquences en termes de qualité des vins (baisse de l'acidité, modifications des profils aromatiques, perte de typicité,...). Des températures nocturnes trop élevées perturberont par ailleurs la synthèse des polyphénols⁶². Un débourrement plus précoce au printemps pourrait accroître le risque de dégâts par le gel. Le jour, un dépassement du seuil de 35°C en plein soleil dessécherait les feuilles les plus exposées qui tomberont plus tôt, ralentissant l'alimentation des baies. Les vignes seront sensibles à des événements extrêmes plus fréquents : grêle, tempêtes, pluies violentes et orages. Les maladies et pathogènes actuellement présents s'accroîtront et la présence future de nouveaux parasites est donnée comme fortement probable⁶³.

Ces effets seraient toutefois différents selon les régions ou les types de vinification (la qualité requise n'étant pas toujours la même).

Même s'il existe actuellement très peu de certitudes sur le niveau et la répartition de la pluviométrie future, on s'attend néanmoins à un stress hydrique plus marqué⁶⁴, avec pour conséquence une diminution du rendement. Les effets sur la qualité des vins restent incertains.

S'agissant de l'évolution des potentiels des cultures, les études d'impact pour le XXI^{ème} siècle prévoient de nouvelles zones de culture de la vigne (plus au nord ou plus en altitude), ainsi que d'autres cépages possibles pour les régions viticoles actuelles⁶⁵. Il existe une corrélation positive entre température et rendements des vignobles jusqu'à un certain seuil au-delà duquel les rendements de productions végétales seraient affectés dans tous les cas. Ce seuil maximal se situerait à +4°C en moyenne en France, mais peut être inférieur selon le degré d'exigence climatique des variétés et cépages. Le seuil reste non encore atteint pour la majorité des vins français, ce qui laisse une marge d'opportunité pour certains vignobles⁶⁶.

Des problématiques propres à la France et à la notion de terroirs sont à prendre en compte : l'Appellation d'Origine Contrôlée (AOC) est en effet définie par le milieu physique (sol, climat), les techniques culturales et le matériel végétal utilisé. Or tous ces éléments sont amenés à évoluer.

⁶² Seguin, réunion groupe PV, 2008

⁶³ Pichery, 2007

⁶⁴ Sur les précipitations, les projections des modèles climatiques sont hétérogènes. Selon le modèle Arpège-climat en France, la diminution des précipitations en été est mise en évidence par les projections à l'horizon 2100, en particulier dans le sud (MEDCIE Grand Sud-est, 2008).

⁶⁵ Seguin, réunion groupe PV, 2008

⁶⁶ Agenis-Nevers, 2006

I.5.2 L'adaptation

I.5.2.1 L'adaptation spontanée

La première action d'adaptation consiste à prendre en compte les interactions entre climat, sol et pratiques culturales⁶⁷. Différentes pratiques culturales⁶⁸ et notamment de celles permettant la modification du microclimat végétal, sont aujourd'hui connues pour limiter les effets d'un réchauffement modéré (+1°C)⁶⁹.

Une adaptation du matériel végétal est également envisageable, en termes de choix de clones, de porte-greffes ou de création de nouvelles variétés⁷⁰. L'ajustement des pratiques en matière de fertilisation et d'irrigation, ainsi que les modalités de lutte contre les ravageurs et maladies sont une autre possibilité⁷¹.

Une modification du micro climat local par changement des aires de culture (cultiver en altitude par exemple) pourrait permettre de conserver les mêmes cépages. En Bourgogne, certains viticulteurs observent déjà que des terrains en altitude sont mieux adaptés à leur production. En Espagne, plusieurs producteurs ont d'ores et déjà commencé à planter certaines parcelles de vigne dans les Pyrénées pour échapper aux fortes températures en été⁷².

La migration géographique est pressentie comme le mode d'adaptation dans un futur lointain : une augmentation de la température moyenne de +1°C correspondrait à un déplacement relatif du climat de 180km vers le nord⁷³ ou de 150m en altitude et on estime que la bande géographique favorable à la culture de la vigne s'est d'ores et déjà déplacée de 80 à 240km vers le nord et pourrait gagner de 280 à 500km supplémentaires d'ici 2099⁷⁴. Or certaines terres excellentes pour la viticulture pourraient ne pas être adaptées à d'autres cultures : la question de la gestion de ces déplacements doit donc être posée. Par ailleurs, une telle migration pose la question des terroirs, qui ne peuvent être délocalisés. Si on observe depuis plusieurs siècles des changements de cépages réguliers pour s'adapter aux variations du climat, dans le contexte bien particulier de l'AOC, le changement de cépages en tant que mesure d'adaptation spontanée aurait tendance à diminuer ; il pourrait en effet entraîner en France des pertes significatives pour les exploitants, via la perte de l'appellation.

I.5.2.2 L'adaptation planifiée

L'AOC en tant qu'outil de protection et distinction des terroirs est néanmoins vouée à s'adapter au contexte spécifique et changeant des terroirs. La question de l'évolution de l'AOC en réponse au changement climatique devra ainsi être posée : s'agira-t-il par exemple de proposer des rieslings sucrés ? Jusqu'où aller avec l'augmentation du degré

⁶⁷ Seguin, présentation mars 2009

⁶⁸ Par exemple : adaptation de la taille, écartement, protection du gel par des systèmes chauffants, vignes à palissage haut, enherbement des sols nus, traitement à la fraîche, enracinement plus profond des pieds, augmentation de la densité de plantation

⁶⁹ García de Cortázar-Atauri, 2006

⁷⁰ Duchêne, réunion transversale, 2008

⁷¹ Communication B. Seguin

⁷² Communication I. García de Cortázar-Atauri

⁷³ Moisselin *et al.*, 2002

⁷⁴ Communication B. Seguin

alcoolique ? Faut-il créer de nouvelles typicités, tels des rouges en Champagne ?⁷⁵. La question de l'acceptabilité de ces changements, notamment par le consommateur, reste ouverte.

La recherche génétique pour de nouveaux cépages mieux adaptés aux terroirs (en matière de précocité, durée du cycle, optimum thermique, besoins en froid, sensibilité au gel) peut constituer un axe d'adaptation. Dans cette optique, on connaît déjà certaines variétés étrangères pouvant être introduites dans des vignobles français, ou encore des cépages du Sud de la France pouvant être introduits dans le Nord (par exemple du Cabernet Sauvignon sur du granit alsacien)⁷⁶.

En viticulture, si des essais de désalcoolisation ont pu avoir lieu en Californie, ce type d'adaptation à la baisse de qualité observée du vin n'est pas (encore) envisageable à grande échelle en France⁷⁷ d'un point de vue d'acceptabilité des consommateurs et des cahiers des charges des AOC. Par ailleurs, les possibilités de marges de manœuvre pour modifier les pratiques œnologiques sont moins importantes avec les vins blancs qu'avec les vins rouges⁷⁸.

I.5.3 Evaluation quantifiée de l'impact du changement climatique et de l'adaptation sur la viticulture

L'évaluation réalisée se base essentiellement sur les résultats des travaux de thèse de M. Inaki García de Cortázar-Atauri : Thèse INRA Avignon « Adaptation du modèle STICS à la vigne : Utilisation dans le cadre d'une étude du changement climatique à l'échelle de la France », décembre 2006. L'objectif de ce travail de thèse est d'adapter un modèle générique de cultures, le modèle STICS, à la vigne à l'échelle des grands vignobles de France pour ensuite l'appliquer à une étude d'impact du changement climatique à la même échelle.

I.5.3.1 Périmètre de l'analyse

Horizons considérés

Dans cette étude, nous observons l'horizon 2080 (simulations réalisées pour la période 2070-2099 par rapport à la période 1970-1999).

Périmètre géographique

Il existe d'importantes différences régionales, tant au niveau des impacts du changement climatique que de la capacité d'adaptation. Le choix s'est donc porté sur deux régions, qui diffèrent sur ces deux aspects :

- la Bourgogne : dans cette région, la filière viticole serait impactée positivement par le changement climatique. Cependant, en termes d'adaptation (scénarios les plus pessimistes), la marge de manœuvre serait limitée, car les viticulteurs sont particulièrement attachés à leurs cépages ;
- le Languedoc-Roussillon : de fortes modifications sont attendues sur tous les aspects (production, qualité et environnement).

⁷⁵ Seguin, 2007

⁷⁶ Communication E. Duchêne

⁷⁷ Communication B. Seguin

⁷⁸ Communication E. Duchêne

Périmètre sectoriel

L'évaluation porte sur deux cépages :

- le cépage pinot noir en Bourgogne : cépage aux exigences climatiques pointues, qui produit les vins rouges de Bourgogne ;
- le cépage syrah en Languedoc-Roussillon : la syrah est le quatrième cépage rouge planté en France, dont près de la moitié en Languedoc-Roussillon.

Seule la viticulture a été observée - et non la viniculture - sur la base de l'impact du changement climatique sur le chiffre d'affaire des viticulteurs.

I.5.3.2 Scénarios et hypothèses climatiques

Sont étudiés ici les scénarios A2 et B2 (Arpège-Climat) pour la période 2070-2099. Les données du modèle Arpège-Climat correspondent à la période 1970-1999 pour la série Contrôle et à la période 2070-2099 pour les scénarios futurs.

Tableau 7 – Paramètres climatiques considérés pour la période 2070-2099 sur la France (simulations Météo-France – Arpège-Climat) – comparaison avec la période 1970-1999 (Planton, 2005)

Scénario	Ecart de températures (°C)			Ecart de précipitations (%)		
	Année	Hiver	Eté	Année	Hiver	Eté
A2	3 à 3,5	2,5 à 3	4 à 5	-10 à 0	+5 à +20	-35 à -20
B2	2 à 2,5	1,5 à 2	2,5 à 3,5	-5 à 0	0 à +10	-25 à -5

I.5.3.3 Présentation de la méthodologie

L'évolution des rendements sans adaptation (structure technique de base) et avec adaptation (nouvelle structure technique) selon les deux scénarios considérés, est tirée de résultats de la modélisation STICS⁷⁹ réalisée par l'équipe d'I. García de Cortázar-Atauri, INRA, 2006.

Hypothèses principales

Un raisonnement à économie constante : La principale hypothèse et certainement la plus limitante, concerne l'hypothèse d'économie constante. On raisonne ainsi à surface cultivée constante, prix constant, conditions techniques constantes.

La prise en compte du fonctionnement de la plante et de sa relation avec le milieu : L'étude utilisée met en relation l'ensemble des réactions biophysiques des éléments du système sol-climat cépage-techniques culturales avec la modification des facteurs du climat, ainsi que l'élévation du CO₂.

Prise en compte de l'adaptation : L'étude d'impact du changement climatique a été réalisée dans le cadre des travaux d'I. García de Cortázar-Atauri pour chaque région en prenant en compte les différentes configurations de plantations de cépages et de qualité recherchée à la vendange. Pour définir une structure de base (sans adaptation), les paramètres tels que densité des plantations, hauteur de feuillage ou encore distance entre les ceps sur le rang ont été calibrés selon les spécificités de chaque vignoble.

⁷⁹ Pour la région Languedoc-Roussillon, ces deux étapes de calcul sont réalisées pour deux types de sols (à faible réserve utile fRU et à grande réserve utile gRU). On peut traduire cela en sol profond ou superficiel.

Lorsque possible, deux types de sols ont été étudiés. Une nouvelle structure avec adaptation a été introduite, qui constitue la combinaison de la/des structure(s) de plantation et des pratiques culturales qui pourraient permettre d'obtenir les meilleurs résultats en termes de rendements dans le futur.

On suppose ici que les itinéraires d'adaptation choisis ne demandent pas d'investissements supplémentaires de la part de l'agriculteur. Or à titre d'exemple, l'arrachage et le replantage sont susceptibles de représenter des coûts significatifs pour les agriculteurs. Ici, aucun coût supplémentaire de l'adaptation n'est retranché des gains résultant de l'itinéraire technique adapté.

Tableau 8 – Les structures entrées dans le modèle STICS sur nos deux régions d'étude (García de Cortázar-Atauri, 2006)

	Structure de base	Nouvelle structure
Bourgogne	9090 ceps/ha, 0,9m feuillage, sans irrigation, sans éclaircissage, sans mulch	9090 ceps/ha, 1,3m feuillage, sans irrigation (A2 avec irrigation), sans éclaircissage, sans mulch
Languedoc -Roussillon	3333ceps/ha, 1,0m feuillage, sans irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	fRU : 3333ceps/ha, 1,5m feuillage, irrigation, éclaircissage libre, sans mulch
		gRU : 3333 ceps/ha, 1,5m feuillage, sans irrigation, éclaircissage libre, sans mulch

I.5.3.4 Analyse des limites et de l'incertitude

Incertaineté quant aux scénarios climatiques : Le chiffrage de l'évolution physique de la vigne est basé sur des données de simulation. Leur validité dépendra donc bien sûr du climat réel. La variabilité climatique et les extrêmes de sécheresse, qui ont pourtant un impact particulièrement important, ne sont pas intégrés. Certains résultats positifs (notamment pour la région Bourgogne) doivent être relativisés.

Economie constante : Cette hypothèse comporte des limites importantes. On considère ainsi que les prix des productions restent stables et que les surfaces cultivées restent constantes. Notamment en matière d'utilisation des sols, cette hypothèse ne permet pas de poser la question des conséquences de déplacements de zones de production (utilisation des terres pour d'autres usages ? abandon des terres ?). Par ailleurs, sous cette hypothèse, la question de l'évolution du prix en réponse à l'évolution des rendements n'est pas étudiée.

Données utilisées : Le choix d'un seul cépage par région et le choix de plusieurs appellations pour obtenir le prix moyen du vin rouge vrac introduit une grande imprécision : le cépage choisi ne constitue en effet pas à 100% les vins d'appellation que nous étudions ici.

Incertainetés sur les simulations : Les résultats présentés découlent d'un travail de simulation, réalisé à partir du modèle STICS. Comme dans tout exercice de modélisation, l'ensemble des impacts du changement climatique n'ont pas pu être considérés. Les aspects sanitaires par exemple (évolution des parasites et ravageurs) ne sont pas intégrés à l'analyse⁸⁰.

Options d'adaptation : La capacité d'adaptation technique des viticulteurs au cours du temps n'est pas prise en compte. Le modèle utilisé ne permet pas de faire varier les techniques appliquées à la parcelle en fonction des événements climatiques. Ceci peut pénaliser les résultats dans certains cas. Par ailleurs, le coût des installations et de l'eau pour les scénarios avec adaptation par le biais de l'irrigation (ce qui peut réduire les

⁸⁰ Garcia de Cortazar-Atauri, 2006

gains monétaires) et la compatibilité de mesures de ce type avec la diminution projetée de la ressource ne sont pas pris en compte non plus à ce stade.

Des paramètres non considérés : L'évaluation chiffrée des impacts du changement climatique sur la filière viticole s'avère être un exercice très difficile et ne permet pas, à ce stade de premier chiffrage, de prendre en compte les paramètres suivants :

- Les incertitudes sur la qualité et les importantes modifications qu'elle va subir : même si l'on a une augmentation du rendement, celle-ci est compromise par la qualité du raisin récolté ;
- L'opposition rendement/qualité et la limitation du rendement par hectare pour de nombreux vins (99% du vignoble en Bourgogne voient leur rendement limité par les critères du label AOC) : ainsi, les opportunités observées sur la Bourgogne pourraient se voir limitées pour des questions de qualité ;
- La différence des effets du climat et des « effets de mode du marché du vin » : les critères de qualité n'étant pas les mêmes, les impacts seront différents pour une bouteille à 10 euros ou pour une bouteille à 150 euros⁸¹. En effet, l'une des spécificités de la viticulture, en comparaison avec les autres cultures agricoles, réside dans le fait qu'il ne s'agit pas d'un secteur proprement alimentaire : il relève de l'économie de la convivialité, voire parfois du luxe et est donc plus sensible à l'évolution du pouvoir d'achat ou à celle de la qualité. Etudier l'évolution de la demande est donc ici fondamental.

1.5.3.5 Evaluation de l'impact physique du changement climatique

Résultats pour la Bourgogne

Le tableau suivant présente les évolutions de rendements obtenus par I. García de Cortázar-Atauri pour les deux régions choisies à l'horizon 2080 selon les scénarios A2 et B2.

Tableau 9 – Evolution du rendement : Bourgogne, Pinot noir (García de Cortázar-Atauri, 2006)

Scénario	Rendement actuel (t/ha)	Rendement futur – sans adaptation (t/ha)	Evolution du rendement sans adaptation (%)	Rendement futur – avec adaptation (t/ha)	Evolution du rendement – avec adaptation (%)
A2	10,8	14,6	35,2%	16,6	53,7%
B2	10,8	15,3	41,7%	15,3	41,7%

Sur la période 2070-2099 quel que soit le scénario climatique considéré, le changement climatique aurait un impact positif sur la production de vins rouges en Bourgogne sans modification de la structure de plantation ni des pratiques culturales (+35,2% de rendement supplémentaire selon A2 ; +41,7% selon B2).

Les bénéfices de l'adaptation diffèrent selon le scénario climatique. Sous A2, l'adaptation « optimale », comprenant des mesures d'ajustement de la hauteur du feuillage et d'apport d'eau, permet de porter la hausse de rendement à 57%. Pour le scénario B2, il ressort des simulations qu'une adaptation (cette fois sans apport en eau supplémentaire pour le scénario d'adaptation optimale) n'apporterait pas de hausse de rendement supplémentaire.

Résultats pour le Languedoc-Roussillon

⁸¹ Communication B. Seguin

Tableau 10 – Evolution du rendement : Languedoc-Roussillon, Syrah (García de Cortázar-Atauri, 2006)

Type de sol	Scénario	Rendement actuel (t/ha)	Rendement futur – sans adaptation (t/ha)	Evolution du rendement – sans adaptation (%)	Rendement futur – avec adaptation (t/ha)	Evolution du rendement – avec adaptation (%)
fRU	A2	5,0	4,4	-12,0%	6,5	30,0%*
	B2	5,0	4,7	-6,0%	7,3	46,0%*
gRU	A2	6,6	4,9	-25,7%	6,4	-3,0%**
	B2	6,6	5,4	-18,2%	7,3	10,6%**

Source : *fRU : La quantité d'eau d'irrigation nécessaire dans les sols fRU est d'environ 140 mm pour les scénarios A2 et B2 ; et de 100 mm pour les sols gRU (dans les deux scénarios). La période d'irrigation déterminée par le modèle est différente selon les scénarios : pour le scénario A2, elle commence au début du mois de juin et elle s'étend jusqu'à la fin du mois d'août ; et pour le scénario B2, elle commence à la mi-mai et elle termine à la fin du mois d'août.

**gRU : Dans le scénario B2, la réponse de la plante au dépassement de l'optimum de températures et du raccourcissement du cycle est compensée par l'introduction de l'irrigation

Sur sol à grande réserve utile, l'adaptation par des nouvelles techniques avec irrigation pourrait fortement limiter la perte de rendement. Celle-ci passe en effet de -26% sans adaptation à -3% avec adaptation selon le scénario A2. Selon le scénario B2, l'irrigation pourrait même transformer une situation de perte du rendement (-18%) en un gain (+11%) sur la période 2070-2099 par rapport à la période de référence.

Sur sol à faible réserve utile, une bonne adaptation des structures de plantation et des pratiques culturales, notamment le recours à des apports ponctuels en eau, pourrait avoir des répercussions très positives, en évitant non seulement des pertes de rendement, mais en transformant la vulnérabilité à l'aléa climatique en opportunité.

Néanmoins, la possibilité d'accroître le recours à l'irrigation dépend de la disponibilité de la ressource en eau. Or les projections climatiques mettent en avant une accentuation des disparités régionales de même que saisonnières s'agissant des précipitations : il semble que le Sud-est de la France devra faire face à une baisse importante de la ressource en eau notamment en été et à la multiplication des conflits d'usage⁸².

1.5.3.6 Discussion sur la traduction en termes de gains/coûts monétaires

Les résultats obtenus sont à utiliser avec grande précaution. **Leur traduction en termes de coûts ou de gains monétaires n'est pas directe : une amélioration de rendement ne se traduit pas forcément par une augmentation de la production et un accroissement du revenu pour les viticulteurs.** Les raisons sont les suivantes :

- Une évaluation monétaire, sous l'hypothèse d'économie constante, ne permettrait pas à ce stade d'évaluer **la dépendance prix-rendement** – pour des raisons i) qualitatives et ii) d'équilibre offre/demande. La prévision des volumes de récolte

⁸² MEDCIE Grand Sud-est, 2008

attendus est utilisée pour discuter le prix d'achat des raisins en Alsace et en Bourgogne notamment⁸³.

- Il semble peu probable, avec une augmentation des rendements telle que celle potentiellement obtenue en Bourgogne, de continuer à produire autant de **vins de haute qualité**. Cela se traduira par une baisse des prix. Par ailleurs, il peut y avoir un effet direct et négatif de l'augmentation des températures sur la qualité des raisins et donc sur leur prix⁸⁴.
- Enfin, le potentiel de rendement ne gouverne pas le revenu des viticulteurs, puisqu'il est aujourd'hui plafonné réglementairement. Des limitations de rendement à l'hectare sont actuellement imposées par les AOC.

Pour aller plus loin...

Il serait par possible, dans une étape ultérieure, d'aller plus loin dans le chiffrage du d'autres impacts que celui de baisse des rendements en chiffrant par exemple le coût de l'impact sur la qualité, par exemple grâce à l'outil utilisé en Australie permettant de chiffrer l'effet direct de l'augmentation des températures sur qualité des raisins et donc de leur prix. Dans cette étude⁸⁵, le prix du kg de Pinot noir peut s'écrire $\text{Prix} = 5164,7 - 182,4 \times \text{température du mois de janvier}$ ⁸⁶.

Le coût des investissements nécessaires à l'adaptation et la possibilité effective de mettre en œuvre certaines des mesures mentionnées – notamment l'irrigation – devront être étudiés en profondeur dans les travaux ultérieurs : la baisse de la ressource en eau pourrait remettre en cause la viabilité de ce type d'option.

Le coût de méthodes d'adaptation planifiée telles que le transfert des cépages vers le nord (coût du défrichage d'un hectare, etc.), le changement d'aires de cultures (coût de terrassement, etc.) ou encore l'introduction de nouveaux cépages (coût de la recherche pour la création d'une nouvelle variété, coût d'arrachage et plantation) pourraient également être étudiés.

I.6 Analyse détaillée sur les prairies

L'impact du changement climatique sur les prairies et cultures fourragères est une problématique majeure, puisque les prairies naturelles et semées recouvrent environ 13 millions d'hectares en France en 2007 (10 de prairies permanentes et 3 de prairies temporaires ou artificielles), soit 45% de la surface agricole utile nationale.

Experts interrogés :

- François Lelièvre, UMR SYSTEM, INRA Montpellier
- Françoise Ruget, UMR 1114 EMMAH, INRA Avignon

⁸³ Communication E. Duchêne

⁸⁴ Webb L.B *et al.*, 2008.

⁸⁵ *Ibid.*

⁸⁶ Communication E. Duchêne

I.6.1 Etat des connaissances des impacts sur la filière

I.6.1.1 Les impacts observés

L'étude des impacts du changement climatique sur la production fourragère et les systèmes d'élevage s'avère particulièrement difficile : à cette échelle de temps (plusieurs décennies), isoler les effets des tendances climatiques de ceux du progrès technologique et des changements sociaux ou économiques est un exercice compliqué. De plus, les principales variations climatiques mémorisées sont les contrastes entre années récentes, non les tendances. Les analyses d'impact du climat sur la production fourragère sont donc généralement réalisées en deux temps : (a) analyse des évolutions des facteurs climatiques enregistrés, dont on dégage des tendances par des ajustements linéaires ou curvilinéaires sur des séquences longues ; (b) analyse de l'impact des tendances sur la production des prairies par application de modèles de croissance.

L'évolution des calendriers de production liée au changement climatique pèse sur toute la filière élevage et en premier lieu à l'échelle des cultures fourragères. L'évolution possible du nombre de passages de pâturage et du nombre de coupes possibles affecte la stratégie et potentiellement les revenus de l'exploitant.

Les effets sur les prairies sont variables selon les zones géographiques. Au Nord de l'Europe et de la France, où les épisodes de sécheresses estivales sont rares et courts, le principal effet est une augmentation de la production de biomasse du fait de l'augmentation de la teneur de l'air en CO₂, de températures plus élevées et des hivers plus courts⁸⁷. Dans les régions du sud de l'Europe et de la France où le déficit hydrique limite systématiquement la production en été, l'accroissement de la durée et de l'intensité des sécheresses tend en revanche à réduire la production de biomasse estivale et annuelle, ce qui entraîne une vulnérabilité accrue des systèmes d'élevage⁸⁸. Une étude en cours (Climfourrel) sur les départements périméditerranéens du Tarn à la Drôme montre que dans cette zone historiquement en limite sud du climat tempéré, l'évapotranspiration potentielle (ETP) a augmenté de façon très importante au printemps et en été (+120 à +150mm en 30 ans), ce qui a pour conséquence de creuser le déficit hydrique. Même si la pluviométrie moyenne n'est pas encore significativement modifiée en été, la période sèche sans croissance des plantes s'allonge dans les régions historiquement déficitaires en eau en été (Grand Sud-est) de 8 à 10 jours par décennie (soit 1 jour par an environ) en moyenne. La variabilité de la production estivale d'herbe est accrue, les étés secs se traduisant par des rendements de plus en plus bas. Ainsi, les sécheresses de 2003, 2005 et 2006 ont eu des impacts plus graves que celles de 1986 ou 1989-90-91, alors que la pluviométrie n'a pas été plus faible⁸⁹. Le système d'aide de type « calamité agricole sécheresse », prévu pour être déclenché exceptionnellement (une année sur 10 à 15) a été activé avec une fréquence exceptionnelle depuis 2000 (en 2003, 2005 et 2006), sur cet arc périméditerranéen⁹⁰. Pour les cultures irriguées, les besoins en eau ont fortement augmenté⁹¹.

Il y a donc une ligne de partage « nord gagnant / sud perdant » du changement climatique. La limite se situerait actuellement autour de la ligne Toulouse-Lyon, les zones sud d'altitude supérieure à 1000m étant incluses dans les zones gagnantes⁹². A partir de

⁸⁷ Soussana *et al.*, 2002 ; Seguin *et al.*, 2004

⁸⁸ Satger *et al.*, 2008 ; Lelièvre et Volaire, 2009

⁸⁹ Lelièvre *et al.*, 2008

⁹⁰ Satger *et al.*, 2008

⁹¹ Lelièvre *et al.*, 2008

⁹² Communication F. Lelièvre

cette ligne, plus on va vers le nord, plus le changement climatique accroît la production de biomasse annuelle ; plus on va vers le sud, plus il la réduit⁹³.

Les impacts de la canicule et de la sécheresse de 2003 sur les fourrages ont conduit à une baisse de 30% de la production fourragère nationale pour l'année⁹⁴. De nombreux effets corollaires ont été observés : perte d'autonomie fourragère, dégradation des prairies, perte de carbone des sols, réduction de l'ingestion et de la production des ruminants, effets aggravés sur les sols à faible réserve en eau, ...⁹⁵.

Les exploitations bio et herbagères strictes seraient les plus sensibles à ces effets sécheresse : ainsi lors de la sécheresse de 2003, elles ont connu un déficit respectivement de 1 et 0,6 tonne de matière sèche par UGB (unité gros bétail)⁹⁶.

Notons enfin, dans un contexte d'incertitude quant à l'évolution future du régime des précipitations, que l'aléa inverse d'excès de précipitations peut également impacter la filière élevage en empêchant l'accès à la ressource herbagère : par exemple en 2007, année très humide, les fauches ont été particulièrement tardives (mi-juillet) à cause de la pluie et la qualité de l'herbe s'en est trouvée amoindrie.

I.6.1.2 Les impacts attendus d'ici la fin du XXI^{ème} siècle

La combinaison de modèles politico-économiques (scénarios du GIEC) et des modèles climatiques donne une large gamme des évolutions possibles pour le XXI^{ème} siècle ; les hypothèses moyennes prévoient un doublement de la teneur en CO₂ et un réchauffement en France dans la continuité de celui observé depuis 1980, entre +0,3 et +0,5°C par décennie : on va donc assister à la poursuite ou à l'accentuation des effets déjà observés depuis 1980⁹⁷. Pour la moitié sud du pays, le changement peut se résumer à une extension du climat méditerranéen vers le nord à la vitesse de 3 à 6km/an et à son renforcement progressif⁹⁸.

Pour les régions qui resteront bien arrosées toute l'année et fraîches (moitié nord, ou sud à altitudes élevées), les scénarios climatiques prévus pour la fin du siècle se traduiraient globalement par une augmentation de la production d'herbe, autorisant un chargement animal accru et une extension de la saison de pâturage⁹⁹. Le doublement de la concentration atmosphérique en CO₂ provoquerait une forte stimulation de la photosynthèse, jusqu'à 30% sur les plantes en C3 quand les autres conditions sont optimales. Pour les graminées fourragères, cela pourrait représenter une hausse de production en matière sèche de l'ordre de 15 à 20% dans toutes les régions où le déficit hydrique n'augmentera pas notablement¹⁰⁰. La hausse des températures entraînerait une production d'herbe plus précoce au printemps et plus tardive en fin d'automne, voire même une hausse de potentiel de production hivernale : par exemple, un potentiel de production non négligeable apparaîtrait l'hiver à Rennes et Pau (jusqu'à 15% de la biomasse produite annuellement à l'horizon 2080).

⁹³ Lelièvre et Volaire, 2009

⁹⁴ Ciaïa *et al.*, Nature 2005 in présentation Soussana

⁹⁵ Seguin, réunion groupe PV, 2008

⁹⁶ Pflimlin, conférence AFPP, mars 2007

⁹⁷ Communications F. Lelièvre, P. Gate, F. Ruget

⁹⁸ Lelièvre *et al.*, 2008

⁹⁹ Soussana *et al.*, 2002

¹⁰⁰ Soussana *et al.*, 2005

Dans les régions les plus douces (plaines du Sud-est, du Sud-ouest et Ouest atlantique), le pâturage hivernal pourrait même devenir une pratique fréquente, comme c'est le cas général en zone méditerranéenne côtière, réduisant les besoins en stock de fourrages d'hiver¹⁰¹. Selon les premiers résultats de l'étude ACTA¹⁰², les régions les plus méridionales de cette partie Nord vont être gagnantes dans la première moitié du XXI^{ème} siècle, puis perdantes par la suite, car elles basculeront dans le cas climatique chaud et sec. L'alimentation en eau deviendra limitante durant plusieurs mois par an dans ces régions, avec une forte incertitude sur la survie des plantes et la reprise effective des prairies à l'automne lors des années les plus sèches, comme c'est courant en zone méditerranéenne¹⁰³. Dans le cas des prairies irriguées, les besoins en eau augmentent¹⁰⁴, alors que la disponibilité tend à diminuer.

Néanmoins, la ligne de partage entre ces zones « nord gagnantes » et « sud perdantes » remonte lentement vers le nord et en altitude : si la zone « gagnante » couvre encore 80% du territoire national, elle tend à se réduire et pourrait ne plus représenter qu'une moitié nord du territoire national vers la fin du XXI^{ème} siècle¹⁰⁵. Cette tendance est confirmée par les résultats intermédiaires de l'étude ACTA.

Encadré 4 - Zoom sur l'étude ACTA « Étude de la sensibilité des systèmes de grandes cultures et d'élevages herbivores aux changements climatiques »

L'étude **ACTA** se penche sur trois zones géographiques différentes, permettant la spatialisation de l'incidence du changement climatique à l'aide de STICS. Les premiers résultats exposent les modifications de calendrier et d'adaptation des systèmes sur trois systèmes d'élevage caractéristiques de trois zones bien différentes quant à l'ampleur et l'impact du changement climatique (Lorraine, Bretagne, Sud de l'Aquitaine). Les premiers résultats donnent les conséquences à horizon 2030 (futur proche) et à horizon 2080 (futur lointain) sur les systèmes de production herbagers avec adaptation. Le rapport final devrait être publié d'ici fin 2009.

Les principales conclusions intermédiaires confirment la bonne tenue des rendements annuels de la prairie à base de graminée et l'intérêt de la luzerne dans le futur proche (2020-2046), notamment au Sud de la France. Dans le futur lointain (2070-2096), dans certaines zones les rendements de la prairie se dégraderont très vite : de +15% (A2 futur proche) par rapport à leur valeur actuelle à -16% (A2 futur lointain) dans le Lot par exemple.

Vers la fin du siècle, en adaptant les itinéraires techniques (dates de semis et groupes de précocité) et en considérant les sols les plus propices, les rendements ne seraient que légèrement affectés dans le quart Nord-ouest (de manière plus importante dans le scénario B1 que A2), mais pourraient progresser à l'Est.

Indépendamment des effets indirects sur les températures et la sécheresse, l'augmentation de la teneur de l'air en CO₂ modifie d'ores et déjà la biodiversité des prairies permanentes et il faut anticiper un futur déclin des graminées et une augmentation des légumineuses et des plantes diverses, notamment les dicotylédones non fixatrices d'azote¹⁰⁶.

¹⁰¹ D4E / ONERC, 2008

¹⁰² Moreau *et al.*, 2009

¹⁰³ Lelièvre et Volaire, 2009

¹⁰⁴ Lannuzel, 2008 ; Lelièvre *et al.*, 2008

¹⁰⁵ Communication F. Lelièvre

¹⁰⁶ Seguin, réunion groupe PV, 2008

I.6.2 L'adaptation

Les éleveurs doivent assurer une ressource alimentaire relativement constante à leurs troupeaux, malgré les arrêts de croissance végétale en hiver et en été. Les systèmes sont adaptés au creux d'hiver (lié aux températures trop basses), car il est historique et très reproductible d'une année à l'autre. En revanche, dans la bande de transition entre climat tempéré et méditerranéen, les creux de production par effet des sécheresses estivales sont imprévisibles en fréquence et en intensité et il est difficile de s'y adapter. Des enquêtes d'exploitations réalisées dans le cadre du projet Climfourrel en Ardèche, Lozère et Aveyron ont montré que la plupart des éleveurs considèrent encore les sécheresses comme des aléas climatiques exceptionnels, auxquels ils s'adaptent surtout par des achats de fourrages avec l'aide financière publique qui leur est allouée, mais pas vraiment comme la manifestation d'un changement climatique durable. Pourtant, la plupart des systèmes d'élevage français doivent s'adapter au risque de sécheresse croissant. La diminution et l'irrégularité de production d'herbe a des conséquences dans le choix de systèmes d'élevage et du type de production animale (lait ou viande ; gras ou maigre ; broutards, bouvillons ou bœufs...). Mais avant de changer de type de production, l'adaptation passe par une plus grande diversification des systèmes fourragers et une stratégie de constitution de stocks permettant de passer les périodes de pénurie fourragère sans diminution trop forte de la production animale¹⁰⁷. F. Lelièvre a inventorié une dizaine de leviers d'adaptation possibles, plus ou moins exploitables selon les exploitations. Nous les reprenons ci-dessous en les classant en mesures d'adaptation individuelles plus ou moins spontanément utilisées par les agriculteurs et en adaptations plus structurelles ou collectives relevant de la planification économique.

Adaptations individuelles, plus ou moins spontanées

- Abaissement structurel de charge animale par hectare, compensable par une extension de surface et/ou une meilleure valorisation des produits ;
- Mise à l'herbe plus précoce et pâturage plus tardif en automne, voire pâturage hivernal ;
- Adaptation de la conduite zootechnique : ainsi en climat méditerranéen, les mises-bas ont lieu au début de l'automne ; l'adaptation à l'évolution climatique passe aussi inévitablement par un accroissement des niveaux des stocks, afin de se prémunir contre une trop forte variabilité des rendements ;
- Changement du pilotage technique des prairies semées (prairies de pâture et de fauche) : nouvelles variétés à fort potentiel hivernal, modification des dates de semis, des dates de fauches et des pratiques de fertilisation.
- Adaptations plus lourdes à planifier et à aider
- Les mesures suivantes sont relativement coûteuses et seraient de ce fait susceptibles de nécessiter des incitations pour être mises en œuvre par les agriculteurs.
- Extension de l'exploitation à des surfaces d'ajustement si elles existent (estives d'altitude par exemple) ou création de ces surfaces (sorgho ou maïs à double fin) ;
- Ré-analyse des politiques à long terme de gestion de l'eau pour favoriser l'irrigation de petites surfaces : dans une grande moitié sud du pays, la capacité à stocker les excédents pluviométriques d'hiver qui tendront à se renforcer pour

¹⁰⁷ Lemaire *et al.*, 2006

limiter les crues, permet en même temps des irrigations de complément en fin de printemps et en été ;

- Aide à la mise en œuvre des actions précédentes dans le cadre de contrats collectifs (en commun entre éleveurs, ou entre éleveurs et cultivateurs, ou entre plaine et montagne) ;
- Anticipation des impacts de l'évolution du climat sur le cheptel, en adaptant notamment les bâtiments d'élevage pour limiter les impacts de la canicule sur les performances animales.

I.6.3 Evaluation quantifiée de l'impact du changement climatique et de l'adaptation sur les prairies

Est présentée ci-dessous une évaluation de l'impact du changement climatique sur les prairies du sud du Massif Central. L'approche utilisée ici est simplifiée. Une analyse plus approfondie devrait coupler l'analyse des impacts sur les prairies et sur les élevages.

I.6.3.1 Périmètre de l'évaluation

L'évaluation est faite pour la période couvrant la seconde partie du XXI^{ème} siècle (2050-2090) comparée à la situation initiale avant changement (1970-1980).

L'évaluation à l'échelle nationale est complexe à conduire étant donné les différences d'impact selon les systèmes et les régions. Dans les grands bassins herbagers du nord de la France (Bretagne-Normandie ; Ardennes-Lorraine-Franche-Comté), le gain de potentiel de production annoncé pourrait ne pas être réellement traduit par des augmentations de production, mais permettre de conduire une politique de désintensification sans réduire les charges animales par hectare fourrager et à production par hectare à peu près stable.

Au sud, il y aura en revanche une baisse du potentiel de production fourragère. A titre d'exemple, nous avons réalisé une évaluation pour l'« Arc périméditerranéen » : cette zone de transition tempéré-méditerranéen est impactée négativement¹⁰⁸. On se concentre ici sur le croissant sud du Massif Central du Tarn à l'Ardèche, soit plus précisément les zones entre 200 et 1000m d'altitude des départements du Tarn, Aveyron, Nord-Aude, Lozère, Nord-Hérault, Nord-Gard, Ardèche, Drôme. L'étude Climfourel¹⁰⁹ en cours sur cette zone a permis de préciser les hypothèses de travail.

I.6.3.2 Scénarios et hypothèses climatiques

L'évaluation est faite en considérant que la situation initiale avant changement correspond à ce que l'on a observé sur la période 1960-1980. Le changement est analysé pour la période s'étalant de 1980 à 2050-2090. L'hypothèse d'évolution climatique retenue est celle d'une poursuite, au long du XXI^{ème} siècle, de l'évolution du climat telle qu'observée ces trente dernières années. Cela correspondrait, entre 1980 et 2050, à une variation de température moyenne comprise entre +3 et +4°C, dont la moitié est déjà acquise. Les changements sont considérés comme résultant simplement de la remontée vers le nord du climat méditerranéen¹¹⁰.

¹⁰⁸ Lelièvre et Volaire, 2009

¹⁰⁹ www.climfourel.fr

¹¹⁰ Lelièvre *et al.*, 2008

I.6.3.3 Présentation de la méthodologie

Elle comporte deux étapes principales :

Etape 1 : Estimation de l'impact de la *méditerranéisation* du climat sur le rendement des prairies (production d'herbe), à partir des rendements actuellement observés dans la zone méditerranéenne ;

Etape 2 : Chiffrage du coût, que l'on résume principalement au coût d'achat de fourrages de compensation permettant de maintenir la production à un niveau stable.

Hypothèses principales

On considère deux périodes distinctes dans l'année :

- Période A : période chaude (et sèche), de mi-mai à mi-septembre, durant laquelle le rendement est une fonction inverse du déficit climatique en eau (que le changement climatique augmente) ;
- Période B : période fraîche et humide, de mi-septembre à mi-mai, pendant laquelle les rendements sont déterminés par les températures faibles (la hausse des températures et du CO₂ tend à accroître ces rendements).

On considère par ailleurs trois catégories de prairies :

- Catégorie 1 : prairies temporaires semées (luzerne, ray-grass, dactyle, fétuque) et les meilleures prairies naturelles sur sols profonds de vallée ;
- Catégorie 2 : prairies permanentes standard ;
- Catégorie 3 : prairies naturelles médiocres (sur sols pauvres, peu épais, en pente).

Le Tableau 11 présente les hypothèses de surface et de rendements relatifs à ces catégories de prairies.

Tableau 11 – Surface et rendement moyen de chaque catégorie de prairies, sur la période 1970-1980 (Communication F. Lelièvre)

	Nombre d'hectares sur la zone étudiée	Rendement Période (tMS/ha)	Rendement A Période (tMS/ha)	Rendement B Période (tMS/ha)	Rendement annuel moyen (tMS/ha)
Catégorie 1	350 000	5,0	6,0		11,0
Catégorie 2	350 000	3,0	4,5		7,5
Catégorie 3	300 000	1,5	2,5		4,0
Total	1 000 000	-	-	-	-

On considère que l'objectif général est le maintien de l'activité de production et de transformation des produits animaux. A cette fin, il est alors nécessaire de s'approvisionner en fourrage externe (achats) pour compenser la baisse des rendements. On supposera ici qu'1 kgMS fournit 0,7 unités fourragères (UF) dans les prairies de catégorie 1 ; 0,6 UF dans les prairies de catégorie 2 et 0,55 UF dans les prairies de catégorie 3¹¹¹. Par ailleurs, on considère que :

- Le coût d'achat d'une unité fourragère est de 0,2€/UF ;

¹¹¹Communication F. Lelièvre

- La valeur du foin est de 0,15 €/kgMS.

On suppose enfin une stabilité des surfaces et productions fourragères autres que les prairies (telles que le maïs ou le sorgho, pour faire des stocks).

1.6.3.4 Analyse des limites et de l'incertitude

Les incertitudes quant au scénario climatique : Elles sont importantes. Dans les départements étudiés, l'évolution de la température est relativement bien cernée à moyen-terme, jusqu'à 2050¹¹², mais les incertitudes sur les évolutions de la pluviométrie estivale et l'accroissement d'ETP estivale (mai-août) sont plus importantes. Le degré d'incertitude s'accroît notablement à l'horizon 2090.

L'incertitude quant à l'impact des évolutions climatiques considérées sur le rendement des prairies est également à considérer. En effet, ces impacts pourront être accentués ou amortis selon différents critères tels que le type de sol et les changements d'itinéraires techniques¹¹³.

Le raisonnement à économie constante : cette hypothèse est simplificatrice. On ne considère pas de changement de surfaces cultivées, de prix pratiqués, ni de technologie employée.

Périmètre géographique : Le cas d'étude porte sur une zone géographique limitée, parmi celles qui seront négativement impactées. Ces résultats sont principalement issus de « dire d'experts » connaissant bien cette zone. Ils doivent être considérés comme des ordres de grandeur susceptibles d'être critiqués et affinés au fur et à mesure de la progression des prévisions. Ces résultats ne sont en aucun cas extrapolables hors zone.

Une adaptation conjoncturelle : Ces résultats ne présentent qu'une adaptation conjoncturelle à l'aléa climatique sécheresse. Or l'achat de fourrage est généralement la méthode utilisée en dernier lieu.

1.6.3.5 Etape 1 : Evaluation de l'impact physique du changement climatique

Le Tableau 12 présente les effets possibles de la *méditerranéisation* du climat des départements du sud du Massif-Central (< 1000 mètres d'altitude) sur le rendement des prairies. Ils sont obtenus en supposant que les zones concernées connaîtront, d'ici la fin du siècle, des rendements équivalents à ceux que l'on observe actuellement dans les zones méditerranéennes.

Tableau 12 – Effet de la méditerranéisation du climat entre 1980 et 2050-90 sur le rendement des prairies dans les départements du sud du Massif Central (Communication F. Lelièvre)

	Rendement actuel (kgMS/ha)			Coefficient de changement		Rendement futur (kgMS/ha)			Perte annuelle	
	Période A	Période B	Année (A+B)	Période A	Période B	Période A	Période B	Année (A+B)	tMS/ha	%
Catégorie 1	5,0	6,0	11,0	0,30	1,20	1,5	7,2	8,7	-2,3	-21,0

¹¹² Lelièvre *et al.*, 2008

¹¹³ Lannuzel, 2008 ; Communication F. Ruget

Catégorie 2	3,0	4,5	7,5	0,25	1,15	0,8	5,2	5,9	-1,6	-21,0
Catégorie 3	1,5	2,5	4,0	0,20	1,10	0,3	2,8	3,1	-1,0	-24,0

De 1980 à 2050-90, le changement en cours aura abouti à :

- une chute très importante (environ -70%) du rendement de la période estivale, les sécheresses type 2003, 2005, 2006 étant devenues la norme ;
- un gain de 10 à 20% du rendement de la période hivernale du fait des températures et du niveau de concentration CO₂ plus favorables ;
- au total une baisse de la production fourragère annuelle comprise entre -20 et -25%.

Notons que si l'évolution climatique probable est assez bien cernée, il existe une forte incertitude sur la vitesse des changements.

I.6.3.6 Etape 2 : Traduction en termes monétaires

On calcule ici le coût du maintien de la production fourragère et animale par l'achat d'aliments conservés. Il pourrait s'ajouter un surcoût lié à une augmentation de la part de fourrages conservés sur les exploitations (stockage). L'adaptation à la variabilité interannuelle plus grande aura en effet un coût puisqu'il faudra faire plus de stocks reportables (foin) pour les creux d'été (taux accru de conservation de l'herbe produite). En effet, une UF conservée et distribuée coûte 4 à 6 fois plus qu'une UF directement pâturée par les troupeaux¹¹⁴.

¹¹⁴ Communication F. Lelièvre

Tableau 13 – Evaluation de l'impact moyen dans l'hypothèse où 1 million d'ha sont concernés (Communication F. Lelièvre)

Type de prairie	Surface (1000ha)	Perte de production annuelle en fourrage sec			Perte de production en UF		
		rdt (tMS/ha)	tonnage (1000t)	Valeur (M€)	UF/tMS	Production (1000UF)	Valeur UF (M€)
Catégorie 1	350	-2,3	-805,0	-120,7	0,70	-563,5	-112,7
Catégorie 2	350	-1,6	-551,2	-82,7	0,60	-330,7	-66,2
Catégorie 3	300	-1,0	-285,0	-42,7	0,55	-156,7	-31,3
Total	1 000		-1 641,2	-246,2		-1 051,0	-210,2

Le coût annuel de compensation de la baisse de rendement par achat de fourrage pour maintenir la production stable et au même niveau que la moyenne 1970-80 se situerait entre 200 et 250 millions d'euros par an pour cette zone périméditerranéenne couvrant environ 1 million d'hectares de prairies.

Pour aller plus loin...

Rappelons que l'achat de fourrage ne représente qu'une adaptation conjoncturelle à l'aléa climatique sécheresse.

Pour aller plus loin dans le chiffrage des coûts, on pourrait par exemple imaginer :

- chiffrer le stockage réalisé et son coût de mise en œuvre ;
- utiliser une unité de conversion des prairies en surfaces utilisées par les autres cultures pour connaître le coût de l'évolution des systèmes vers des cultures autres que les prairies (surfaces d'ajustement telles que le sorgho, maïs à double fin, etc.).

I.7 Analyse et discussion des résultats

Tableau 14 – Récapitulatif des résultats (en raison des nombreuses limites et incertitudes, il est indispensable de se reporter aux chapitres de cette partie avant toute interprétation des chiffres)

	Culture	Périmètre géographique	Scénario	Impact physique (% évolution)			Traduction en coûts (M€)			Principale source des données
				CT	MT	LT	CT	MT	LT	
Grandes cultures (adaptation spontanée)	Maïs	National	A2	-0,7 à +4,1	-0,8 à +3,6	-23,4 à +3,5	-13 à +77	-14 à +68	-439 à +65	Rosenzweig et Iglesias
	Blé		B2	-1,6 à +4,5	-0,2 à +3,8	-3,7 à +1,6	-30 à +85	-3 à +71	-68 à +30	
			A2	+4,1 à +7,4	+5,9 à +9,0	-1,2 à +12,9	+47 à +84	+67 à +102	-13 à +147	
	B2		+3,0 à +7,2	+5,1 à +7,8	+6,2 à +9,8	+34 à +82	+58 à +89	+70 à 111		
Viticulture (adaptation des itinéraires techniques)	Pinot noir	Bourgogne	A2			+54			I. Garcia de Cortazar-Atauri, 2006	
	Syrah		B2			+42				
		Languedoc-Roussillon	A2			-3 à +30 selon type de sol				
	B2				+10 à +46 selon type de					
Prairies (adaptation par achat de fourrages)		Arc péri-méditerranéen	Remontée vers le nord du climat méditerranéen			-21 à -24 selon le type de prairie			-250 à -200	F. Lelièvre, avis d'expert, 2009

Attention : Notons à nouveau que ces résultats ne constituent pas des prévisions de l'évolution du secteur agricole. Ils se basent sur des hypothèses lourdes et comportent des limites importantes, évoquées tout au long de ce rapport. Par ailleurs, couvrant des zones géographiques réduites et établis selon des méthodes d'évaluation différentes, ils n'ont pas vocation à être comparés ou agrégés.

Grandes cultures : Un impact différencié selon les cultures masquant des disparités régionales potentiellement significatives ; un facteur « eau » limitant qui remettra certainement en cause les impacts positifs de la concentration en CO₂ atmosphérique

L'analyse réalisée sur la base des travaux de Rosenzweig et Iglesias fait état pour le blé d'une augmentation des rendements jusqu'à un certain seuil, qui serait atteint entre 2050 et 2100 sous A2. Les résultats sont plus contrastés pour le maïs : si les rendements augmentent légèrement jusqu'à 2030, ils amorcent une baisse entre 2030 et 2050 quel que soit le scénario considéré et l'impact du changement climatique tend largement vers le négatif en 2100 (compris dans une fourchette de -3,7% à +1,6% sous B2 ; entre -23,4% et +3,5% sous A2). Notons que l'analyse ne tient pas compte d'un certain nombre de facteurs susceptibles d'impacter significativement les productions, tels que l'impact des ravageurs et parasites, ou encore les épisodes de canicules et sécheresse

plus fréquents, notamment dans le sud de la France où les fortes températures et le stress hydrique tendent déjà à limiter les hausses de rendements du blé et du maïs. Les études françaises à paraître d'ici 2010 (CLIMATOR, ACTA) permettront de confirmer ou infirmer ces tendances d'évolution.

Viticulture : un impact contrasté selon les régions, qui peut se transformer en opportunité grâce à l'adaptation, si l'évolution de la disponibilité de l'eau le permet...

Les résultats de l'évaluation réalisée sur la base des travaux de thèse d'I. García de Cortázar-Atauri montrent qu'en région Bourgogne les rendements devraient augmenter avec le changement climatique (à l'horizon 2080 : 35,2% de rendement supplémentaire selon A2 ; 41,7% selon B2). Une adaptation optimale des itinéraires techniques avec irrigation permettrait même d'atteindre une augmentation des rendements de 54% dans le cas du scénario A2. Ces résultats sont toutefois à nuancer : d'une part, la question de l'impact du changement climatique sur la qualité n'est pas considérée ; et d'autre part, il ne sera pas possible dans ces conditions de produire autant de vins de haute qualité qu'aujourd'hui (les AOC limitent la production de certaines appellations à un certain rendement maximal que le producteur ne peut dépasser pour garder une bonne qualité du produit fini). Enfin, il peut y avoir un effet direct et négatif de la hausse de la température sur la qualité du vin. Le Languedoc-Roussillon subirait quant à lui des pertes de rendement considérables sans adaptation (jusque -26%). Les itinéraires techniques comprenant l'irrigation pourraient toutefois changer la donne (transformer une situation de perte de -18% du rendement en un gain de 11% sur la période 2070-2099 par rapport à la période de référence sur sol à grande réserve utile). Dans cette étude, la principale limite réside dans le fait que l'on ne prend pas en compte la disponibilité de la ressource en eau.

Prairies : une possible hausse des rendements dans la partie Nord, une vulnérabilité accrue de l'arc périméditerranéen et la montée en latitude de la bande de transition

De 1980 à une date située entre 2050 et 2090, le changement en cours aura abouti à une chute très importante (environ -70%) du rendement de la période estivale - les sécheresses type 2003, 2005, 2006 étant devenues la normale - ; et à un gain de 10 à 20% du rendement de la période hivernale du fait des températures et du niveau de concentration en CO₂ plus favorables. Au total une baisse de la production fourragère annuelle comprise entre -20 et -25% pourrait être observée. Notons que le cas d'étude porte sur une zone géographique limitée, parmi celles qui seront négativement impactées et que ces résultats sont principalement à « dire d'expert » devant être considérés comme des ordres de grandeur. Enfin, si le sens de l'évolution climatique est bien cerné, il existe une forte incertitude sur la vitesse des changements. Ces résultats ne sont en aucun cas extrapolables hors zone, puisque des résultats inverses sont attendus au nord. Les études ACTA et CLIMFOUREL à paraître d'ici 2010 permettront d'apporter des nuances à ces résultats. Le coût de compensation de la baisse de rendement par achat de fourrage pour maintenir la production stable au même niveau que la moyenne 1970-80 se situerait entre 200 et 250 millions d'euros par an pour la région étudiée (approximativement 1 million d'hectares de prairies, soit 5 à 6% de l'élevage français). Le coût de l'adaptation à la variabilité interannuelle plus grande (taux accru de conservation de l'herbe produite) n'est pas pris en compte à ce stade.

I.8 Besoins et pistes identifiées pour favoriser l'adaptation en agriculture

Nous présentons ci-après les besoins de recherches, de suivi et d'observations identifiés dans le cadre de notre analyse, à travers l'étude bibliographique et les communications

des experts consultés. Plusieurs pistes de recherche ressortent de manière générale pour les trois types de cultures étudiés. Notons que l'Atelier de Réflexion Prospective (ARP) sur l'adaptation au changement climatique de l'agriculture et des écosystèmes anthropisés (ADAGE), lancé à l'initiative de l'Agence Nationale de Recherche (ANR) et dont les résultats devraient être disponibles d'ici 2010, a pour objectif d'identifier et de mutualiser les besoins d'études et de recherche notamment sur les impacts du changement climatique sur l'agriculture et son adaptation.

- Lancer une réflexion globale et un effort d'anticipation sur les questions de disponibilité et des usages de l'eau devra être au centre des recherches à venir, notamment pour des aménagements conçus pour servir 20, 50 ans, voire plus¹¹⁵. L'observation des aspects excès/non excès d'eau méritera notamment d'être creusée (par exemple dans le Sud-ouest, le changement climatique pourrait diminuer la période d'excès d'eau et donc rendre les cultures d'hiver possibles). Les auteurs de la première modélisation de STICS vigne proposent des pistes d'études approfondies sur l'efficacité de l'utilisation de l'eau pour différents cépages par diverses voies : une sélection de clones les plus résistants à la sécheresse des cépages acceptés dans les AOC, la recherche de ce type de caractéristiques dans les cépages secondaires de chaque région (cépages à faible intérêt économique actuel, étude de l'utilisation de différentes combinaisons porte-greffe/cépages)¹¹⁶. Il conviendra également de considérer l'impact du changement climatique sur la bilan hydrique P/ETP ou ETP-P de mai à août ou septembre : celui-ci est très insuffisamment pris en compte dans les prévisions¹¹⁷.
- Prendre en compte l'aspect azote et l'utilisation d'intrants minéraux : ce sujet devient crucial en contexte de changement climatique. Ce dernier favorise la minéralisation des sols et donc une meilleure utilisation des intrants minéraux et pourrait donc être bénéfique à l'agriculture biologique. Or cet aspect de la loi de réponse de la minéralisation à la température reste controversé et mériterait de plus amples travaux de recherche¹¹⁸.
- Se préoccuper des impacts sur la qualité autant que des aspects quantitatifs
- Avancer dans la question de l'apport en CO₂ et de son impact sur les rendements des végétaux : bien que largement étudiée depuis les années 1990, celle-ci reste polémique et il conviendrait d'en vérifier l'effet par de nouvelles études¹¹⁹.
- Elaborer progressivement des approches affinées des prévisions par région et par type de système agricole pour que les décisions et orientations prises actuellement soient compatibles avec les évolutions imposées par le climat.
- Poursuivre et affiner les travaux en cours sur les aspects économiques des impacts et du coût de l'adaptation au changement climatique¹²⁰. C'est d'ailleurs l'une des orientations proposées par le Livre Blanc de la Commission Européenne sur l'adaptation au changement climatique¹²¹.

¹¹⁵ Communication F. Lelièvre

¹¹⁶ García de Cortázar-Atauri, 2007

¹¹⁷ Communication F. Lelièvre

¹¹⁸ Communication N. Brisson

¹¹⁹ Communication F. Ruget

¹²⁰ Communication B. Seguin

¹²¹ Commission Européenne, 2009

- Intégrer les conséquences environnementales dans le champ des impacts à prendre en compte, notamment le phénomène de rétroaction changement climatique/effet de serre¹²². Il convient alors d'analyser la faisabilité et les coûts d'une intervention combinant ces deux registres¹²³.
- Collaborer avec d'autres pays faisant face aux mêmes problèmes d'adaptation et accroître les analyses selon des gradients nord-sud avec nos voisins du sud est également un axe important pour chacune des filières étudiées¹²⁴. Dans cette perspective, mais sur un champ plus large que celui de l'agriculture, on peut citer la Convention Alpine qui réunit huit pays dont la caractéristique commune est celle d'avoir une partie de leur territoire respectif dans l'arc alpin. L'objectif de la Convention est de mener une réflexion commune et d'engager une politique coordonnée pour faire face aux grands défis de développement durable auxquels le milieu alpin est confronté. L'adaptation au changement climatique est l'un d'eux¹²⁵. La Déclaration sur les changements climatiques dans les Alpes, dite Déclaration d'Alpbach, adoptée en novembre 2006 par la IXe Conférence alpine, prescrit l'élaboration d'un plan d'action qui devra être mis en œuvre par les pays alpins et la Communauté européenne.
- Prendre en compte le degré d'aversion au risque des exploitants agricoles, de façon à prédire les comportements d'adaptation attendus si l'incertitude sur le climat devient plus importante¹²⁶. L'incertitude pourrait en effet constituer un obstacle de taille à l'action¹²⁷.
- Poser la question fondamentale de la planification de l'adaptation¹²⁸ : l'adaptation des écotypes devant *a priori* se faire par remontée d'écotypes plus méridionaux dans les milieux naturels (prairies, forêt), faut-il le favoriser ou laisser la nature s'adapter à son rythme ?
- Prévoir dans les financements publics de la recherche en matière d'adaptation de l'agriculture au changement climatique, une *partie* consacrée aux mises à jour des résultats passés¹²⁹.
- Continuer de faire évoluer les mécanismes d'assurance en fonction de l'évolution des risques climatiques : dans cette perspective, la notion de « calamité agricole » devenue évolutive et la référence servant à la détermination des pertes et à l'indemnisation doivent continuer d'évoluer au fil du temps¹³⁰ : il faudra notamment étudier et faire évoluer les niveaux de sécheresse seuils en dessous desquels on indemnise¹³¹. Par ailleurs, il faudra observer de plus près la pertinence des assurances « revenu » ou des assurances « marché » selon les aléas climatiques et les filières. L'approche en termes de filière devient en effet urgente.

¹²² Seguin, 2002

¹²³ Aubert *et al.*, 2009

¹²⁴ Communications J.-M. Legave, F. Lelièvre

¹²⁵ Pour plus d'information, voir : <http://www.alpconv.org>

¹²⁶ D4E / ONERC, 2008

¹²⁷ Sfez et Cauquelin, 2007

¹²⁸ Communication F. Lelièvre

¹²⁹ Communication N. Brisson

¹³⁰ Les pertes sont calculées à partir d'un barème établi au niveau départemental qui prend en compte la moyenne des rendements des cinq années passées dont sont retranchées les deux années avec un rendement extrême

¹³¹ Communication F. Lelièvre

- Améliorer les connaissances sur les conséquences du changement climatique sur l'érosion terres arables.
- Améliorer la compréhension des impacts du changement climatique sur les pollinisateurs.
- Poursuivre les recherches sur l'évolution des parasites notamment dans un contexte de diminution des insecticides autorisés, afin d'anticiper les futurs moyens de lutte. Notons qu'un travail de thèse sur le sujet a débuté en décembre 2008 à l'INRA-Avignon. Il sera utile d'entreprendre des travaux de recherche également sur l'évolution des maladies et adventices. On dispose de très peu de références à ce jour en France et il pourrait éventuellement être intéressant de se pencher sur des exemples étrangers, notamment dans des pays de latitudes méridionales.
- Mettre en place de réseaux de surveillance des maladies pathogènes et vecteurs
- Favoriser les relations et l'interconnexion entre chercheurs et monde professionnel - par le biais des instituts techniques - afin d'assurer un transfert des connaissances pour permettre aux agriculteurs de s'accoutumer aux nouvelles données liées au changement climatique.

Les personnes interrogées ont par ailleurs cerné des besoins de recherche spécifiques à chaque filière.

I.8.1 Grandes cultures

En matière de grandes cultures, la communauté scientifique a concentré son attention sur les grandes cultures jusqu'alors « rentables » telles que le blé, le maïs ou le riz. Il semble nécessaire d'axer les recherches génétiques sur la *performance des cultures dites « orphelines »*. Il serait intéressant de développer des variétés de sorgho rentables même dans des conditions difficiles de sécheresse. Or les sommes à investir sont importantes. La réalisation de tests sur des variétés existantes voire anciennes pour échapper au stress hydrique notamment (esquive) constitue un autre axe de travail. D'anciens travaux de recherche existent pour prévoir l'implantation géographique des cultures : il s'agit désormais de les réactiver¹³².

Plus généralement à l'échelle de la parcelle, il s'agit d'adopter une approche systémique consistant à observer l'intérêt de la rotation des cultures céréalières (notamment selon l'état hydrique du sol au moment du semis). De même, pour une meilleure adaptation des agriculteurs, il s'agit de remettre au goût du jour des études en matière d'agroclimatologie qui intègrent la variabilité interannuelle permettant d'anticiper les changements de pratiques culturelles¹³³, ce qui permettrait notamment de mettre en parallèle l'évolution du calendrier des semis avec celle du calendrier des pluies. Sur cette question précise de l'avancée des dates de semis, les problèmes de tassement du sol et de ressuyage (particulièrement pour les cultures de printemps telles que le maïs) devront être pris en compte. Etant donné le manque d'information sur cette question, des études complémentaires en agroclimatologie s'imposent.

I.8.2 Prairies

Pour les prairies semées, la nécessité de proposer des variétés à caractère de plus en plus méridional impose de faire varier le catalogue français et européen des variétés fourragères. Par rapport aux variétés actuelles, il faut progresser en résistance à la

¹³² Communication N. Brisson

¹³³ Communication N. Brisson

sécheresse en été, en capacité de croissance hivernale aux basses températures et en efficacité d'utilisation de l'eau. Ce type de matériel, très développé en Australie, plus récemment en Nouvelle-Zélande, au sud des Etats-Unis ou encore en Argentine, est quasi absent du catalogue français et européen des variétés fourragères¹³⁴.

En matière d'adaptation aux impacts sur le bétail, les systèmes d'alimentation doivent être revus pour intégrer la prise en compte de sécheresses de plus en plus fréquentes et longues, en favorisant divers moyens de sécurisation ou de compensation. Une réflexion sur les notions de confort estival des bâtiments d'élevage est également nécessaire¹³⁵.

Une réflexion serait enfin à mener sur la sélection animale avec adaptation des systèmes.

I.8.3 Viticulture

La question de l'impact des changements climatiques sur la qualité du raisin et du vin est un axe de recherche essentiel en France, avec un besoin croissant de plus de données expérimentales sur le lien température/qualité¹³⁶. Des travaux pourraient être menés pour mettre en relation les indicateurs de l'état de la plante avec les différentes composantes de la qualité¹³⁷. La conservation du savoir-faire dans la création de variétés doit rester une stratégie globale¹³⁸. Il s'avère par ailleurs indispensable, au dire des experts de la filière viticole, de régionaliser les questions agricoles et surtout viticoles et d'adapter le discours quant aux impacts et à l'adaptation à chaque région.

Enfin, il serait intéressant de prendre en compte la particularité du vin dans les modèles économiques, qui tient en son caractère convivial et culturel : le comportement et la logique des consommateurs devraient être considérés, ceux-ci diffèrent en effet de lorsqu'il s'agit d'un produit purement alimentaire.

¹³⁴ Lelièvre et Volaire, 2009

¹³⁵ Communication F. Lelièvre, Climfourrel

¹³⁶ Communications E. Duchêne ; B. Seguin

¹³⁷ García de Cortázar-Atauri, 2007).

¹³⁸ Communication E. Duchêne

II Rapport du Groupe Forêt

II.1 Introduction

Ce document intègre des éléments d'analyse sur la forêt (valeurs de la forêt et impacts du changement climatique) fondée sur une revue de la littérature et complète le rapport de la phase 1 établi par l'ensemble des groupes de l'étude MEEDDM en 2008. Il présente également un premier chiffrage des coûts des impacts du changement climatique sur les forêts métropolitaines.

II.1.1 Mission et composition du groupe de travail

II.1.1.1 Composition et modalités de travail

Les réflexions sur la forêt ont été menées en étroite collaboration avec le MAAP et avec certains groupes thématiques de l'étude MEEDDM, étant donné les fortes interactions de la forêt avec notamment les risques naturels, l'énergie et la biodiversité. Le choix a également été fait de se fonder sur l'expertise française sur l'impact du changement climatique et les forêts par l'organisation d'un séminaire fin mars 2009 (liste des participants en Annexe D.6).

II.1.1.2 Objectifs du séminaire

Les principaux objectifs du séminaire ont été d'identifier les éléments à prendre en compte pour établir les scénarios : impacts principaux, adaptations planifiées, adaptations spontanées ; les horizons de temps possibles et leur déclinaison selon les scénarios A2 et B2.

II.1.2 Synthèse et résultats

Avec ses fonctions multiples et comme interface à de nombreux enjeux, la forêt est souvent mal connue, notamment en termes d'évaluation économique. Les incertitudes sur les impacts du changement climatique, les différences régionales, leurs interactions et coûts, rendent donc l'exercice particulièrement délicat pour le secteur forestier.

La quantification et les scénarios proposés sont donc volontairement simples et fondés sur le critère de productivité des forêts (et donc les volumes de bois) selon deux horizons de temps : le moyen terme avec une hausse du taux moyen de croissance des arbres (2030 pour A2, 2050 pour B2) et le long-terme (jusqu'en 2100) avec une baisse de ce taux. Sur le moyen terme, les impacts du changement climatique sont favorables puisque n'est pris en compte que l'effet volume de bois à prix constants (niveaux actuels), tandis que le long-terme paraît plus défavorable avec des coûts plus importants et des recettes potentielles moindres. Le chiffrage à 2100 n'a pas été réalisé du fait des incertitudes encore plus grandes à cet horizon.

Selon le scénario « changement climatique et productivité des forêts », sur le moyen terme, la production brute (accroissement annuel) supplémentaire atteindrait en fin de période près de 30 millions de m³ (dont 70% en bois d'œuvre), soit des recettes potentielles cumulées sur cette période (à prix constants) de +3,1 milliards d'euros selon A2 (jusqu'à 2030) et le double pour B2 du fait d'une période d'occurrence plus longue (jusqu'à 2050).

Le second scénario « valorisation + » est une variante du scénario précédent. On introduit des volumes récoltés supplémentaires en lien avec les objectifs assignés à la

forêt à 2020¹³⁹, ainsi que les volumes susceptibles d'être consommés par les projets CRE2 bois. Ce scénario traduit de façon implicite une mesure sans regret car plus grande est la récolte, plus les risques associés au changement climatique diminuent.

L'ensemble de ces gains pourront toutefois être modérés voire annulés par des pertes importantes liées à une augmentation des dépenses de prévention contre les incendies, à une exposition des peuplements à des tempêtes plus fréquentes et plus fortes, à une augmentation de la fréquence des sécheresses et des incendies. Chacun de ces éléments peut engendrer des dépenses ou des pertes de plusieurs centaines de millions d'euros.

Les travaux en cours et à venir tant en recherche fondamentale qu'en recherche appliquée permettront d'étendre, au fur et à mesure, les impacts et mesures d'adaptation qui pourront être pris en compte dans les évaluations économiques et d'aller au-delà de l'exercice de style ici proposé.

II.2 Les valeurs de la forêt française

Les activités liées à la forêt sont multiples et peuvent être décomposées en deux groupes : celles qui sont liées au bois et sont organisées en filière ; celles qui ne sont pas liées au bois¹⁴⁰.

La forêt produit des biens et des services multiples. Certains comme le bois sont marchands, d'autres, comme la fourniture d'un espace de détente ou la protection des milieux et de la biodiversité, ne le sont généralement pas. Il est possible d'associer des valeurs monétaires à un grand nombre de services qui ne font pas l'objet de vente par différentes méthodes (établissement d'un prix virtuel par un prix d'un produit de substitution, par enquête, par un prix de revient, ...)¹⁴¹. Le travail mené dans le cadre du groupe Biodiversité propose un certain nombre de valeurs pour des services non marchands fournis par la forêt. Si une réflexion sur l'évaluation de ces services est présentée ici, le lecteur est invité à se reporter au chapitre Biodiversité pour des éléments plus détaillés.

II.2.1 Evaluation des biens et services commercialisés

II.2.1.1 La valeur liée à la production du bois

Des prix de marché sont attachés au bois commercialisé. Les coûts de récolte, d'extraction et de transport doivent être déduits pour arriver à un prix résiduel¹⁴² pour le bois sur pied dans la forêt. Les valeurs totales des bois en forêts sont calculées en appliquant ces prix unitaires aux quantités qui pourraient être récoltées.

La production de bois reste la principale fonction marchande des espaces forestiers. Le bois issu des forêts français alimente en matière première l'industrie du bois et du papier, ainsi qu'une (auto) consommation de bois de feu qui ne fait pas l'objet d'une

¹³⁹ Directive EnR, Grenelle de l'Environnement, Assises de la Forêt

¹⁴⁰ Peyron, Ibanez et Couture, 2004

¹⁴¹ Gregersen *et al.*, 1997

¹⁴² Le bois en forêt a une valeur par son utilisation. Afin d'estimer à rebours la valeur du bois sur pied, on estime traditionnellement un prix résiduel en enlevant du prix rendu unité de transformation, les coûts de production (transport et exploitation). Dans cette approche, la valeur du bois sur pied est déduite de la valeur de son usage. Une forêt pouvant produire des bois de qualité a ainsi une valeur plus importante qu'une forêt avec des bois de moindre qualité.

commercialisation en bonne et due forme. Comme le souligne le rapport du CAS (2009), le MAP/IFN (2006) donne une valeur annuelle après exploitation de 1,68 milliard d'euros pour le bois commercialisé dans la période 1998-2002¹⁴³. En valorisant les volumes autoconsommés (22 millions de m³) au prix du bois de feu, la valeur totale de la production atteint alors 2,4 milliards d'euros. Ces valeurs intègrent des coûts d'exploitation pouvant être estimés de 20 à 25€/m³. Dès lors, en utilisant un prix moyen **sur pied** de 24,9€/m³ pour le bois commercialisé et de 8,2€/m³ pour le bois non commercialisé¹⁴⁴, la production totale est estimée à 1,13 milliard d'euros.

Les prix du bois sur pied financent les coûts de sylviculture et sont souvent des prix résiduels. Ce point met en évidence l'importance de la forêt comme support d'une activité économique. En plus de la sylviculture et l'exploitation forestière, la forêt permet d'alimenter une industrie de première et deuxième transformation du bois (scieries, papeteries, industries des meubles...). Ces activités représentent 173 000 emplois salariés et participent à hauteur d'environ 1% à la création de richesse nationale. Toutefois, elles utilisent le bois produit en France mais aussi du bois importé, la balance commerciale de la France dans le secteur bois¹⁴⁵-papiers-cartons étant négative (de -6,3 milliards d'euros en 2008). Ceci ne permet pas d'établir un lien direct entre l'intensité de ces activités et l'importance de la forêt en France.

II.2.1.2 Produits forestiers non ligneux commercialisés

Les produits forestiers non ligneux commercialisés représentent divers biens matériels autres que le bois, tirés des forêts et échangés ou vendus - fruits, plantes médicinales, fibres, végétaux à vocation décorative, produits de la cueillette, apiculture, etc.¹⁴⁶. Pour ces produits et ces quantités produites pour la vente, l'évaluation peut reposer sur les prix du marché et suivre fidèlement la procédure décrite pour le bois. Le potentiel en produits forestiers non ligneux est important et diversifié et leur valeur non négligeable. Par exemple, les menus produits forestiers vendus par l'ONF (par exemple...) et la cueillette sont évalués respectivement à 9 et 85 millions d'euros¹⁴⁷. Ainsi, sans atteindre l'importance des ventes de bois, ces produits ne sont pas négligeables dans la production marchande de la forêt.

II.2.2 Rôle environnemental de la forêt

II.2.2.1 La séquestration du carbone au cœur des enjeux

La mise en évidence, grâce au marché des droits d'émission, d'une valeur monétaire de ce service rendu par la forêt se traduit à terme par le développement d'activités économiques autour de cette fonction.

La valeur que représente le maintien ou l'aménagement des forêts en tant que puits de carbone devrait être comparée à l'efficacité des autres moyens de piéger ou de stocker le carbone (parmi lesquels le remplacement de la forêt par des plantations ou des cultures capables d'absorber le carbone, ou la plantation compensatrice d'espèces à croissance rapide en un autre lieu) - et aux bénéfiques auxquels on renonce en n'exploitant pas d'autres ressources, comme le bois.

¹⁴³ Avec une valeur moyenne de 44,2€/m³ (55,8€/m³ pour le bois d'œuvre, 20,8€/m³ pour le bois d'industrie, 32,325€/m³ pour le bois de feu) appliquée à un volume de 38 millions de m³.

¹⁴⁴ Montagné et Niedzweidz, 2007

¹⁴⁵ Dont meubles et sièges en bois (Agreste Conjoncture, 2009, Avril, n°2/4).

¹⁴⁶ Gregersen *et al.*, 1997

¹⁴⁷ Berger et Peyron, 2005

Pour la fonction de fixation du carbone, le rapport du CAS (2009) propose une valeur de 115€/ha/an et une valeur comprise entre 207 et 414€/ha/an pour la fonction de stockage du carbone¹⁴⁸.

II.2.2.2 La préservation de la biodiversité

La conservation de la diversité biologique¹⁴⁹ contribue à renforcer la capacité d'adaptation des écosystèmes et leur stabilité, à améliorer l'habitat et à éviter la perte de matériel génétique potentiellement précieux à l'avenir. Au niveau des espèces, une approche hédonique peut être adoptée pour établir la valeur attribuable à la conservation de la banque de gènes des principales plantes cultivées. Elle peut être fixée par référence à la valeur des espèces actuellement utilisées commercialement, parmi toute la gamme des espèces. Dans une moindre mesure qu'en agriculture, la valeur des améliorations génétiques déjà obtenues par création variétale peut aussi être prise en compte. Les coûts supportés par les propriétaires publics et privés pour conserver et développer la banque de gènes présente dans les peuplements français sont élevés et difficiles à chiffrer.

De plus, bien qu'il y ait des exemples de produits médicaux importants reposant sur des espèces forestières sauvages, il est quasiment impossible d'attribuer des valeurs *ex ante* à des propriétés ou des produits qui n'ont pas encore été identifiés. Etant donné que des produits potentiellement utiles n'acquièrent une valeur appréciable qu'après la mise en place de processus commerciaux de production dans un contexte agricole ou industriel contrôlé, on peut se demander quelle part de cette valeur finale doit être attribuée à ses origines forestières.

Ce problème tend à renforcer la valeur d'existence des forêts - celle que les populations attachent à leur pérennité, indépendamment des valeurs des utilisations particulières. Pour évaluer ces dernières, on cherche par divers moyens à estimer la disposition à payer.

A titre d'exemple, une enquête axée sur le consentement à payer indique que les Français seraient prêts à payer 15,2 euros par ménage et par an pour contribuer au maintien de la biodiversité de la forêt. En multipliant cette somme par le nombre de ménages français, on obtient 364 millions d'euros par an, soit 22,8 euros par hectare¹⁵⁰.

II.2.2.3 La protection contre l'érosion et les avalanches, la régulation hydrologique

Les changements survenant dans le couvert forestier peuvent avoir divers effets sur les fonctions des bassins versants : érosion du sol superficiel, modification et dérégulation des débits des cours d'eau en aval, inondations et sédimentation, moindre recharge hivernale des nappes hivernales, ainsi que les dégâts en résultant pour l'agriculture, les pêches, les retenues d'eau et la production d'électricité. En principe, nombre de ces effets peuvent être évalués en fonction de leur impact sur la production. On peut aussi évaluer les démarches comportant des dépenses préventives, pour éviter par exemple la perte de rendements agricoles due à l'érosion, aux inondations et aux pénuries d'eau. Ces dernières peuvent également avoir un impact fort sur les activités industrielles et touristiques. Il est aussi possible de comptabiliser les dépenses engagées par la construction d'ouvrages de prévention des crues, afin d'éviter ces dommages.

¹⁴⁸ Voir le Rapport du groupe Biodiversité pour plus de précisions.

¹⁴⁹ Pour plus d'informations concernant la biodiversité on peut se référer au travail du groupe « Biodiversité ».

¹⁵⁰ Berger et Peyron, 2005

En pratique, les difficultés et les coûts, auxquels il faut faire face pour suivre à la trace et quantifier ces chaînes complexes de causes et d'effets limitent les opérations d'évaluation à un examen des coûts et des avantages, mené uniquement jusqu'au point où des décisions peuvent être prises quant à la ligne de conduite à adopter. Dans la plupart des cas, cela revient à dire que l'accent a été mis sur les effets dans les hautes terres près de la zone où le couvert forestier doit être altéré. Alors que cette stratégie convient à une évaluation préalable de projet, elle fournit évidemment une vue d'ensemble des coûts et des avantages liés aux effets sur les bassins versants, qui est loin d'être complète.

Pour mettre en œuvre la politique de restauration de terrains en montagne (RTM) initiée dans la seconde moitié du XIX^{ème} siècle, l'Etat a progressivement acquis 380 000 hectares, souvent par expropriation après déclaration d'intérêt public. Les techniques de RTM mises au point allient des travaux de génie civil tels des barrages de correction torrentielle, les drainages, les ouvrages paravalanches, le soutènement de blocs rocheux au génie écologique, comme le reboisement et l'engazonnement.

Les terrains acquis font maintenant partie des forêts domaniales gérées par l'Office national des forêts. L'Etat y a reboisé 230 000 hectares et construit environ 30 000 ouvrages de protection. Ils atténuent significativement les risques naturels auxquels sont exposés 800 000 habitants permanents et un flux d'une dizaine de millions de touristes. Ces dispositifs protègent aussi les voies de communication et les sites industriels.

Un quart des forêts françaises joue un rôle de protection contre l'érosion et les avalanches. Il s'agit notamment des surfaces boisées situées sur des pentes de plus de 30% ou à plus de 1 500 mètres d'altitude. Un budget annuel de 15,5 millions d'euros est attribué aux opérations de restauration des terrains de montagne. Ce montant représente une valeur annuelle minimale pour ce type de services rendus par la forêt. Enfin, sans aucune évaluation monétaire, la fonction de maintien de la qualité des eaux par les forêts est recensée sur près de 1,4 million d'hectares.

II.2.2.4 Des activités récréatives multiples

L'évaluation des valeurs récréatives dans des zones forestières exige une approche faisant intervenir la « disposition à payer ». Les méthodes du coût du voyage et de l'évaluation contingente ont été toutes les deux utilisées. La première est limitée, car elle ne saisit qu'une partie de la valeur pour l'utilisateur. Le point faible de la deuxième est le postulat selon lequel l'indication donnée par les gens quant au prix qu'ils seraient disposés à payer reflète rigoureusement ce qu'ils dépenseraient réellement pour profiter de cette activité récréative.

La forêt permet également l'exercice d'activités récréatives telles que la randonnée, la chasse (96 millions d'euros¹⁵¹), la cueillette, ...

La prise en compte des données fournit un indicateur de la pression du public sur les espaces boisés, mais aussi de l'intérêt porté par les Français aux services engendrés par les forêts. A titre d'exemple, une évaluation contingente a été menée, afin d'évaluer le consentement à payer pour remettre en état la forêt de Fontainebleau. Le prix du consentement à payer, par les personnes s'étant déclarées disposées à apporter leur soutien, est variable selon la méthode de calcul retenue. Si on ne tient pas compte des valeurs nulles (refus de payer), on obtient en moyenne : 53€ pour un supplément d'impôts, 55€ pour un don et enfin un droit d'entrée moyen de 3€¹⁵². Le rapport du CAS

¹⁵¹ Berger et Peyron, 2005

¹⁵² Maresca *et al.*, 2008

(2009) fait quant à lui état d'une valeur comprise entre 0 et 1000€/ha/an pour les fonctions récréatives de la forêt (promenades – hors cueillette et chasse)¹⁵³.

II.2.3 Conclusion

La multifonctionnalité des forêts doit être un sujet de préoccupation centrale lorsqu'il s'agit d'évaluer les avantages et les inconvénients d'un choix de gestion de la forêt ou d'aménagement du territoire qui la concerne. Bien que cette multifonctionnalité contribue à la « richesse » des forêts françaises, elle constitue un problème central lorsqu'il s'agit de chiffrer l'ensemble des biens et services que procure la forêt. Toutefois, cette réflexion, même si elle repose, compte-tenu des données disponibles et des méthodes d'évaluation, sur une agrégation de valeurs de nature différente (revenus, valeur ajoutée, surplus), se révèle utile en matière d'évaluation de la forêt française et semble démontrer que les biens et services marchands représentent seulement une fraction de la valeur économique totale¹⁵⁴. Une première évaluation de certains services non marchands fournis par la forêt est proposée dans le rapport Biodiversité.

II.3 Les impacts du changement climatique sur la forêt

Ces impacts peuvent être déclinés en deux catégories :

- L'influence de la tendance moyenne du climat, qui peut être reliée directement au changement climatique ;
- Les aléas et événements extrêmes, qui sont liés plus au moins directement au changement climatique (incertitude plus grande sur les causes de ces phénomènes).

Un résumé est proposé en Annexe I.5, ainsi qu'un bilan sur les forêts françaises¹⁵⁵.

II.3.1 Influence de la tendance moyenne du climat

Il est fréquemment admis que le changement climatique augmentera la productivité des forêts et cela à travers trois mécanismes¹⁵⁶ : le réchauffement du climat, l'augmentation de la concentration du CO₂ et régionalement l'augmentation des précipitations. Toutefois, certains facteurs - la dynamique de nutriments, la composition d'espèces, les effets de la structure dynamique d'âge et les interactions biotiques, en particulier à travers des organismes du sol - peuvent modérer les effets directs du CO₂ ou du changement climatique sur la productivité nette d'un écosystème¹⁵⁷.

Le rythme et la nature du changement climatique seront significatifs, particulièrement pour ce qui est de la distribution des espèces. Le réchauffement de la température entraînera le déplacement progressif des espèces vers le nord (en l'absence de barrières naturelles) et des altitudes plus élevées. Les espèces vivant près des limites inférieures des aires de distribution actuelles et celles dont les mécanismes de dispersion sont limités seront sans doute les plus affectées par ces migrations et certaines disparaîtront peut-être, localement.

¹⁵³ Voir rapport Biodiversité pour plus de précisions.

¹⁵⁴ Berger et Peyron, 2005

¹⁵⁵ B. Roman-Amat, 2007

¹⁵⁶ GIEC, 2007

¹⁵⁷ GIEC, 2007

Bien qu'il soit difficile de faire des projections en raison de l'incertitude à l'égard du changement qui se produira sur la configuration des précipitations et dans l'intensité, on s'attend à ce que le risque et la gravité des feux de forêts augmentent et que les ravageurs forestiers se développent.

II.3.1.1 Impacts sur la croissance et sur la santé des forêts

Même de petits changements de température et de précipitations pourraient avoir d'importantes répercussions sur la croissance et la survie des forêts.

Les modèles climatiques prévoient que le réchauffement le plus marqué se produira pendant les mois d'hiver. Des températures plus élevées en hiver auront sur les forêts des effets positifs (allongement de la saison de végétation), mais aussi négatifs (allongement de la période d'exposition aux gelées automnales précoces ou printanières tardives, à fort impact sur la productivité forestière). Cette évolution devrait exposer les arbres aux risques de gelées « *tardives* » ou « *précoces* » à l'automne. On s'attend aussi à une floraison plus précoce, également exposée aux gelées tardives, ainsi qu'une maturité des graines avancée en fin de saison¹⁵⁸. L'impact de ces évolutions du climat sur le cortège des parasites des fleurs et des fruits n'a pas encore été étudié de manière approfondie.

Les changements de configuration des températures et des précipitations, occasionnés par le changement climatique auront des répercussions sur les conditions d'humidité régnant dans les forêts. Lorsque la température augmente, la perte d'eau par évapotranspiration augmente, ce qui rend les conditions plus sèches. Les températures plus chaudes tendent également à diminuer l'efficacité d'utilisation de l'eau par les plantes.

Les caractéristiques et la structure des classes d'âge des forêts sont déterminantes dans la manière dont les forêts réagissent aux changements des conditions d'humidité. Les peuplements mûrs ont des systèmes racinaires bien établis et sont, de ce fait, moins sensibles aux changements d'humidité que les jeunes peuplements¹⁵⁹. De plus, certaines espèces et variétés tolèrent davantage l'humidité ou la sécheresse que d'autres.

Par conséquent, la disponibilité en eau est le premier des facteurs du milieu qui contrôlent la croissance des arbres et donc la production de bois. La substitution d'essences actuelles par des essences plus méridionales, si elle se produisait, aurait à terme des conséquences importantes sur la production de bois des forêts françaises.

Les chercheurs reconnaissent généralement que des concentrations plus élevées de CO₂ améliorent le rendement de l'utilisation de l'eau par certaines plantes (dans ces circonstances, les plantes perdent donc moins d'eau par transpiration), mais les résultats obtenus varient en ce qui concerne les effets globaux sur la croissance des plantes.

Ainsi, les effets du changement climatique sur la croissance et la santé des forêts varieront suivant les régions et seront influencés par la composition des espèces, les conditions de l'endroit et le microclimat local (territoire).

¹⁵⁸ La hausse des températures hivernales augmentera peut-être la fréquence et la durée des périodes de dégel en plein hiver, ce qui aggravera les dommages aux pousses et le dépérissement terminal des arbres.

¹⁵⁹ DIACC, 2004

II.3.1.2 Impacts sur la migration des espèces d'arbres et le déplacement des écosystèmes

Le changement climatique pourrait engendrer des modifications de la distribution des espèces. Les espèces d'arbres vont tenter de s'adapter aux conditions nouvelles : en fonction des situations rencontrées, elles abandonneront et/ou coloniseront de nouveaux territoires. La question posée est de savoir si les espèces vont pouvoir migrer aussi vite que le climat va évoluer. Les futurs changements climatiques pourraient contrecarrer la capacité de reproduction et de dispersion de certaines espèces. D'autres stress, tels que les obstacles à la dispersion (fragmentation des habitats) et la concurrence des espèces exotiques, risquent de freiner la migration, tandis que les changements de rythme et de taux de production des semences pourraient limiter les taux de migration.

On émet généralement l'hypothèse qu'à mesure que le climat se réchauffera, les arbres migreront vers le nord et vers des altitudes plus élevées. Mais la température n'est pas le seul facteur à agir sur la distribution des espèces. Il ne faut pas considérer les changements de température isolément d'autres facteurs tels que notamment les caractéristiques du sol. La présence d'éléments nutritifs et les régimes des perturbations, peuvent jouer un rôle plus important que la température dans la future dynamique des écosystèmes.

Il importe de retenir que les espèces réagiront individuellement au changement climatique et que les écosystèmes ne se déplaceront pas comme des unités cohérentes. Les espèces les plus vulnérables seront sans doute celles qui ne tolèrent que de faibles écarts de température et qui se caractérisent par une croissance lente et des paramètres de dispersion limitatifs, tels que la lourdeur de leurs semences. La réaction différente des espèces aux émissions anthropiques pourrait également influencer sur leur capacité compétitive, ce qui risque d'avoir des répercussions considérables sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers. Le lecteur est invité à se reporter au chapitre Biodiversité pour plus de précisions sur les migrations des espèces et le changement climatique.

On peut envisager que l'évolution des espèces en place, ou l'arrivée spontanée de nouvelles espèces adaptées aux nouvelles conditions de milieu ne pourra pas se faire en temps voulu, compte tenu de la rapidité du changement climatique, et qu'il faudrait alors que des plantations interviennent, pour installer des arbres génétiquement adaptés. Si ce risque existe, ne faudrait-il pas l'anticiper, dès à présent, dans les traitements (au sens forestier) adoptés dans les forêts¹⁶⁰ ?

II.3.2 Aléas/événements extrêmes

Chaque année, les forêts subissent d'importantes perturbations causées par les incendies, les insectes et les maladies. Ces perturbations sont souvent fortement influencées par les conditions météorologiques et on s'attend généralement à ce qu'elles s'amplifient à l'avenir sous l'effet du changement climatique prévu.

Il est probable que le réchauffement des températures agrandira les zones d'activité des ravageurs forestiers, raccourcira leurs cycles de prolifération et augmentera leur taux de survie. Les insectes ont des cycles de vie courts, une grande mobilité et une immense capacité de reproduction, ce qui leur permet de s'adapter rapidement à de nouvelles conditions et de tirer parti de nouvelles possibilités. Il est vraisemblable que l'interaction des perturbations produira des effets cumulatifs. Par exemple, une augmentation du stress de sécheresse pourrait augmenter la fréquence et l'ampleur des invasions d'insectes et des épidémies. De même, une plus forte défoliation due à l'invasion d'insectes pourrait augmenter le risque de feux de friches. En plus des dommages causés

¹⁶⁰ Communication Y. Poss

aux arbres, les changements de régime des perturbations auraient des conséquences à long terme sur les écosystèmes forestiers, comme la modification de la structure d'âge et de la composition des populations végétales.

II.3.2.1 Impacts sur les perturbations

Le risque d'incendie recouvre à la fois : l'aléa défini comme « la probabilité qu'un phénomène naturel d'intensité donnée se produise en un lieu donné » et la vulnérabilité qui représentent les conséquences particulières découlant de cet événement¹⁶¹.

Le phénomène des feux de forêt est naturel et bénéfique à la santé de nombreux écosystèmes forestiers. En fait, sans feux de forêt, certaines espèces d'arbres et certains écosystèmes seraient condamnés. Mais les feux créent avant tout d'énormes dommages aux forêts et sont une menace pour la sécurité des biens et des personnes.

La baisse des précipitations et l'augmentation de la température auront un impact sur l'aléa. Ces facteurs vont notamment avoir un impact sur la diminution de la teneur en eau des végétaux et donc sur l'augmentation de leur inflammabilité et leur combustibilité. Une augmentation du risque d'incendie est donc à prévoir.

Le type de végétation influencera les changements de fréquence et d'intensité des futurs feux¹⁶². Et la migration des espèces, en réaction au changement climatique, modifiera également le comportement des feux en modifiant les types de combustibles. Parmi les autres facteurs qui influenceront sur les saisons des feux, citons le vent, les conditions d'humidité avant les feux et les mécanismes de gestion des feux. Il est également à noter que, en montagne, sous climat méditerranéen, l'augmentation du risque d'incendie pourrait conduire à une proportion plus élevée de sol nu et donc à un risque d'érosion plus important.

II.3.2.2 Prolifération des insectes

Dans certaines régions, la défoliation opérée par les insectes nuisibles constitue l'impact le plus important sur la croissance des arbres. La réaction des insectes au changement climatique sera sans doute rapide, notamment en fonction de l'évolution des conditions hivernales (augmentation des températures minimales), au point que de petits changements climatiques pourront entraîner des répercussions importantes. Le changement climatique, par son intensité et sa vitesse, pourrait donc constituer une perturbation plutôt favorable aux parasites du fait de leurs grandes capacités d'adaptation¹⁶³. Le lecteur est invité à se reporter au chapitre Biodiversité pour plus de précisions sur les relations insectes-plantes.

Les températures plus élevées seront généralement bénéfiques aux insectes, car elles accéléreront leur développement, étendront leurs zones d'activité et augmenteront leur taux de survie à l'hiver. Toutefois, l'augmentation de la fréquence de phénomènes météorologiques extrêmes pourrait contrebalancer cette augmentation.

Le changement climatique se répercutera peut-être indirectement sur la perturbation des forêts par les insectes nuisibles. Par exemple, des conditions de sécheresse prolongées -

¹⁶¹ Legay, 2007

¹⁶² Les travaux en cours de la mission interministérielle sur l'extension des zones sensibles aux incendies de forêts aux horizons 2030-2050 dont le rapport devrait être finalisé fin 2009 permettront d'avancer sur ce domaine. Une synthèse est proposée en Annexe I.8.

¹⁶³ http://www.inra.fr/presse/processionnaire_du_pin_et_changement_climatique

tout comme l'instabilité des écosystèmes causée par la migration des espèces - accroîtront peut-être la sensibilité des arbres à la défoliation par les insectes. Et les augmentations prévues des émissions anthropiques (de CO₂ et d'O₃, par exemple) affaibliront encore la défense des arbres contre les insectes et les maladies. L'incidence du changement climatique sur la prolifération des insectes se traduira par la modification de l'abondance des populations de leurs ennemis. Par exemple, un temps plus chaud aura des répercussions différentes sur les taux de développement des hôtes et des parasitoïdes, de même que sur la gamme des prédateurs et des proies des insectes¹⁶⁴. Une telle situation pourrait modifier la dynamique des écosystèmes en réduisant les contrôles biologiques qui s'exercent sur certaines populations d'insectes nuisibles.

Il est probable qu'il n'y aura pas une évolution générale commune pour tous les pathogènes et insectes forestiers, certains risquent d'être favorisés, tandis que d'autres pourraient voir leur population diminuer.

Le réchauffement du climat peut permettre l'implantation en France de parasites (champignons, bactéries, virus, insectes, ...) actuellement inconnus ; des parasites non virulents peuvent le devenir. Par ailleurs, l'aire de répartition de certains des parasites déjà présents et limités par des seuils de température devrait s'étendre en suivant les isothermes : le réchauffement climatique pourrait alors augmenter la surface de la zone forestière touchée. Enfin la sensibilité des arbres à certains parasites peut augmenter en situation de stress, hydrique notamment. En tenant compte du fait que chaque ensemble parasite-hôte-milieu est spécifique, les risques sanitaires semblent être plutôt augmentés que diminués par le réchauffement climatique sous l'effet de trois phénomènes principaux : introduction de nouveaux parasites, extension de l'aire de présence (ou virulence) des parasites actuels, fort développement des parasites sur arbres stressés.



Carte 1 - Progression de la chenille processionnaire du pin (DSF-INRA, Rousselet et al., 2005)¹⁶⁵

II.3.2.3 Phénomènes météorologiques extrêmes

L'impact des phénomènes météorologiques extrêmes sur les forêts et le secteur de l'aménagement forestier a été clairement démontré lors des tempêtes Lothar et Martin des 26 et 27 décembre 1999 et Klaus du 24 janvier 2009, par exemple.

Des phénomènes ponctuels tels que les tornades et les rafales descendantes, ou des vents violents accompagnant les tempêtes peuvent également causer des dommages. Le

¹⁶⁴ DIACC, 2004

¹⁶⁵ cité par Riou-Nivert (2006).

fait qu'un arbre soit cassé net ou qu'il soit complètement déraciné par les vents violents dépend de paramètres tels que sa hauteur, le fait qu'il est vivant ou mort à ce moment-là et la densité de la forêt. Les phénomènes éoliens font parfois subir d'autres dommages aux forêts, comme les feux et la prolifération des insectes.

Notons que le réchauffement du climat peut favoriser les phénomènes éoliens violents, mais il existe une grande incertitude à cet égard. Il est toutefois certain que la vulnérabilité des forêts a fortement augmenté¹⁶⁶.

II.3.3 Les impacts économiques du changement climatique sur la forêt

Les impacts économiques se déclinent selon les catégories de valeur des forêts (biens et services marchands vs. biens non-marchands) et des chocs imputables au changement climatique.

II.3.3.1 Impacts économiques sur les biens et services marchands

Le fort stress des écosystèmes forestiers, conséquence du changement climatique, aura d'importantes incidences sur la productivité des forêts, ce qui pourrait modifier l'offre de bois sur le marché et les prix des différents produits¹⁶⁷.

Il n'existe pas pour l'instant d'analyse au niveau national de l'impact du changement climatique sur le secteur forestier.

Malgré les prédictions écologiques sur les espèces forestières sur pied et en distribution géographique, la plupart des études de marché sont centrées seulement sur les futurs changements de productivité de la forêt en excluant d'autres variables comme sa distribution, des activités non liées au bois, loisirs, gestion de l'air, gestion de l'eau, paysage, etc.

Les modèles utilisés pour mesurer l'impact économique potentiel du changement climatique (modèles d'optimisation sectorielle, d'équilibre général incluant des modules agricoles et/ou forestiers, cf. Annexe I.3) se différencient par leurs hypothèses de base concernant le mouvement des espèces forestières ou les interdépendances entre usages de terres.

Notons, que la prise en compte de la forêt « naturelle » dans un modèle économique représente le défi le plus important pour représenter l'allocation des terres. En effet, la forêt naturelle produit aussi des fruits, champignons, ... et est source de nombreuses aménités – ou services rendus par la forêt. Or tous ces services sont peu valorisés économiquement. Face à ces faibles valeurs économiques, le coût d'opportunité de la terre forestière peut être très élevé près des villes ou du fait des pressions agricoles. C'est pourquoi l'optimisation peut conduire à une suppression de la forêt pour utiliser la terre de manière « plus profitable »¹⁶⁸.

Les études disponibles sur l'impact économique de l'évolution de la productivité des essences projettent en général une diminution de la part de marché de l'Europe tempérée, sans augmentation de la tension sur le marché. Le message principal de ces études est qu'à l'horizon de la seconde moitié du XXI^{ème} siècle, l'offre globale de bois devrait augmenter, particulièrement dans les pays en développement, en Europe du Nord

¹⁶⁶ Riou-Nivert, 2008

¹⁶⁷ Irland *et al.*, 2001

¹⁶⁸ Mazas, 2007

et en Russie, aboutissant à une diminution du prix du bois et à une part de marché plus faible pour la production de l'Europe tempérée.

Ainsi, en Europe, la production de bois devrait se déplacer vers l'est. En Europe orientale, on s'attend à ce que la production de produits forestiers augmente considérablement dans l'avenir. Dans les pays d'Europe occidentale et notamment en France, le secteur forestier devrait continuer à se développer de manière à satisfaire toute une série d'objectifs plus généraux de nature à répondre à l'évolution des besoins de la société. Il est probable, que l'industrie bénéficiera d'un avantage comparatif dans la production de produits à forte valeur ajoutée et devrait continuer à mettre l'accent sur la technologie et le marketing¹⁶⁹. De plus, il est probable que le bois et les produits forestiers seront utilisés de façon rationnelle ; le recyclage et l'utilisation des déchets devraient donc se développer. Enfin, la promotion d'énergies renouvelables devrait favoriser une gestion forestière plus dynamique et, peut-être, la réintroduction de systèmes d'exploitation en taillis.

La logique dans la plupart des études est de réaliser l'estimation des évolutions de productivité d'une forêt. Cette variation signifiera un changement important dans les futurs stocks et récoltes et par conséquent des variations d'offre et de demande. La logique d'évaluation peut se faire selon le schéma suivant :

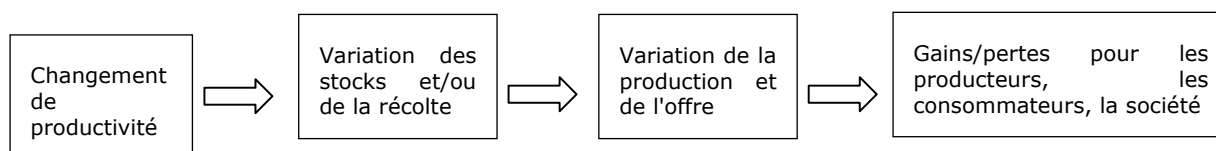


Figure 3 – Logique d'évaluation des coûts

Les impacts du changement climatique sur la sylviculture et un changement de la production (vers un usage plus grand des bioénergies par exemple) vont se traduire en impacts économiques et sociaux notamment par la relocalisation de certaines activités économiques forestières. Les effets redistributifs vont affecter les propriétaires, salariés, industriels, consommateurs, gouvernements, ...

II.3.3.2 Impacts économiques des chocs

Les chocs climatiques « brutaux » se traduisent par une perte de revenu pour les propriétaires forestiers, sous l'effet combiné¹⁷⁰ :

- De la destruction de tout ou partie des peuplements ;
- De la perte de valeur d'avenir des arbres sauvegardés, qui sont soit exploités avant l'optimum économique, soit laissés sur pied, mais pourront connaître un retard de croissance ;
- Du surcoût engendré par l'obligation de reconstituer le peuplement de manière anticipée ;
- Eventuellement, des pertes liées au déstockage massif de carbone ;

¹⁶⁹ FAO, 2005

¹⁷⁰ Lecocq, 2008

- Eventuellement, de la perte de valeur marchande des arbres sauvegardés et exploités, si l'augmentation massive de l'offre a entraîné une chute des prix¹⁷¹.

L'impact d'un choc climatique sur les marchés des produits bois et sur la filière dépend de l'amplitude du choc par rapport à la taille totale du marché. Toutefois, si la part du secteur forestier dans l'économie nationale reste du même ordre de grandeur qu'aujourd'hui (environ 1% de la valeur ajoutée nationale), l'impact direct d'un choc sur l'offre de bois sur l'économie nationale pourrait rester limité.

Aujourd'hui, le recensement, l'identification et l'estimation des coûts induits par les catastrophes naturelles présentent d'importantes lacunes. Les conséquences économiques à court et moyen terme des feux de forêt sont presque totalement ignorées, à l'exception de celles sur les récoltes de bois en Aquitaine¹⁷².

Les données disponibles sont principalement celles correspondant aux dépenses de protection et de prévention. A titre d'exemple, les dépenses de l'Etat ont été d'environ 130M€ pour les feux de forêt¹⁷³, dont 30M€ pour la prévention. Pour ce risque, celles-ci sont imputées sur des budgets relevant des ministres chargés de l'intérieur, de l'agriculture et de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer. Les dépenses sont partagées entre la prévention et la gestion des crises. Les données disponibles sur la dernière décennie font apparaître une stagnation en euros constants des crédits de l'Etat consacrés à la prévention, alors que les crédits affectés à la sécurité civile, donc à la gestion de crise, ont fortement augmenté¹⁷⁴. Les dépenses de l'Etat ne représentent probablement pas la partie principale des dépenses liées aux incendies de forêts, tant pour la prévention que pour la lutte. Une partie significative des crédits des collectivités locales est mobilisée pour la prévention et la lutte (notamment services départementaux d'incendies et de secours). Là où des associations syndicales de propriétaires sylvicoles sont constituées, une partie des travaux de prévention est prise en charge par les sylviculteurs. Rappelons également que les obligations légales de débroussaillage qui sont édictées en zone à risque de feux de forêt incombent aux particuliers et aux propriétaires d'infrastructures linéaires.

Les implications économiques d'une sécheresse (choc « mou ») sont encore mal connues, mais potentiellement très importantes. Ceci est dû au fait qu'une sécheresse¹⁷⁵ a à la fois des impacts de court terme (surmortalité, augmentation de la fréquence des incendies) et des impacts de moyen terme (réduction de la vitesse de croissance des peuplements, augmentation de la vulnérabilité des peuplements à d'autres types de chocs dans le futur, etc.)¹⁷⁶. Il existe donc une perte de valeur d'avenir des peuplements atteints dans leur croissance, une perte de valeur marchande des arbres dépérissants ou morts, un surcoût de reconstitution, un surcoût de gestion et un renforcement de la vulnérabilité des arbres et peuplements maintenus sur pied à un certain nombre de risques potentiels¹⁷⁷.

¹⁷¹ Lorsque l'effet prix est présent, le choc climatique affecte aussi les propriétaires forestiers non directement touchés par l'événement.

¹⁷² Cour des comptes, 2008

¹⁷³ Le rapport attendu fin 2009 de la mission interministérielle sur l'extension des zones sensibles aux incendies de forêts aux horizons 2030-2050, apportera des éclairages plus précis sur cette évaluation.

¹⁷⁴ Cour des comptes, 2008

¹⁷⁵ Lecture d'intérêt sur le sujet, Dossier spécial, Rendez-vous-technique (2006)

¹⁷⁶ Lecocq, 2008

¹⁷⁷ Peyron, Ibanez, Couture, 2004

II.3.3.3 Analyses des impacts économiques des biens non marchands

Biodiversité et services écologiques

Ce sont les pertes écologiques et de biodiversité qui sont les plus difficiles à quantifier monétairement. La valorisation de ces impacts peut faire appel à l'évaluation directe à partir des prix de marché et de l'évaluation indirecte à partir de l'appel aux marchés de substitution (coûts de remplacement, dépenses de protection, coûts de transport, prix hédonistes) ou aux marchés hypothétiques (évaluation contingente)¹⁷⁸. Dans la pratique, leur application au cas du changement climatique soulève un certain nombre de difficultés. Dans beaucoup de régions, les données manquent pour appliquer l'une ou l'autre de ces méthodes. De plus, la plupart des travaux disponibles correspondent bien souvent à des évaluations pour un écosystème et à un emplacement particulier¹⁷⁹.

Ce manque de valeurs est d'autant plus regrettable que la valeur totale des biens et services non marchands produits par les forêts françaises est au moins du même ordre de grandeur que la valeur totale des biens et services marchands produits par la forêt¹⁸⁰. La production de ces différents biens et services sera très probablement affectée par le changement climatique, en particulier stockage de carbone, biodiversité, qualité de l'eau, voire récréation et paysage¹⁸¹. Le carbone est particulièrement important car il commence à être valorisé – tout au moins au niveau des Etats dans le cadre du Protocole de Kyoto (dans lequel la quantité de carbone stocké dans certains écosystèmes forestiers compte dans les objectifs d'émissions nationaux) – et qu'il fait l'objet d'une « marchandisation » plus poussée. Les projets de séquestration du carbone dans la biomasse et les sols forestiers doivent ainsi tenir compte des impacts potentiels du changement climatique sur ces écosystèmes. Un exercice d'évaluation économique de certains services non marchands rendus par la forêt est proposé dans le chapitre Biodiversité.

Activités récréatives

L'évolution saisonnière de la demande d'activité récréative forestière est très sensible : la fréquentation est moyenne en été, forte au début de l'automne, faible en hiver. Ces variations s'observent tant sur le nombre de personnes qui se rendent en forêt que sur le nombre moyen de sorties par mois et par individu¹⁸².

Les effets du changement climatique peuvent être directs ou indirects :

- *Directs*, si l'on considère l'effet d'un changement des températures et/ou des précipitations sur la demande d'activité récréative « forestière » ;
- *Indirects*, si on fait référence aux changements de quantité et/ou qualité des ressources naturelles considérées dus au changement climatique¹⁸³.

Les conditions climatiques jouent un rôle essentiel sur la demande d'activités récréatives. C'est pourquoi, par exemple, en montagne - où le paysage joue un rôle prépondérant sur le tourisme - les terres situées plus bas et plus chaudes tendront à attirer plus de gens

¹⁷⁸ Les différentes méthodes de valorisation, et la méthodologie proposée par le CAS pour l'évaluation des services non marchands sont présentées en Annexes F.5 et F.6 (groupe Biodiversité).

¹⁷⁹ Ambrosi et Courtois, 2004

¹⁸⁰ Montagné et Niedzwiedz, 2007

¹⁸¹ Loomis et Crespi (1999) estiment que le changement climatique pourrait diminuer la valeur récréative de la forêt américaine de 1% à horizon 2060.

¹⁸² CREDOC, 1999

¹⁸³ Loomis et Crespi, 1999

que les terres plus élevées et froides. Par ailleurs, le changement climatique pourrait affecter le brouillard ainsi que la chute de feuillage et les couleurs d'automne¹⁸⁴.

L'une des rares études ayant tenté d'évaluer l'effet du changement climatique est celle de Loomis et Crespi (1999). Ayant identifié les déterminants (notamment ceux liés au climat concernant la concentration du CO₂, la hausse de la température et des précipitations) influençant la demande d'activité récréative aux Etats-Unis, ils ont estimé le nombre possibles de journées d'activité récréative perdues à l'horizon 2060. Les résultats montrent des pertes conséquentes liées au changement climatique.

II.3.4 Conclusion

L'évaluation des impacts économiques sur la forêt avec toutes ses conséquences directes et indirectes, la relation entre phénomènes, forêts, services et activités reste encore incertaine. La plupart des évaluations économiques se sont focalisées sur l'évolution du marché mondial du bois (par grandes zones régionales). Par contre, l'évaluation des impacts directs ou indirects sur les écosystèmes forestiers et sur des biens non-marchands est assez limitée, sans parler de la dimension éthique du problème (générations actuelles vs. générations futures, pays du Nord vs. Pays Sud).

La bonne mise en œuvre d'une évaluation des impacts économiques doit supposer une bonne prévision du tableau complet des effets du changement climatique en termes de mécanismes physiques.

II.4 L'adaptation dans la forêt

II.4.1 Les différentes dimensions de l'adaptation

La question pour les différents acteurs de la filière forestière est d'évaluer s'il est plus rentable d'adopter des mesures d'adaptation proactives *ex ante* malgré l'incertitude ou d'attendre que les impacts du changement climatique se manifestent et de réagir (adaptation réactive)¹⁸⁵. L'adaptation du secteur forestier pourrait prendre bien des formes : nouvelles technologies, introduction de nouvelles espèces d'arbres, déplacement des activités forestières¹⁸⁶, ... L'adaptation préventive, qui tient compte du changement climatique, semble particulièrement importante dans le cas de longues phases de rotation des cultures, car les espèces sélectionnées aujourd'hui doivent pouvoir non seulement résister aux futurs climats, mais croître dans ces nouvelles conditions. Bien que l'adaptation préventive vise à limiter les pertes dues au changement climatique, il est toutefois difficile de l'intégrer dans l'aménagement forestier car on ne sait pas quand, où et comment se produiront les changements.

L'aménagement des forêts a beaucoup d'influence sur la croissance, la santé et la composition de celles-ci. On considère généralement que les forêts aménagées sont moins vulnérables aux impacts du changement climatique que les autres en raison de leur capacité d'adaptation. De plus, les forêts aménagées ont des caractéristiques qui les rendent plus aptes à résister aux perturbations. Certaines activités d'aménagement peuvent réduire l'importance des dommages à long terme causés par des perturbations.

Le maintien de la santé et de la biodiversité des forêts constitue un mécanisme d'adaptation important. Les forêts aménagées en fonction de ces critères seraient moins

¹⁸⁴ Bloomfield et Hamburg, 1997

¹⁸⁵ Lecocq, 2008

¹⁸⁶ Irland *et al.*, 2001

vulnérables aux perturbations et, par conséquent, plus résilientes au changement climatique.

Dans certains cas, pour favoriser la conservation de la durabilité des forêts, les gestionnaires forestiers préconiseront la régénération des forêts, qui consiste à replanter des espèces indigènes ou à introduire de nouvelles espèces¹⁸⁷. Les gestionnaires forestiers peuvent également aider la migration des espèces en introduisant des essences soigneusement sélectionnées dans les régions situées au-delà de leurs aires de distribution actuelles.

En permettant la création de génotypes mieux adaptés à des conditions particulières telles que la sécheresse et résistant mieux à des menaces potentielles telles que la prolifération d'insectes et la propagation de maladies, la biotechnologie pourrait également jouer un rôle important dans l'adaptation au changement climatique.

De plus, « les pertes dues au dépérissement possible des forêts et à la modification des régimes d'inflammabilité et d'infestation par les insectes, ainsi qu'au stress de sécheresse dans certaines régions, risquent de mettre à contribution la capacité adaptative de l'industrie »¹⁸⁸. Là où la fréquence des feux augmenterait, la priorité de la protection demanderait des ajustements, afin que les incendies ne s'étendent pas. Le nombre croissant de feux influera sur les budgets, la dotation en personnel, les technologies utilisées, les besoins en équipement et les systèmes de surveillance et d'alerte.

L'ensemble de ces différentes mesures d'adaptation possibles aura des implications sociales, économiques et politiques. Comme chaque groupe percevra à sa manière les risques du changement climatique et sa capacité d'adaptation, les réactions au phénomène seront différentes. C'est pourquoi une des composantes importantes de l'adaptation consistera à déterminer qui devra être à l'initiative de l'adaptation et qui devra en supporter les coûts (industrie forestière, Etat, consommateurs).

II.4.2 Adaptation planifiée et adaptation spontanée en forêt

Les différentes mesures et actions identifiées par les experts consultés (séminaire de mars 2009 et autres retours, cf. Annexe) sont regroupés dans les deux tableaux suivants, selon leur caractère planifié ou spontané.

Les mesures de l'adaptation planifiée visent principalement à impliquer plus les propriétaires-gestionnaires, afin d'améliorer l'offre de bois. Ce thème, récurrent dans les réflexions sur la forêt et la filière bois en France, demande de mieux comprendre pourquoi les efforts des Centres Régionaux de la Propriété Forestière (CRPF) et de l'administration n'ont pas été plus efficaces et de proposer des arguments, des processus, des procédures, des mesures réglementaires ou législatives (acceptables par le corps social) qui permettrait de dépasser les blocages actuellement constatés¹⁸⁹.

Pour l'adaptation spontanée, des mesures sont déjà engagées par certains propriétaires-gestionnaires. A titre d'illustration, on peut citer à nouveau la Société Forestière qui, par un choix des essences et des techniques d'implantation et de sylviculture, cherche à

¹⁸⁷ De nombreux problèmes sont liés à l'utilisation d'espèces non indigènes, le plus important concernant les conséquences imprévisibles, comme l'infestation d'insectes ou la perte d'espèces indigènes due à de nouvelles interactions compétitives.

¹⁸⁸ Notons, de plus, que l'adoption de mesures dites « sans regret », restructurant le secteur industriel, pourra entraîner de réels bénéfices pour les industriels, au lieu de coûts. Lindner *et al.*, 2000, cité par DIACC (2004)

¹⁸⁹ Communication Y. Poss

répondre à la demande par la production de 1/ biomasse/bois¹⁹⁰ (courtes révolutions, forte vitesse de croissance), 2/ matériaux à bonne qualité technologique (bois de structure) de plus en plus orientés vers le résineux, 3/ bois de qualité esthétique ou ayant des valorisations particulières comme le merrain ou les piquets (plutôt avec des feuillus). L'adaptation spontanée introduit un acteur qui a été peu évoqué jusqu'à présent. Il s'agit des entreprises de l'industrie du bois.

Que ce soit pour l'adaptation planifiée ou l'adaptation spontanée, l'une des conclusions du séminaire de mars 2009 a été qu'il sera nécessaire de maintenir une certaine flexibilité dans la gestion de la forêt, afin de pouvoir répondre à des changements inattendus qui pourraient intervenir dans les décennies qui viennent (cf. stratégie d'adaptation vs. stratégie adaptative¹⁹¹).

Tableau 15 – Identification des adaptations planifiées selon les experts

Mesures	Cibles
Récolter plus : mesures pour récolter plus et conserver un stock forestier « raisonnable » (lien avec a, b, c, e)	Incitations/propriétaires-gestionnaires
Baisser l'âge d'exploitation/des rotations (a)	Incitations/propriétaires-gestionnaires
Choisir les essences adaptées (b, d, e)	Incitations/propriétaires-gestionnaires Recherche
Développer un système de suivi des impacts du CC (a, b, c, d)	Recherche
Spécialiser les territoires (multifonctionnel vs. spécialisation) (a, b, c, d)	Incitations/propriétaires-gestionnaires/population Recherche
Travailler sur la robustesse ¹⁹² /résistance des essences (génétique, amélioration) (b, d, e)	Recherche
Développer des normes et appliquer les mesures visant à favoriser l'usage du bois (notamment dans la construction)	Législateur et procédures de certification
Gérer les volumes supplémentaires issus d'aléas notamment tempêtes Transformation, stockage Autres solutions comme laisser une partie des bois sur place sous réserve qu'il n'y ait pas de risques d'incendie et de prolifération d'insectes	Incitations/propriétaires-gestionnaires (et utilisateurs de bois)
Modeler (extension et évolution) la gestion des aires protégées forestières	Législateur (droit) et propriétaires-gestionnaires (contractualisation)
Compléments aux discussions du séminaire	
Favoriser les migrations des essences par une gestion des régénérations en synergie avec les corridors de migration (planification spatiale adaptée et en favorisant la régénération naturelle assistée au profit des essences migrantes)	
Utiliser les aléas pour accélérer l'adaptation des forêts au changement climatique (reconstitution après incendies, tempêtes)	
Développer de nouvelles modalités de gestion des forêts de protection contre les risques naturels pour garantir la pérennité du boisement et sa production	
Renforcer et systématiser les mesures visant à réduire les autres agressions contre les écosystèmes forestiers fragilisés par le CC : gestion cynégétique exemplaire, protection des sols, fragmentation des massifs...	
Adapter l'industrie aux bois pouvant être produits par les forêts de demain (essences, caractéristiques, géographie...) dans le respect d'une préservation maximale des capacités écologiques des écosystèmes (objectif : réduire là aussi les agressions sur des écosystèmes fragilisés, dus cette fois aux contraintes de sylvicultures imposées pour répondre au marché) Toutefois, dans l'offre mondiale de produits bois, l'industrie choisira d'abord les productions qui répondent à ses cahiers des charges et non le contraire.	

¹⁹⁰ L'usage de ce bois pourrait convenir à des produits reconstitués tel le lamellé-collé.

¹⁹¹ Ces concepts sont décrits en détail dans le rapport Biodiversité

¹⁹² Complément aux conclusions du séminaire : la robustesse peut consister à chercher une « croissance lente » et « conserver des cycles actuels de maturation avec des arbres croissant plus lentement, plus robustes et sans dommage du raccourcissement des cycles pour la biodiversité ».

Note : le lien avec les impacts identifiés lors du séminaire (voir également Tableau 21) est mis dans la colonne de gauche :

- a. Hausse de productivité des arbres
- b. Changement de la composition des essences
- c. Aléas (probabilités des aléas)
- d. Insectes et éléments pathogènes (et vitesse de migration)
- e. Incendies

Tableau 16 – Identification des adaptations spontanées selon les experts

Actions	Cibles
Baisse des rotations/âges d'exploitabilité	Propriétaires-gestionnaires
Systèmes d'exploitation/de production (schémas sylvicoles)	Propriétaires-gestionnaires (voire artificialisation), extensification : + pour l'adaptation, mais fragilisation accrue ?
Diversification des peuplements	Propriétaires-gestionnaires
Au nord – adaptation dynamique de la gestion Au sud – intensification concentrée sur zones littorales / extensification ailleurs	Propriétaires-gestionnaires
Capacité d'adaptation/flexibilité (les entreprises s'ajustent aux changements forêts, ne décident pas des choix des propriétaires/gestionnaires forestiers, sauf à s'engager dans une intégration verticale)	Entreprises de l'industrie du bois
Augmentation de la capacité de transformation et d'approvisionnement	Industries
Usage des forêts autres que le bois : exemple pour la chasse	Propriétaires-gestionnaires

II.5 Evaluation quantifiée des impacts du changement climatique et de l'adaptation

La quantification se fonde d'une part sur les données disponibles (revue de la littérature) et des orientations données lors du séminaire de mars 2009. Les impacts observés et attendus sont tout d'abord présentés. Dans un deuxième temps, est précisé le cadre d'analyse retenu pour la quantification.

II.5.1 Impacts observés et attendus

L'augmentation de la productivité forestière observée depuis le milieu de XX^{ème} siècle est un phénomène complexe, multifactoriel, susceptible de variations dans l'espace et probablement dans le temps. Sous l'effet du changement climatique¹⁹³, le potentiel de production de bois et de maintien des services liés à la forêt pourraient être affectés par divers mécanismes : changements de la productivité des peuplements forestiers, changement du rythme des perturbations : insectes, champignons, maladies, tempêtes, sécheresses extrêmes, incendies. Ainsi, la productivité forestière devrait décliner d'ici la fin du siècle dans le Sud de la France et s'essouffle déjà dans certaines situations où les espèces en place ne semblent plus constituer l'optimum d'adaptation. C'est pourquoi, sans préjuger de l'augmentation des volumes économiquement valorisés, qui dépendra aussi des chablis et des mortalités dues aux sécheresses extrêmes, il faudra adapter les itinéraires sylvicoles. Il faudra aussi prévoir dans certains cas l'utilisation de provenances

¹⁹³ Plus que la multiplication des tempêtes ou l'apparition de gelées précoces, la répétition des canicules représente pour certains experts la vraie menace pour la forêt.

ou d'espèces dotées d'une plus grande capacité d'adaptation aux nouvelles conditions climatiques.

Encadré 5 - Les modèles de productivité (Contribution du groupe Biodiversité)

La réalisation de modèles de productivité est complexe et encore à des stades d'avancement très inégaux selon les espèces. Une première approche a donc consisté à faire des modèles de niche basés sur la cartographie des zones actuelles de présence/absence de l'espèce, mais en se limitant aux forêts, et en excluant toutes les présences non forestières observées. On obtient des aires actuelles et potentielles beaucoup plus petites que dans les modèles de niche « totale ».

Le développement prévu vers le nord des zones méditerranéennes suggère, à terme, une baisse globale de la productivité des écosystèmes forestiers. Mais ce n'est pas toujours ce qu'indiquent les modèles mécanistes, à base écophysologique*, de fonctionnement des peuplements forestiers. Le projet CARBOFOR [2009] en particulier a permis de montrer que la productivité primaire nette des écosystèmes forestiers français montre des tendances, au cours du XXIème siècle, différenciées selon le type d'essence, les scénarios d'évolution des pluies, les caractéristiques des sols, la zone géographique et le type de station sur laquelle on se trouve.

Afin d'avoir une vue d'ensemble des problèmes à venir, les chercheurs du projet CARBOFOR ont aussi modélisé l'évolution des grands types d'habitats forestiers, méditerranéen et montagnard en particulier. Il apparaît (ci-dessous) une forte progression des zones subméditerranéennes, qui vont largement s'étendre au nord de la Loire et une forte régression des habitats montagnards. Ils sont appelés à disparaître largement des zones de plaine, où ils constituaient des zones de biodiversité remarquable.

Tableau 17 - Evolution des surfaces des grands domaines bioclimatiques forestiers de France, en pourcentage de la surface totale du territoire national (Roman-Amat, 2007)

	Actuel	2100 scénario B2	2100 scénario A2
Méditerranéen	9,1%	28,1%	47,9%
Domaine océanique Sud Ouest	17,2%	45,9%	30,8%
Domaine océanique Ouest	35,6%	17,4%	16,4%
Montagnard	15,6%	5,4%	3,7%
Domaine continental Est	22,4%	3,2%	1,2%

On observe un allongement global de la saison végétative. Les arbres débourrent plus tôt et les feuilles tombent plus tard. Ce sont principalement la **réserve en eau** et la **fertilité des sols**¹⁹⁴ qui modulent la réponse des peuplements au changement climatique. En fait, le facteur crucial et mal connu est l'évolution de la quantité d'eau disponible pendant la période de croissance.

Là où elle restera élevée, l'augmentation des températures et du taux de CO₂ atmosphériques aura tendance à améliorer la productivité. A l'opposé, elle diminuera fortement dans les zones limitées par la disponibilité en eau. La crainte principale concerne donc la modification du régime des pluies et d'alimentation en eau des arbres en été. Les espèces les plus vulnérables au réchauffement climatique sont celles qui ont besoin de beaucoup d'eau, comme les épicéas, les sapins, voire les Douglas et aussi les feuillus comme les chênes pédonculés, les hêtres, les peupliers, les frênes. Ces espèces constituent la majorité des surfaces actuelles et, pour une proportion très importante,

¹⁹⁴ L'amélioration de la capacité de réserve en eau des sols et écosystèmes forestiers et les conditions locales de disponibilité en nutriments sont les facteurs clés déterminant la réponse des peuplements au changement climatique.

sont mal adaptées aux stations qui les portent. Une grande part de la forêt française se trouve donc en situation de vulnérabilité face au réchauffement climatique.

Les différentes expériences de simulation de la production forestière et la modélisation des aires climatiques menées par le projet de recherche CARBOFOR ont permis de donner une image de l'évolution possible du paysage forestier national au cours du XXI^{ème} siècle : le potentiel climatique de production est diminué sur la moitié Sud et la façade Ouest du pays où l'effet du cycle saisonnier des précipitations est défavorable, alors que l'impact climatique est neutre ou bénéficiaire dans la partie Centre et Nord-Est. Ce changement intervient sur un laps de temps inférieur à la durée d'une révolution moyenne.

Encadré 6 - Le facteur Eau

Le facteur crucial et mal connu est l'évolution de la quantité d'eau disponible pendant la période de croissance. Il est donc crucial d'améliorer notre connaissance de la réserve en eau des sols forestiers. Dans les modèles mécanistes, les rôles respectifs de températures trop élevées sur la phénologie d'une part et des contraintes hydriques sur l'acquisition du carbone d'autre part sont mal connus. Cette méconnaissance rend délicate les prévisions d'évolution des limites Sud de répartition des espèces.

II.5.1.1 Changement d'aires potentielles

Les études de simulation (de type CARBOFOR) ont montré que les niches des essences forestières sont extrêmement sensibles aux changements climatiques ; de ce fait, la répartition et la composition des espèces pourraient être altérées. La limite des arbres s'élèvera aussi lorsque des microsites adaptés se seront établis, suite à la baisse de la mortalité des arbres et à la hausse de croissance et de reproduction dans les endroits où la température est actuellement un facteur de limitation¹⁹⁵. Toutefois, ces limites forestières sont sensibles non seulement à l'évolution du climat, mais aussi aux changements d'affectation des terres qui peuvent soit atténuer soit amplifier les effets climatiques.

L'impact du changement climatique se traduit par de fortes extensions d'aires potentielles pour les espèces dont la survie hivernale est limitée par les températures basses. Par contre, l'évolution du régime hydrique (baisse des précipitations pendant la saison de croissance) affecte très différemment les espèces selon leur biologie.

Soulignons toutefois que l'incertitude pour les scénarios régionalisés du GIEC est beaucoup plus élevée pour la variable hydrique que pour la variable thermique. Le travail des chercheurs de l'INRA Nancy fait apparaître un déplacement des conditions climatiques propices aux essences méditerranéennes et sud-atlantiques vers le Nord et l'Est. Les territoires à conditions favorables aux espèces montagnardes et continentales régressent. Les espèces les plus sensibles et donc vulnérables sont les espèces en limite Sud de leur aire naturelle comme le hêtre ou le pin sylvestre. En revanche, la forêt méditerranéenne, de productivité faible, progresserait vers le Nord au détriment des forêts atlantiques et des forêts de feuillus sociaux (chêne, hêtre) de plaine du Centre et de l'Ouest.

¹⁹⁵ C'est ainsi qu'un déplacement vers le haut de la limite de la zone arborée dominée par *Picea abies* et *Pinus cembra* a déjà été observé ces dernières années dans les Alpes.

II.5.1.2 Production courante¹⁹⁶

Le développement vers le nord des zones méditerranéennes suggère, à terme, une baisse globale de la productivité des écosystèmes forestiers. Toutefois, le projet CARBOFOR en particulier a permis de montrer que la productivité primaire nette des écosystèmes forestiers français présenterait des tendances, au cours du XXI^{ème} siècle, différenciées selon le type d'essence, les scénarios d'évolution des pluies, les caractéristiques des sols et la zone géographique. Ces modèles prévoient que la productivité primaire brute va globalement augmenter au cours du XXI^{ème} siècle, en raison des effets du changement climatique sur l'allongement de la saison de végétation et, surtout, via l'effet fertilisant et anti-transpirant de l'augmentation du taux de CO₂ atmosphérique.

La productivité primaire nette, qui prend en compte la respiration des peuplements et qui est de ce fait plus proche de la production de bois attendue, montre des tendances beaucoup plus variables selon les essences. Pour le groupe des feuillus de plaine, l'évolution de la productivité primaire nette est en général défavorable (réduction), à l'exception des Alpes, avec une baisse moyenne en 2090 de -10 à -15%.

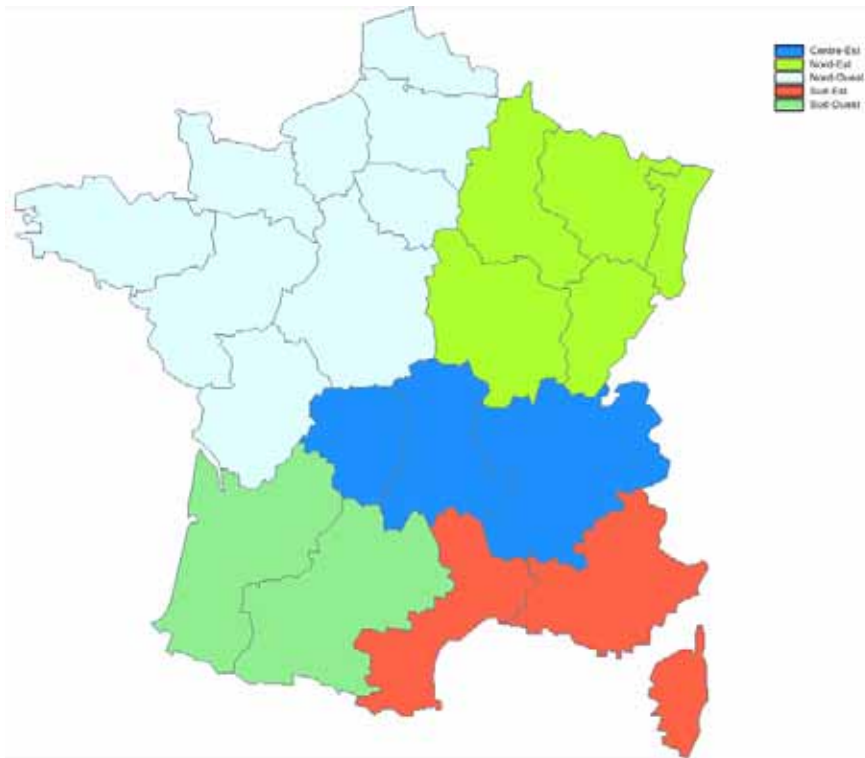
La production courante des écosystèmes forestiers montre une réponse positive au scénario climatique, les feuillus (chêne, hêtre) profitant mieux que les conifères (pins maritime et sylvestre) du réchauffement par l'allongement de leur saison de végétation. Cet effet est plus marqué dans le Nord-Est et neutre, parfois même inversé dans l'Ouest et le Sud. L'impact est positif dans le Nord pour les feuillus sociaux (chêne, hêtre) avec une réponse décroissante de l'Est vers l'Ouest.

En fin de siècle, compte-tenu de l'évolution climatique annoncée, le potentiel de production à espèces constantes sera diminué d'environ un quart sur la moitié Sud et la façade Ouest du pays, où l'effet du cycle saisonnier des précipitations est défavorable. L'impact demeure neutre ou bénéficiaire dans le quart Nord Est, partie très boisée du territoire. A espèces et provenances inchangées, l'impact global sur la productivité forestière nationale serait compris entre -5 et -15% de l'accroissement annuel.

II.5.1.3 Territorialisation des impacts du changement climatique

Si l'on considère les cinq grandes régions telles que définies par l'IFN, les principaux impacts, au moins durant la première période, seront les suivants.

¹⁹⁶ D'après la contribution de J.L. Dupouey pour le groupe « Biodiversité »



Carte 2 - Les grandes régions IFN (IFN : www.ifn.fr)

Sud Est

Pour la forêt méditerranéenne, la productivité promet d'être chaotique, très variable selon les essences. Pour illustrer la variabilité climatique à venir, la pluviométrie niçoise récente est éloquente : 520mm en 2006, 317 en 2007, 1032 en 2008. Dans ces conditions, certaines espèces, dont les capacités d'adaptation à une grande variabilité sont limitées, pourraient être menacées. La productivité du pin sylvestre devrait continuer à décroître et même s'effondrer dans quelques décennies, avec de probables dépérissements, tandis que celle du pin d'Alep pourrait progresser encore un peu puis stagner jusqu'au milieu du XXI^{ème} siècle avant de chuter fortement à la fin du siècle. L'aire du pin sylvestre devrait régresser, tandis que l'aire potentielle du pin d'Alep pourrait progresser de quelques centaines de mètres en altitude. L'augmentation de la fréquence des épisodes de sécheresse, telle qu'elle s'est produite entre 2003 et 2007, conjuguée à une importante fréquence d'incendies, conduit à un affaiblissement du fonctionnement biologique de l'écosystème. Le changement climatique, en intensifiant cette conjonction de feux et de sécheresses, pourrait rendre plus précoce l'effondrement de la productivité de ces espèces et accélérerait fortement les dépérissements du pin sylvestre.

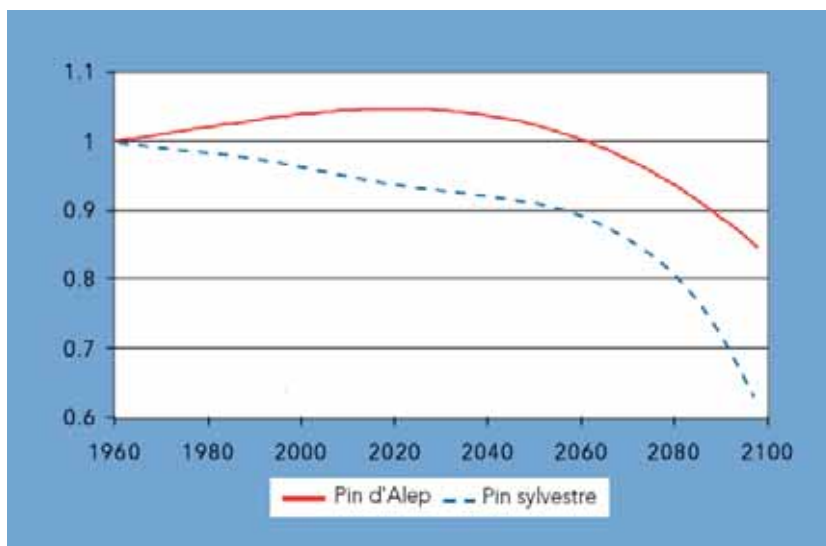


Figure 4 - Evolution simulée de la productivité du pin d'Alep et du pin sylvestre entre 1960 et 2100 (Vennetier et al., 2005)

Pour les résineux - pin d'Alep, pin sylvestre, pin maritime, pin noir... autant d'essences emblématiques de la forêt méditerranéenne - la durée de vie des aiguilles a déjà diminué de moitié (2,5 ans au lieu de 5 ans) ! Avec des aiguilles de taille plus petite, la capacité de photosynthèse des arbres se trouve réduite, ce qui les rend plus vulnérables, notamment face aux parasites.

Enfin, à long terme, la niche climatique du chêne vert, espèce emblématique, de la région méditerranéenne, pourrait dépasser la latitude de la Loire. Cet exemple peut d'ailleurs être transposé à la grande majorité des espèces méditerranéennes : l'olivier, le pin d'Alep, le pin parasol, le cyprès.

Sud Ouest

Dans le Sud Ouest, l'impact de la productivité, positif jusqu'en 2030, s'inverse en fin de période (2080). Pour le pin maritime du sud-ouest, les projections sont plus pessimistes : la chute de production devrait atteindre 20 à 30% d'ici à 2100, voire 40% pour les productions plus à l'intérieur des terres, en particulier dans la lande sèche de Gascogne¹⁹⁷ si aucune substitution d'essences ou de provenances n'est engagée¹⁹⁸.

¹⁹⁷ L'eau joue un rôle important dans la productivité du massif forestier selon que l'on se situe sur le plateau humide ou dans les landes sèches. Le réchauffement impacterait donc moins la bande côtière (jusqu'à 30/40 kilomètres de l'Océan).

¹⁹⁸ Communication Y Poss

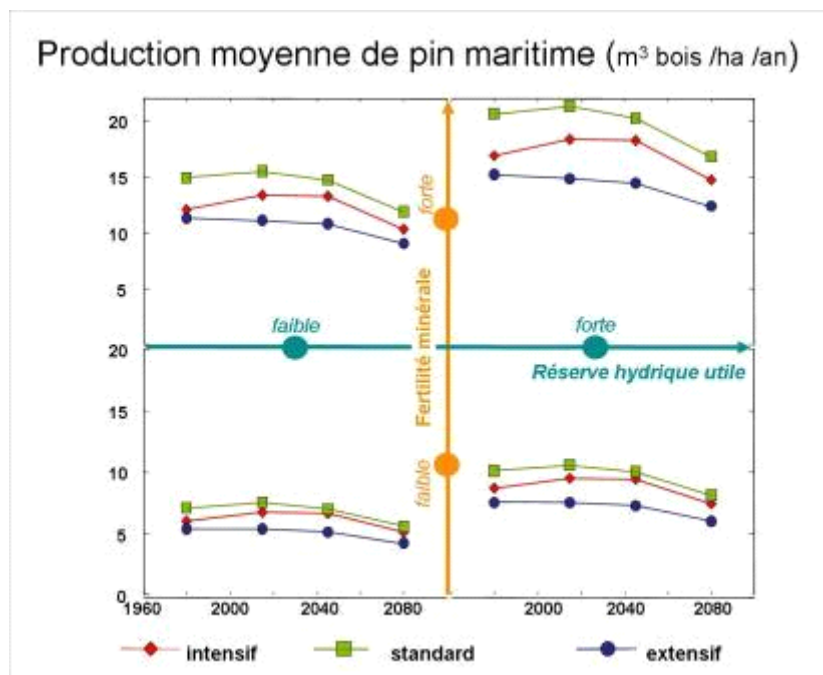


Figure 5 - Production moyenne de pin maritime (selon choix de sylviculture) (Loustau et al., 2005)

Centre-Est

Si, en terme de croissance, les feuillus profitent des scénarios de changement climatique, un climat plus chaud et plus sec réduit la productivité de l'épicéa du fait notamment de la diminution des précipitations. Les régions de montagne fourniront certes encore du bois résineux mais dans une moindre mesure. Un développement de l'industrie du bois pour la mise en valeur des feuillus est absolument nécessaire si on souhaite valoriser ces produits forestiers dans notre pays.

Les aires de répartition potentielle des espèces montagnardes telles que mélèze, sapin, épicéa, pourraient fortement régresser d'ici une centaine d'années à cause de fortes températures en été et d'une baisse des précipitations.

A des altitudes supérieures, les températures plus élevées et un milieu environnemental moins âpre ont déjà augmenté les taux de croissance. La prolongation continue de la période de végétation pourrait intensifier ce phénomène, tout en stimulant un bourgeonnement précoce qui, à son tour, risque d'accroître la susceptibilité des arbres aux gelées tardives. Néanmoins, une tendance de croissance positive devrait se poursuivre, en particulier dans les sites qui ne souffrent pas de pénurie d'eau.

A des altitudes inférieures et dans les vallées alpines intérieures sèches, les changements du régime des précipitations et les températures croissantes pourraient provoquer le stress dû à la sécheresse et diminuer par là même la productivité. Cette augmentation du stress dû à la sécheresse risque aussi d'accroître la vulnérabilité des forêts de montagne à des agents de perturbation biotiques et abiotiques.

L'évolution pourrait être plutôt favorable pour les forêts de mélèzes les plus élevées en altitude et défavorable à celles des Alpes méditerranéennes.

Au Nord, le réchauffement devrait être globalement bénéfique pour les feuillus. On peut s'attendre à des hausses de productivité de 20 à 30% dans un premier temps (d'ici à

2020), qui devraient se poursuivre par une faible croissance au Nord-Est et une stabilité au Nord-Ouest¹⁹⁹.

Nord-Est

Le hêtre a besoin d'une humidité atmosphérique élevée, avec des précipitations annuelles supérieures à 700mm. Son aire de répartition potentielle pourrait fortement régresser d'ici une centaine d'années à cause de fortes températures en été et d'une baisse des précipitations. De plus, si le dynamisme et la tolérance à l'ombrage du hêtre l'ont conduit à supplanter le chêne dans des peuplements, il pourrait sembler opportun de privilégier cette dernière essence, plus résistante à la sécheresse. Certaines recommandations de bon sens visant à prévenir ou diminuer les risques ont été formulées :

- Ne pas maintenir le hêtre dans des conditions stationnelles qui lui sont défavorables, en particulier du point de vue hydrique ;
- Limiter la compétition pour l'eau par une sylviculture réduisant la densité des tiges. Une telle conduite devrait également diminuer le risque vis-à-vis du vent.

Nord Ouest

Le chêne pédonculé, pur ou en mélange, occupe de l'ordre d'un million d'hectares en France dont seule une partie correspond à ses exigences de très bonne nutrition minérale et d'alimentation en eau régulière²⁰⁰. Bien souvent, dans l'Ouest, le Bassin Parisien, etc., il souffre des sécheresses estivales. L'inadaptation de ces peuplements ne peut que s'accroître sous l'effet du changement climatique. Toutefois, la transformation s'impose sur ces stations, mais n'est pas forcément facile à entreprendre : en particulier, la substitution du chêne sessile au chêne pédonculé n'est pas aisée.

Dans certains territoires, certaines essences apparaissent déjà comme menacées, telles que l'épicéa commun, le sapin de Vancouver, le hêtre ou le chêne pédonculé. « [Les] *chênes végètent* » et seront remplacés, dans certains cas, par des châtaigniers ou des robiniers, essences que la Société Forestière de la Caisse des Dépôts a retenues dans sa liste d'espèces de transition, capables de survivre dans les conditions climatiques prévues après 2050. Ces espèces, parmi lesquelles se trouvent aussi le tilleul, les cèdres de l'Atlas et du Liban, le pin laricio ou le chêne sessile, seront progressivement confortées.

II.5.2 Cadre d'analyse retenu pour la quantification

La quantification porte sur l'impact jugé prioritaire lors du séminaire, à savoir l'impact du changement climatique sur la **productivité des forêts**²⁰¹. La déclinaison impact par impact (croissance et santé des forêts, migration des espèces, sécheresse, incendies et tempêtes) n'a pas été jugée pertinente par les participants étant donné les interactions fortes entre les différents phénomènes. De plus, des interrogations subsistent sur la relation de certains d'entre eux (tempêtes notamment) avec le changement climatique.

¹⁹⁹ D. Loustau : http://www.rac-f.org/article.php3?id_article=529

²⁰⁰ Legay *et al.*, 2007

²⁰¹ Les autres impacts mentionnés étaient : le changement de la composition des essences et les aléas et dans une moindre mesure les insectes et les éléments pathogènes (notamment leur vitesse de migration). On pourrait également ajouter les incendies qui ont été peu évoqués lors du séminaire, mais qui peuvent profondément modifier certaines zones, tant en terme de productivité moyenne que de qualité des bois ou d'organisation des massifs et des choix de sylviculture.

II.5.2.1 Périmètre de l'évaluation

Horizon temporel

Lors du séminaire, choix a été fait de caler **deux phases de temps** fondées sur le critère de productivité des arbres résultant du changement climatique (intitulées « moyen terme » et « long terme »), de définir les périodes de différenciation des scénarios A2 et B2 et de se focaliser sur les impacts et adaptations sur le « moyen terme ». Le facteur discriminant entre ces deux périodes est la « tendance » de la productivité.

Deux horizons de temps ont été définis sur la base des évolutions anticipées de la productivité des arbres :

- Moyen terme (changement climatique => taux de croissance plus important en forêt)
- Long terme (changement climatique => taux de croissance moins important en forêt)

Les scénarios A2 et B2 (GIEC) ne peuvent être dissociés sur les premières années. L'occurrence avec A2 a été fixée à 2030 ; celle avec B2 à 2050.

Tableau 18 – Les horizons de temps et le taux national moyen de croissance des forêts

	A2	B2	
Moyen terme (changement climatique : taux national moyen de croissance en forêt ↗)	2008-2030	2008-2050	Mêmes hypothèses pour A2 et B2
Long terme (changement climatique : taux national moyen de croissance en forêt ↘)	2030 et +	2050 et +	Hypothèses spécifiques par scénario

Pour 2100, les estimations sont plus globales en termes d'essences et d'approche géographique.

Périmètres sectoriel et géographique

Etant donné les incertitudes, il a été jugé préférable lors du séminaire de mars 2009 d'engager un exercice simple. Ainsi, le travail proposé porte sur les **essences principales** (et donc le bois) pour la France métropolitaine en se fondant sur une déclinaison territoriale en mixant les évaluations existantes, les données de terrain (un suivi des productivités est réalisé depuis plusieurs années en France) et des dires d'experts. La déclinaison géographique est réalisée sur les **5 grandes zones établies par l'IFN pour la France métropolitaine** (cf. Carte 2).

La quantification et les scénarios sont hexagonaux, ce qui ne permet pas de prendre en compte les possibles et probables bouleversements dans les marchés internationaux (production accrue des pays du nord en résineux, perte de la place de la France pour les grands feuillus tels le chêne et le hêtre).

II.5.2.2 Evolution des productivités utilisées dans la quantification

A 2030-2050

Certaines évaluations des productivités intègrent non seulement l'impact du changement climatique sur les forêts, mais également d'autres impacts et/ou mesures d'adaptation (diverses hypothèses sur l'évolution des facteurs limitants, plusieurs itinéraires sylvicoles

étudiés,...). Ainsi, **la productivité prise en compte dans la quantification est une variable synthétique de plusieurs phénomènes, différenciée selon les essences.**

Le tableau suivant donne les évaluations des productivités utilisées dans les calculs.

Tableau 19 – Evaluation de productivités de base utilisées

Essence	Résultats simulations	Source
Pin Maritime	Pour le scénario B2. 3 scénarios sylvicoles : production intensive, sylviculture standard, sylviculture minimale Légère hausse de la productivité jusqu'en 2020, puis baisse de la productivité s'accroissant à partir de 2060. Le scénario intensif est plus réactif au changement climatique que les scénarios standards et longs, dans cet ordre.	CARBOFOR (2004)
Hêtre	Pour le scénario B2. 2 scénarios : semi-intensif/futaie claire, extensif/futaie serrée Croissance de la productivité. Relativement importante au début puis faible voire nulle à partir de 2060. Un peu plus forte dans l'Est que dans l'Ouest. Peu sensible au scénario sylvicole.	CARBOFOR (2004)
Pin Sylvestre	Pour le pin sylvestre, une diminution constante de la productivité est modélisée, quelle que soit l'altitude, avec un effondrement vers le milieu du XXI ^{ème} siècle.	Vennetier et al. (2005)
Pin d'Alep	Pour le pin d'Alep, une poursuite de la tendance à l'accroissement est prévue pour les premières décennies du XXI ^{ème} siècle, qui s'inverse ensuite pour aboutir à une forte réduction. Cela est valable à toutes les altitudes, mais la baisse est plus marquée à basse altitude.	Vennetier et al. (2005)

Toutefois, ces données ne portent que sur certaines essences. Aussi, pour réaliser la quantification, des hypothèses ont été faites (**dires d'experts**) : pour les feuillus, sont distingués deux catégories : « équivalent chêne » et hêtre ; pour les résineux : « équivalent pin sylvestre », pin maritime et résineux sans changement de productivité.

Pour les feuillus, on considère que les châtaigniers et autres feuillus ont le même comportement de productivité que le chêne dans toutes les régions. Pour la productivité du hêtre, sa croissance est légèrement plus forte dans le Nord-Est (comparativement au Nord-Ouest).

Pour les résineux, on considère que le taux de croissance de la productivité du pin maritime est le même dans toutes les régions. Les sapins, épicéas, pins divers et autres conifères ont un comportement envisagé identique au pin sylvestre pour certaines régions uniquement (sud et ouest de la France). Deux régions font exception pour la catégorie pins divers. Pour la zone Sud Est (Languedoc-Roussillon et PACA), on considère que la modification de taux de croissance est nulle car deux effets se combinent : une baisse des pins divers (car assimilés au pin sylvestre) et une hausse du pin d'Alep.

A horizon 2100

Comme vu précédemment, ce sont principalement la **réserve en eau** et la **fertilité des sols** qui modulent la réponse des peuplements au changement climatique.

Comme nous pouvons le voir sur les graphiques ci-dessous, entre 2050 et 2100, en moyenne, les précipitations ne vont cesser de diminuer et les températures estivales augmenter. Ces températures auront un effet non seulement sur la productivité des essences, mais aussi sur l'évolution de la répartition des essences au sein de la forêt française.

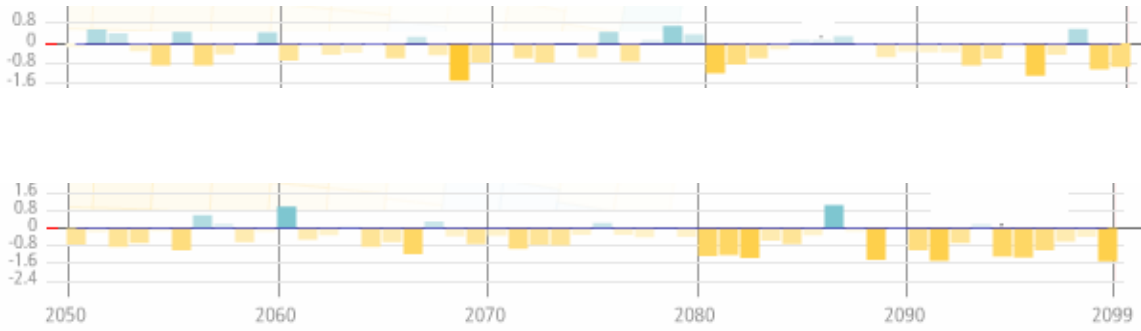


Figure 6 - Précipitations estivales journalières - Ecart par rapport aux normales actuelles de référence (2.1mm/j) (B2 en haut, A2 en bas) (Météo-France (http://climat.meteofrance.com/chgt_climat/simulateur/))

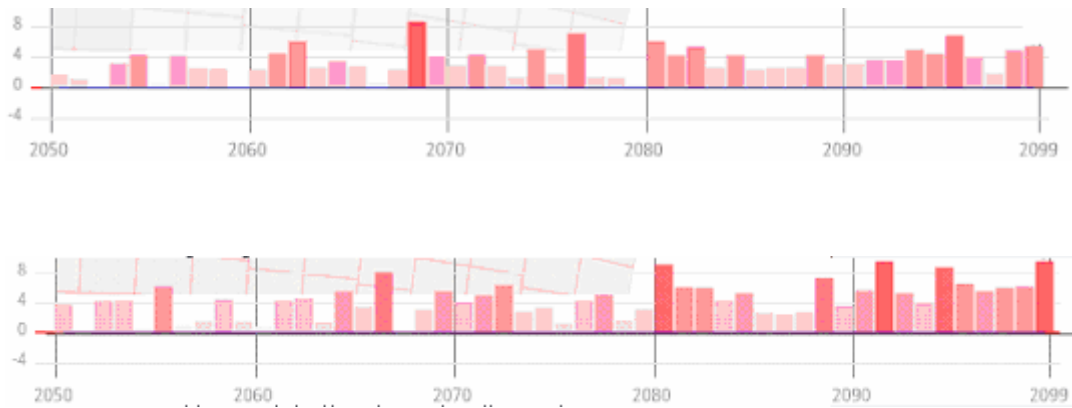


Figure 7 - Températures estivales maximales - Ecart par rapport aux normales actuelles de référence (22.4°C) (B2 en haut, A2 en bas) (Météo-France (http://climat.meteofrance.com/chgt_climat/simulateur/))

Les espèces qui pourront résister au changement climatique sont donc les plus résistantes au stress hydrique estival : cèdre, robinier, pin laricio ou maritime et, dans une moindre mesure, le pin sylvestre et le chêne sessile.

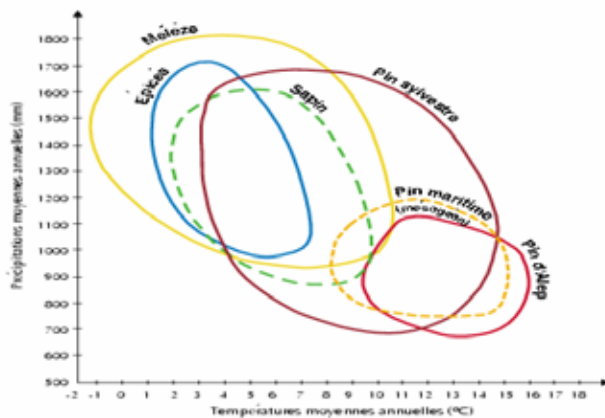
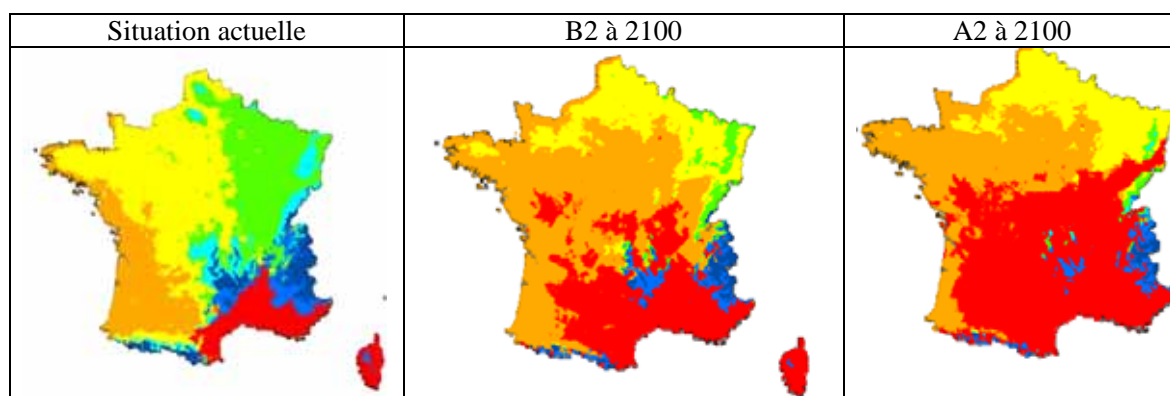


Figure 8 - Aires ombrothermiques des principaux résineux français (Riou-Nivert, 2005²⁰²)

Avec les données du modèle Arpège de Météo-France en 2100, Badeau et Dupouey²⁰³ ont établi des cartes de répartition potentielle des groupes d'espèces dont la présence ou l'absence dépendent des conditions climatiques²⁰⁴.

Le déplacement théorique des aires des espèces pourrait se faire de manière très rapide :

- 20km en direction Sud Nord en moyenne tous les dix ans pour le groupe méditerranéen sous le scénario B2 (32 sous le scénario A2) ;
- 55km en direction Ouest Est tous les dix ans pour le groupe aquitain sous les deux scénarios.



Carte 3 - Modélisation des aires de répartition des espèces arborées en 2100 (à gauche selon B2, à droite selon A2)²⁰⁵ (CARBOFOR, 2004)

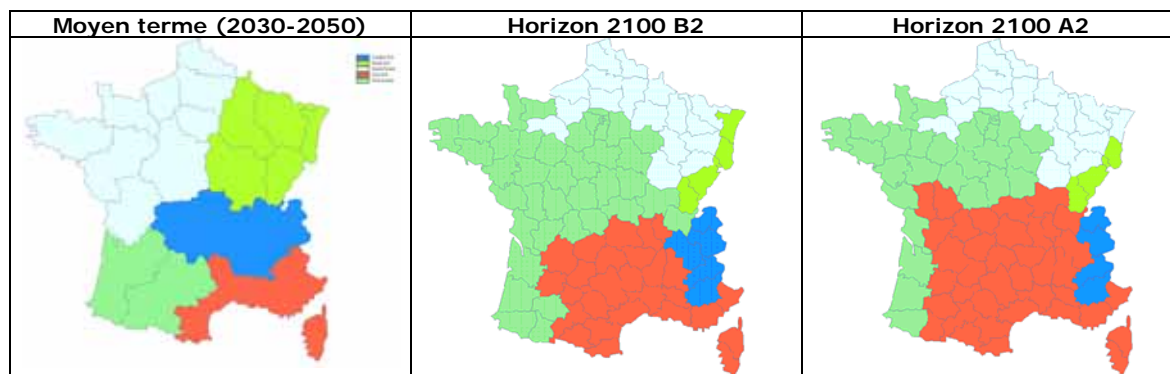
A horizon plus lointain (2100), on devrait donc observer une migration plus forte des espèces, qui entraînerait (schématiquement) un redécoupage des grandes zones forestières qui pourraient être représentées (selon le scénario : B2 ou A2) selon les cartes suivantes.

²⁰² cité par Riou-Nivert, 2006

²⁰³ CARBOFOR, 2004

²⁰⁴ Voir Annexe F.2 (groupe Biodiversité) pour une présentation détaillée de ces modèles.

²⁰⁵ Rouge : groupe méditerranéen (espèce principale : chêne vert), orange : Atlantique sud (pin maritime), jaune : atlantique nord (châtaignier), vert : continental (hêtre), bleu : montagnard (pin cembro, aulne incana, sapin blanc).



Carte 4 – Régions forestières hypothétiques à horizon 2100 (gauche : B2, droite : A2)

Ces prévisions sont toutefois à nuancer car, nous ne connaissons pas avec exactitude la plasticité individuelle des espèces. De plus, comme le note P. Riou-Nivert²⁰⁶ : « Les processus de dépérissements des boisements, qui ne seront plus adaptés aux nouvelles conditions climatiques seront malheureusement plus rapides que les processus de migration des espèces du sud. Il faut se rappeler que les espèces ne progressent que de quelques centaines de mètres par siècle tandis qu'on doit envisager une remontée vers le nord des limites biogéographiques de plusieurs centaines de kilomètres. »

Il semble que les principales évolutions envisageables à horizon 2100 soient plutôt défavorables à la production brute annuelle et cela pour plusieurs raisons :

- Apparition de facteurs limitants pesant sur la productivité individuelle des espèces ;
- Remplacement progressif d'un type de forêt (nord) par un type forestier (méditerranéen) moins productif (3,4m³/ha/an contre 7,5m³/ha/an, IFN 2005) ;
- Répétition d'évènements défavorables à la croissance forestière et à l'origine de nombreux dépérissement, tels que les sécheresses et les canicules ;
- Plus grands risques d'incendies et extension géographique de la zone à risque (susceptibles de générer des coûts importants en termes de prévention et de lutte) ;
- Développement de pathogènes.

Ainsi, même si un renforcement de la connaissance des stations forestières est encore nécessaire, il est évident que la vitesse de l'évolution du climat sera supérieure à celle d'adaptation des arbres. Certaines essences risquent donc de disparaître des forêts françaises d'ici la fin du siècle. Cela aura des conséquences sur la biodiversité²⁰⁷ et l'industrie liée au bois.

En termes d'adaptation, il est sans doute préférable d'infléchir, d'ores et déjà, la gestion pour la conduite des peuplements en diminuant leur densité (futaie claire) et en favorisant les espèces qui sont les plus susceptibles de s'adapter aux conditions climatiques futures. On peut aussi diversifier les provenances au sein d'une même espèce, comme pour le Douglas, ou rechercher des espèces exotiques (ce qui est le plus

²⁰⁶ http://www.forets-et-climat.fr/?page_id=100

²⁰⁷ Voir le rapport du groupe Biodiversité.

risqué). L'ONF, par exemple, favorise les chênes sessiles lors des coupes de régénération au détriment des chênes pédonculés. Pour les plantations, il convient de favoriser la diversité des espèces. La Société forestière²⁰⁸, elle, a décidé d'accélérer les révolutions pour les peuplements arrivant à maturité avant 2050 et, pour les espèces arrivant à maturité au-delà de 2050, de favoriser le développement d'essences de transition, pouvant supporter le climat actuel et le climat à venir. Parmi les espèces pouvant constituer les forêts futures, la Société forestière a opté pour le chêne sessile, les tilleuls à grandes feuilles, les robiniers et eucalyptus en plantation, les pommiers, ou encore les pins maritimes, les sapins de Turquie et les Douglas en ce qui concerne les résineux.

II.5.2.3 Scénarios retenus

Les scénarios retenus se concentrent sur les impacts directs du changement climatique sur les forêts françaises métropolitaines. Ce sont des scénarios **médians**.

Le scénario « **changement climatique et productivité des forêts** » n'intègre qu'une dimension des impacts du changement climatique, à savoir le taux de croissance moyen des forêts. Aucune mesure d'adaptation n'est prise en compte.

Le scénario « **valorisation +** » est une **variante** du scénario « changement climatique » en intégrant un volume récolté supplémentaire suivant les objectifs chiffrés identifiés à 2020. En cela, il constitue un scénario avec mesure d'adaptation sans regret, puisque cette récolte supplémentaire réduit d'autant les volumes sur pied et les risques associés aux impacts du changement climatique comme les sécheresses, etc.

La quantification de ces scénarios est réalisée à moyen terme selon les scénarios globaux A2 (2030) et B2 (2050) :

SCENARIOS	A2 (2030)	B2 (2050)
« changement climatique et productivité des forêts »	x	x
« valorisation + »	x	x

Scénario « **changement climatique et productivité des forêts** » à économie constante²⁰⁹

Pour ce scénario, on estime que les valeurs sur pied sont constantes. Nous supposons que le changement climatique, du fait notamment d'une hausse des températures sous un régime hydrique qui n'est pas encore un facteur limitant, permet dans un premier temps une hausse de la productivité d'un grand nombre d'essences forestières. Cela permet donc une hausse du volume sur pied potentiellement disponible pour l'industrie. Nous supposons que le taux de récolte reste constant et que la répartition du matériel ligneux entre des différents produits (selon les catégories usuelles : bois d'œuvre, bois d'industrie et bois énergie) reste la même (niveau 2008).

Scénario « **valorisation +** »

Pour la forêt, deux limites principales au scénario « économie constante » ont été identifiées :

²⁰⁸ <http://www.forets-et-climat.fr/?p=168>

²⁰⁹ En l'absence d'une prospective socio-économique de long-terme régionalisée et par secteur pour la France, l'ONERC a choisi de travailler en conservant la situation socio-économique actuelle. Or aussi bien les prix que les usages du bois sont évolutifs. De plus, la concurrence pour les sols agricoles pourrait également conduire à un retournement de tendance au détriment de l'expansion forestière observée ces dernières décennies. Les estimations sont donc à considérer avec prudence.

- La valorisation énergétique du bois : en lien avec la Directive EnR et les orientations françaises (Grenelle de l'Environnement et Assises de la Forêt²¹⁰), le bois est amené à prendre une place de plus en plus importante et à modifier les marchés et les comportements d'offre en forêt ;
- Le développement du matériau bois dans la construction (loi sur l'Air et Grenelle de l'Environnement).

Afin de prendre en compte les objectifs attribués à la forêt lors des Assises de la forêt (+12 millions de m³ à 2012 et +21 millions de m³ à 2020), un scénario complémentaire au scénario à économie constante, intitulé « valorisation + » est ainsi proposé. Ce scénario ne ventile pas les récoltes supplémentaires selon les usages, mais se fonde sur le solde de la production en bois restant en forêt.

Les impacts du changement climatique considérés sont les mêmes que pour le scénario « productivité des forêts ».

II.5.3 Méthodologie

II.5.3.1 Présentation de la méthode

Comme le souligne le Conseil d'Analyse Stratégique (2009), en 2007, la forêt française couvrait 15 millions d'hectares et il a été récolté 59 millions de m³ (dont 22 millions autoconsommés²¹¹), soit une récolte moyenne de 4m³/ha/an²¹².

En termes financiers, les prix varient beaucoup selon les essences (de plus de 100€/m³ pour des chênes à moins de 30€/m³ pour des pins maritimes). Le MAP (2006) donne une valeur annuelle après exploitation de 1,68 milliard d'euros pour le bois commercialisé dans la période 1998-2002 pour un volume de 38 millions de m³, soit une moyenne de 44,2€/m³ (55,8€/m³ pour le bois d'œuvre, 20,8€/m³ pour le bois d'industrie, 32,3€/m³ pour le bois de feu). Si l'on valorise les 22 millions de bois autoconsommés au prix du bois de feu commercialisé, on aboutit à une valeur totale de la production de 2,4 milliards d'euros, soit 160€/ha en valeur 2002.

Cependant, ces valeurs intègrent des coûts d'exploitation, que l'on peut estimer de 20 à 25€/m³. Montagné et Niedwiedz (2007) annoncent pour 2003 un prix moyen sur pied de 24,9€/m³ pour le bois commercialisé et estiment à 8,2€/m³ la valeur du bois non commercialisé. En appliquant ces valeurs, la production totale tombe à 1,13 milliards d'euros, soit 75€/ha.

Tableau 20 – Les prix du bois estimés et utilisés dans la quantification (Montagné et Niedwiedz, 2007)

Prix sur pied (€/m ³)	
Bois d'œuvre feuillu	53,9
Bois d'œuvre résineux	28,9
Bois de trituration	8,4
Autre bois commercialisé	8,4
Bois non commercialisé	8,2

Ce sont ces dernières valeurs que nous utiliserons pour évaluer la valeur des gains (ou pertes) de production ligneuse nette. Pour cela, nous supposerons que le taux de récolte

²¹⁰ Halley Des Fontaines (2008).

²¹¹ Estimation à dire d'expert.

²¹² FPF, 2008

demeure constant et que la répartition du bois entre ces différents usages demeure la même.

II.5.3.2 Hypothèses principales

On pose la demande « traditionnelle » en bois (bois d'œuvre, bois d'industrie, bois bûche) sur la base de 2008 à laquelle s'ajoute une demande additionnelle se fondant sur les projets envisageables à 2020 et les objectifs du Grenelle de l'Environnement²¹³. Cette demande additionnelle se base sur des hypothèses de consommation de bois des projets CRE2 qui ont été acceptés (ci-après les projets CRE2 bois). Ne sont pas pris en compte les futurs projets CRE3, ni les possibles demandes additionnelles pour la valorisation thermique (Fonds Chaleur) ou les futures unités de biocarburants utilisant de la biomasse ligno-cellulosique.

On considère que les 16 projets acceptés avec du bois en 2008 seront tous opérationnels en 2012 et que la biomasse qui doit être issue des taillis à courte rotation (TCR) selon les plans d'approvisionnement sera substituée par du bois issus des forêts, afin de prendre en compte le temps nécessaire d'établissement et d'arrivée à récolte de ces cultures dédiées. Au fur et à mesure que les TCR seront récoltables, le rôle de substitut des forêts déclinera. On pose qu'à 2020, les cultures dédiées pourront entièrement répondre aux objectifs qu'on leur avait assignés dans les plans d'approvisionnement. L'approche est linéaire, alors que les courbes d'augmentation de la production risquent d'être en dents de scies tout comme celles de la récolte.

II.5.3.3 Données d'entrées

Les données utilisées sont les EAB (Enquêtes Annuelles de Branche de l'Agreste), l'étude CEMAGREF (2007), les résultats de l'enquête CEREN²¹⁴, les objectifs de récolte des Assises de la Forêt à 2012 (+12 millions de m³) et à 2020 (+21 millions de m³). La demande est composée de BO (EAB) + BI (EAB) + bois bûche (CEREN) + bois énergie pour les projets CRE2. Les taux de boisement régionaux issus de l'IFN sont également utilisés.

II.5.4 Limites de l'exercice

Les conclusions du séminaire de mars 2009 et des autres contributions (cf. Annexe I.) mises en perspectives avec la méthodologie proposée, constituent les limites de l'exercice réalisé dans le présent rapport.

II.5.4.1 Impacts qui n'ont pas pu être pris en compte

La quantification a porté sur un impact (la productivité) et une unique dimension : les volumes de bois. Comme déjà évoqué précédemment, dans le changement climatique attendu, les conséquences, pour les forêts, viendront probablement plus des événements extrêmes que des tendances. Il faudrait donc anticiper les risques qui y sont associés, mais aussi les risques phytosanitaires, les sécheresses et leurs conséquences, les phénomènes de chaleurs ou de froids extrêmes, qui sont négligés quand seule l'évolution moyenne est mise en avant.

²¹³ Les volumes envisagés du Grenelle ne sont pas ventilés par usage, mais agissent sur les volumes restants en forêt.

²¹⁴ Communication personnelle par l'Observatoire de l'Energie (MEEDDAT).

Tableau 21 - Impacts du changement climatique et hiérarchisation : conclusions du séminaire de mars 2009

Impacts	Importance de l'impact dans l'analyse	Autres éléments
a. Hausse de productivité des arbres	+++	↗ de productivité : quelle qualité des bois ? arbres plus fragiles ? Engorgement des sols (moins de gel, + d'eau, - de neige) Eau (rareté de l'eau/usage des sols) Faune (CC-> faune-> forêt)
b. Changement de la composition des essences	++	
c. Aléas (probabilités des aléas)	++	
d. Insectes et éléments pathogènes (et vitesse de migration)	+ ²¹⁵	
e. Incendies	²¹⁶	

Note : CC= changement climatique

II.5.4.2 Adaptations qui n'ont pas pu être prises en compte

Le scénario « valorisation + » intègre en quelque sorte une mesure sans regret, puisque les récoltes supplémentaires pour répondre à des objectifs nationaux notamment en termes de valorisation énergétique issue de ressources renouvelables, permet de diminuer les volumes sur pied et donc les risques potentiels d'impacts du changement climatique. Toutefois, l'intégration des autres adaptations présentées précédemment (Tableau 15 et Tableau 16) aurait permis d'affiner les évaluations des mesures ayant pour objet d'éviter le basculement des écosystèmes.

Dans la quantification réalisée, de façon implicite, nous avons considéré que les entreprises étaient « suiveuses », car devant s'adapter aux évolutions des caractéristiques du matériau bois (âges inférieurs, dimensions plus faibles, propriétés mécaniques différentes et à terme essences différentes). On peut également envisager que ces industries peuvent avoir une action en retour sur la forêt.

II.5.5 Résultats obtenus

Les résultats quantifiés (volumes et monétaires) sont d'abord proposés par scénario forêt, à savoir le scénario « changement climatique et productivité des forêts » et le scénario « valorisation + », chacun étant décliné selon A2 et B2. Dans un second temps, sur la base d'une synthèse, les résultats sont discutés. Enfin, sont mis en exergue les besoins spécifiques et pistes identifiées pour poursuivre l'analyse.

II.5.5.1 Scénario « changement climatique et productivité des forêts »

Les volumes

En projetant, sur la période dite « favorable » (hausse de la productivité), des taux de croissance différents selon les régions, *i.e.* un changement climatique plus favorable pour les régions du nord que pour les régions du sud, on peut obtenir ce type d'évolution de la production forestière annuelle.

²¹⁵ Ou ++ car on peut avoir de grandes surprises dans ce domaine : parasites invasifs, progression et adaptation des parasites beaucoup plus rapides que celles des arbres ...

²¹⁶ Peu évoqué lors du séminaire, ce phénomène selon certains experts pourrait être mis en catégorie ++.

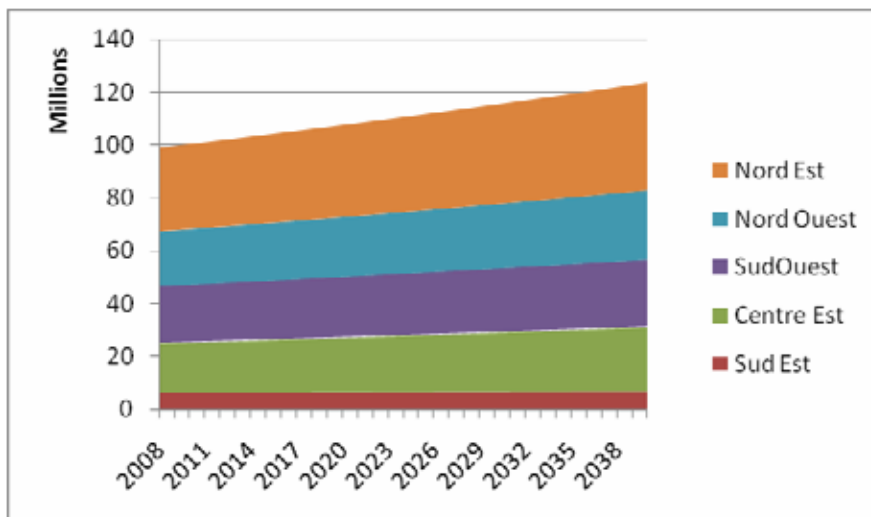


Figure 9 - Evolution des volumes par grande zone du fait de l'impact du changement climatique (hausse des productivités) (millions de m³)

Ici, à titre d'exemple²¹⁷, on estime que la période allant jusqu'à 2040 est une période favorable sans événement climatique extrême et que la répartition des surfaces forestières demeure constante (remarque : avec une reconstitution systématique, après tempête, des zones sinistrées, comme c'est le cas dans le massif landais après la tempête Klaus, on retrouve très vite des niveaux élevés d'accroissement annuel grâce à la vigueur juvénile, supérieure à celle des peuplements âgés).

Il faut donc modérer cette évolution en évoquant notamment deux éléments.

D'une part, les événements caniculaires ou événements « tempêtes » susceptibles d'affecter notamment la production des forêts du Sud. Comme l'a montré la sécheresse de 2003, les conséquences des sécheresses « remarquables » sont très nettes sur les boisements qui ne sont pas adaptés aux stations. Ainsi, un fort dépérissement a frappé immédiatement les épicéas en plaine. En Midi-Pyrénées, les Douglas qui étaient plantés au-dessous de 600m ont attendu le printemps 2004 pour faire apparaître des signes de dépérissement. Les sapins dans les Alpes du Sud ont souffert eux aussi. Les effets touchent également les feuillus comme le chêne pédonculé, première essence française en surface et en volume.

D'autre part, il faut mentionner la question de l'adaptation des boisements. Il est possible que les processus de dépérissement des boisements qui ne seront plus adaptés aux nouvelles conditions climatiques soient plus rapides que les processus de migration des espèces du sud. Bref, les unes pourraient dépérir avant que les autres n'arrivent pour les remplacer. Théoriquement les espèces ne progressent que de quelques centaines de mètres par siècle, tandis qu'on doit envisager une remontée vers le Nord des limites biogéographiques de plusieurs centaines de kilomètres.

Evaluation économique

Au niveau national, dans un premier temps, le changement climatique serait à l'origine de gains de productivité qui conduiraient à un supplément de production brute annuelle. Celui-ci pourrait approcher au terme de la période dite « favorable » les 30 millions de

²¹⁷ La croissance linéaire représentée est bien sûr donnée à titre d'illustration. Il est probable que l'évolution de la production brute annuelle ainsi que de la récolte soit caractérisée par des irrégularités du fait d'une augmentation des dépérissements et des catastrophes naturelles (Riou-Nivert, 2008).

m³ supplémentaires. En conservant la répartition entre les différents usages en 2008 et en appliquant les prix sur pied, on obtient les gains du changement climatique. Ils dépendent de la longueur de la période dite « favorable ». En supposant que dans le cadre du scénario A2, cette période dure 20 ans et que dans le cas du scénario B2, elle dure 40 ans, les gains du changement climatique sont les suivants.

Tableau 22 – Evaluations économiques des impacts du changement climatique (selon A2 et B2) sur la production forestière à moyen terme

			Scénario A2		Scénario B2	
	Volume annuel récolté actuellement (millions m ³)	Volume annuel récolté lors de la dernière année de la période favorable (+30% vs 2008) (millions m ³)	Volume supplémentaire récolté sur la période 2008-2030 (cumul) (millions m ³)	Valeur (millions €)	Volume supplémentaire récolté sur la période 2008-2050 (cumul) (millions m ³)	Valeur (millions €)
Bois d'œuvre feuillus	5,7	7,4	17	916,3	34	1 832,6
Bois d'œuvre résineux	15,1	19,6	45	1 300,5	90	2601
Bois d'industrie	11	14,3	33	277,2	66	554,4
Autre bois commercialisé	2,7	3,5	8	67,2	16	134,4
Bois non commercialisé	21,2	27,5	63	516,6	126	1 033,2
Total	55,7	72,3	166	3 077,8	332	6 155,6

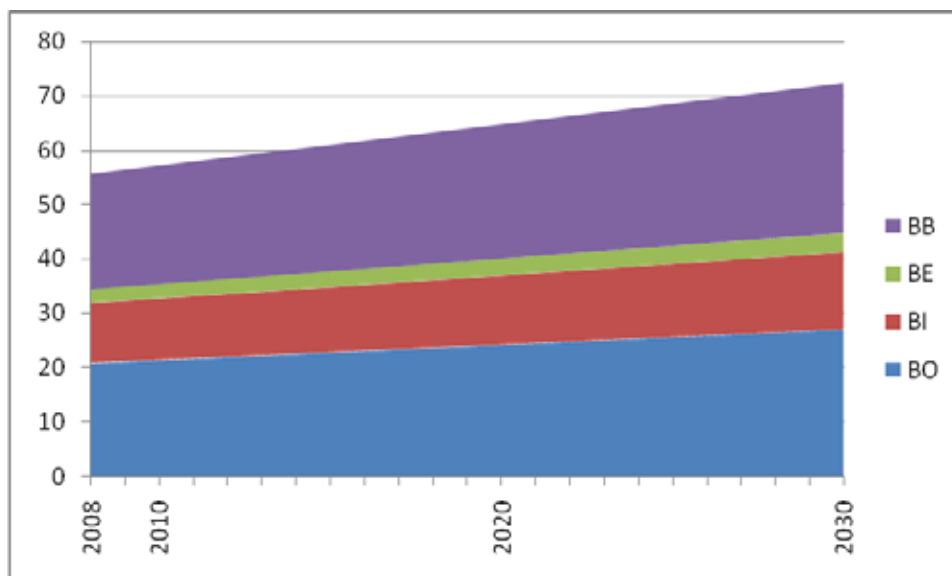


Figure 10 – Scénario « changement climatique et productivité » A2 – Evolution de la récolte (selon les catégories de produits) (millions de m³)

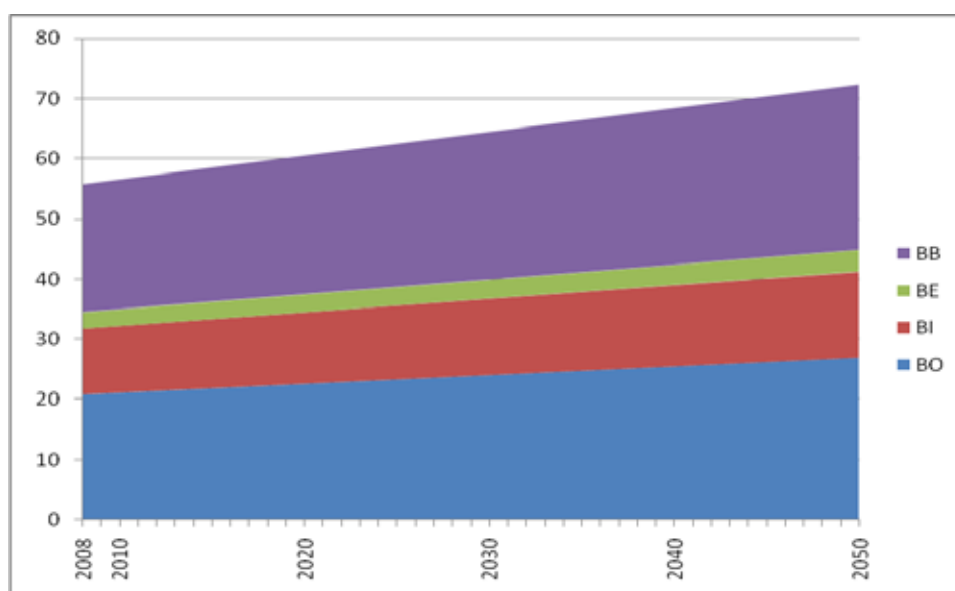


Figure 11 – Scénario « changement climatique et productivité » B2 – Evolution de la récolte (selon les catégories de produits) (millions de m³)

Les coûts

Au cours de cette période, l'écosystème forestier risque de subir des épisodes de fortes chaleurs pouvant être à l'origine de dépenses et de pertes importantes. En effet, la sécheresse et la canicule affaiblissent les arbres. Ceux-ci accumulent moins de réserves que d'habitude et deviennent plus fragiles vis-à-vis d'éventuels champignons ou insectes qui les attaqueraient ou en cas de nouveau stress climatique. Cette faiblesse peut perdurer plusieurs années. De plus, les épisodes de sécheresse entraînent une augmentation des surfaces forestières incendiées.

L'impact de l'épisode de sécheresse et canicule de 2003 en France a conduit à une plus forte mortalité des bois (perte de valeur marchande, d'avenir et frais supplémentaires de reconstitution ou gestion, se montant à plus de 0,5 milliard €), par une réduction de la

croissance des arbres restants (0,2 à 0,3 milliard €), la moindre production de truffes (14 millions €) et la perte environnementale au niveau du carbone (0,4 milliard € provenant à la fois d'une moindre séquestration et de l'abandon en forêt d'une partie des arbres morts), soit au total de l'ordre de 1,2 milliard €²¹⁸. Notons de plus, que l'été 2003 a été caractérisé par des incendies quatre fois plus importants que d'habitude (0,2 milliard €)²¹⁹.

On estime²²⁰ que dans le cas du scénario A2 (le plus probable), on pourrait observer d'ici 2030 jusqu'à 3 trois épisodes caniculaires. Le coût entraîné par ces phénomènes météorologiques pourrait annuler voire dépasser les gains attribuables à l'augmentation de la production annuelle. De même, pour le scénario B2, d'ici 2050, le nombre de canicules pourrait être compris entre 0 et 4. Les canicules pourraient alors entraîner des pertes de plusieurs milliards d'euros, que l'on considère l'ensemble des coûts engendrés ou uniquement ceux correspondant à des pertes de production.

Le coût du changement climatique pour ce qui concerne les incendies (cf. Annexe I.7) est lié à la plus grande fréquence des épisodes de sécheresses et de canicules (facteurs favorisant les incendies) et à l'extension progressive de la zone géographique concernée par un risque moyen ou fort d'incendies estivaux. Au total, le coût supplémentaire supporté par la collectivité, correspond d'une part, à l'augmentation des dépenses de prévention et de lutte, du fait de l'augmentation de la zone à risque et d'autre part, à l'augmentation du nombre d'années caractérisées par de grandes surfaces incendiées (plusieurs dizaines de milliers d'hectares d'écart à la moyenne)²²¹.

Les éléments rassemblés en Annexe proposent à titre d'illustration quelques approches très partielles de l'augmentation probablement significative à attendre du coût des incendies de forêts dû au changement climatique. Ainsi, on estime que la canicule de 2003 a occasionné deux à quatre fois plus de dépenses de l'Etat pour la lutte qu'en année moyenne et que les pertes pour le secteur forestier ont été de 370M€.

II.5.5.2 Scénario « valorisation + »

Les volumes

Sous le scénario A2, à horizon 2030, les volumes supplémentaires cumulés prélevés sur l'ensemble de la période (c'est-à-dire plus de 20 ans) sont, les suivants : pour les projets CRE2 bois : 23 millions de m³ ; pour le Grenelle de l'environnement : 376,5 millions de m³.

²¹⁸ Birot et Peyron

²¹⁹ Pour un exemple de coûts générés par les perturbations associés au changement climatique, cf. Annexe I.2.

²²⁰ Estimation du groupe méthodologique « Canicule ».

²²¹ Actuellement la Mission interministérielle sur l'extension du zonage « *risque élevé d'incendie de forêts* » en lien avec le changement climatique aux horizons 2030-2050, tente de présenter une approche du coût global à partir, pour chaque département, du classement du département en risque faible-moyen-fort, le coût/ha de la prévention pour la classe de risque correspondante, le coût de la lutte (charges fixes, charges variables) ramené à l'hectare de forêt protégée et, pour le territoire national, le coût des moyens nationaux déployés par la DSC. Les résultats sont attendus pour la fin de l'année.

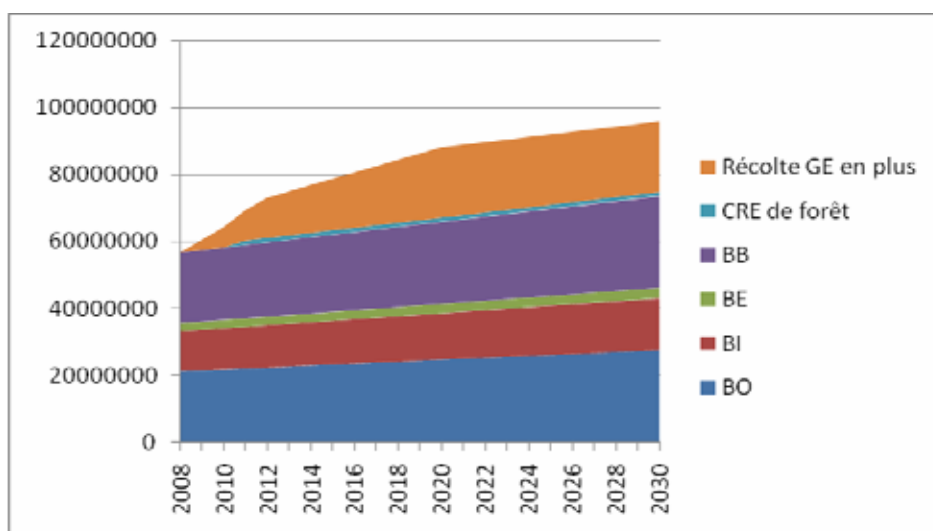


Figure 12 - Scénario « valorisation + » A2 (m³)

Sous le scénario B2, à horizon 2050, les volumes supplémentaires cumulés prélevés sur l'ensemble de la période considérée (c'est-à-dire plus de 40 ans) sont les suivants : pour les projets CRE2 bois : 46 millions de m³ ; pour le Grenelle de l'environnement : 796,5 millions de m³.

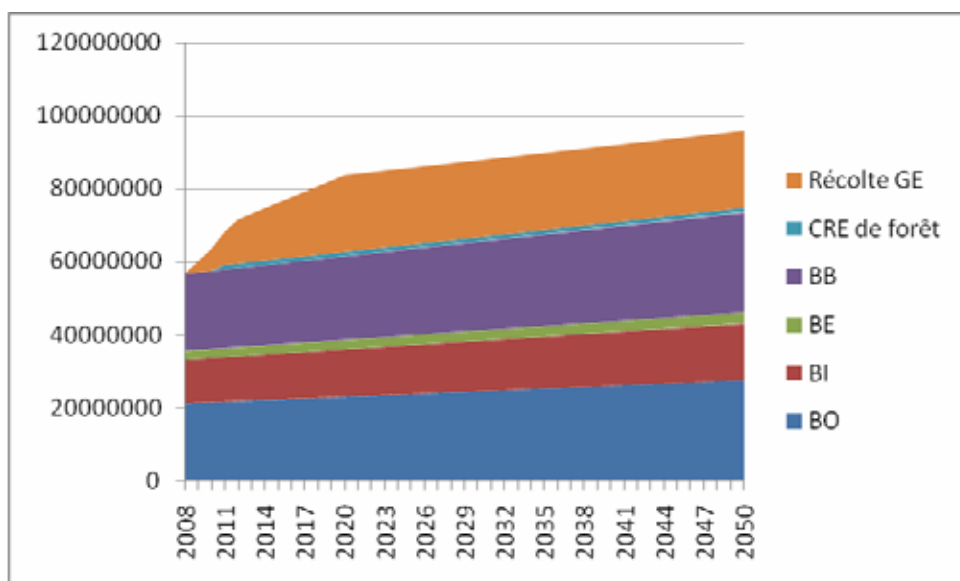


Figure 13 - Scénario « valorisation + » B2 (m³)

Les prélèvements permettant de remplir les objectifs des projets CRE2 bois et du Grenelle de l'Environnement devraient être inégalement répartis entre les 5 grandes régions forestières. Cette répartition devrait se faire environ selon cette répartition suivante²²² :

²²² Ventilation selon les taux de boisement (données des derniers inventaires IFN) des régions administratives constituant les zones IFN. Elle est donc identique pour A2 et B2.

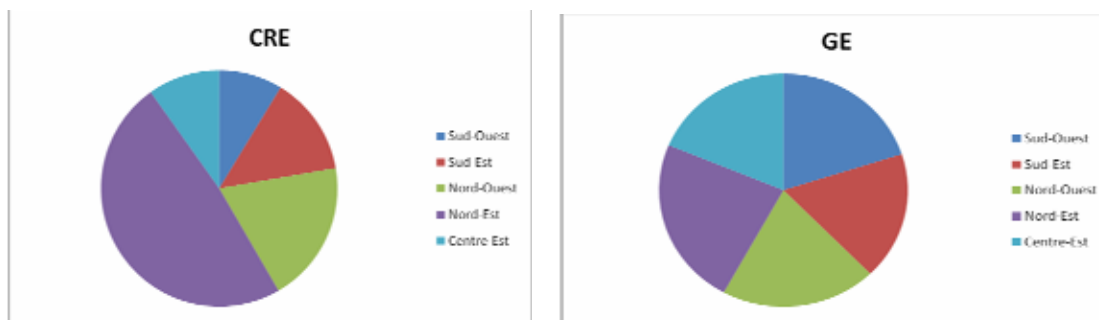


Figure 14 - Répartition des volumes récoltés additionnels, selon les grandes zones IFN

Notons, que en plus du **gain économique direct** que ces récoltes supplémentaires procurent, elles constituent un élément de « **sécurité** » pour la forêt, puisqu'en diminuant le volume de bois sur pied non récolté, elle diminue de fait l'ampleur des dégâts susceptibles d'être subis en cas de tempêtes ou de sécheresse.

Evaluation économique

Dans le cadre d'une étude confiée à l'IFN par l'ADEME, les rémanents de l'exploitation forestière actuelle ont été évalués à environ 34 millions de m³ (Mm³) par an (7,3 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep) par an). Comme noté dans les Assises de la Forêt « *La ressource forestière française peut être mieux exploitée : [est] identifier une ressource supplémentaire mobilisable, dans des conditions compatibles avec la gestion durable, de 12 Mm³ en 2012 et plus de 20 Mm³ en 2020 pour fournir le bois matériau et énergie nécessaires à l'atteinte des objectifs du Grenelle* ». Au-delà de l'intérêt de limiter l'accumulation du volume de bois sur pied et de permettre le développement de la bioénergie, cette augmentation du taux d'exploitation est pour la forêt française et ses acteurs, une source économique supplémentaire non négligeable.

Ainsi, en supposant que les prélèvements effectués dans le cadre des projets CRE2 bois et du Grenelle de l'Environnement soient valorisés comme l'est le reste de la récolte de bois en 2008 (prix moyen de 25€/m³)²²³. On obtient à horizon 2030 (A2), en cumulé sur la période : pour les projets CRE2 bois : 575 millions d'euros (26M€/an), pour le Grenelle de l'environnement : 9,4 milliards d'euros (427M€/an). A horizon 2050 (B2), les valeurs sont respectivement de 1,15 milliards d'euros (27,2M€/an) et de 19,9 milliards d'euros (473,8M€/an).

II.6 Analyse et discussion des résultats

Il semble que les conséquences biologiques et par conséquent économiques du changement climatique sur la forêt française et l'industrie qui en dépend vont se manifester en deux temps.

Tout d'abord, au cours d'une première période allant jusque vers 2030-2040, selon les scénarii A2 ou B2), plus ou moins longue selon la vitesse à laquelle va se manifester le changement climatique, les effets seront plutôt positifs en ce qui concerne la productivité des principales essences et par conséquent pour la production brute annuelle totale. Cette augmentation de la production annuelle brute, pour peu qu'elle soit exploitée, pourra générer des gains économiques. En conservant le taux de récolte de bois 2008, on peut estimer qu'en moyenne annuelle, les recettes supplémentaires par rapport à la

²²³ En supposant que les coûts d'exploitation de ces nouveaux volumes soient équivalents à ceux actuellement observés.

situation actuelle seront de 150 millions d'euros. Ces gains se retrouvent sur l'ensemble de la période dite « favorable » (soit 150M€*22 pour A2 et 150M€*42 pour B2), toutefois ils ne sont pas constants et suivent la même évolution que les volumes.

Ces gains potentiels pourront être renforcés par une augmentation du taux de récolte, notamment dans le souci du respect des engagements pris dans le cadre du Grenelle de l'environnement et du programme CRE2. A terme, ceux-ci prévoient un prélèvement supplémentaire d'environ 20 millions de m³, en 2020²²⁴. Toutefois, il faut, d'une part remarquer que ces gains ne seront pas répartis uniformément sur l'ensemble du territoire (le nord devant plus en bénéficier que le sud). D'autre part, ils pourront être modérés voire annulés par des pertes tout aussi importantes liées à une augmentation des dépenses de prévention contre les incendies, à une plus grande fragilité des peuplements face aux tempêtes, à une augmentation de la fréquence des sécheresses et des incendies. Chacun de ces événements peut engendrer des dépenses ou des pertes de plusieurs centaines de millions d'euros. Notons que, là aussi, les pertes seront inégalement réparties, la hausse des dépenses de prévention se concentrant principalement sur la moitié sud du pays par exemple.

Tableau 23 - Récapitulatif des gains et impacts valorisés (sur la période favorable)

	Scénario A2 (millions €)	Scénario B2 (millions €)
Gains à prix et usages constants - moyen-terme	+3077,8	+6155,6
Scénario CRE2 bois	+575,0	+1150,0
Grenelle de l'environnement	+9400,0	+19900,0
Total gains (cumulés sur la période)	+13052,8	+27205,6
Coûts des épisodes caniculaires	-0 à -3600	-0 à -4800

Ensuite, dans une seconde période, il semble que l'évolution des facteurs limitants que sont les réserves en eau du sol et les températures va entraîner un profond changement de la forêt française, en particulier dans la moitié sud. Les conditions météorologiques vont connaître un tel bouleversement que certaines essences pourraient disparaître dans plusieurs parties du territoire national. Il s'en suivrait un bouleversement de la composition de la forêt française qui privilégierait dans la moitié sud les espèces résistant le mieux au stress hydrique estival. De plus, au cours de cette période, les problèmes associés aux phénomènes extrêmes vont devenir centraux et être source de coûts extrêmement importants pour la société : la répétition des sécheresses va nuire fortement à la production forestière, accroître le risque d'incendies et affaiblir les peuplements qui seront moins capables de résister à des événements tels que les tempêtes. Pour cette période, les incertitudes sont telles qu'il est extrêmement difficile de chiffrer le bilan potentiel du changement climatique à long terme.

II.7 Besoins spécifiques et pistes identifiées pour poursuivre l'analyse

II.7.1 Pour affiner la méthodologie utilisée

Plusieurs pistes de recherche permettraient d'avancer dans la connaissance des possibles impacts du changement climatique sur les forêts.

Il s'agit de mieux connaître les **valeurs** elles-mêmes de la forêt, des produits et des aménités qu'elle procure, l'économie de la gestion forestière et des mesures de protection, de type incendie. Une **déclinaison régionale/locale** permettrait également

²²⁴ En supposant que les coûts d'exploitation de ces nouveaux volumes soient équivalents à ceux actuellement observés, on peut évaluer ces volumes supplémentaires à environ 450 millions d'euros/an.

d'avancer dans un diagnostic des pratiques actuelles et des mesures d'adaptation, tant spontanées que planifiées suite aux perturbations des forêts, qu'elles soient en lien ou non avec le changement climatique ou liées à l'activité humaine et aux processus naturels.

D'autres recherches sur les effets du changement climatique sont également nécessaires pour une meilleure appréciation des phénomènes. Les **causes de l'évolution de la productivité constatée** sur les 25 dernières années sont multiples (reboisement de la dernière moitié du XX^{ème} siècle, intensification de la gestion notamment du pin maritime, modification de l'environnement). Il est difficile de dégager ce qui est du ressort du changement climatique. Des travaux plus poussés sur le déterminisme environnemental sont nécessaires et/ou en cours (LERFOB/IFN notamment) et ce d'autant plus que les progressions constatées par le passé ne présagent en rien des évolutions futures. Compte tenu des limites imposées par les incertitudes planant sur les modèles climatiques, surtout en ce qui concerne les futurs changements des modèles de **précipitations**, il est difficile de prévoir les effets du changement climatique sur les forêts, à l'échelle régionale et locale et également au niveau des essences forestières, niveau pertinent pour les forestiers.

Il apparaît également très important de recenser et d'évaluer les ressources génétiques forestières présentes, ainsi que leurs capacités d'adaptation aux différents stress susceptibles de se produire lors des prochaines rotations sylvicoles. Une meilleure appréciation du comportement des sols à long terme et de l'aspect carbone dans les forêts (dont les sols) serait également utile. Ce travail considérable justifie la mise en place d'une stratégie communautaire et de coopérations scientifiques internationales dans ces domaines.

Des travaux de recherche sont en cours, mais il est essentiel, pour la planification de la gestion des ressources forestières, de connaître la vulnérabilité des forêts et les évolutions des schémas sylvicoles au changement climatique. Une adaptation appropriée permettra de réduire les effets négatifs du changement climatique tout en offrant au secteur la possibilité de nouveaux débouchés. Ainsi, les besoins se font sentir tant en recherche fondamentale qu'en recherche appliquée pour apporter des réponses aux gestionnaires des milieux.

De plus, comme l'indiquent les travaux actuels de la mission interministérielle sur « *l'extension future des zones à risque élevé d'incendies de forêt* » (cf. Annexe I.8), le changement climatique s'accompagnera d'une aggravation de l'aléa « incendie de forêt » dans les zones déjà concernées (massif aquitain et zone sud-est) et de sa propagation vers le nord et en altitude. Sur la base de l'estimation de l'extension des zones sensibles (travail en cours) il faudra réfléchir à la nécessaire adaptation, face à ce risque accru ou émergent, de la gestion sylvicole dans les années à venir (mobilisation de biomasse, traitement des peuplements déperissants,...). Il sera utile également de déterminer comment doivent évoluer les politiques de lutte et de prévention (par exemple, usage des technologies nouvelles pour améliorer la détection, la surveillance et le contrôle) et comment affecter les moyens sur l'ensemble du territoire pour atteindre le meilleur rapport coût/efficacité.

La redéfinition d'un **zonage du territoire avec des vocations forestières conseillées et encouragées en fonction des risques** serait particulièrement utile pour les propriétaires-gestionnaires. Cela donnerait également une visibilité des bassins d'approvisionnement potentiels des entreprises. Cette territorialisation compléterait les zonages existants et permettrait d'élargir le champ des impacts et mesures pris en compte.

II.7.2 Pour élargir le champ des impacts et des mesures pris en compte

Les motivations des propriétaires (notamment privés) et les leviers d'action sont des thèmes importants de recherche et d'analyse. La forêt risque d'être de plus en plus gérée en « **valeur d'actif espace naturel** » dans lequel les fonctions de production assureront une partie des ressources. L'élargissement aux autres fonctions que le bois est donc un élément non-négligeable. Il sera également utile d'introduire dans les analyses, la notion de **risque financier** qui existe dans la production, mais également dans l'écoulement des produits. Ces évaluations en termes de risque sont à mettre en relation avec la notion de **flexibilité** identifiée dans les mesures d'adaptation. Il y a également nécessité à examiner réellement l'option de l'incitation volontariste à l'adaptation des industries à ce que pourra produire la forêt. Ces champs de recherche sur les acteurs publics ou privés passent par une meilleure connaissance des phénomènes qu'ils soient du domaine de l'adaptation ou de l'atténuation (comme l'aspect carbone).

III Rapport du Groupe Santé

III.1 Introduction

III.1.1 Mission et composition du groupe

La direction générale de la santé (DGS) a été chargée d’animer les travaux concernant l’impact du changement climatique sur la santé.

Monique Delavière, ingénieure générale de génie sanitaire et chargée de mission à la DGS a présidé le groupe de travail « santé » sur les coûts et ont été associés la mission analyse stratégique, prospective, recherche et appui scientifique de la DGS (MASPRAS), la Direction de la Sécurité Sociale, l’Agence Française de Sécurité Sanitaire de l’Environnement et du Travail (AFSSET) et l’Institut de Veille et Sanitaire (InVS).

Les membres du groupe de travail du ministère de la santé et des sports ayant participé aux réunions sont :

Nom Prénom	Organis-me	Dates des réunions							
		06/03/08	27/03/08	21/04/08	23/05/08	11/07/08	09/12/08	04/02/09	20/02/09
Delavière Monique	MSS/DGS/S DEA	X	X	X	X	X	X	X	X
Fontaine Alain	MSS/DGS/M ASPRAS	X	X	X	X		X	X	X
Galland Clara	AFSSET/ DE							X	
Hennion Marie	DREES	X							
Lasfargues Gérard	AFSSET /DE	X		X			X	X	X
Pascal Mathilde	InVS/DSE	X	X	X	X	X		X	
Pavillon Christelle	DSS/EPF	X	X	X	X	X			
Thieriet Nathalie	AFSSET/ DE				X	X			
Thuret Anne	AFSSET	X							

Une liste des principaux acronymes et sigles utilisés figure en Annexe.

Les co-rédacteurs sont :

- Alain Fontaine, DGS, MASPRAS
- Gérard Lasfargues, AFSSET, responsable du DE en Santé-Environnement –Travail
- Mathilde Pascal, InVS, DSE
- Christelle Pavillon, DSS, EPF
- Annie Perraud, DSS, 6B
- Nathalie Thieriet, AFSSET, DE en Santé-Environnement-Travail

Et a concouru à la réalisation du rapport par ses suggestions et commentaires :

- Elvyne Février, MEEDDAT, DGEC

III.1.2 Eléments de contexte

Le rapport Stern a attiré l'attention des politiques sur le coût du changement climatique en cas d'inaction. Néanmoins, il est important de souligner que le coût pour la santé en France dans les cinquante prochaines années est certainement fort dépendant du contexte social et économique général. Il devrait dépendre aussi de la réponse qui sera apportée par le gouvernement, les collectivités locales, le secteur privé et les citoyens eux-mêmes.

Les conséquences économiques des effets du changement climatique sur la santé sont peu traitées au niveau international et le plus souvent de manière globale. L'exercice est délicat compte tenu des nombreuses sources d'incertitudes à prendre en compte : projections climatiques, impacts estimés sur la santé aux différentes échelles de temps, évolution de la société.

En France, l'évaluation économique des risques sanitaires liés à l'environnement ne fait pas non plus traditionnellement l'objet de publications. Le rapport de l'Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail (AFSSET), publié le 24 octobre 2007, a traité du coût de la pollution atmosphérique sur la base des dépenses pour l'assurance maladie associées aux principales pathologies engendrées par cette pollution.

La première phase du travail a consisté à identifier les impacts possibles du changement climatique en France, sans toutefois parvenir à une hiérarchisation du risque et à disposer d'estimations ou d'indications fiables sur la probabilité de réalisation, les populations potentiellement concernées et les échéances temporelles. Réaliser une évaluation économique de l'ensemble de ces impacts dans ces conditions nécessiterait des études complémentaires longues impliquant un temps et des moyens qui ne sont pas à la disposition de ce groupe de travail. Aussi, le choix a été fait de se centrer uniquement sur l'estimation du coût de catastrophes naturelles historiques en prenant l'angle des dépenses pour l'assurance maladie. Il convient de souligner que les dépenses d'assurance maladie ne sont pas les seules dépenses à prendre en compte mais sont les plus facilement quantifiables aujourd'hui. Elles ne sont cependant représentatives que d'une fraction de l'impact économique réel supporté par la société à court, moyen et long terme.

Aussi ces résultats sont présentés uniquement à titre indicatif et ne présument pas du coût réel du changement climatique dont les conséquences dépendront par ailleurs de nombreuses variables : modification du climat, de la vulnérabilité des populations, du système de santé, de l'évolution économique...

L'évolution qui sera donnée par tous les acteurs concernés dans les années futures à la prévention des risques sanitaires concernant notamment l'eau potable, les loisirs, le bâtiment, l'urbanisme, l'assainissement, l'air, l'alimentation et la surveillance de certaines pathologies aura une influence sur les conséquences du changement climatique sur la santé de la population française et les coûts en résultant.

III.2 Phénomènes climatiques étudiés

En Europe, l'aléa climatique exceptionnel le plus susceptible d'augmenter en fréquence et en intensité à cause du changement climatique est sans doute la canicule. Nous évaluons ici les éléments de coût disponibles pour les conséquences pour la santé de la vague de chaleur de 2003. D'après les scénarios du GIEC, une nette hausse de fréquence des vagues de chaleurs est à prévoir : un été du type de celui de 2003,, qui a eu des conséquences sanitaires importantes en termes de mortalité prématurée et de morbidité aggravée, pourrait devenir la norme d'ici la fin du siècle.

De même, les risques accrus d'inondations ont été identifiés dans le rapport sur les effets qualitatifs du changement climatique. En effet, il est attendu une augmentation probable du nombre de jours consécutifs de fortes pluies en hiver. Le présent document examine des éléments de coût des conséquences pour la santé des inondations importantes survenues dans le Gard du 8 au 10 septembre 2002, inondations au cours desquelles de nombreuses personnes ont été sinistrées. Les coûts ont été évalués sur la base d'une étude d'estimation de l'impact médico-psychologique menée à partir d'indicateurs de consommation de médicaments psychotropes (anxiolytiques, hypnotiques et antidépresseurs) recueillis par l'assurance maladie sur le court terme.

III.3 Évaluation économique de l'impact des dégradations de l'environnement sur la santé

Les données les plus communément accessibles sont celles qui correspondent aux coûts supportés par l'Assurance maladie. Cette introduction a pour but de situer ces dépenses dans l'évaluation économique de l'impact des dégradations de l'environnement sur la santé et de rappeler les principales étapes nécessaires à la réalisation de ce type d'évaluation.

Au cours de cette dernière décennie, plusieurs documents de synthèse sur les méthodes d'évaluation économique applicables au domaine de l'environnement et de la santé ont été publiés par les principales institutions internationales (OMS, OCDE, ...) ainsi que par les services ministériels ou les agences spécialisées de nombreux pays développés (Royaume Uni, États-Unis d'Amérique, Australie, ...). Ils témoignent du développement de ces méthodes et de la reconnaissance de leur importance pour l'élaboration des politiques publiques. Les bases méthodologiques et les finalités des principales méthodes utilisées dans ce contexte sont rappelées très sommairement en Annexe J.1.

III.3.1 Place des coûts de prise en charge financés par l'assurance maladie dans l'évaluation économique de l'impact des dégradations de l'environnement sur la santé

Les dégradations de l'environnement ou les événements climatiques extrêmes peuvent affecter la santé en induisant un risque de mortalité prématurée et/ou une augmentation de l'incidence ou de la sévérité de maladies spécifiques (exemples : pollution atmosphérique et maladies respiratoires, inondations et maladies infectieuses).

Le « coût de la maladie » est la composante la plus facilement identifiable de la valeur économique de ces conséquences sur la santé : il s'agit d'estimer les dépenses associées à la survenue et à la prise en charge, par le système de santé, des maladies causées par une dégradation de l'environnement ou qui pourraient être évitées par une amélioration de cet environnement.

Il est toutefois important de rappeler que, quelles que soient leurs causes, les dépenses de santé (*a fortiori* la part de ces dépenses prise en charge par les systèmes de solidarité collective) ne reflètent qu'une fraction de la valeur économique de la morbidité et de la mortalité prématurée. L'estimation de l'ensemble de cette valeur doit en effet prendre en compte, schématiquement²²⁵ :

- D'une part les « coûts directs » liés à l'utilisation des services de santé (au sens large) pour le dépistage, le traitement et la prise en charge des suites des

²²⁵ U.S. EPA, 2006: <http://www.epa.gov/oppt/coi/index.html>. Voir en particulier l'introduction pour la présentation des définitions et des méthodes principales : http://www.epa.gov/oppt/coi/pubs/I_1.pdf

phénomènes morbides, que ces dépenses soient financées par les patients eux-mêmes ou par la solidarité collective : c'est cette composante, ou la part financée par les dispositifs de solidarité, qui est le plus souvent identifiée comme « coût de la maladie ». Il faut toutefois rappeler que les coûts médicaux directs sont déterminés par les technologies diagnostiques et thérapeutiques disponibles, l'organisation du système de santé et les pratiques de soins prévalentes à un moment donné et peuvent donc varier notablement selon les lieux et dans le temps.

- D'autre part des « coûts indirects » représentant la valeur du temps perdu du fait de la maladie par le patient (temps consacré à la prise en charge de la maladie et années de vie perdues du fait d'un décès prématuré), mais aussi par son entourage quand celui-ci participe à sa prise en charge. L'estimation de la valeur de ce temps perdu peut notamment prendre en compte le retentissement sur la production.
- Enfin des « coûts intangibles » représentant la valeur accordée à la souffrance et à la dégradation de la qualité de vie associée à la maladie et à ses séquelles ; et plus largement à la vie elle-même.

Pour l'analyse économique, la valeur associée à la perte d'une vie humaine ou à la dégradation de sa qualité doit être au minimum égale, du point de vue de la société, au retentissement de la maladie et des décès sur la capacité de production (approche dite du « capital humain »). La prise en compte des coûts intangibles ou de la valeur intrinsèque accordée à la vie humaine et à sa qualité, nécessite de recourir à des méthodes dites de « révélation des préférences » (estimation du « consentement à payer » des individus et de la société pour éviter la survenue d'une situation pathologique ou d'un décès).

À titre d'exemple, dans une estimation du retentissement économique, en 2004, des troubles de la vision en Australie, les coûts directs (incluant les dépenses financées par les dispositifs de solidarité et d'assurance) ne représentaient que 18% (1 824 millions de \$ australiens) du retentissement économique total, alors que les coûts indirects et les coûts intangibles liés à l'altération de la qualité de vie représentaient respectivement 33% (3 224 millions) et 49% (4 818 millions) de ce total²²⁶.

En France, l'analyse économique des coûts du cancer publiée par l'INCa en 2007²²⁷ estimait, pour l'année 2004, le coût des soins curatifs dispensés par les professionnels et les établissements de santé (pris en charge intégralement par l'Assurance maladie dans le cadre d'une ALD) à près de 11 milliards €, les pertes de productivité liées à la prise en charge de la maladie à 0,5 milliards et les pertes de production liées à la mortalité prématurée à près de 17 milliards ; le rapport consacrait également un chapitre au retentissement de la pathologie sur la qualité de vie et à la discussion des possibilités (et des limites) de sa monétarisation.

Dans le domaine des transports, un rapport du Commissariat Général au Plan recommandait en 2001, après avoir passé en revue la littérature française et internationale, de retenir un montant de 1,5 million € comme valeur d'une vie statistique épargnée²²⁸. Sur la base d'un nombre moyen de 40 années de vie sauvées par un décès évité dans ce contexte et en accordant à chaque année de vie un poids équivalent, cela revient à estimer la valeur reconnue par la société pour chaque année de vie sauvée à 37 500€.

²²⁶ Taylor *et al.*, 2006

²²⁷ Amalric *et al.*, 2007

²²⁸ Boiteux, 2001

Au Royaume-Uni, le National Institute for Clinical Excellence (NICE) recommande actuellement l'adoption de nouvelles techniques thérapeutiques par le National Health System (NHS) lorsque leur coût par année de vie ajustée sur la qualité (QALY²²⁹) gagnée est compris entre 20 000£ et 30 000£ (22 000€-34 000€), mais des débats sont en cours sur la nécessité de relever ce seuil²³⁰.

III.3.2 Principales étapes de l'évaluation économique de l'impact des dégradations de l'environnement sur la santé

A - Le point de vue des politiques publiques est, en principe, celui de l'ensemble de la société. L'évaluation doit donc prendre en compte l'ensemble des coûts et des conséquences, quels que soient les acteurs individuels ou institutionnels concernés et les transferts réalisés entre ces acteurs. Toutefois, il est également nécessaire, pour déterminer la faisabilité des interventions envisagées, de considérer leurs coûts et leurs conséquences du point de vue de chacun des principaux acteurs concernés (industriels, patients, financeurs, ...). Des coefficients de pondération peuvent par ailleurs être introduits pour refléter, de façon explicite, l'importance relative accordée aux coûts ou aux conséquences sur la santé affectant certains groupes de la population.

B - Identification et évaluation des effets sur la santé attribuables aux dégradations de l'environnement. Il s'agit de déterminer les maladies et leurs conséquences ainsi que les causes de mortalité prématurée dont la probabilité est augmentée par l'exposition à un facteur de risque environnemental, puis de quantifier la fraction de cette morbidité et de cette mortalité qui peut effectivement être attribuée à une modification de l'exposition de la population au(x) facteur(s) de risque considéré(s).

C - Quantification des conséquences identifiées : les efforts de quantification peuvent porter en priorité sur celles dont la fréquence et/ou la sévérité semblent les plus importantes ; et/ou sur celles qui sont les plus susceptibles d'être influencées par les interventions envisagées.

D - Détermination de l'horizon temporel sur lequel étendre l'analyse : les conséquences pour la santé de l'exposition à un facteur de risque dans l'environnement peuvent être très différées dans le temps ; les manifestations morbides causées par un facteur de risque environnemental peuvent elles-mêmes être d'évolution rapide ou, plus souvent, évoluer de façon chronique sur plusieurs années.

E - Valorisation des ressources et des effets sur la santé que l'évaluation doit prendre en compte. Elle requiert des efforts de complexité variable selon le type d'analyse retenu (évaluation coûts-efficacité ou coûts-bénéfices) et selon le type de ressources et de conséquences pour la santé prises en compte.

F - Actualisation : l'analyse doit faire le choix du taux d'actualisation permettant de prendre en compte de façon adéquate les « préférences temporelles » : le principe qui postule que la valeur accordée aux événements décroît en fonction de l'éloignement de leur survenue dans le temps est désormais à peu près généralement accepté, mais la rapidité de cette décroissance ou son caractère uniforme peuvent encore faire l'objet de débats, d'autant plus lorsque l'on prend en compte des effets pouvant toucher les générations futures.

²²⁹ Quality Adjusted Life Year (QALY) : indicateur composite qui pondère chaque année de vie gagnée par un coefficient compris entre 0 et 1 pour prendre en compte la dégradation de la qualité de vie associée à la maladie et à ses séquelles.

²³⁰Towse, 2009

A chaque étape, les données qui peuvent être rassemblées peuvent être incomplètes, peu précises et/ou possiblement biaisées. Dans une perspective d'aide à la décision, il s'agit alors de tirer le meilleur parti possible des meilleures données disponibles, en explicitant de façon transparente chacune des hypothèses intégrées dans l'analyse et en explorant l'importance de leurs conséquences sur les conclusions de l'évaluation.

Deux situations doivent être distinguées selon que l'incertitude porte sur la plus ou moins grande précision de l'estimation d'un paramètre dont la distribution est (raisonnablement) connue ou selon qu'elle concerne un paramètre dont la distribution reste inconnue mais pour lequel des limites de variation vraisemblables peuvent être déterminées.

- Dans le premier cas (estimation imprécise), le choix de la valeur à retenir peut dépendre de l'attitude du décideur auquel l'analyse est destinée : lorsque le décideur est indifférent vis-à-vis du risque associé à la dispersion de la distribution, il est légitime d'utiliser l'indicateur de tendance centrale (moyenne, médiane, ...) approprié en fonction du type de distribution. Le coût moyen de la prise en charge thérapeutique d'une pathologie simple doit ainsi pouvoir être utilisé si sa distribution est à peu près symétrique, quelle que soit l'importance des variations individuelles autour de cette moyenne, dans la mesure où ces variations devraient s'équilibrer à l'échelle de la population. D'autres choix peuvent être faits si l'importance relative des risques associés à une sur- ou une sous-estimation n'est pas équivalente : par exemple celui d'utiliser une valeur maximale (borne supérieure d'un intervalle de confiance, quartile supérieur ...) lorsqu'il existe un seuil à ne pas dépasser, ou au contraire une valeur basse pour une estimation « *a minima* ».
- Dans le second cas (incertitude sur la distribution d'un paramètre), l'évaluation doit inclure une « analyse de sensibilité » utilisant différentes valeurs vraisemblables du ou des paramètres concernés afin d'apprécier la robustesse (la sensibilité) des résultats obtenus vis-à-vis de ces variations et d'identifier le cas échéant les valeurs au-delà desquelles les résultats seraient modifiés de façon appréciable. Cette analyse de sensibilité permet ainsi également d'identifier les besoins prioritaires d'amélioration des connaissances disponibles afin de réduire les incertitudes concernant les paramètres particulièrement critiques pour la validité des conclusions de l'évaluation.

III.4 Évaluation du coût pour l'assurance maladie

III.4.1 Canicule 2003

Remarque liminaire et précautions

Cette analyse présente une évaluation de l'impact financier pour l'assurance maladie de la canicule de 2003. Il convient de prendre ces résultats avec précaution, car un grand nombre de facteurs est mal connu. A ce stade, un grand nombre d'hypothèses a donc dû être posé, contrariant ainsi la valeur conclusive de l'estimation. On les précisera chaque fois que nécessaire.

De plus, en se référant à la canicule de 2003, il est certain que l'on ne pourra tirer de conclusion trop générale sur le coût d'une canicule. Les premières données sur la canicule de 2006 (voir plus loin) montrent un impact sur la mortalité inférieur à celui de 2003. Il conviendra donc de rester très prudent sur la réelle portée de ces évaluations.

Périmètre des coûts

Restreint au périmètre pris en charge par l'assurance maladie, nous comptabiliserons les coûts liés aux soins curatifs (y compris les diagnostics) délivrés par les établissements de santé et les professionnels libéraux exerçant en ville. Cela comprend également les coûts liés aux soins thérapeutiques prodigués par la médecine conventionnelle, comme les prescriptions de médicaments, produits de santé et actes d'auxiliaires médicaux à la charge de l'assurance maladie.

En revanche les soins de support et les soins palliatifs, les soins de suite et le coût des hospitalisations à domicile ne sont pas comptabilisés. Enfin, les coûts supportés par les patients ou leurs familles et les interventions de professionnels comme les assistantes sociales, les associations de patients et médecins non conventionnels ne font pas partie de l'analyse. Les coûts des pertes de production induites par les arrêts de travail ne sont pas non plus pris en compte.

Par commodité, les arrêts de travail, les coûts de la prévention et des dépistages n'ont pas été intégrés. Compte tenu de la spécificité du périmètre d'analyse, on suppose que cela ne porte pas à conséquence sur les résultats attendus.

III.4.1.1 Méthode

Dans un premier temps, une revue des études réalisées par l'assurance maladie a été réalisée. Une évaluation des coûts pour l'assurance maladie a ensuite été menée en s'appuyant sur les résultats d'études épidémiologiques conduites après la vague de chaleur de 2003. Elle se décompose en deux parties :

A – L'identification et la quantification des conséquences sur la mortalité et la morbidité à partir des résultats d'études épidémiologiques disponibles.

- A1. Impact sur la mortalité
- A2. Impact sur la morbidité

B – L'estimation des dépenses pour l'assurance maladie qui inclut :

Des dépenses attribuées à la canicule :

- B1. On tentera de mesurer le coût des soins urgents mobilisés en plein mois d'août pour faire face à l'augmentation soudaine des températures.
- B2. On mesurera les coûts financiers liés à la dégradation de l'état de santé des personnes qui n'ont pu se protéger suffisamment pendant la vague de chaleur et qui cependant ne sont pas décédées.

Et des dépenses évitées par la canicule :

- B3. On mesurera plus particulièrement celles qui résultent d'un nombre inhabituel de décès.

Les sources de données utilisées sont les suivantes :

- Sur la mortalité : les rapports publiés par l'Institut de Veille Sanitaire et par l'Inserm suite à la vague de chaleur de 2003.
- Sur la morbidité : Une étude épidémiologique plus détaillée a été publiée en février 2006 par l'InVS. Elle est la source principale de données sur la morbidité engendrée par la vague de chaleur 2003. Elle a été réalisée à partir des personnes participant à deux cohortes, celles des « Personnes Agées Quid » (PAQUID) et

celles des « Trois Cités » (3C). Ces deux cohortes ont pour objectif général l'étude épidémiologique du vieillissement cérébral et fonctionnel. La cohorte **PAQUID** est constituée d'environ **4000 personnes âgées de 65 ans** et plus résidant en Gironde ou en Dordogne et suivies depuis 1988. L'Etude des **Trois Cités (3C)** a inclus, entre janvier 1999 et février 2001, environ **10 000 sujets âgés de 65 ans** et plus vivant dans trois régions françaises autour de Bordeaux, Dijon et Montpellier. L'étude a porté sur les personnes vivantes en 2004 dans les deux cohortes : 879 individus dans le cas de PAQUID (tous les survivants) et 1416 individus dans le cas de 3C (Bordeaux : toutes les personnes suivies jusqu'en 2004, Dijon : échantillon par tirage au sort).

- Sur les coûts des soins : on se réfèrera aux publications de la CNAMTS concernant les effectifs et les coûts des soins par affections de longue durée (ALD). Ce sont des données annuelles de coûts qui se réfèrent à l'année 2004. Elles sont relativement détaillées. En revanche, elles ne permettent pas d'avoir une répartition fine selon l'âge des patients, ni d'aller très loin dans le détail des pathologies.

III.4.1.2 Résultats

Les conséquences sur la mortalité et la morbidité

- A1. Impact de la vague de chaleur de 2003 sur la mortalité

L'analyse de la surmortalité liée à la vague de chaleur a été initiée par l'Institut de veille sanitaire (InVS) puis complétée par la suite par l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm). Ainsi, une surmortalité de 14 800 décès a été observée entre le 1er et le 20 août 2003 (dont 80% concentrés sur 8 jours). Les premiers éléments recueillis ont mis en évidence qu'une proportion importante de la population touchée par la vague de chaleur était des personnes âgées. Ainsi, la surmortalité était de +70% chez les personnes âgées de 75 ans et plus contre +60% pour la population tous âges. Au total, 82% des décès attribuables à la vague de chaleur avaient touché des personnes âgées de 75 ans et plus (Tableau 24).

Tableau 24 - Vague de chaleur 2003 - Surmortalité du 1er au 20 août 2003 par tranche d'âge (INSERM – rapport canicule)

	Femmes	Hommes	Total	% du nombre de décès « en excès »
<45 ans	-9	151	142	1%
45-74	1044	1406	2450	17%
≥75	8475	3735	12210	82%
Tt âge	9510	5292	14802	100%

- A2. Impact de la vague de chaleur de 2003 sur la morbidité

Afin d'estimer l'impact de la vague de chaleur en termes de morbidité, l'InVS s'est concentré sur deux types d'informations : une variable reflétant « l'impact réel » (impact objectivable) causé par la canicule traduit si les sujets ont déclaré avoir eu un **malaise, une chute, une perte d'équilibre, ont été hospitalisés pendant le mois d'août ou sont décédés pendant le mois d'août** ; une seconde variable représentative de « l'aggravation subjective » de l'état de santé correspond aux réponses données à la question suivante « **Avez-vous ressenti, pendant la canicule, une aggravation de votre état de santé ?** ».

Un certain nombre d'autres variables ont été recueillies tant sur l'état de santé que sur les conditions sanitaires et sociales des individus pendant l'été 2003. L'objectif de l'InVS était de mettre en évidence les comportements pouvant être utiles en termes de santé

publique pour la prévention et la réduction des conséquences sanitaires liées à la survenue des vagues de chaleur. Ce rapport s'intéresse donc à de nombreux aspects, comme l'autonomie, l'habitat et les comportements d'adaptation que nous n'aborderons pas ici.

Pour notre part, nous nous intéresserons aux conclusions très précises fournies par cette étude d'une part sur le nombre de personnes ayant connu une dégradation de leur état de santé, d'autre part sur les pathologies des personnes concernées par cette dégradation et enfin sur les situations de recours ou non à des soins urgents.

Malgré la richesse des éléments apportés il convient de garder à l'esprit quelques limites de cette étude :

- L'étude porte sur des personnes âgées de 70 ans et plus pour les participants de la cohorte 3C, 80 ans et plus pour les participants issus de la cohorte PAQUID. Bien que de moindre ampleur, on peut craindre qu'une dégradation soit également survenue pour certaines pathologies à des âges jeunes. En l'occurrence, le rapport canicule de l'INSERM²³¹ cité plus haut mentionne que les 17% de la surmortalité concernent la tranche d'âge 45-74 ans. Les données disponibles ne permettent pas d'intégrer cette classe d'âge dans l'analyse.
- La canicule n'a pas sévi de la même façon selon les régions, ce qui pose un problème de représentativité géographique des échantillons étudiés. Les conditions de vie prévalant dans les régions où résident les cohortes dont proviennent les personnes étudiées ne sont pas représentatives de celles observées pour le reste de la France notamment en termes de climat, pollution, etc.... Les résultats obtenus ne sont donc pas nécessairement généralisables à l'ensemble de la population française.
- Enfin, il s'agit pour une part de données déclaratives, ce qui expose les résultats à des risques d'exagération, ou au contraire de minoration, en fonction des références subjectives propres de chaque répondant.

Ce que l'on peut néanmoins retenir :

- *Résultats pour les participants issus de la cohorte PAQUID (Personnes Agées QUID)*
 - Impact sur l'état de santé : parmi les 879 personnes âgées de 80 ans et plus retenues pour l'analyse, 157 personnes (18%) ont été touchées significativement par la vague de chaleur, qu'elles aient subi un « impact réel » sur leur santé (95 personnes) et/ou qu'elles aient déclaré une aggravation de leur état de santé (101 personnes) (Tableau 25).

²³¹Surmortalité liée à la canicule d'août 2003 – INSERM, 25 septembre 2003.

Tableau 25 - « Impact réel » de la canicule et « aggravation subjective » de l'état de santé pour les participants de la cohorte PAQUID en nombre de personnes

		« Impact réel »			
		oui	non	total	%
Aggravation subjective de l'état de santé	Oui	39	62	101	11%
	Non	56	722	756	86%
	Val. Manq.	.	.	22	3%
	Total	95	784	879	
	%	11%	89%		

- Les sujets considérés comme ayant subi un « **impact réel** » étaient ceux ayant déclaré avoir eu un malaise, une chute, une perte d'équilibre, ayant été hospitalisés pendant le mois d'août ou étant décédés pendant le mois d'août.
- « L'aggravation subjective » de l'état de santé mesure, elle, la perception des personnes interrogées : Il y a **aggravation de l'état de santé** en cas de réponse positive à la question « Avez-vous ressenti, pendant la canicule, une aggravation de votre état de santé ? »
- Pathologies concernées : les personnes souffrant de pathologies cardiovasculaires et de démence ont eu un risque plus élevé de déclarer une aggravation de leur état de santé. Les individus souffrant de pathologie rénale, de maladie respiratoire, neurologique, cardiovasculaire ou de troubles de l'humeur ont connu un risque supérieur aux individus ne présentant pas ces pathologies de subir un « impact réel » de la chaleur.
- Recours aux soins urgents : pendant la canicule, plus de 70% des sujets ont consulté un médecin ; 2,8% disent l'avoir consulté à cause de la chaleur. Par ailleurs, 3,11% ont été hospitalisés durant l'été et 1,84% pendant la 1ère quinzaine d'août. Il n'est cependant pas précisé si l'hospitalisation est liée à la vague de chaleur ou pas.

Résultats pour les participants issus de la cohorte des Trois Cités

- Impact sur l'état de santé : parmi les 1 416 individus âgés de 70 ans et plus retenus pour l'analyse, 152 personnes (10,73%) ont été touchées significativement par la vague de chaleur, qu'elles aient subi un « impact réel » (85 personnes) et/ou une aggravation subjective de leur état de santé (101 personnes) (Tableau 26).

Tableau 26 - « Impact réel » de la canicule et « aggravation subjective » de l'état de santé pour les participants de la cohorte 3C en nombre de personnes

		« Impact réel »			
		oui	non	total	%
« Aggravation	Oui	34	67	101	7%

subjective » de l'état de santé	Non	51	1264	1300	92%
	Val. Manq.	.	.	15	1%
	Total	85	1331	1416	
	%	6%	94%		

- les sujets considérés comme ayant subi un « **impact réel** » étaient ceux ayant déclaré avoir eu un malaise, une chute, une perte d'équilibre, ayant été hospitalisés pendant le mois d'août ou étant décédés pendant le mois d'août.
 - « **l'aggravation subjective** » de l'état de santé mesure, elle, la perception des personnes interrogées : Il y a aggravation subjective de l'état de santé en cas de réponse positive à la question « Avez-vous ressenti, pendant la canicule, une aggravation de votre état de santé ? »
- Pathologies concernées : l'asthme, la dépression, les pathologies rénales et la consommation d'alcool sont associés au risque de déclaration d'une aggravation subjective de l'état de santé. Les individus souffrant d'une maladie neurologique, d'œdème des jambes ou de dépression ont un risque plus élevé d'avoir subi un « impact réel » pendant la période de canicule.
 - Recours aux soins urgents : pendant la canicule, plus de 30% des sujets ont consulté un médecin. Parmi eux, 8% disent l'avoir consulté à cause de la chaleur. De plus, 1,48% des personnes a été hospitalisé pendant l'été (0,3% pendant le mois d'août). Il n'est cependant pas précisé si l'hospitalisation est due à la vague de chaleur ou pas.

Estimation des dépenses pour l'assurance maladie

Une étude spécifique de la CNAMTS réalisée en 2004 étudie la consommation médicale des personnes âgées décédées au mois d'août 2003 et la compare à celle d'un échantillon du même âge et ayant survécu²³². La proportion de patients en ALD était de 82,2% chez les personnes décédées, comparable à celle observée pour les personnes ayant survécu (Tableau 27).

Tableau 27 - Comparaison des profils de patients selon le motif d'exonération entre l'échantillon témoin et les personnes décédées en août 2003 (CNAMTS – Point de conjoncture n°23)

Pourcentages	Personnes décédées en août 2003			Echantillon témoin (personnes vivantes)		
	ALD *	non ALD **	Ensemble	ALD *	non ALD **	Ensemble
70 à 74 ans	83,45	16,55	100	82,76	17,24	100
75 à 79 ans	83,80	16,20	100	83,68	16,32	100
80 à 84 ans	83,26	16,74	100	83,74	16,26	100
85 à 89 ans	82,02	17,98	100	81,85	18,15	100
90 à 94 ans	79,80	20,20	100	79,75	20,25	100
95 ans et plus	78,18	21,82	100	77,13	22,87	100
Total	82,17	17,83	100	82,11	17,89	100

*: personnes prises en charge à 100 % pour Affection de Longue Durée

** : personnes non prises en charge pour Affection de Longue Durée

Cette étude, se limitant au champ des soins ambulatoires, n'indique pas si les patients décédés ont davantage eu recours à l'hospitalisation que les autres patients. Elle conclut que les personnes décédées en août avaient commencé à augmenter leur consommation médicale dès le mois de mars 2003, soit cinq mois avant leur décès (Figure 15). Il est possible que leur état de santé ou les effets secondaires des traitements aient pu accroître leur sensibilité aux effets de la canicule. L'analyse montre aussi que la

²³² Point de conjoncture n°23 –mars 2004

consommation médicale et tout particulièrement celle des consultations et des visites s'est fortement accrue en juillet et en août.

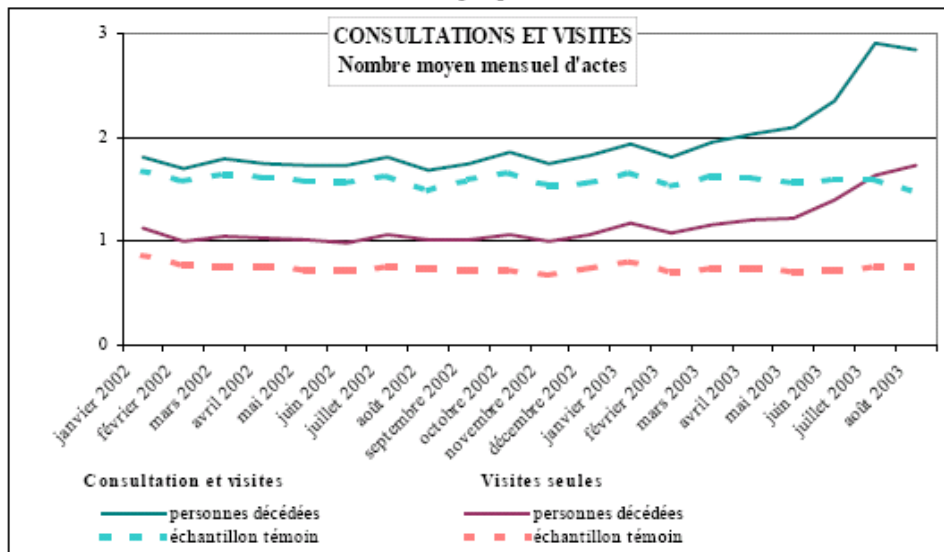


Figure 15 - Comparaison de la consommation d'actes médicaux de janvier 2002 à août 2003 entre l'échantillon témoin et les personnes décédées en août 2003 (CNAMTS – Point de conjoncture n°23)

- B1. Coûts liés aux urgences

Pendant la canicule, 2,8% des personnes âgées de 80 ans et plus participant à l'étude PAQUID et 8% des personnes de 70 ans et plus de l'étude 3C ont fait appel à leur médecin généraliste en raison des fortes chaleurs.

L'estimation du coût unitaire moyen (par personne) pour l'assurance maladie du recours à un généraliste pendant la canicule 2003 repose sur trois éléments :

- Le montant remboursé pour une consultation et pour une visite, avec et sans exonération ;
- La proportion de personnes exonérées de ticket modérateur ;
- La part respective de ces deux actes dans le recours aux soins.

Le tarif de responsabilité d'une consultation en 2003 s'élevait à 20€ avec un taux de remboursement de 70% ou de 100% en cas d'exonération. La base de remboursement de la visite s'élevait à 30€ en situation justifiée et 20€ sinon. Un certain nombre de majorations entre en vigueur selon les cas : majoration de nuit, dimanche et jour férié. Compte tenu de celles-ci, le tarif opposable moyen des visites est estimé à 32€ en situation justifiée et 26€ sinon, tarif sur lequel s'applique un taux de remboursement de 70% ou de 100% en cas d'exonération.

Pour la consultation, nous retenons un coût moyen de 16,50€ pour les personnes de 70 ans et plus et de 17,40€ pour celles de 80 ans et plus. Il correspond à une part de 42% de patients remboursés à 100% parmi les patients de 70 ans et plus et de 57% parmi les personnes de 80 ans et plus.

Pour les visites, on peut raisonnablement penser qu'elles étaient justifiées et remboursées par conséquent sur la base d'un tarif opposable de 32€. Compte tenu des proportions de personnes exonérées mentionnées ci-dessus, le remboursement moyen

d'une visite est estimé à 26,40€ pour les personnes de 70 ans et plus et 27,90€ pour les personnes de 80 ans et plus.

Enfin, au vu des résultats de l'étude DSES (Direction de la stratégie, des études et des statistiques de la CNAMTS), les visites ont constitué 50% des recours aux généralistes, ce qui aboutit à un coût moyen du remboursement des actes par patient de l'ordre de 21€ pour les personnes de 70 ans et plus et de 23€ pour les personnes de 80 ans et plus.

Les taux de recours aux généralistes en situation normale pour les personnes de 70 ans et plus et celles de 80 ans et plus ne sont pas disponibles actuellement ; leur détermination nécessite d'adresser une requête spécifique à la CNAMTS.

Les estimations finales sont détaillées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 28 - Impact financier du recours aux médecins généralistes pendant la période chaleur de 2003

	1) Effectifs INSEE au 1er janvier 2004	2) Hypothèses de taux de recours aux médecins	3) Nombre de patients ayant eu recours au généraliste = 1*2	4) Hypothèse de coût unitaire pour l'Ass. Mal.	5) Coût total Assurance Maladie (millions €) = 3*4/1 000 000
70 ans et plus	7 236 505	8,0%	578 920	21€	12,0
80 ans et plus	2 624 046	2,8%	73 473	23€	1,7

Sur la base de ces hypothèses, on peut estimer que le recours aux généralistes pendant la période caniculaire de 2003 s'est conclu par un surcoût pour l'Assurance maladie de l'ordre 12 Millions € pour les 70 ans et plus, dont 1,7 Million € pour les 80 ans et plus.

En 2003, les remboursements annuels correspondant à des consultations ou à des visites de médecins généralistes ont représenté 5,5 milliards €, soit environ 500 millions € remboursés mensuellement. Le surcoût lié à la canicule représenterait donc environ 3% des remboursements sur un mois, soit l'équivalent d'une demi-journée de remboursement.

On ne dispose pas d'information détaillée sur le recours aux urgences, néanmoins la DREES a publié en septembre 2006 un article « Etudes et Résultats » sur l'activité des services d'urgences en 2004, couvrant également la période antérieure²³³. Selon cette analyse, au niveau national et comptabilisé annuellement, le phénomène n'a pas eu une ampleur suffisante pour que l'on puisse noter un accroissement significatif de l'activité des urgences pendant l'année 2003. Il est possible qu'une augmentation soudaine et massive de la demande se soit heurtée à un engorgement et une saturation des services qui ont fonctionné au maximum de leur capacité.

S'agissant de l'hospitalisation, les taux d'hospitalisation recueillis par l'analyse des données concernant les participants issus de la cohorte 3C sont très faibles : 21 personnes ont été hospitalisées pendant l'été (1,49%), dont 5 (0,4% du total) pendant la première quinzaine d'août. Le taux d'hospitalisation est plus élevé dans la cohorte plus âgée de PAQUID, avec 27 personnes hospitalisées pendant l'été (3,11%), dont 16 (1,84%) pendant la première quinzaine d'août. Il n'est en revanche pas indiqué si l'hospitalisation est causée ou non par la vague de chaleur. Or l'hospitalisation pour ces tranches d'âge est relativement fréquente : les recours à l'hospitalisation sont de 38,4%

²³³ Etudes et Résultats n°524. L'activité des services d'urgences en 2004 : Une stabilisation du nombre de passages.

par an au-delà de 80 ans (soit en moyenne 3,2% par mois indépendamment des variations saisonnières). La difficulté ici est donc de déterminer la part des hospitalisations attribuable à la vague de chaleur. Cette incertitude nous amène à ne pas chiffrer cette hypothèse.

Tableau 29 - Taux de recours aux soins hospitaliers par tranche d'âge sur une année donnée

	Total hospitaliers soins
Résultats issus de l'exploitation des données de consommation de l'Echantillon Permanent des Assurés Sociaux (EPAS) pour l'année 2003, échantillon représentatif de la population du Régime Général hors sociétés locales mutualistes (SLM) au 1/600ème.	14,6%
	16,3%
	18,2%
	22,2%
	26,9%
	31,5%
	38,4%
	19,7%

Le taux de recours hospitalier des plus de 81 ans (38,4%) est :

- le nombre de personnes de plus de 81 ans ayant consommé des soins hospitaliers (consultations externes et frais hospitaliers)
- par rapport à la population de plus de 81 ans protégée par le régime général.

- B2. Les coûts postérieurs liés à la dégradation de l'état de santé des malades suite à la vague de chaleur

Les coûts postérieurs liés à la vague de chaleur concernent les patients qui sont restés en vie et qui ont connu une dégradation de leur état de santé ressentie et/ou objectivable les conduisant à recourir davantage aux soins. On s'intéressera donc à la proportion de patients qui dans les deux études ont subi un « impact réel » et/ou une aggravation ressentie de leur état de santé, soit 18% des patients âgés de 80 ans et plus de l'étude PAQUID et 11% des patients âgés de 70 ans et plus de l'étude 3C.

Cette aggravation de l'état de santé est associée dans l'étude réalisée par l'InVS à différentes pathologies. Au regard des pathologies concernées, dont la liste n'est pas identique dans les deux études, on réalisera donc deux simulations, l'une pour les personnes de 70 ans et plus et la seconde pour les personnes de 80 ans et plus.

On estimera en premier lieu les effectifs des personnes atteintes par les pathologies citées, aux âges représentés dans chacune des deux cohortes, puis ceux des patients dont l'état de santé s'est dégradé. On simulera ensuite l'augmentation des coûts consécutifs à cette dégradation.

❖ **Estimation à partir des données des participants de la cohorte PAQUID :**

Les pathologies identifiées comme associées à une dégradation de l'état de santé des participants issus de la cohorte PAQUID comprennent les maladies cardio-vasculaires, les démences ou troubles de l'humeur, les pathologies rénales, les maladies respiratoires et neurologiques.

Pour estimer le nombre de personnes concernées sur l'ensemble du territoire, on retiendra les chiffres de patients en ALD en 2004, France entière, publiés par la CNAMTS en 2006 à partir l'étude « fréquence et coûts »²³⁴. Dans le cas des troubles de l'humeur,

²³⁴ Pratiques et Organisation des Soins volume 37 n° 3 / juillet-septembre 2006. Fréquence des trente affections de longue durée pour les bénéficiaires du Régime général de l'Assurance maladie en 2004

on ne retiendra pas l'ensemble des patients de l'ALD n°23 (troubles de l'humeur) mais seulement le sous-groupe relatif aux troubles anxieux graves, qui regroupe trois codes CIM spécifiques : F40 (troubles anxieux phobiques), F41 (autres troubles anxieux) et F42 (troubles obsessionnels compulsifs). Pour les autres pathologies, ce sont les fréquences de l'ALD qui ont été utilisées.

Par ailleurs, ces chiffres ne sont pas systématiquement disponibles pour tous les régimes : on utilisera donc en première estimation un facteur de redressement de 1,2.

Tableau 30 - Estimation des patients dont l'état de santé s'est dégradé en août 2003 - Avec un taux de dégradation de 17,9% issu de la conclusion de l'étude réalisée sur les participants de PAQUID

	(1) Effectifs ALD 2004 (estimation tous régimes)	(2) moyen âge	(3) part des personnes de 80 ans et plus	Effectifs avec état de santé aggravé (Nb de personnes) : (1)* (3)*0,179
AVC (Accident vasculaire cérébral)	230 723	67	17%	7 020
AOMI (artériopathie)	341 160	70	17%	10 381
Insuf. Cardiaque	482 022	68	17%	14 667
HTA (hypertension artérielle)	951 571	71	17%	28 954
Maladie coronaire	796 019	70	17%	24 221
Diabète	1 459 354	64	17%	44 312
Troubles de l'humeur (anxiété)	74 277	55	8%	1 048
Pathologie rénale (néphropathie)	71 061	54	9%	1 184
Maladie respiratoire	311 830	58	10%	5 570
Maladie neurologique (parkinson)	80 683	75	35%	5 057
Démences et maladie d'Alzheimer	186 905	81	40%	13 353
TOTAL	4 985 606			155 766

NB : une personne enregistrée pour plusieurs ALD simultanément est comptée autant de fois que le nombre d'ALD pour lesquelles elle est enregistrée. Les totaux surestiment les effectifs de la population atteinte d'une ALD (ils supposent que chaque patient ne souffre que d'une ALD à la fois). Cette hypothèse nous est utile pour les besoins de l'étude (il s'agit d'estimer les coûts de prise en charge des pathologies). Par contre, il est également possible que les personnes présentant plusieurs pathologies associées ne soient pas enregistrées en ALD pour toutes ces pathologies.

Note de tableau : la proportion de 17% de patients âgés de personnes de 80 ans et plus pour les maladies cardio-vasculaires résulte d'une donnée agrégée, il n'a donc pas été possible de distinguer chacune des ALD.

En appliquant le taux d'aggravation de l'état de santé de 17,9% des patients de 80 ans et plus de PAQUID à l'ensemble des effectifs de la population de la même classe d'âge en ALD pour les mêmes pathologies, on estime qu'environ 150 000 cas d'aggravation d'une pathologie seraient survenus pour des personnes de 80 ans et plus.

Une fois le nombre de cas d'aggravation estimé, toujours selon l'étude fréquence et coûts de la CNAMTS, on estime le surcoût associé à leur prise en charge, pour l'assurance maladie. A cette fin, on retient le montant annuel moyen correspondant à la prise en charge de l'ALD. Ne disposant pas de données objectives pour mesurer l'accroissement

des coûts des soins, on se borne à faire un jeu d'hypothèses que l'on applique aux effectifs estimés dans l'étape précédente. Ainsi une augmentation moyenne de 10% des coûts se traduit par un coût supplémentaire d'environ 70M€, 20% par un surcoût de 140M€, etc....

Tableau 31 - Coût moyen des pathologies : montants annuels moyens déclarés en rapport avec l'ALD - Impact d'une augmentation de 10% du coût moyen

	(1) coût annuel moyen (€)	(2) Surcoût moyen (10%) (1)*0,10	(3) Nombre de cas	Surcoût total (€) : (2) * (3)
AVC	6162	616	7 020	4 325 927
AOMI	4705	471	10 381	4 884 104
Insuf. Cardiaque	4173	417	14 667	6 120 428
HTA	3815	382	28 954	11 045 938
Maladie coronaire	3688	369	24 221	8 932 671
Diabète	4265	427	44 312	18 899 027
Troubles de l'humeur (anxiété)	5953	595	1 048	623 875
Pathologie rénale (néphropathie)	19108	1 911	1 184	2 261 573
Maladie respiratoire	4764	476	5 570	2 653 387
Maladie neurologique (parkinson)	6156	616	5 057	3 112 879
Démences et maladie d'Alzheimer	5943	594	13 353	7 935 915
				70 795 724

Source pour (1) et (3) : étude « fréquence et coûts des ALD » - 2004 - CNAMTS

❖ Estimation à partir des données concernant les participants de la cohorte 3C :

Les pathologies suivantes : asthme, dépression, pathologies rénales, maladies neurologiques et œdème des jambes, étaient plus souvent associées à la déclaration d'une aggravation subjective de l'état de santé et/ou d'un « impact réel » pour les participants de la cohorte 3C. Cette liste est plus restreinte que celle qui concerne les participants de PAQUID, car elle ne comprend pas le diabète ni les maladies cardiovasculaires. En revanche, elle est plus large pour les affections psychiatriques, car elle intègre les problèmes dépressifs plutôt que les troubles anxieux.

Avec un taux de dégradation de 11% issu de la conclusion de l'étude 3C

Tableau 32 - Estimation des patients dont l'état de santé s'est dégradé en août 2003

	(1) Effectifs ALD 2004 (estimation tous régimes)	(2) âge moyen	(3) part des personnes de 70 ans et plus	Effectifs avec état de santé aggravé : (1)*(3)*0,1073
Dépression	151 735	54	30%	4 886
Pathologie rénale (néphropathie)	71 061	54	25%	1 940
Asthme	143 442	58	non déterminé	non déterminé
Maladie neurologique (parkinson)	80 683	75	73%	6 347
TOTAL	446 921			T > 13 173

NB : une personne enregistrée pour plusieurs ALD simultanément est comptée autant de fois que le nombre d'ALD pour lesquelles elle est enregistrée. Les totaux surestiment les effectifs de la population atteinte d'une ALD (ils supposent que chaque patient ne souffre que d'une ALD à la fois). Cette hypothèse nous est utile pour les besoins de l'étude (il s'agit d'estimer les coûts de prise en charge des pathologies). Par contre, il est

également possible que les personnes présentant plusieurs pathologies associées ne soient pas enregistrées en ALD pour toutes ces pathologies.

En appliquant le taux d'aggravation de l'état de santé de 10,73% des patients de 70 ans et plus de la cohorte 3C à l'ensemble des effectifs de la population de la même classe d'âge en ALD pour les mêmes pathologies, on estime que plus de 13 173 cas d'aggravation d'une pathologie seraient survenus pour des personnes de 70 ans et plus. Il est à souligner que les pathologies prises en compte dans la cohorte 3C sont moins nombreuses que celles de l'étude PAQUID.

On estime par exemple le nombre de cas d'aggravation d'une néphropathie à 1 940 cas chez les sujets de 70 ans et plus à partir des données de la cohorte 3C, contre 1184 cas chez les sujets de 80 ans et plus à partir des données de la cohorte PAQUID.

- B3. Les coûts évités

On peut considérer que 82,2% des 14 800 décès attribués à la canicule selon les estimations de l'InVS et de l'INSERM sont survenus chez des personnes en ALD²³⁵. Afin d'estimer le coût associé à la prise en charge de ces personnes si elles avaient survécu, il convient de retenir un certain nombre d'hypothèses sur le temps de vie perdue et les coûts afférents à la consommation de soins des patients décédés.

En moyenne, un patient en ALD coûte à l'assurance maladie 7 068€ par an²³⁶. Ce remboursement annuel moyen est très variable selon la pathologie (de 3 400 € pour la spondylarthrite ankylosante grave à 26 464€ pour les hémophilies et affections constitutionnelles de l'hémostase graves), le profil du patient (avec 19 504€ pour un garçon nourrisson et 6 186€ pour un homme de 60-64 ans) et l'ancienneté de la déclaration dans l'ALD (le remboursement annuel moyen est de 10 938€ au cours de la première année de l'ALD, il atteint 5 000€ les années suivantes). Le montant le plus élevé est observé la dernière année de vie avec une moyenne annuelle par malade de 25 900€. Le coût moyen pour l'Assurance maladie d'un patient atteint d'une maladie chronique a été évalué à environ 900€ par an pour une personne qui n'est pas en ALD²³⁷. Afin d'estimer les coûts évités en raison d'un décès, on considèrera donc deux estimations unitaires moyennes : celui d'un patient en ALD à 15 000€ par an et celui d'un patient non couvert par une ALD à 1 000€ par an.

Les estimations sont détaillées dans le tableau ci-dessous.

²³⁵ cf. Tableau 4, source : CNAMTS – Point de conjoncture n°23

²³⁶ Pratique et organisation des soins, volume 37, n°4 / octobre-décembre 2006

²³⁷ Point d'information mensuelle. CNAMS. Jeudi 5 Juillet 2007.

Tableau 33 - Estimation des coûts évités pour l'assurance maladie selon le nombre de mois de vie perdus

	(1) Nombre de Décès	en %	(2) hypothèses de remboursement moyen annuel	Coût en k€			
				1 mois : (1)*(2)/12	3 mois : (1)*(2)/4	6 mois : (1)*(2)/2	12 mois : (1)*(2)
ALD	12 167	82,20%	15 000€	15 209€	45 626€	91 253€	182 505€
non-ALD	2 635	17,80%	1 000€	220€	659€	1 318€	2 635€
Total	14 802	100%		15 429€	46 285€	92 571€	185 140€

III.4.1.3 Conclusions

Les estimations produites sont synthétisées dans le Tableau 34. Globalement, selon les hypothèses retenues, on peut arriver à des conclusions très différentes avec un solde de coûts très positif ou très négatif.

Tableau 34 - Récapitulatifs canicule de 2003

Coûts évités

	hypothèses de mois de vie perdus			
	1 mois	3 mois	6 mois	12 mois
coûts évités (millions d'€)	15	46	93	185

Surcoûts liés aux soins urgents

	70 ans et plus	Dont 80 ans et plus
coûts des soins urgents (millions d'€)	12	2

Coûts maximum des soins de suite

	hypothèse d'augmentation du coût moyen annuel			
	10%	20%	30%	40%
coûts des soins de suite (millions d'€)	71	142	212	283

On peut proposer schématiquement deux cas extrêmes à partir de ces estimations (et en ne retenant que les surcoûts liés aux soins urgents pour les 70 ans et plus) :

1) une hypothèse « basse » (en termes de retentissement financier pour l'assurance maladie) correspondant aux coûts évités par 6 mois de vie perdue et à une augmentation de 10% des coûts des soins de suite : la canicule aurait évité à l'assurance maladie une dépense de 10 millions d'euros...

2) une hypothèse « haute » (du même point de vue), correspondant aux coûts évités par 1 mois de vie perdue et à une augmentation de 40% du coût des soins de suite : le coût de la canicule pour l'assurance maladie aurait été au total de 280 millions d'euros.

Si l'on reprend les constats de dépenses de l'année 2003, la CNAMTS dans son bilan de l'année 2003²³⁸ constate des évolutions très proches de celles des années précédentes, ainsi note-t-elle que « le volume global des soins de ville, apprécié sans tenir compte des revalorisations tarifaires qui sont intervenues ces dernières années, a progressé de façon pratiquement aussi rapide en 2003 qu'en 2002 ».

S'agissant de l'hôpital, l'activité des établissements de santé relevée par la DREES²³⁹ mesurée en nombre de séjours des établissements publics et privés en France métropolitaine relève une légère reprise en 2003 (+0,6%). Cette légère croissance s'explique par une augmentation de l'hospitalisation à temps partiel et plus particulièrement dans les disciplines de médecine, chirurgie et obstétrique et de soins de suite et de réadaptation. Mais, comme le note la DREES, l'hospitalisation à temps partiel connaît depuis plusieurs années une croissance continue de son activité. Les données sont agrégées sur l'année, elles ne permettent donc pas d'isoler la période associée à la vague de chaleur, si bien qu'aucun commentaire n'est fait à ce sujet.

Que ce soit en ville ou à l'hôpital, il n'apparaît donc sur l'année 2003 aucun sursaut manifeste des dépenses, ni même de déclin soudain. Ceci laisse penser que, pour l'équilibre budgétaire de l'assurance maladie, les différents effets de coûts produits et de coûts évités ont fini à moyen terme par se neutraliser.

Indépendamment des limites liées au peu de données disponibles et à la nécessité de recourir à des hypothèses parfois un peu sommaires, l'analyse réalisée met ainsi clairement en évidence la nécessité de prendre en compte d'autres éléments que ceux comptabilisés ici. Il s'agit en particulier de la valeur accordée par notre société à la prolongation de la durée de vie, qui n'apparaît ici que comme source de dépenses pour l'Assurance maladie. Cette dernière réalise une « économie » croissante selon l'importance de la durée de vie perdue. En estimant la valeur, pour la société, des années de vie perdues à 37 500€ par an sur la base des recommandations du rapport Boiteux²⁴⁰, on estimerait par contre la valeur perdue par notre société du fait de la canicule 2003 à un peu plus de 500 millions € dans l'hypothèse d'une perte moyenne d'une année de durée de vie par personne décédée.

III.4.1.4 Le Plan National Canicule

L'évaluation doit également prendre en compte les ressources consacrées à la prévention. Depuis 2004, le ministère de la santé a mis en place un plan national canicule (PNC) permettant de déployer des mesures de gestion en cas de vague de chaleur dangereuse pour la santé. L'alerte est déclenchée sur la base de dépassements de seuils de températures, selon les critères définis par un système d'alerte canicule et santé (Sacs).

En 2006, la France a connu une vague de chaleur importante, la première pour laquelle le PNC et le Sacs étaient en application. Le nombre de décès s'est élevé sur la période du 11 au 28 juillet 2006 à 2 065 personnes. Les modélisations réalisées par l'Inserm ont montré que 6 452 décès étaient attendus si les conditions de 2003 avaient prévalu : environ 4000 décès ont donc été évités.

Sur le plan de la mortalité, la canicule de 2006 n'est donc pas comparable à celle de 2003. Les mesures d'alerte et de prévention ont pu s'enclencher à temps et ont montré une certaine efficacité. On manque par contre de données et d'expertises sur les

²³⁸ Point de conjoncture n°21 – Janvier 2004

²³⁹ Etudes et résultats n°382- mars 2005

²⁴⁰ Boiteux, 2001

conséquences en termes de morbidité, telles qu'elles avaient été mesurées pour la canicule de 2003.

On peut toutefois tirer des enseignements d'une étude de la CIRE du Languedoc-Roussillon : les données transmises par les services d'urgence montrent que le mois de juillet 2006 a connu une augmentation d'activité des consultations aux urgences. Cette suractivité ne s'est pas traduite par une augmentation du nombre de patients hospitalisés. On ne dispose pas d'information sur la disponibilité des lits qui est un facteur limitant d'hospitalisation. La régulation des Samu a, elle aussi, été plus importante. Cette suractivité des Samu semble liée, en partie, à l'organisation de la permanence des soins. En conséquence, il est important de connaître le contexte de prise en charge des établissements de santé et du secteur libéral pour interpréter les résultats.

A titre indicatif, une estimation du coût du Système d'alerte canicule et santé (Sacs) a été réalisée en 2005. Le coût de la préparation du système d'alerte a été chiffré à 286 933€. Le coût du fonctionnement entre le 1^{er} juin et le 31 août a été chiffré à 454 006€, soit un coût global de 740 939€. Il s'agit principalement de coût humain comptabilisant les ressources humaines de l'InVS, des Cires, de Météo France et de la DGS, pour la collecte des données et leur interprétation. Le coût par personne protégée a été estimé en considérant que le Sacs vise essentiellement à protéger les nourrissons et les personnes âgées, soit 750 000 enfants de moins d'un an et 4 850 000 personnes de plus de 75 d'après les estimations de l'INSEE. On aboutit ainsi à un coût de 13 centimes d'euro par personne protégée.

Le dispositif de prévention/gestion correspondant aux dépenses d'actions sociales mises en œuvre par les collectivités locales n'a pas encore fait l'objet d'évaluation financière. Il faudrait évaluer l'ensemble des actions de prévention et de soins mises en œuvre.

III.4.2 Inondation du Gard en septembre 2002

Cette analyse présente une évaluation de l'impact financier pour l'assurance maladie des conséquences psychologiques faisant suite à des inondations.

Un certain nombre d'inondations qui se sont produites récemment a donné lieu à des rapports ou bulletins épidémiologiques. Ils concernent les catastrophes suivantes :

- Le département de l'Aude (310 000 habitants) en novembre 1999, avec 228 communes touchées (52% des communes du département) ;
- La vallée de la Somme au printemps 2001, avec 138 communes touchées (20% des 782 communes du département) et 1 500 personnes évacuées ;
- Le Gard en 2002 (620 000 habitants), avec 295 communes touchées (sur 350 communes du département) ; 94% de la population du département résidait en commune sinistrée ;
- La ville d'Arles en décembre 2003 (50 000 habitants) : 7000 personnes évacuées.

Selon les cas, on a connaissance du nombre de personnes sinistrées ou évacuées.

De ces observations, il ressort trois grandes phases de dangers à court et moyen terme communes à toutes les inondations :

- La première phase de danger immédiat se traduit par des cas de blessures et traumatismes, qui engendrent des recours accrus aux services d'urgences²⁴¹ et dans le pire des cas un certain nombre de décès : 25 décès directement imputés aux inondations sont ainsi par exemple à déplorer dans l'Aude, 24 dans le Gard.
- La seconde phase comprend les dangers à court terme dans les premiers jours suivant l'inondation : il s'agit des risque infectieux (leptospiroses, tétanos, gastro-entérites, typhoïde, hépatites virales, infections respiratoires aiguës, allergies respiratoires et cutanées), dont le temps de développement dépendra de la durée d'incubation, par exemple de quelques jours pour la gastro-entérite à quelques semaines pour l'hépatite virale. Aux Antilles, des cas de maladies tropicales sont également cités : fièvre typhoïde, dengue. Cette période peut se traduire par une augmentation de la fréquence des actes médicaux et de biologie²⁴².

A court et moyen terme, ce sont les problèmes psychologiques s'apparentant aux états de stress post-traumatiques qui apparaissent le plus fréquemment.

Les impacts sanitaires à plus long terme n'ont pas été jusqu'ici identifiés précisément.

La majorité des études met l'accent sur la fréquence des troubles psychologiques provoqués par la catastrophe et montre qu'ils constituent une source importante de l'augmentation de l'activité des médecins. Ces impacts sont ensuite plus ou moins amortis selon l'ampleur des dégâts matériels, la gravité de l'inondation, le nombre de personnes évacuées et la mise en place de programmes de soutien psychologique aux personnes sinistrées.

Ce sont ces conséquences que l'on évalue ici. Pour cela on se base sur une étude réalisée par la CIRE sud, la DRASS PACA et la DDASS du Gard au sujet des inondations du Gard intitulée « conséquences psychologiques des inondations à partir des bases de données de l'Assurance Maladie, département du Gard de Septembre 2002 ».

III.4.2.1 Étude épidémiologique

L'étude de la CIRE s'appuie sur les données du régime général et de la MSA ; la population étudiée couvre 77,5% de la population du Gard²⁴³. L'étude porte sur les prescriptions délivrées à 498 584 assurés de plus de 20 ans. Parmi eux, 93,9% vivent dans un département déclaré sinistré. L'inondation a eu lieu du 8 au 10 septembre 2002. L'étude compare alors la période des 3 semaines suivant l'inondation à deux périodes de références d'une durée de 3 semaines, l'une en juin 2002 et la seconde en septembre 2003. La période de référence retenue dans les calculs est celle de juin 2002²⁴⁴.

Des résultats obtenus, on s'intéressera à deux indicateurs pour lesquels on estime un « risque relatif » significatif²⁴⁵ entre la période de référence et la période de post-inondation, il s'agit de :

²⁴¹ Situation sanitaire dans l'Aude à la suite des inondations, bilan épidémiologique, rapport préliminaire, décembre 1999.

²⁴² Surveillance épidémiologique suite aux inondations survenues à Arles, décembre 2003-janvier 2004, INVS.

²⁴³ Les données du RSI et des autres régimes spéciaux n'ont pu être collectées, ce qui explique l'écart.

²⁴⁴ La période de 2003 a été utilisée pour vérifier que des effets saisonniers n'étaient pas source d'écart ou d'erreur. Or il ressort globalement que le mois de septembre 2002 reste au dessus des seuils de consommation observés en septembre 2003, et qu'elle est comparable à celle du mois de juin 2002 (en fait elle est légèrement au dessus). Pour des raisons techniques, il n'était pas possible de remonter au delà de juin 2002.

²⁴⁵ À partir d'une régression de poisson sur le nombre de délivrances de nouveaux traitements.

- La délivrance d'un nouveau traitement psychotrope²⁴⁶, qu'il s'agisse d'anxiolytiques et/ou d'hypnotiques, accompagnés le cas échéant d'antidépresseurs en première intention ;
- La délivrance d'un nouveau traitement d'antidépresseurs en deuxième intention (*i.e.* faisant suite à une délivrance d'anxiolytiques et/ou hypnotiques)

Tableau 35 - principaux résultats de l'étude épidémiologique des conséquences psychologiques des inondations du Gard 2002 (INVS - CIRE Sud – DRASS PACA)

		Homme	Femme
taux de délivrance de nouveaux traitements psychotropes pour 1000 personnes protégées	période de référence (3 semaines en juin 2002)	6,38	10,69
	période post-inondation (3 semaines post-inondations)	7,58	13,64
	Risque relatif [IC 95%]	1,19 [1,11-1,27]	1,28 [1,21-1,34]
	Excès de risque (*) [IC 95%]	1.2 [0,75-1,64]	2.95 [2,40-3,49]
taux de délivrance de nouveaux traitements par antidépresseur suivant la délivrance d'un premier traitement par psychotrope pour 1000 personnes protégées	période de référence (3 semaines en juin 2002)	0,39	0,81
	période post-inondation (3 semaines post-inondations)	0,56	1,26
	Risque relatif [IC 95%]	1,43 [1,10-1,86]	1,56 [1,32-1,86]
	Excès de risque [IC 95%]	0,17 [0,05-0,29]	0,45 [0,27-0,62]

(*) : L'excès de risque est la différence entre le taux avant et après exposition.

Ainsi, quelle que soit la période de comparaison retenue, le taux de délivrance a augmenté significativement dans les trois semaines suivant l'inondation dans les communes sinistrées. Les données montrent comme un pic épidémique de délivrance de médicaments. Cet impact a été plus important pour les femmes que pour les hommes.

Ensuite, la consommation d'antidépresseurs a été observée dans les 6 mois qui ont suivi les inondations. Ce bilan fait état d'une consommation plus fréquente, par rapport à la période de référence de juin 2002, dans la période des 6 mois qui a suivi l'inondation avec par ailleurs un écart non significatif de consommation d'antidépresseurs en première intention dans les premiers jours qui ont suivi l'inondation (9,8% au lieu de 9,5%). Cela signifie que les traitements d'antidépresseurs n'ont été prescrits qu'en deuxième intention conformément aux recommandations en vigueur.

Rapportée aux données de population du Gard du recensement 1999 de l'INSEE, l'augmentation de l'incidence des prescriptions se traduit par une augmentation de 953 personnes consommatrices de psychotropes au delà de ce que l'on observe habituellement. Parmi eux, 141 personnes ont consommé en plus de ce traitement des antidépresseurs.

Selon le recensement de l'Insee, la population du Gard était de 623 058 habitants en 1999 (302 239 hommes et 320 819 femmes). Les plus de 20 ans représentaient 75,9% de la population totale (74,7% pour les hommes et 77,1% pour les femmes). En considérant que 93,9% de la population étaient sinistrées, on estime que 444 319 personnes de plus de 20 ans ont été sinistrées en 1999.

²⁴⁶ Le nouveau traitement correspond à un traitement qui n'a pas été délivré dans une période d'au moins 6 mois avant.

Tableau 36 - Estimation de l'impact populationnel de l'augmentation de la consommation de psychotropes à la suite de la période d'inondation

	Total	Hommes	femmes
population de plus de 20 ans sinistrée	444 319	211 917	232 402
estimation de l'augmentation du nombre de personnes sous psychotropes pendant la période de post-inondation	953	257 (*)	696
estimation du nombre de personnes sous antidépresseurs après délivrance de psychotropes dans les 6 mois qui ont suivis l'inondation	141	36	105

(*) : Population de plus de 20 ans x effet additionnel sur la prescription médicamenteuse liée à l'inondation.

Effet additionnel = 6,38 (incidence du traitement) x (1,19-1) (taux d'augmentation de l'incidence) / 1000.

III.4.2.2 Coûts unitaires de la prise en charge des troubles psychologiques pour l'assurance maladie

Faute d'analyse chiffrée sur les recours à l'hospitalisation ou aux centres dédiés à l'accueil psychologique des personnes en état de choc, le périmètre des coûts estimés est limité à ceux liés aux soins des professionnels libéraux exerçant en ville, principalement les consultations de généralistes et de psychiatres et aux coûts de leurs prescriptions en médicaments et arrêts de travail.

Pour le coût de la prise en charge, on se réfère ici aux produits les plus prescrits. Les coûts sont estimés en fonction des prix et des modalités de remboursement actuels, qui sont quelque peu différents de ceux de 2002 (ils tiennent notamment compte des forfaits et franchises instaurés respectivement en 2005 et 2008).

On distingue deux cas :

1/ celui d'une prescription ponctuelle d'anxiolytiques et d'hypnotiques

2/ celui d'un traitement par antidépresseurs sur une année de prescription, étant entendu que ce type de prise en charge exige un suivi au long cours²⁴⁷.

Tableau 37 - Coût de la prescription ponctuelle d'hypnotiques et d'anxiolytiques

	(1) Prix TTC ou prix tarif opposable	(2) Nombre	(3) taux de remboursement	(4) forfait ou franchise	coût assurance maladie [(1) * (2) * (3)] - (4)	coût unitaire
Hypnotiques - boîte de 14 comprimés de zopiclone (générique de l'imovane 7,5mg))	2,62 €	1 boîte	65%	0,50€		1,20 €
Anxiolytique - 1 boîte de 30 comprimés de bromazepam (générique du lexomil)	2,65 €	1 boîte	65%	0,50€		1,22 €
Consultation généraliste	22,00 €	1 consultation	70%	1,00€		14,40 €
Jour d'arrêt de travail	30,00 €	5 jours d'arrêt	100%			150,00 €
Total (arrondi à l'€)						167 €

²⁴⁷ La durée d'un traitement efficace doit être de 6 mois à un an selon les recommandations de la HAS : Prise en charge d'un épisode dépressif isolé de l'adulte en ambulatoire (mai 2002)

Tableau 38 - Coût d'un traitement annuel par antidépresseurs

	(1) Prix TTC ou prix tarif opposable	(2) Nombre	(3) taux de remboursement	(4) forfait ou franchise	coût unitaire assurance maladie [(1)* (2)* (3)] - (4)
Antidépresseur boîte de 14 comprimés de paroxétine (2 par mois : 20 mg/jour) (générique du prozac)	2,65€	24	65%	12 €	29,34
Consultation généraliste	22,00€	1	70%	1 €	14,40
Consultations de psychiatres	41,00€	12	70%	12 €	332,40
Jour d'arrêt de travail	30,00€	5	100%		150,00
Total (arrondi à l'€)					526€

III.4.2.3 Les coûts totaux

Au total, le coût pour l'assurance maladie peut ainsi être estimé à 693€ pour chacune des 141 personnes traitées par l'ensemble des thérapeutiques (soit 97 713€) et à 167€ pour chacune des 812 personnes dont le traitement se limite à une prescription isolée d'anxiolytiques et d'hypnotiques (soit 135 604€). Le coût total de la prise en charge est donc estimé à 233 317€ pour 953 personnes, ce qui équivaut à un coût moyen par personne de 245€.

Ce coût peut paraître relativement modeste au regard des risques considérés. Toutefois, il doit être interprété comme un coût minimum, dans l'hypothèse que les affections traitées ne relèvent pas de pathologies lourdes. Or si c'était le cas, il conviendrait de tenir compte de coûts unitaires plus élevés, tenant compte d'un dosage de molécules plus important et de possibilités d'hospitalisation. Pour être plus précis dans l'évaluation financière, il conviendrait de connaître plus précisément la part des gens inondés et évacués parmi les sinistrés et de déterminer plus précisément la nature et la fréquence des pathologies spécifiques pour ces groupes de populations.

Dans la littérature, il apparaît que les personnes peuvent être affectées plusieurs mois à plusieurs années après une catastrophe de type inondations²⁴⁸.

De plus, certains travaux dont « l'enquête santé chez les inondés de la Somme au printemps 2001 » et « l'état de santé psychologique et physique des sinistrés des inondations de juillet 1996 : étude comparative entre sinistrés et non sinistrés »²⁴⁹ ont montré que les répercussions psychologiques de ce type de catastrophe naturelle ne se limitent pas seulement aux troubles anxieux et dépressifs. Un stress chronique pourrait se répercuter dans des domaines divers comprenant des troubles cardiovasculaires, pulmonaires, gynécologiques, gastro-entérologiques, neurologiques et rhumatologiques.

Enfin, il faut rappeler à nouveau que ces estimations sont limitées aux coûts directs pris en charge par les dispositifs de solidarité collective. Elles ne prennent donc pas en compte ni les coûts directs supportés par les personnes touchées et leur entourage, ni les coûts indirects liés au retentissement des pathologies sur l'activité, ni les coûts intangibles du retentissement de la maladie sur la qualité de vie.

²⁴⁸ Verger P *et al.*, 2005

²⁴⁹ Maltais *et al.*, 2001

III.5 Données manquantes : discussion

Les exemples précédents d'estimation du coût des conséquences pour la santé d'événements climatiques extrêmes montrent toute la difficulté de réaliser cet exercice en l'absence de données adéquates, tant sur le plan économique (limité ici aux dépenses de l'assurance maladie) que sur les données épidémiologiques nécessaires pour ce type d'études.

Les suivis épidémiologiques de ces événements ont été réalisés afin d'avoir une meilleure compréhension de risques à court et moyen terme et d'orienter les mesures de gestion. Ils n'avaient pas pour vocation de recueillir des données sous un format utile pour l'analyse des coûts. Cela a conduit à faire de très nombreuses hypothèses qui amènent à prendre les résultats avec beaucoup de précautions. Il est également difficile de comparer les différents résultats obtenus.

Un travail de réflexion collective réunissant les divers intervenants lors des différentes catastrophes devrait être entrepris pour identifier des paramètres et indicateurs communs d'une part aux catastrophes de même type et d'autre part à l'ensemble des situations de catastrophe. Cette identification permettrait ensuite de recueillir les données permettant d'estimer les coûts à court et moyen termes. Cette réflexion peut s'inscrire dans un champ plus vaste du suivi des catastrophes naturelles, afin de répondre à des questions telles que :

- la qualification de la catastrophe, (définition, durée, comment évaluer la fin d'une catastrophe,), la définition d'indicateurs d'exposition et de zones exposées ;
- la définition des populations impliquées, de témoins et/ou de périodes de référence : ne serait-il pas bon de prendre des échantillons de population correspondant aux modes de vie et régions où a lieu la catastrophe ou bien tenir par région ou département un recueil de données régulièrement mises à jour pour entretenir des échantillons de population témoin ?
- la qualification du court, moyen et long terme : quelle population concernée (seulement les personnes déjà en traitement, passage par un entretien psychologique, etc.).
- l'identification des conséquences des catastrophes sur la santé à court, moyen et long terme (impact psychosocial, traumatismes, maladies infectieuses, arrêts et accidents de travail etc.) : quels malades doivent être considérés ? Doit-on se baser sur des études auprès de personnels de la santé en milieu ambulatoire ? Doit-on inclure le milieu hospitalier ?
- la collecte des données : enquête auprès de la population, du personnel médical, des pharmaciens, etc. ?
- l'accès aux données récoltées : quelle arborescence de stockage à utiliser ? Quelle durée de stockage ?
- le choix des traitements statistiques pour ces données, les approximations à faire ?
- l'identification et le développement de méthodologies d'analyse de bases de données déjà existantes (CnamTS, données du réseau Oscour, données de mortalité etc.)
- la pertinence de la mise en place d'études épidémiologiques *ad hoc* et leur méthodologie

Et aussi :

- comment corréler toute cette réflexion aux catastrophes passées et non chiffrées ?
- comment relier pathologie identifiée et soin, doit on dégager des automatismes de prévention (campagne de vaccinations, ingestion de médicaments spécifiques) ?

Cette liste de questions ne se veut pas exhaustive mais indicative du travail de réflexion à conduire par les services de l'Etat en charge de la veille, de l'alerte, de la gestion, l'assurance maladie et les collectivités locales.

Encadré 7 – Les recommandations de la commission spécialisée maladies transmissibles du Haut Conseil de Santé Publique en matière de prise en compte du changement climatique dans les politiques sanitaires – Extrait de l’avis du HCSP relatif aux risques pour la santé liés aux effets qualitatifs du changement climatique, 26 juin 2009

« Le Haut Conseil de la santé publique ne peut, au vu des rares et fragmentaires données disponibles, de la complexité de la question et dans le délai imparti, indiquer parmi toutes les conséquences sanitaires possibles, quelles sont celles à considérer comme prioritaires.

Le Haut Conseil de la santé publique recommande néanmoins de considérer comme prioritaires les actions suivantes, réparties selon le champ (actions de santé publique et recherches) et selon l’échéance : court (5 ans), moyen (15 ans) et long terme (30 ans). Par ailleurs, le Haut Conseil de la santé publique recommande que soit créée, à l’instar d’autres nations occidentales, une structure interministérielle pérenne, chargée de coordonner les compétences nationales en matière d’étude des conséquences sanitaires du changement climatique, d’évaluer régulièrement l’impact et l’évolution de ces conséquences, de mobiliser les capacités des différents secteurs, de réaliser et actualiser la priorisation nécessaire des conséquences sanitaires du changement climatique, de suivre, évaluer et orienter les actions de santé publique et de recherches engagées. Au-delà de l’intérêt national de coordination, cette structure pourrait permettre une meilleure articulation des échanges aux niveaux européen et international.

Actions prioritaires de santé publique

Pour le court terme :

- Mettre en place ou renforcer la surveillance des facteurs sanitaires et environnementaux pouvant être modifiés par le changement climatique :
 - o surveillance des populations vectorielles et d’hôtes réservoirs ;
 - o surveillance de la qualité de l’air et des eaux continentales, côtières et estuariennes, et des sols ;
 - o surveillance des rayonnements naturels ;
 - o surveillance des résistances et des adaptations des agents pathogènes ;
 - o surveillance des pneumallergènes.
- Mettre en place et généraliser des plans de réponse aux phénomènes météorologiques extrêmes (sur les modèles de plans existants : canicule, grand froid, ouragan...) incluant l’étude systématique des effets sanitaires (somatiques et psychologiques) de ces phénomènes.
- Evaluer les plans existants.
- Organiser la prise en charge des populations fragiles et à risque de fragilité (personnes âgées, personnes atteintes d’affection de longue durée, personnes précaires...) face aux phénomènes climatiques extrêmes.
- Intégrer les risques sanitaires d’origine climatique aux formations initiale et continue des professions de santé.
- Intégrer les risques sanitaires d’origine climatique dans les messages et campagnes d’information à destination du public et des médias notamment à destination des adolescents.

Recherches prioritaires dans le domaine de la santé

Les termes des propositions faites ci-dessous portent sur l'obtention de résultats et non sur le délai de mise en œuvre. Des résultats intermédiaires pourront être utiles dans les décisions de santé publique.

Pour le court terme

- Promouvoir la recherche sur les capacités d'adaptation de l'homme aux changements climatiques. Ce développement doit être multidisciplinaire et porter à la fois sur :
 - o La santé publique et l'impact économique surtout en temps de crise ;
 - o La clinique et en particulier la physiopathologie et le traitement du choc thermique dû au coup de chaleur ;
 - o La physiologie de la thermolyse, en particulier chez le sujet âgé ;
 - o La biologie moléculaire et la génétique, intégrant le génome mitochondrial.
- Conduire des recherches sur la perception des conséquences sanitaires du changement climatique dans la population et les comportements subséquents.
- Développer des recherches expérimentales sur les capacités d'adaptation des agents infectieux et de leurs hôtes au changement climatique et sur les effets mutagènes des rayonnements naturels sur les agents infectieux.

Pour le moyen terme

- Evaluer l'impact du réchauffement climatique : sur la qualité des eaux et la qualité de l'air sur l'ensemble du territoire, en particulier dans les COM-ROM et sur le pourtour méditerranéen.

Pour le long terme

- Développer ou soutenir la recherche sur les capacités d'atténuation des effets sanitaires du changement climatique, et/ou d'adaptation, en adoptant une position proactive (liens entre santé des écosystèmes et santé des populations). »

L'avis du HCSP est présenté dans son intégralité en Annexe J.2.

Conclusion et synthèse

En l'état actuel des connaissances et des données disponibles, il n'est pas possible de faire des projections de coût des impacts sanitaires du changement climatique en France. Ce rapport présente simplement des évaluations financières correspondant aux dépenses à court terme pour l'assurance maladie d'événements climatiques extrêmes passés. Ne prenant en compte que les coûts supportés par l'assurance maladie et ignorant le long terme, il ne s'agit donc que d'une fraction du coût réel de ces événements pour la société.

Sur l'année 2003, après la canicule, il n'apparaît ainsi aucune modification notable des dépenses d'assurance maladie, que ce soit en ville ou à l'hôpital. Ceci laisse penser que, pour l'équilibre budgétaire de l'assurance maladie, les coûts générés par la pathologie induite par la canicule et les coûts évités par les décès de personnes âgées consommatrices de soins se sont neutralisés. **La prise en compte de la valeur que peuvent représenter les années de vie perdues modifie sensiblement les conclusions de l'analyse.** En effet en estimant la valeur, pour la société, des années de

vie perdues à 37 500€ par an sur la base des recommandations du rapport Boiteux²⁵⁰, **on estimerait la valeur perdue par notre société du fait de la canicule 2003 à un peu plus de 500 millions € dans l'hypothèse d'une perte moyenne d'une année de durée de vie par personne décédée.** De plus la valeur de la perte de qualité de vie des personnes âgées, ayant vu leur état de santé se dégrader (plus de 13 000 personnes de 70 ans et plus), n'a pas pu être chiffrée.

Pour estimer les dépenses d'assurance maladie des inondations du Gard, survenues du 8 au 10 septembre 2002, le périmètre des coûts a été limité à ceux liés aux soins dispensés par les professionnels libéraux exerçant en ville (principalement les consultations de généralistes et de psychiatres) et aux coûts de leurs prescriptions de médicaments (anxiolytiques et hypnotiques) et d'arrêts de travail. **Le coût de la prise en charge sur l'année suivant l'inondation a été estimé à environ 234 000€** pour l'ensemble des personnes présentant des troubles psychologiques (pour 953 cas sur 444 319 personnes de plus de 20 ans dans la région sinistrée) à partir des données recueillies sur une période de trois semaines. Ceci est un coût minimum car il a été pris comme hypothèse que les affections traitées ne relevaient pas de pathologies lourdes. Pour être plus précis dans l'évaluation financière il faudrait disposer d'études épidémiologiques précisant la fréquence des troubles observés et différenciant les gens inondés et évacués parmi les sinistrés. Par ailleurs, sur le moyen et long terme d'autres pathologies liées à l'existence d'un stress chronique pourraient se répercuter dans les domaines cardiovasculaire, pulmonaire, gynécologique, gastro-entérologique, neurologique et rhumatologique. **Là encore, une évaluation économique complète devrait prendre en compte le retentissement de la morbidité en termes de coûts indirects et de coûts intangibles.**

A l'issue de ce travail d'évaluation financière des dépenses pour l'assurance maladie, concernant deux phénomènes climatiques exceptionnels, il ressort d'une part un besoin de connaître le contexte de prise en charge des établissements de santé et du secteur libéral pendant les dits phénomènes pour interpréter les résultats et d'autre part un besoin d'améliorer les connaissances. Pour ce faire il est souhaitable de développer les retours d'expérience et les évaluations systématisés, homogènes sur le territoire national (pour pouvoir comparer les événements climatiques) au niveau épidémiologique, recueillis dans le cadre de dispositifs d'alerte et de gestion établis sur la base de protocoles prédéfinis. Cela devrait permettre de disposer de données harmonisées pouvant servir de base à des évaluations plus précises. Les résultats épidémiologiques seront dépendants des progrès accomplis en matière d'alerte, de gestion par le secteur santé mais aussi les autres secteurs ministériels et les collectivités locales ; ceci plaide pour la systématisation des retours d'expérience.

Par ailleurs, l'augmentation de la fréquence et le renforcement de l'intensité des phénomènes climatiques jusqu'ici exceptionnels doit amener à considérer plus attentivement dès à présent leurs effets à moyen et long terme sur la santé.

L'évaluation doit aussi inclure les dépenses engagées pour la prévention et la gestion des risques, comme l'illustrent les mesures mises en œuvre dès 2004 dans le cadre du plan canicule. Une estimation du coût du Système d'Alerte Canicule et Santé (Sacs) a été réalisée en 2005. Le coût global est de 741 000€ pour la période allant du 1 juin au 31 août. Il s'agit principalement du coût des ressources humaines engagées par l'InVS, les Cires, Météo-France et la DGS, pour la collecte des données, leur interprétation et le suivi des alertes. Il serait aussi nécessaire de pouvoir valoriser l'ensemble des actions de prévention, notamment le travail important d'action sociale engagé pendant cette période chaque année auprès des personnes âgées. Un comité de pilotage pourrait être

²⁵⁰ Boiteux, 2001

constitué pour élaborer le cahier des charges et suivre l'étude afin d'effectuer cette analyse financière.

Au delà de la nécessité d'améliorer la qualité des données épidémiologiques, il sera également indispensable d'élargir le cadre des éléments pris en compte dans l'évaluation économique de l'impact des conséquences des changements climatiques sur la santé. Au delà des seules dépenses relevant de l'assurance maladie, il est indispensable de prendre en compte les dépenses supportées par la population elle-même, le retentissement sur la capacité de production et le retentissement sur la qualité de vie avec la valeur que notre société accorde à la qualité et à la durée de la vie (coûts indirects et intangibles).

C'est le domaine des méthodes d'évaluation économique (voir Annexe J.1), qui visent à comparer l'ensemble des coûts et des conséquences de différentes modalités d'intervention vis-à-vis d'un même problème. Le développement de ces évaluations et la clarification des difficultés méthodologiques qu'elles soulèvent (coût/efficacité ou bénéfiques), est indispensable. Ce besoin se justifie, d'une part pour comparer différentes actions d'adaptation au changement climatique en prenant en compte l'ensemble des conséquences, d'autre part pour comparer les mesures et stratégies pour assurer au mieux les conséquences sur la santé.

Les modifications de fond du climat comme la sécheresse des étés, des hivers plus doux et humides seront de plus en plus visibles et intenses. Tous les effets sur la santé ne seront pas évités même si des mesures de prévention et d'adaptation sont prises. A titre d'exemple, une évaluation économique des conséquences de l'épidémie de Chikungunya survenue à la Réunion et des mesures de prévention et de gestion mises en place serait pertinente compte tenu du risque d'endémisation de pathologies liées aux moustiques par le changement climatique en métropole.

Enfin, un aspect n'est pas du tout abordé dans cette étude, celui des « bénéfiques secondaires » associés aux stratégies de lutte contre le changement climatique. Il apparaît en effet que des mesures destinées à réduire les émissions de gaz à effets de serre pourraient avoir d'autres impacts sur la santé, par exemple par une amélioration de la qualité de l'air. Au delà des seuls effets sur la santé, le développement de nouvelles technologies peut par ailleurs avoir également des effets sur l'activité économique.

IV Rapport du Groupe Energie

IV.1 Introduction

IV.1.1 Composition du groupe

Le groupe thématique, présidé par le Département de lutte contre l'effet de serre (DLCES²⁵¹), s'est réuni à cinq reprises entre janvier et mai 2009. Il est constitué d'un réseau d'experts ou de personnes qualifiées du domaine énergétique issu des secteurs administratifs et industriels. Les représentants des organismes suivants ont permis la réalisation de ces travaux :

- pour le secteur industriel : (i) Electricité de France – Recherche et Développement (EDF-R&D), (ii) Groupe GDF SUEZ, (iii) Institut Français du Pétrole – Direction économie et veille (IFP) et (iv) Réseau de Transport d'Electricité (RTE) ;
- pour le secteur administratif : (i) l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN), (ii) la Mission Climat de la Caisse des Dépôts et consignations (CDC) et (iii) le MEEDDM²⁵².

IV.1.2 Objectifs

La mission confiée au groupe thématique « Energie et impacts du changement climatique » était de recenser et évaluer les impacts du changement climatique sur les différents aspects du système énergétique de France métropolitaine, aux horizons 2030, 2050 et 2100. Lors de la première phase de ce travail en 2008, des impacts et des mesures d'adaptation potentiels avaient été identifiés. Le travail ici présenté vise à compléter cette première phase par une estimation quantitative des impacts et à approfondir les possibilités d'adaptation du secteur.

Les exercices de quantification à réaliser ne visent pas à l'exhaustivité mais plutôt à déterminer des coûts ou des opportunités probables pour le secteur énergétique. Selon les disponibilités de données et de temps, l'ensemble des impacts n'a pas été forcément traité à ce stade. Néanmoins, les quantifications présentées dans ce rapport doivent permettre en première approche d'identifier quelques impacts clés à considérer dans la problématique d'exposition et d'adaptation au changement climatique. Il existe des limites méthodologiques aux évaluations. Le groupe s'est efforcé d'exposer clairement les hypothèses et les incertitudes associées.

Le travail conduit est cohérent avec les orientations méthodologiques définies pour l'ensemble des groupes de travail de cet exercice interministériel. Cela consiste en particulier à retenir l'hypothèse d'une économie constante, les projections climatiques issues des scénarios A2 et B2 du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) ainsi qu'une remontée du niveau de la mer de + 100 cm à l'horizon 2100.

²⁵¹ Le DLCES, créé en juillet 2008, est rattaché à la Direction générale de l'Energie et du Climat (DGEC) du Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (MEEDDAT).

²⁵² Dont notamment le Commissariat Général au Développement Durable (CGDD), l'Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique (ONERC) et la Direction Générale de l'Energie et du Climat (DGEC).

IV.1.3 Synthèse et résultats

La quantification des impacts fait apparaître :

- Une tendance à la baisse de la demande d'énergie à l'échelle nationale annuelle ;
- Une tendance croissante des besoins en climatisation dans les logements et dans l'automobile (en conséquence d'une adaptation spontanée) impliquant une nécessité d'évolution du bâti ou du parc automobile ;
- Une tendance à l'augmentation des contraintes offre/demande d'énergie électrique en période de forte chaleur ;
- Les moyennes générales ne doivent pas masquer des impacts régionaux très différenciés.

Ces résultats doivent être interprétés avec prudence :

- L'ensemble des données nécessaires pour réaliser les quantifications ne sont pas toujours accessibles ou existantes ;
- Le modèle climatique utilisé présente un certain nombre d'incertitudes et les experts du groupe estiment qu'il pourrait sous-estimer les tendances de réchauffement (sur la base d'une comparaison avec les données des dernières années) ;
- L'hypothèse d'économie constante rend les résultats fragiles.

Quatre pistes d'améliorations méthodologiques sont proposées :

- La plupart des calculs étant basés sur des données issues d'un unique modèle, il serait intéressant de pouvoir actualiser ce modèle et de le confronter à des modèles différents ;
- Il serait également intéressant de calculer les impacts sur la base des données annualisées d'un pool de modèles et ensuite de les agréger aux différents horizons ;
- L'affinement des données au niveau territorial apporterait un éclairage très utile en terme de planification ;
- La méthodologie actuelle gagnerait en précision si certaines données étaient plus facilement disponibles.

Huit types de mesures d'adaptation ont été identifiés :

- Développer les technologies de refroidissement de l'air ;
- Améliorer les procédés de refroidissement des centrales énergétiques ;
- Rendre les installations énergétiques plus robustes aux extrêmes climatiques ;
- Généraliser le système de gestion des tranches ;

- Renforcer les outils de modélisation de l'offre et de la demande en fonction du climat ;
- Affiner le processus de gestion de crise ;
- Identifier les structures sensibles à la remontée du niveau de la mer ;
- Faciliter le développement d'un cadre bâti réduisant la demande d'énergie, notamment celle de climatisation.

IV.2 Liste des impacts et des mesures d'adaptation retenus pour la quantification

IV.2.1 Rappel des résultats de la phase 1²⁵³

Les liens entre secteur énergétique et changement climatique sont généralement abordés sous l'aspect de l'impact du premier sur le second à travers les émissions de gaz à effet de serre. Néanmoins, le changement climatique a également des impacts directs sur le secteur énergétique :

- les variations de température de l'air influent sur la production, le transport et la consommation d'énergie. Les tendances de températures modélisées sur le siècle laissent prévoir une baisse de la demande hivernale (hiver moins rigoureux) mais des besoins potentiellement en hausse en période de forte chaleur (besoin de refroidissement croissant) ;
- les événements de chaleur extrême plus fréquents entraîneront des pics de consommation nécessitant une gestion adaptée et souvent difficilement prévisible (exemple des difficultés connues par le secteur en 2003 lors de l'épisode caniculaire) ;
- les variations de précipitations et le réchauffement des eaux de surface se traduiront par une évolution des sources d'approvisionnement hydroélectrique et de refroidissement des centrales électriques.

Plusieurs mesures d'adaptation potentielles avaient également été identifiées²⁵⁴ :

- aménager le cadre bâti pour la réduction de la consommation énergétique en chauffage et climatisation ;
- mettre en œuvre des procédés de refroidissement plus efficaces (centrales, climatisation du bâti et véhicule, chaîne du froid) ;
- adapter les nouvelles infrastructures énergétiques ainsi que de celles existantes ;
- adapter la gestion du réseau de transport et distribution des énergies ;
- mettre en place un système plus précis de gestion des ressources en eau (prévention des conflits d'usage) ;

²⁵³ D4E / ONERC, 2008, p 145-168.

²⁵⁴ Ibid., p.163-165

- valoriser les avancées en termes météorologique pour mieux anticiper les crises et gérer les stocks ;
- responsabiliser la demande en période critique (compteurs électriques communicants/évolués et développement de l'effacement) ;
- affiner les processus de gestion de crise énergétique ;
- réfléchir à la place de la production décentralisée d'électricité.

IV.2.2 Impacts retenus

Sur la base des résultats de la première phase et des thématiques lui semblant les plus sensibles au changement climatique, le groupe de travail thématique « Energie » a choisi de se focaliser sur la quantification de quatre types impacts. L'analyse de la bibliographie rassemblée par le CIRED²⁵⁵, l'apport d'autres études et l'examen des données disponibles ont permis ensuite de procéder à une évaluation quantitative.

IV.2.2.1 Impact sur la demande d'énergie

L'influence du facteur « climat » sur la demande d'énergie est une donnée bien connue des énergéticiens qui depuis plusieurs années déjà « corrigent » leurs données de consommation en fonction des variables climatiques. Ainsi, des modèles de prévision des consommations ont été développés par les opérateurs du secteur.

Les tensions connues lors des épisodes de canicule (notamment 2003) et les pics de consommation des vagues de froid mettent en exergue les difficultés auxquelles sont confrontés les gestionnaires énergétiques au cours d'événements extrêmes très localisés dans le temps ou l'espace.

Les modélisations de consommation d'énergie se fondent en particulier sur des données de températures. Les modèles climatiques pouvant modéliser des températures aux horizons 2030, 2050 et 2100, les résultats de ces modèles permettent d'apprécier l'impact du changement climatique sur la variation de la demande énergétique.

Ainsi, l'existence de contraintes climatiques spécifiques, de méthodes de calcul éprouvées et la disponibilité de données rendent possible une première approximation de l'évolution des tendances de consommation énergétique en fonction des modélisations climatiques.

IV.2.2.2 Impact sur la production à partir des ressources en eau

La prise en compte de la ressource en eau renvoie aux évènements connus en 2003, lorsque l'épisode caniculaire avait assez fortement contraint la production. Les productibles des barrages étaient à un faible niveau. Les normes de température de rejet des eaux de refroidissement avaient obligé à un arrêt de certaines centrales électriques. L'impact considéré ici concerne donc plus particulièrement l'électricité.

Les travaux sur les ressources en eau nécessitent des modèles hydrologiques et thermiques complexes. Des modèles d'évolution des débits des cours d'eau en fonction du changement climatique sont en développement : ce secteur fait actuellement l'objet

²⁵⁵ cf. Annexe C.4.

de plusieurs travaux de recherche spécifiques à des bassins versants²⁵⁶, mais aucune étude globalisée sur le territoire n'est finalisée. Néanmoins, quelques travaux préliminaires de quantification²⁵⁷ sont disponibles et peuvent fournir des données d'une précision assez satisfaisante pour estimer les impacts recherchés.

Sur le cas du refroidissement des centrales électriques, peu de données précises existent. Néanmoins, le secteur électrique (Electricité de France – EDF) a fourni quelques chiffres indicatifs sur les coûts encourus en 2003²⁵⁸ pour cause des pertes de refroidissement.

IV.2.2.3 Impact sur la production d'énergies renouvelables

Les énergies renouvelables (ER) sont un moyen de réduire les émissions de GES et de réduire ainsi l'impact du secteur énergétique sur le réchauffement climatique. Le Grenelle de l'environnement a fixé un objectif de doublement de la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale soit 20% d'ici à 2020. Compte tenu des liens entre ces énergies et le changement climatique et au vu de la dynamique engagée, il a semblé pertinent de voir si le changement climatique était susceptible d'impacter ces ER. Le travail s'est focalisé sur l'éolien et le photovoltaïque dont le fonctionnement est le plus dépendant du climat. L'impact sur la ressource en biomasse, après concertation avec le groupe thématique « Forêts », a été étudié par ce dernier.

Les infrastructures de production en ER ont une durée d'exploitation beaucoup plus courte que les centrales énergétiques classiques : elles peuvent donc techniquement être redéployées plus facilement sur des sites aux conditions de production plus favorables en cas de modification profonde du climat.

Les données de prévision sur les évolutions des régimes d'insolation et des vents sont encore peu nombreuses. L'analyse de cet impact sera donc limitée par les données effectivement disponibles.

Le groupe n'a pas eu le temps d'aborder la question des agro-carburants. Cette dernière est en grande partie liée à celle plus générale des impacts dans le secteur agricole.

IV.2.2.4 Impact sur la localisation des infrastructures énergétiques

Les infrastructures énergétiques se caractérisent majoritairement par des durées de vie d'équipement très élevées. Si on prend l'exemple des barrages ou des centrales nucléaires, leur temps de construction est supérieur à dix ans, leur durée de service est d'au moins 40 ans et ce sont des structures statiques par nature.

²⁵⁶ Sans être exhaustif on pourra citer notamment le travail en cours sur la Seine à travers le projet RexHySS, sur le Rhône dans le cadre du GICC Rhône, sur la Loire et la Durance avec le projet RIWER 2030, sur la Meuse avec le projet EPAMA et ceux sur le bassin Adour- Garonne avec le projet IMAGINE 2030.

On pourra se reporter notamment aux références suivantes :

Ducharne. *et al.*, 2006

Caballero *et al.*, 2004

²⁵⁷ Boé, 2007

Manoha *et al.*, 2007

²⁵⁸ Des éléments ont été spécifiquement mis à disposition de notre groupe de travail par EDF. Des données ont également été publiées dans un rapport au Sénat en 2004 : Letard *et al.*, 2004.

En conséquence, il est intéressant de regarder en quoi le changement climatique peut impacter le fonctionnement de ces infrastructures : la plupart des structures actuelles connaîtront sur une période assez longue une possible modification climatique, soit pendant leur fonctionnement, soit pendant leur démantèlement. Il convient donc d'être attentif aux alternatives possibles. Il est également important de bien différencier le cas des installations existantes de celui des installations futures. En effet, pour les installations nouvelles à construire, il faudra être attentif à la prise en compte des conditions climatiques qui règneront pendant la durée de vie et de démantèlement des ouvrages ; mais celles-ci seront en général intégrées dans les conditions de leur conception.

Sur la base de l'existant, on cherchera à identifier les impacts potentiels liés à l'élévation des températures (air et eau) et du niveau de la mer.

IV.2.3 Scénarios d'adaptation retenus

IV.2.3.1 Mesures d'adaptation associées et justification

Le groupe thématique s'étant focalisé sur la quantification des impacts, le champ des mesures d'adaptation n'a pas été beaucoup élargi par rapport à la phase 1. On reprendra donc les mesures d'adaptation revalidées suite aux travaux en y ajoutant des mesures spécifiques le cas échéant.

Développer des technologies de refroidissement de l'air

Cette mesure d'adaptation renferme deux volets distincts.

Le premier est celui de l'adaptation spontanée par un équipement soutenu en climatisation : cette mesure spontanée de traitement de la contrainte a cependant le désavantage d'augmenter fortement la demande en énergie en période chaude tout en nécessitant un investissement régulier pour le renouvellement et l'entretien du matériel.

Le second volet est celui de l'amélioration technologique des équipements de refroidissement, notamment le gain de performances énergétiques des systèmes de climatisation, individuels ou collectifs. Cette option de recherche-innovation technologique pourrait à la fois alléger la consommation unitaire des climatiseurs tout en réduisant l'impact énergétique d'un équipement massif spontané des ménages en climatiseurs (résidentiel, véhicules, etc.).

Améliorer les procédés de refroidissement des centrales énergétiques

Les systèmes de refroidissement des centrales électriques (nucléaires comme thermiques à combustible fossile) sont confrontés aux problèmes de l'évaporation de l'eau ainsi que de son réchauffement. Le choix du mode de réfrigération est à considérer : les réfrigérants humides ont l'avantage de minimiser fortement l'échauffement de l'eau du fleuve (0,3 à 0,5°C) au prix d'une évaporation d'une partie de l'eau (0,6 à 0,7 m³/sec pour une centrale de 1000 MW) ; la réfrigération directe par le fleuve supprime cette évaporation au prix d'un échauffement plus élevé (quelques degrés). Améliorer les systèmes existants ou en développer de nouveaux, plus compétitifs, permettrait de relâcher la contrainte de la disponibilité d'eau de refroidissement et/ou la gestion des températures de rejet.

Mais une évolution de la réglementation sur les rejets thermiques serait à considérer pour mieux prendre en compte l'impact réel de l'installation énergétique sur le milieu vivant, lui-même affecté par le réchauffement climatique (en été il arrive de plus en plus

fréquemment que la température limite des rejets à l'aval soit déjà dépassée à l'amont de l'installation). La Directive Cadre sur l'Eau invite à cette réflexion.

Rendre les installations énergétiques plus robustes aux extrêmes climatiques

Il s'agit de tirer toute l'expérience des crises passées en considérant les conditions extrêmes que peuvent avoir à supporter les installations existantes jusqu'à leur fin de vie. Ces conditions peuvent être celles qui surviennent en cas de canicule (températures d'air, de l'eau de mer ou de rivière), de tempête ou de crues. Les mesures techniques à prendre portent notamment sur les systèmes de ventilation, de réfrigération d'auxiliaires ou sur la protection des plateformes contre les eaux en cas de forte précipitation (par murets ou digues). Ces mesures sont destinées à éviter des pannes ou des arrêts préventifs par application de spécifications techniques.

Généraliser les systèmes de gestion des tranches

Il s'agit de continuer l'optimisation de l'utilisation du réseau et des unités de production (i) en décalant les entretiens de centrales afin d'éviter les creux en période chaude, (ii) en privilégiant le fonctionnement des centrales en bord de mer durant les période chaudes, (iii) en favorisant l'effacement de la demande, (iv) en responsabilisant le public aux utilisations électriques en période climatique sensible, (v) en renforçant les systèmes d'achat prévisionnel de capacités à l'étranger pour les périodes de tension sur le réseau et (vi) en explorant les possibilités de développement de gestion active de la demande (compteurs électriques évolués, etc.).

Renforcer les outils de modélisation de l'offre et de la demande en fonction du climat

Le renforcement de la connaissance des liens entre précipitation et productible hydraulique et l'amélioration de la prévision de la demande en énergie (à différentes échelles de temps) sont deux types d'extrants que l'on peut tirer de l'affinement des modèles climatiques. Ces outils peuvent également aider à mieux anticiper les risques de tension sur la ressource en eau et d'amorcer plus rapidement la concertation sur la gestion partagée de la ressource. En affinant les corrections climatiques, les modèles permettent également de mieux suivre les tendances de fonds de consommation d'énergie.

Affiner le processus de gestion de crise

Suite aux différents événements climatiques extrêmes (type canicule ou tempête), des plans de crises ont été mis en place par le gouvernement, ainsi que par les opérateurs énergétiques nationaux. Cette gestion de crise implique différentes actions qui ont déjà été mises en œuvre (*e.g.* canicule 2006) alors que d'autres peuvent encore être améliorées. Il s'agirait (i) de poursuivre la coordination entre les acteurs ; (ii) de développer les marchés de gros de l'électricité et du gaz ; (iii) de développer de nouvelles interconnexions électriques dans le respect des exigences environnementales notamment paysagères ; (iv) de renforcer l'efficacité des plans de délestage en s'assurant de la mise à jour régulière des clients prioritaires et sensibles et de la capacité d'informer en temps utile pour minimiser l'impact sur le public et (v) de renforcer le système d'alimentation en priorité des personnes fragiles en cas de coupures d'électricité.

Identifier les structures sensibles à la remontée du niveau de la mer

Cela implique un développement de la modélisation des zones touchées (liée à une projection améliorée des remontés du niveau de la mer) ainsi qu'un géo-référencement précis tridimensionnel des infrastructures énergétiques. Il s'agira d'anticiper les risques

potentiels sur le réseau énergétique. Le renforcement de digues de protections des centrales à risque ou l'adaptation des unités de pompage pourrait en être des illustrations.

Faciliter le développement d'un cadre bâti et d'un urbanisme réduisant la demande d'énergie, notamment celle de climatisation

La hausse de températures modélisée dans les différents scénarios du GIEC plaide pour le développement de mesures d'adaptation visant à réduire la consommation en climatisation. Cela sous-entend le besoin de développer et d'encourager les mesures d'isolation et d'urbanisme économes en énergie notamment l'été. L'isolation est généralement considérée comme du ressort de l'atténuation : néanmoins, le dimensionnement de l'isolation et les variations de consommation énergétique associées varieront selon l'intensité du changement climatique. On ne posera donc pas l'isolation comme une mesure d'adaptation à part entière, mais une part des coûts d'isolation ou de variation de consommation sera liée au changement climatique.

D'autres facteurs que l'isolation doivent encore être approfondis. Le phénomène « d'îlot de chaleur²⁵⁹ », *i.e.* l'augmentation de température du centre d'une ville par rapport à sa périphérie, pourrait être influencé par le réchauffement climatique mais ce phénomène est encore mal connu²⁶⁰. L'approfondissement des recherches entre le secteur de l'urbanisme et celui de l'énergie pourrait ainsi permettre de mieux modéliser cette composante de la demande d'énergie en ville. Les recherches en cours semblent ainsi indiquer que la densité de la végétalisation des villes et l'albédo des bâtiments auraient une influence significative sur la demande en énergie de refroidissement²⁶¹.

Cette question est l'objet de recherches récentes afin d'approfondir les options et stratégies d'adaptation associées pour des villes moins vulnérables aux effets du réchauffement climatique (on peut citer par exemple le récent projet le projet VUrCA qui se focalise sur les questions de chaleur urbaine et de climatisation avec un optique de définition de stratégies d'adaptation²⁶²).

IV.2.3.2 Mesures d'adaptation spontanées et planifiées

Dans les propositions précédentes, la seule adaptation spontanée identifiée est la suivante (sans jugement sur sa pertinence à ce stade) :

- Développer des technologies de refroidissement de l'air : développement de l'équipement bâtiments et des véhicules en climatiseurs.

Les autres propositions sont plutôt de l'ordre de l'adaptation planifiée dans la mesure où elles font appel à des exercices de concertation ou de planification de recherche-action :

²⁵⁹ Sur la thématique d'îlot de chaleur on pourra se reporter notamment aux récents travaux de doctorat de M. Colombert : Colombert, 2008

²⁶⁰ Roaf *et al.*, 2005, Best et Bettes, 2004 et Rozenzweig *et al.*, 2005 in Colombert, 2008.

²⁶¹ Colombert, 2008

²⁶² Le projet « Vulnérabilité urbaine aux épisodes caniculaires et stratégies d'adaptation (VUrCA) » étudie le niveau de vulnérabilité en termes de confort thermique et de demande énergétique liée à l'usage de la climatisation. Il est mis en œuvre par le Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED), le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) et le laboratoire CNRM-GAME. Il a été lancé en 2009.

- Développer des technologies de refroidissement de l'air : développement de technologies de refroidissement plus efficaces énergétiquement pour les bâtiments et les véhicules ;
- Développer de nouveaux procédés de refroidissement des centrales énergétiques ;
- Rendre les installations énergétiques plus robustes aux extrêmes climatiques ;
- Généraliser les systèmes de gestion des tranches ;
- Renforcer les outils de modélisation de l'offre et de la demande en fonction du climat ;
- Affiner le processus de gestion de crise ;
- Identifier les structures sensibles à la remontée du niveau de la mer.

IV.2.3.3 Caractérisation du « risque de se tromper »

On propose ici de classer les différentes mesures selon le degré de risque de se tromper : fort –intermédiaire-faible-sans regret

Tableau 39 – Caractérisation du « risque de se tromper »

Mesure	Risque de se tromper	Commentaires
Développer des technologies de refroidissement de l'air : équipement des bâtiments et des véhicules en climatiseurs.	faible	La pertinence de cette mesure semble discutable : enjeu fort de développement de l'isolation
Développer des technologies de refroidissement des bâtiments et des véhicules plus efficaces énergétiquement	Sans regret	
Améliorer les procédés de refroidissement des centrales énergétiques pour minimiser encore plus l'échauffement de l'eau	faible	Les technologies étant actuellement très coûteuses, cela en constitue le principal frein
Rendre les installations énergétiques plus robustes aux extrêmes climatiques	faible	Ceci implique un choix industriel de l'opérateur sur l'horizon de temps auquel il souhaite se protéger
Généraliser les systèmes de gestion des tranches	Sans regret	
Renforcer les outils de modélisation de l'offre et de la demande en fonction du climat	Sans regret	
Affiner le processus de gestion de crise	Sans regret	
Identifier les structures sensibles à la remontée du niveau de la mer	faible	La seule difficulté serait sans doute d'estimer la date optimale de réalisation des travaux

IV.2.3.4 Degré d'urgence de la mise en œuvre (CT-MT-LT)

On propose ici de classer les différentes mesures selon le degré d'urgence :

Tableau 40 – Degré d'urgence de mise en œuvre des mesures

Mesure	Degré d'urgence	Commentaires
Développer des technologies de refroidissement de l'air : équipement des bâtiments et des véhicules en	LT	L'isolation des bâtiments serait plus efficace et permettrait de différer

climatiseurs.		cette mesure spontanée
Développer des technologies de refroidissement des bâtiments et des véhicules plus efficaces énergétiquement	CT	
Améliorer les procédés de refroidissement des centrales énergétiques pour minimiser encore plus l'échauffement de l'eau	MT	Le parc nucléaire actuel pourrait fonctionner jusqu'en 2050. Une réflexion d'évolution de la législation pourrait être considérée
Rendre les installations énergétiques plus robustes aux extrêmes climatiques	CT	EDF a déjà engagé un programme « grands chauds » dont la mise en œuvre va s'étaler jusqu'en 2012
Généraliser les systèmes de gestion des tranches	CT	Processus en cours
Renforcer les outils de modélisation de l'offre et de la demande en fonction du climat	CT	Les recherches sur le sujet sont encore en développement (cf. projet VUrCA cité précédemment)
Affiner le processus de gestion de crise	CT	Processus en cours, fortes synergies possibles avec le domaine de la santé et de l'environnement aquatique
Identifier les structures sensibles à la remontée du niveau de la mer	MT	Même dans le cas d'un scénario extrême, la remontée du niveau de la mer sera progressive ; le cas de Blayais a été traité dans le programme post-tempête 1999 ; les protections des autres sites potentiellement concernés ont été réévaluées

IV.2.3.5 Synergies entre mesures d'adaptation et d'atténuation

La principale mesure de ce type concernerait le développement d'un cadre bâti et automobile plus économe en énergie de refroidissement.

IV.2.4 Limites et analyse des incertitudes

IV.2.4.1 Impacts qui n'ont pas pu être pris en compte

Quelques impacts potentiels identifiés n'ont pas pu être examinés pour diverses raisons explicitées ci-après.

Le surcoût d'investissement des centrales électriques futures pour leur adaptation au changement climatique

Le surcoût d'investissement des centrales électriques futures pour leur adaptation au changement climatique n'a pas pu être estimé par le groupe en raison (i) du manque de données chiffrées²⁶³ et (ii) car les surcoûts spécifiques au changement climatique ont tendance à être englobés dans les coûts de mise aux normes de sécurité et sont alors difficilement différenciables.

Le surcoût lié à la baisse des capacités de transit dans les ouvrages du réseau de transport électrique

Plus la température ambiante est élevée, plus l'intensité maximale admissible en permanence (IMAP)²⁶⁴ dans les conducteurs électriques s'abaisse, du fait d'un refroidissement moins efficace. Aujourd'hui, entre l'hiver et l'été, pour un écart de 15°C

²⁶³ Les questions de coût des centrales nucléaires sont surtout documentées aux Etats-Unis. Pour des ordres de grandeurs aux Etats-Unis on pourra notamment consulter Makhinjani, 2008.

²⁶⁴ L'IMAP correspond à l'intensité maximale à laquelle un ouvrage peut être exploité sans limitation de durée

des températures ambiantes enveloppe, la perte d'IMAP avoisine en moyenne 15%. Les répercussions d'un réchauffement global de 3 à 4°C sur le dimensionnement du réseau sont cependant encore mal cernées : d'une part, il est vraisemblable que, s'il y a abaissement des seuils d'IMAP, celui-ci se fera par sauts discrets et qu'en conséquence, une simple interpolation sur la base des valeurs d'été et d'hiver actuelles soit inappropriée ; d'autre part, certaines liaisons (celles qui ont un facteur de charge annuel élevé, telles les liaisons centrale-poste pour le nucléaire par exemple) ne seront pas affectées, l'optimum économique résultant de l'arbitrage investissement / coût des pertes conduisant à un dimensionnement tel que l'IMAP est très largement supérieure à l'intensité effectivement transitée. Au surplus, il convient de signaler que, pour les parties de réseau qui devraient être renforcées (ce qui génère des surcoûts d'investissement), ce renforcement aura pour effet de réduire la résistance ohmique et donc les pertes par effet Joule (ce qui procure un gain sur les coûts d'exploitation liés à l'achat de ces pertes).

Ainsi la modélisation de l'impact est encore très difficile à envisager et l'adaptation du réseau pourrait générer en parallèle des gains pour l'exploitant qui rendent complexe l'estimation du coût net d'une mesure d'adaptation.

L'impact d'une redistribution de la population sur le territoire national

L'impact d'une redistribution de la population sur le territoire national suite aux effets du changement climatique n'a pas été pris en compte car il débordait du champ de l'économie constante. Cette hypothèse est toutefois fort intéressante à titre prospectif mais nécessiterait de bâtir des scénarios climato-démographiques liés au climat. *In fine*, si des dynamiques de population sont associées au changement climatique, elles impacteront la territorialisation annuelle de la consommation ce qui pourrait rendre nécessaire une réorganisation du réseau de production et de distribution énergétique. Quelques études de ce type ont été menées en Australie²⁶⁵ et sont exploitables pour divers secteurs (notamment pour les infrastructures de transport). La variation géographique possible du tourisme estival en lien avec l'évolution du climat pourrait également avoir un impact sur la demande électrique locale estivale et justifier des ajustements du réseau en conséquence.

L'effet des tempêtes

L'effet des tempêtes qui avait été considéré dans la première phase comme un impactant potentiel du changement climatique n'a pas été considéré. En effet, les données pour la France métropolitaine ne mettent pas en évidence, en l'état des connaissances actuelles, une augmentation de la fréquence de ces événements en lien avec le changement climatique. Les modélisations actuelles prévoient une hausse de ces événements en lien avec le changement climatique uniquement pour l'Europe septentrionale et pour les zones intertropicales²⁶⁶. Dans le contexte métropolitain, aucun élément robuste ne permet donc de bâtir un scénario d'augmentation de fréquence des vents violents. On rappellera qu'il y a des objectifs d'enfouissement des lignes de réseau électrique à l'heure actuelle : cette mesure peut être considérée comme une mesure d'adaptation sans regret. Néanmoins, ayant déjà été planifiée pour des motifs non exclusivement liés au changement climatique, on ne l'a pas intégrée dans notre calcul de coût de l'adaptation.

Néanmoins, il est probable que les tempêtes en zone tropicale puissent influencer sur l'hexagone de façon indirecte : le regain d'événements climatiques extrêmes dans les

²⁶⁵ Des scénarios ont été réalisés pour l'Australie par le Centre de Recherche Urbaine et Population de l'Université de Monash et sont présentés dans la publication *Austrroads*, 2004.

²⁶⁶ De récents travaux mettent en évidence une augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes dans l'hémisphère Nord : Ulbrich et al., 2008

zones de production gazière et pétrolière pourrait entraîner une tension sur la disponibilité de ces ressources. Ce phénomène reste cependant difficile à modéliser sur une longue période²⁶⁷.

Les neiges collantes

Les neiges collantes²⁶⁸ peuvent avoir des effets de surcharge sur les câbles électriques de surface (surpoids et apparition de manchons de glace autour des lignes). Les modèles prévoyant une diminution des zones soumises à une rigueur hivernale, la répartition des zones sensibles à ce phénomène devrait donc évoluer : des endroits où le phénomène était inconnu devraient y être confrontés et des zones aujourd'hui touchées devraient alors s'en trouver épargnées à l'avenir. Néanmoins, ce phénomène est extrêmement difficile à modéliser avec précision. Nous avons donc décidé de ne pas le traiter. La tendance de fond étant à la réduction des zones d'enneigement, on devrait toutefois ne pas connaître d'amplification économique de ce phénomène en termes spatial mais plus probablement une redistribution géographique des zones impactées.

L'effet des incendies

Sur ce point, le groupe n'a pas eu accès à des données spécifiques. Le volet est abordé dans le rapport « Forêt » et met en évidence le besoin d'approfondissement des connaissances. Si le changement climatique devait avoir un impact sur l'augmentation du nombre de feux de forêts, cela pourrait fortement influencer sur le réseau. Quand un incendie se déclare, le courant est coupé sur certaines sections pour permettre l'intervention des équipes de lutte contre le feu. Cela impacte fortement la distribution électrique à l'aval de la zone touchée par l'incendie

IV.2.4.2 Limites d'un scénario à économie constante

Le cadre de l'économie constante a entraîné quelques limites dans la portée des travaux :

- on considère que la population n'évolue pas sur un siècle : cela est de nature à sous-estimer l'impact absolu du changement climatique ;
- on considère qu'il n'y a aucune innovation technologique impactant le secteur de l'énergie : cela est de nature à sous-estimer l'impact de l'émergence de nouvelles technologies économes en énergie ou adaptées au changement climatique.

Le cadre d'économie constante a aussi présenté des avantages pour le travail du groupe :

- il a rendu possible l'utilisation des modèles de consommation actuels sur la période d'étude ;
- il a limité le biais de travailler sans taux d'actualisation : si l'économie est constante, la notion de préférence du présent et d'aversion au risque sont beaucoup moins évidentes ;

²⁶⁷ Une étude des effets des ouragans Katrina et Rita estime qu'ils ont entraîné entre août 2005 et juillet 2006 une perte de production dans la zone du Golfe du Mexique de l'ordre de 4.4% de la production nationale de gaz naturel des Etats-Unis. Department of Energy/USA, 2006

²⁶⁸ Les neiges collantes ont une plus grande teneur en eau liquide que les neiges de type poudreux. Ce type de neige se dépose avec des températures comprises entre -5 et 0°C (source : www.meteofrance.com).

- il a évité des débats sur les tendances économiques à des horizons divers : exercice difficile et périlleux comme nous le rappelle la conjoncture actuelle ;
- il pose clairement les limites objectives du travail dès le départ : celui-ci s'inscrit dans une première approche quantitative des impacts et l'économie constante peut nous fournir une heuristique des tendances futures.

Néanmoins, le Groupe de travail a fait le choix de proposer dans certains cas des hypothèses complémentaires pour affiner les analyses : ainsi dans le cadre de la consommation électrique liée aux climatiseurs, le groupe a évalué dans un premier temps l'effet à taux d'équipement constant (hypothèse d'économie constante) puis a également considéré des scénarios supplémentaires « probables » qui verraient un équipement renforcé dans le futur (sur la base de données de la littérature, cela sort toutefois du champ strict de l'économie constante). Ce type de scénario « bis » sera souvent à la base du calcul d'impact de l'adaptation spontanée et ses hypothèses clairement précisées par la suite.

IV.3 Evaluation quantifiée des impacts du changement climatique et de l'adaptation

IV.3.1 Impact sur la demande énergétique

IV.3.1.1 Périmètre de l'évaluation

Conformément aux hypothèses communes aux groupes de travail, le groupe a considéré les horizons 2030, 2050 et 2100, à l'échelle de la France métropolitaine. Le périmètre sectoriel a été restreint à certains types d'utilisation pour cause de disponibilité de statistiques : ces éléments sont explicités en accompagnement de chaque exercice de quantification.

L'évaluation a porté sur :

- La demande totale d'électricité, de gaz et de fioul de chauffage tertiaire et résidentiel pour 2030, 2050 et 2100 à partir des hypothèses du modèle climatique retenu ;
- La demande supplémentaire dans le cadre d'un scénario d'évolution de la climatisation (résidentiel, tertiaire, automobile) ;
- Les effets territoriaux des variations de besoin de climatisation entre des villes du Nord et du Sud de la France.

Le groupe a testé selon les hypothèses d'économie constante ce qui se passerait si les températures modélisées aux horizons 2030, 2050 et 2100 étaient appliquées à la France d'aujourd'hui. A titre de complément prospectif, on a considéré quelques hypothèses de développement de la climatisation.

La température de l'air est le seul paramètre climatique utilisé dans cet exercice : les modèles de consommation actuellement utilisés peuvent se satisfaire de ce déterminant. L'effet de l'ensoleillement ou de la nébulosité peut également jouer, mais il est très difficile à modéliser de façon robuste à l'heure actuelle. Pour l'humidité de l'air, le groupe ne disposait pas de données suffisantes.

IV.3.1.2 Scénarios et hypothèses climatiques

Comme indiqué précédemment, la température de l'air a été considérée comme paramètre de détermination de l'impact du changement climatique sur la demande énergétique. A cette fin, le groupe a exploité les données journalières de températures disponibles, issues du modèle Arpège-Climat de Météo France. Cela a permis néanmoins d'avoir des modélisations quotidiennes sur les différents horizons considérés (2030, 2050 et 2100) et selon les deux scénarios A2 et B2 : ces données ont alors été intégrées dans les exercices de calcul de consommation par rapport à la moyenne 1980-1999.

Comme dans chaque travail avec un modèle climatique, il y a des incertitudes sur la précision des données modélisées. Le recours à un seul type de modèle renforce également l'incertitude associée aux résultats (le GIEC par exemple utilise une vingtaine de modèles). Enfin, les modèles sont affinés continuellement et les données à notre disposition pour ce travail n'étaient pas issues de la version la plus récente d'Arpège-Climat. Ainsi, un certain recul doit être observé avec les données utilisées et bien prendre en compte leur fort degré d'incertitude.

Travaillant dans le cadre de l'économie constante, les scénarios A2 et B2 ont été uniquement considérés dans leurs conséquences climatiques et non globalement comme des scénarios d'évolution socio-économiques.

Ainsi, on a tendance à qualifier le scénario A2 de « pessimiste » car il entraînerait des émissions de GES plus importantes que le scénario B2 et conséquemment un réchauffement climatique plus prononcé. Formellement, les deux scénarios diffèrent simplement par des trajectoires socio-économiques différentes qu'aurait adoptées l'Humanité.

IV.3.1.3 Méthodologie

Dans la demande énergétique globale, une partie est liée à des besoins structurels (fonctionnement journalier d'un parc d'équipement industriel, transport quotidien vers son lieu de travail, etc.), l'autre est sensible au climat. Ainsi, le profil de la consommation annuelle montre qu'en période froide la demande tend à s'accroître. Il en va de même en période très chaude. Quand on est dans des plages de températures où ni la climatisation, ni le chauffage ne sont nécessaires, la courbe « consommation-température » a tendance à être stationnaire. On attribue cette variation de consommation aux équipements de chauffage et de refroidissement.

A partir de ces constats, le secteur de l'énergie utilise notamment des modèles de prévision de la consommation en relation avec le climat fondés sur le concept de degré-jour. Pour une énergie donnée, on examine pour quelle plage de température moyenne la demande est la moins sensible à la température. Au-delà de la température seuil de cette plage, on observera une hausse de la consommation liée à l'augmentation des besoins de refroidissement et de façon symétrique en dessous de la température seuil de la plage, la hausse de consommation sera cette fois-ci due à la hausse des besoins de chauffage. On peut alors calculer des degrés-jour « de chauffe »²⁶⁹ et des degrés-jour « de refroidissement »²⁷⁰ en faisant la différence entre la température seuil et la température observée/modélisée. Par exemple, si le chauffage se déclenche en dessous

²⁶⁹ *i.e.* la température moyenne à laquelle les appareil de chauffage consomment de façon plus soutenue ou alors se mettent en route.

²⁷⁰ *i.e.* la température moyenne à laquelle les appareil de refroidissement consomment de façon plus soutenue ou alors se mettent en route.

d'une température moyenne journalière seuil de 17°C, si la température du jour est de 15°C, il sera comptabilisé 2 degrés-jour de chauffe. Si le refroidissement se déclenche au-delà d'une température moyenne journalière seuil de 18°C, avec une température moyenne journalière de 23°C, il sera comptabilisé 5 degrés-jour de refroidissement.

Les degrés-jour sont utilisés pour prévoir les consommations futures selon le climat avec des modèles plus ou moins complexes. Le groupe a choisi d'utiliser ce concept de degré-jour pour quantifier l'impact du changement climatique sur la demande : il s'agit de calculer des degrés-jour sur une période de référence (1980-1999) et de comparer les valeurs obtenues aux calculs de degrés-jour aux horizons 2030, 2050 et 2100 (en exploitant les données de notre modèle climatique). Cette méthodologie est assez fréquemment utilisée dans la littérature portant sur le changement climatique et l'énergie²⁷¹.

Les données du modèle climatique à disposition ont alors été exploitées pour en déduire les variations climatiques associées. La température seuil de dénombrement des degrés-jour varie en pratique selon le type d'énergie : ainsi les degrés-jour calculés pour la consommation électrique ne se superposent pas forcément à ceux calculés pour la consommation de gaz. Les calculs ont été faits à partir des modèles des énergéticiens du groupe (Représentants d'Electricité de France, de GDF SUEZ, Réseau de Transport d'Electricité, du Service de l'Observation et des Statistiques²⁷² et de l'Institut Français du Pétrole).

IV.3.1.4 Quantification des impacts

Les résultats sont présentés par type d'énergie, les modèles de calcul étant différents. Quand des variations éventuelles sur la méthode générale exposée plus haut interviennent, elles sont spécifiées.

Consommation de gaz naturel²⁷³

Dans le cadre des données de température modélisées pour les scénarios A2 (pessimiste) et B2 (optimiste), deux modèles ont été testés :

- un modèle de consommation classique de gaz basé sur les degrés-jour ;
- un modèle plus élaboré de calcul des corrections climatiques que nous appellerons ici Outil Groupe GDF SUEZ²⁷⁴.

²⁷¹ Quelques références utilisant cette approche :

Cartalis *et al.*, 2001

Valor *et al.*, 2001

Guido et Sanstad, 2006

Lafrance et Desjarlais, 2006

²⁷²Le SOeS est chargé au sein du MEEDDAT des statistiques pour les domaines de l'environnement, de l'énergie, de la construction, du logement et des transports.

²⁷³ Cette partie est issue de la contribution spécifique du Groupe GDF SUEZ pour le groupe de travail

²⁷⁴ Cet outil permet le calcul des corrections climatiques en gaz naturel, i.e. les quantités qui ajoutées à la consommation de gaz naturel observée, donnent une consommation corrigée que l'on constaterait en climat moyen.

Ce calcul, basé sur des techniques de régression, est réalisé en trois étapes :

- (1) Modélisation des consommations à l'aide de variables explicatives ;

L'impact des variations de consommation liées au climat a été uniquement considéré pour le secteur résidentiel, tertiaire et petites industries, à travers des données de variation de consommation issues de GrDF²⁷⁵ et les données de consommation globale estimées en 2008 par le *SOeS* (base Pégase, en ligne). Il a été considéré que la consommation des grands clients industriels n'était pas sensible au facteur climatique (ou alors de façon trop marginale pour être considérée).

La température seuil pour le calcul des degrés-jour est fixée à 17°C.

Au-delà des incertitudes propres aux projections climatiques rappelées précédemment, les limites à prendre en considération sont les suivantes :

- les hypothèses de stabilité de la demande de gaz naturel en fonction du climat et du portefeuille de clients sont des hypothèses très fortes (liées à celle d'économie constante), car dans la pratique, l'évolution des normes, les progrès technologiques à venir et l'évolution des besoins propres aux individus (effet « comportement », autrement dit l'évolution des consommations compte-tenu des prix des énergies par exemple) feront évoluer la relation entre la demande et le climat ;
- dans le modèle climatique utilisé, la référence a été prise sur la période 1980-1999 et le modèle ne prend pas en compte des températures observées de la décennie 2000, ce qui limite la représentativité des calculs²⁷⁶ ;
- les valeurs climatiques sont issues des moyennes de 30 stations qui ne sont pas forcément identiques à celles prises en compte par GDF SUEZ pour ses évaluations internes et le mode de calcul effectif de la température moyenne des énergéticiens peut être différent (prise en compte de facteurs de correction régionaux ou autres) ;
- la température moyenne journalière (définie comme la moyenne des températures maximales et minimales) là aussi diffère de celle utilisée par GDF SUEZ ;
- l'hypothèse pour le calcul des degrés-jour d'un seuil d'allumage ou d'arrêt des chauffages constants dans le temps.

(2) Remplacement des variables climatiques à climat observé par des variables à climat de référence ;

(3) Calcul de la différence entre les consommations estimées à climat de référence et celles modélisées à climat observé (2) – (1).

²⁷⁵ Gaz Réseau Distribution de France : société en charge du réseau de distribution de gaz naturel du Groupe GDF SUEZ.

²⁷⁶ Concrètement, le modèle utilisé aurait un biais à sous estimer le réchauffement par rapport aux dernières données observées. Cette tendance à modéliser un changement climatique « moins chaud » est moins gênante que l'inverse pour notre exercice de quantification.

D'après les variations de degrés-jour modélisées pour le secteur du gaz naturel (cf. Annexe K.1), on en déduit les variations de consommations ci-après estimées pour plusieurs références climatiques à l'aide du premier modèle basé sur les degrés-jour :

Tableau 41 – Variations de consommations – modèle basé sur les degrés-jours

Consommation gaz (TWh)	Référence	2030	2050	2090
Scénario A2 (TWh)	533,2	510,6	501,1	468,7
Variation A2 (TWh)	-	- 22,6	- 32,1	- 64,5
Variation A2 (%)	-	-4%	- 6%	- 12%
Scénario B2 (TWh)	533,2	502,6	506,2	482,9
Variation B2 (TWh)	-	- 30,6	- 27,0	- 50,3
Variation B2 (%)	-	- 6%	- 5%	- 9%

En utilisant la deuxième modélisation avec l'outil du Groupe GDF SUEZ, on obtient les valeurs suivantes aux dates 2030, 2050 et 2090 :

Tableau 42 - Variations de consommations – outil du Groupe GDF Suez

Consommation gaz (TWh)	Référence	2030	2050	2090
Scénario A2 (TWh)	533,2	516,0	508,7	482,5
Variation A2 (TWh)	-	- 17,2	- 24,5	- 50,7
Scénario B2 (TWh)	533,2	510,0	512,8	501,3
Variation B2 (TWh)	-	- 23,2	- 20,4	- 31,9

GDF SUEZ indique que ces deux estimations constitueraient des bornes majorantes et minorantes acceptables au vu des données industrielles calculées dans leur structure.

En termes de quantification de l'impact, il aurait été intéressant de cumuler aux trois horizons précédents, les baisses de consommations modélisées (voir ainsi quelle serait la variation de consommation sur 30 ans, 50 ans et 100 ans). Néanmoins, au vu de la très forte variabilité interannuelle des consommations de gaz, il a été jugé plus prudent d'en rester à des estimations annuelles pour 2030, 2050 et 2090. En termes de variation de consommation, le bilan des deux modèles est présenté dans le Tableau 43.

Tableau 43 – Variations de consommations – Bilan des deux modèles

Baisse	2030 A2	2030 B2	2050 A2	2050 B2	2090 A2	2090 B2
%	[3,2 ; 4,2]	[4,4 ; 5,7]	[4,6 ; 6,0]	[3,8 ; 5,1]	[9,5 ; 12,1]	[6,0 ; 9,4]
TWh	[17,2 ; 22,6]	[23,2 ; 30,6]	[24,5 ; 32,1]	[20,4 ; 27]	[50,7 ; 64,5]	[31,9 ; 50,3]
Mtep ²⁷⁷	[1,3 ; 1,7] ²⁷⁸	[1,8 ; 2,4]	[1,9 ; 2,5]	[1,6 ; 2,1]	[3,9 ; 5,0]	[2,5 ; 3,9]

Les données modélisées dans notre hypothèse d'économie constante semblent indiquer que le changement climatique entraînera un repli de la consommation gazière pour les secteurs résidentiel et tertiaire. Cette tendance au recul apparaît en scénario A2 comme en scénario B2. Ainsi pour 2090, la baisse de consommation pourrait avoisiner les -5% (-2,5Mtep : valeur minorante pour B2) à -9% (-5,0Mtep : valeur majorante pour A2).

N.B. : On remarque qu'à l'horizon 2020-2039, on a modélisé une baisse de chauffage plus importante pour le scénario B2 que pour le scénario A2. Cela peut sembler contre-intuitif car A2, scénario pessimiste, est censé se traduire par un réchauffement plus prononcé (observé d'ailleurs en 2050 et 2090). Cet apparent retournement de tendance est dû au fait qu'à l'horizon 2030, le scénario B2 est plus chaud que le scénario A2. L'inversion observée à l'horizon 2030 n'est donc pas imputable aux modèles de consommation utilisés, qui ne sont que le reflet des scénarios d'évolution des températures. Après 2030 la tendance s'inverse et les températures de A2 augmentent très vite : A2 est bien le scénario le plus pessimiste, mais cette tendance ne se manifeste dans les modèles climatiques qu'à près 2030.

Consommation de fioul domestique pour le chauffage résidentiel et tertiaire²⁷⁹

La température seuil pour le calcul des degrés-jour retenue est 17°C. Les calculs ont été centrés sur la période de chauffe (de janvier à mai et d'octobre à décembre). Les variations de degrés-jour calculées sur des moyennes centrées sur vingt ans sont présentées dans le Tableau 44 (la période de référence est 1980-1999).

Tableau 44 – Variation moyenne de degrés-jours par rapport à la période de référence 1980-1999

Variation moyenne de degrés jours	2030	2050	2090
Scénario A2	-6,9%	-9,0%	-19,7%
Scénario B2	-8,9%	-8,4%	-13,6%

Ces variations ont été ensuite exploitées dans le modèle de consommation du SOeS (cf. Annexe K.2). Les évolutions climatiques modélisées se traduisent, toutes choses étant égales par ailleurs, par la variation annuelle suivante de consommation de fioul :

²⁷⁷ Mtep : million de tonne équivalent pétrole. Unité courante de quantification des consommations énergétiques.

²⁷⁸ 1 TWh gaz = 0,077Mtep

²⁷⁹ Cette partie est issue de la contribution spécifique du Service de l'Observation et des Statistiques du MEEDDAT (SOeS) pour le groupe de travail

Tableau 45 – Variation annuelle de consommation de fioul

Variation moyenne annuelle de la consommation	2030	2050	2090
Scénario A2	-4,6%	-6,5%	-12,4%
Scénario B2	-5,6%	-6,1%	-7,2%

Sur la base de la consommation actuelle et dans l’hypothèse d’une économie constante, on peut dresser le bilan quantitatif suivant par rapport à la moyenne 1980-1999.

Tableau 46 – Bilan quantitatif de la variation de consommation de fioul

Variation moyenne annuelle de la consommation	2030	2050	2090
Scénario A2 (Mt)	-0,51	-0,74	-1,51
Scénario A2 (Mtep) ²⁸⁰	-0,51	-0,74	-1,51
Scénario B2 (Mt)	-0,62	-0,69	-0,83
Scénario B2 (Mtep)	-0,62	-0,69	-0,83

En termes de quantification de l’impact, il aurait été intéressant de cumuler aux trois horizons précédents les baisses de consommations modélisées. Néanmoins, comme pour le gaz naturel, au vu de la très forte variabilité interannuelle potentielle, il a été jugé plus prudent d’en rester aux variations annuelles pour 2030, 2050 et 2090.

Dans le cadre de nos hypothèses, le changement climatique entraînerait une baisse de consommation annuelle de fioul pour les secteurs résidentiels et tertiaires de l’ordre de 0,83 à 1,51 millions de tep selon les scénarios « optimistes » et « pessimistes ». Par rapport à la période 1980-1999, cela représenterait à l’horizon 2030 une baisse moyenne de consommation comprise entre -4,6% et -5,6% ; entre -6,1% et -6,5% à l’horizon 2050, puis entre -7,2% et -12,4% pour l’horizon 2100.

Le groupe n’a pas souhaité à ce stade monétiser la valeur de la baisse de ces quantités de fioul : la fixation d’un prix consensuel sur le siècle serait très complexe²⁸¹. Cette baisse de consommation aura également un effet en termes de rejets de CO₂ « évités ».

Consommation électrique pour le chauffage et le refroidissement²⁸²

Sur la base des données de température de notre modèle climatique pour les scénarios A2 et B2, RTE a estimé des variations de consommation totale du parc de climatisation et de chauffage électrique. Conformément à l’hypothèse d’économie constante, on suppose que le parc de chauffage et de climatisation est inchangé et qu’il n’y a aucune évolution de la performance énergétique, ce qui est une hypothèse forte.

A partir des données de notre modèle climatique et des consommations journalières, un seuil de degrés-jour précis a été déterminé par régression et raccordement parabolique

²⁸⁰ 1 t de fioul domestique = 1 tep

²⁸¹ Même en économie constante, le choix d’un prix de l’énergie est problématique : doit-on considérer uniquement le prix hors taxes ? Doit-on inclure dans le calcul les pertes ou gains fiscaux associés à ces variations ?

²⁸² Cette partie est issue de la contribution spécifique du RTE pour le groupe de travail

(cf. Annexe K.3 pour le détail de la méthodologie). Cette méthodologie plus complexe a permis d'avoir un lien consommation/température plus fin que la fixation d'un seuil de degrés-jour plus conventionnel. Les calculs effectués pour A2 et B2 amènent aux résultats annuels moyens suivants.

Tableau 47 – Consommation électrique pour le chauffage et le refroidissement – scénario A2

Consommation A2 (TWh/an)	1980-1999	2020-2039	2040-2059	2080-2099
Chauffage	70,0	62,7	59,9	49,3
Variation	-	- 7,3	-10,1	-20,7
Climatisation	0,9	1,3	1,9	3,7
Variation	-	0,4	+ 1,0	+ 2,8
<u>Cumul Variation annuelle</u>	-	<u>-6,9</u>	<u>-9,1</u>	<u>-17,9</u>

Tableau 48 - Consommation électrique pour le chauffage et le refroidissement – scénario B2

Consommation B2 (TWh/an)	1980-1999	2020-2039	2040-2059	2080-2099
Chauffage	70,0	60,2	61,5	54,0
Variation	-	- 9,8	- 8,5	- 16,0
Climatisation	0,9	1,4	1,7	2,6
Variation	-	+0,5	+ 0,8	+ 1,7
<u>Cumul Variation annuelle</u>	-	<u>-9,3</u>	<u>- 7,7</u>	<u>- 14,3</u>

N.B. : on a choisi de ne pas faire figurer dans ces tableaux la variation de consommation en pourcentage afin d'éviter les erreurs de lecture. En effet, bien que les hausses de consommation électrique pour climatisation puissent tripler en pourcentage, leur niveau en valeur absolue reste bien en deçà des variations de la consommation de chauffage.

Le changement climatique entraînerait une baisse globale de consommation d'électricité pour le chauffage et le refroidissement, avec les limites imposées par notre hypothèse d'économie constante. L'économie réalisée sur le chauffage dépasserait très largement le surplus de climatisation sur la base du parc actuel. La baisse annuelle modélisée à l'horizon 2100 serait de l'ordre de 1,54Mtep²⁸³ (soit -17,9TWh/an dans le scénario « pessimiste » A2) et de l'ordre de 1,23Mtep (soit -14,3TWh/an dans le scénario « optimiste » B2)

Scénario d'adaptation spontanée : développement de la climatisation

Le développement de la climatisation correspond à une adaptation spontanée des agents au changement climatique.

Le groupe a étudié deux scénarios d'équipement en climatisation correspondant à un prolongement des tendances actuelles : l'un dans les bâtiments résidentiels et l'autre dans le secteur de l'automobile particulière.

²⁸³ 1 TWh électrique = 0,086 Mtep

Secteur résidentiel

Pour l'équipement des bâtiments, l'hypothèse retenue par le groupe est celle d'une poursuite en France des tendances de climatisation des pays européens limitrophes et plus chauds (Espagne et Italie) jusqu'en 2050, puis un scénario de développement de la climatisation plus soutenu de 2050 à 2100, équivalent à celui de la Californie en 2007. Le Tableau 49 présente les statistiques nationales disponibles donnent les taux d'équipement en climatiseur suivants dans le résidentiel.

Tableau 49 – Taux d'équipement des ménages en climatisation, 2007

Pays	Taux d'équipement des ménages en 2007
France ²⁸⁴	3%
USA (Californie) ²⁸⁵	60%
Espagne ²⁸⁶	35,7%
Italie ²⁸⁷	25,3%

Compte tenu de l'hypothèse retenue, cela signifie qu'à l'horizon 2050 la France sera équipée comme ses voisins méditerranéens soit un taux d'équipement de 30,5%, le taux montant à 60% d'ici 2100.

La consommation d'un climatiseur est estimée environ à 500kWh par foyer et par an dans le contexte climatique actuel²⁸⁸. Cette valeur de consommation unitaire devrait vraisemblablement augmenter avec la hausse des températures de l'air modélisée pour le siècle. On estime les consommations de climatisation sur la base de degrés-jour de refroidissement, à partir d'une température seuil de 18°C. Sur la base des données de notre modèle des degrés-jour à 18°C et sur la base d'un calcul modélisé à degrés-jour variables par RTE²⁸⁹, les valeurs moyennes annuelles de degrés-jour de climatisation seraient les suivantes :

Tableau 50 – Valeurs moyennes annuelles de degrés-jour de climatisation

Degrés-jour refroidissement moyens annuels de	1980-1999	2030A2	2030B2	2050A2	2050B2	2100A2	2100B2
Modèle Arpège-Climat	184	211	173	300	304	521	430
Variation	-	+15%	-6%	+63%	+65%	+183%	+134%
Modèle RTE	121	178	185	265	228	509	355

²⁸⁴ D'après RTE (2007)

²⁸⁵ Statistiques nationales pour les Etats fédéraux consultables sur www.eia.doe.gov

²⁸⁶ Statistiques nationales consultables sur www.ine.es

²⁸⁷ Statistiques nationales consultables sur www.istat.it

²⁸⁸ ADEME, 2006

²⁸⁹ La méthode de calcul des degrés-jour est explicitée en Annexe K.3

Variation	-	+47%	+53%	+119%	+88%	+321%	+193%
------------------	---	------	------	-------	------	-------	-------

Le nombre de degrés-jour, quelle que soit la méthode de calcul, serait en très forte hausse sur la période. Il est proposé de retenir une hypothèse prudente de consommation moyenne unitaire par climatiseur de +50% soit 750 kWh/an (plus il fait chaud, plus le climatiseur fonctionnera).

Les chiffres présentés sont des moyennes globales sur 20 ans : ils ne sont pas représentatifs de la forte variabilité de besoins de climatisation d'une année à l'autre et d'une zone géographique à l'autre.

Dans l'hypothèse d'économie constante, on considérera les 26 millions de foyers répertoriés en 2007. Un passage de 3% à 30,5% de taux d'équipement représenterait plus de 7 millions de climatiseurs supplémentaires. En suivant ce raisonnement, on obtient l'estimation suivante de la surconsommation engendrée par ces nouveaux climatiseurs (compte tenu des difficultés de modélisation précise de la consommation d'un climatiseur par rapport à la hausse de température, on ne différenciera pas A2 et B2 dans cette partie).

Tableau 51 – Surconsommation annuelle selon le niveau d'équipement

	Actuel 2007	2050 : profil Espagne-Italie	2100 : profil Californie
Taux d'équipement	3%	30,5%	60%
Surconsommation annuelle engendrée (TWh/an)	-	5,4	11,1
Surconsommation annuelle engendrée (Mtep/an)		0,5	1,0

Le développement spontané de la climatisation à l'image des voisins méditerranéens de la France et des USA à plus long terme entraînerait une forte hausse de la consommation estivale des ménages. Cette hausse se produira spécifiquement sur la période chaude avec une valeur annuelle moyenne équivalente à 0,5Mtep en 2050 et 1,0Mtep en 2100²⁹⁰.

Cette hausse correspond uniquement au secteur résidentiel. Le manque de données n'a pas permis d'estimer l'impact sur le tertiaire et l'industrie. Le chiffre annuel à l'horizon 2100 (11,1TWh) uniquement pour le résidentiel signifierait toutefois une multiplication par 5 de l'appel de puissance pour refroidissement. Cet appel de puissance principalement en période chaude mobiliserait l'équivalent de quatre réacteurs nucléaires de nouvelle génération durant les 3 mois de chaleur.

Une dernière dimension à intégrer à l'impact sur le plan économique serait le coût d'entretien et de renouvellement des climatiseurs. Si l'on prend comme hypothèses (i) que les climatiseurs seraient renouvelés tous les 15 ans, (ii) que leur coût d'achat et d'entretien sur la période de quinze ans est de 600€²⁹¹ et (iii) que la croissance du taux d'équipement est linéaire sur la période 2007-2100, le coût global de l'achat/entretien de

²⁹⁰ Cette valeur paraît assez prudente : à l'horizon 2100, certains auteurs estiment que le schéma « californien » de climatisation engendrerait une hausse de 0,9 Mtep uniquement pour Paris (Hallegatte *et al.*, 2007)

²⁹¹ Valeur sans doute minorante si on compte les frais d'installation et d'entretien régulier du circuit réfrigérant.

l'équipement résidentiel associé à notre scénario serai de l'ordre de 7 milliards d'€ à l'horizon 2050 et 27 milliards d'€ en 2100 soit en moyenne 280 millions d'€ par an sur 2008-2100.

Secteur automobile particulier

Des données d'impact de la chaleur sur la surconsommation de carburant liée à la climatisation automobile en France ont été publiées par l'ADEME en 2003²⁹². Cette étude présente des résultats de consommation en carburant d'un parc de 10 véhicules, réalisés en enceinte, dans des conditions jugées peu sévères par les auteurs²⁹³ (pas d'ensoleillement, par temps chaud les usagers descendent souvent en dessous de 20°C pour la température consigne²⁹⁴, etc.). Les variations de consommation moyenne enregistrées sur le banc de test, entre une température de consigne de 20°C et une température extérieure de 30°C sont les suivantes :

Tableau 52 – Variations de consommation enregistrées entre une température consigne de 20°C et une température extérieure de 30°C (ADEME)

Variation de la surconsommation (l/100km, consigne à 20°C, ext. à 30°C)	Cycle urbain l/100km	Cycle extra-urbain l/100km	Cycle mixte l/100km
Véhicule Essence	+3,1	+0,9	+1,7
Véhicule Diesel	+3,2	+1,0	+1,9

Selon l'ADEME, un véhicule climatisé consommerait ainsi, suivant les climats, entre 2 et 5% de plus annuellement qu'un véhicule non climatisé²⁹⁵. En 2006, le taux d'équipement en climatisation des véhicules est estimé à 45% et 88% sont projetés d'ici 2020²⁹⁶. Cela équivaudrait ainsi à une augmentation de la consommation annuelle totale en carburant des véhicules particuliers de 4,4% en 2020 par effet « climatisation ».

A partir de ces données et sur la base d'une méthodologie simplifiée, l'IFP estime que pour l'année 2006 (à tendance caniculaire), la climatisation a représenté une surconsommation de l'ordre de +1,4% pour l'essence essence et +1,9% pour les véhicules diesel (cf. Annexe K.4). Ces estimations sont un peu moins élevées que celles de l'ADEME. Une valeur moyenne de 2% semble donc réaliste pour quantifier aujourd'hui l'effet « équipement en climatisation » sur la consommation actuelle. Elle passerait à +4% en 2020 (88% du parc automobile climatisé au lieu des 45% actuels).

En plus de cet effet « équipement », on propose maintenant d'estimer de façon simplifiée l'effet « changement climatique ». La tendance à l'équipement en climatisation couplée à l'élévation des températures devrait en effet accentuer l'effet annuel de surconsommation.

En l'absence de modèles spécifiques sur la climatisation automobile pour la France, nous avons adopté une démarche simplifiée visant à estimer l'augmentation du besoin de climatisation, en posant les hypothèses suivantes :

²⁹² Barbusse et Gagnepain, 2003

²⁹³ *ibid.*, p.3.

²⁹⁴ La température de consigne est celle programmée à l'intérieur du véhicule.

²⁹⁵ Gagnepain, 2006

²⁹⁶ Barbusse et Gagnepain, 2003

- la consommation des climatiseurs de voiture va augmenter de façon linéaire avec l'augmentation des degrés-jour (plus il fait chaud, plus la climatisation consommera) ;
- le seuil habituel de degrés-jour de climatisation fixé à 18°C est également valable pour la climatisation automobile.

On peut ainsi valoriser les données de degrés-jour supérieurs à 18°C calculés précédemment avec le modèle Arpège-Climat à notre disposition.

Tableau 53 – Données de degrés-jour supérieurs à 18°C

Degrés-jour de refroidissement moyen annuel	1980-1999	2030A2	2030B2	2050A2	2050B2	2100A2	2100B2
Modèle Arpège-Climat	184	211	173	300	304	521	430
Variation	-	+15%	-6%	+63%	+65%	+183%	+134%

On en déduit en première approximation l'effet de surconsommation lié au changement climatique.

Hypothèse 1 : Référence sans développement de la climatisation (Equipement constant = 45%)

Tableau 54 – Surconsommation liée au changement climatique – sans développement de la climatisation

Horizon	Actuel	2030A2	2030B2	2050A2	2050B2	2100A2	2100B2
Total Surconsommation	+2,0%	+0,3%	-0,1%	+1,3%	+1,3%	+3,7%	+2,7%
Equivalent Mtep ²⁹⁷	0,22	0,06	-0,02	0,27	0,27	0,77	0,56

Hypothèse 2 : Avec développement de la climatisation

Tableau 55 - Surconsommation liée au changement climatique – avec développement de la climatisation

Horizon	Actuel	2030A2	2030B2	2050A2	2050B2	2100A2	2100B2
Total Surconsommation	+2,0%	+2,6%	+1,8%	+4,5%	+4,6%	+9,3%	+7,4%
Surconsommation de base à climatisation constante	+2,0%	+0,3%	-0,1%	+1,3%	+1,3%	+3,7%	+2,7%
Surconsommation nette	0	+2,3%	+1,9%	+3,2%	+3,3%	+5,6%	+4,7%
Equivalent Mtep	0	0,48	0,40	0,67	0,69	1,17	0,98

²⁹⁷ La référence retenue est celle de 2006, chiffrée 10 760 milliers de m³ d'essence et 15 041 milliers de m³ de gazole soit environ 20,85 Mtep. Source : Direction Générale de l'Énergie et des Matières premières/MEDAD, 2007.

On suppose que le taux de véhicules particuliers climatisés reste constant après 2020, soit 88% (hypothèse prudente). L'augmentation du parc d'automobiles climatisées couplée à l'augmentation des besoins de refroidissement conduiraient en première approximation à une hausse de la consommation de carburant annuelle de l'ordre de 1,54Mtep (scénario B2) à 1,94Mtep (scénario A2) à l'horizon 2100 dont une partie serait liée au taux d'équipement actuel (hypothèse d'économie constante) et une autre due à la croissance de l'équipement (*i.e.* surplus net dû à l'adaptation spontanée).

Cette hausse de la consommation ne prend pas en compte l'effet d'émission de CO₂. Elle ne prend pas non plus en compte l'effet de l'amélioration du rendement des moteurs ni la raréfaction des ressources pétrolières (hypothèse d'économie constante).

Seuls les véhicules particuliers sont considérés dans cette estimation.

Bilan des ces deux exemples d'adaptation spontanée

Les deux exercices d'estimation préliminaire du développement « spontané » de la climatisation pour les secteurs résidentiels et de transport particulier laissent entrevoir une augmentation significative de la demande d'énergie en période chaude. Cette adaptation spontanée à la chaleur par le développement du parc climatisé aurait un effet économique non négligeable (hausse de la demande en période chaude, coût d'équipement et rejet de CO₂). L'adaptation spontanée pourrait augmenter de près de 3Mtep la consommation énergétique en période estivale. Il paraît donc nécessaire d'inciter à la mise en œuvre de dispositifs alternatifs ou plus économes dans la perspective d'un réchauffement du climat.

Approche territoriale : cas d'Agen, de Lille et de Strasbourg²⁹⁸

L'objectif est de comparer les consommations énergétiques de bâtiments (bureaux, hôtel, école maternelle, commerce et résidence pour personnes âgées) selon une météo « actuelle » à Lille, Strasbourg et Agen, puis d'estimer les variations attendues pour une météo à l'horizon 2090 pour le scénario A2. L'idée est ici de donner une illustration régionale des variations de consommation électrique attendues sous l'effet du changement climatique.

Les consommations sont estimées à partir d'une simulation dynamique au pas horaire réalisée avec le logiciel PAPTER²⁹⁹, version 4. Les climats retenus sont basés sur :

- climat actuel de Lille, Strasbourg et Agen, à partir du fichier météo de PAPTER ;
- climat futur, le même fichier météo de PAPTER dont les températures extérieures ont été modifiées à partir des valeurs de températures extérieures minimales et maximales quotidiennes issues des prévisions du modèle ARPEGE-Climat période 2070-2099, scénario A2.

La démarche se heurte néanmoins à plusieurs limites :

- Seul le paramètre température extérieure a été modifié car seul disponible ;

²⁹⁸ Cette partie est issue de la contribution d'EDF-Recherche et Développement. Elle s'appuie sur des résultats de modélisations précédentes réalisées pour Agen et Strasbourg, ainsi que sur une modélisation pour Lille réalisée spécifiquement pour le groupe de travail.

²⁹⁹ Le logiciel PAPTER est décrit à l'Annexe K.6.

- PAPTER nécessite également les paramètres flux solaires directs et diffus mesurés sur un plan horizontal en W/m² et l'hygrométrie relative en %, paramètres non disponibles pour la ville de Lille. L'analyse de 2006 pour Agen et Strasbourg avait montré que les flux solaires du climat futur ne sont pas estimés très différents du climat actuel. Ainsi le fait de considérer les valeurs actuelles de ces flux ne devrait avoir qu'un effet très limité sur l'estimation ;
- Concernant l'hygrométrie, les valeurs actuelles et futures étaient également similaires excepté en été où une baisse a été observée pour le climat futur. Ne disposant pas de cette valeur pour Lille, l'hygrométrie actuelle a été retenue pour le climat futur, sachant que la conséquence de ce choix pourrait être une surestimation de la consommation de climatisation par rapport à ce qu'elle devrait être si l'hygrométrie future devait s'avérer inférieure à l'actuelle ;
- Enfin, les hypothèses retenues pour les flux solaires et l'hygrométrie mériteraient d'être vérifiées et corrigées si nécessaire car les comparaisons des météo actuelles / futures faites pour Agen ne sont peut être pas transposables pour Lille.

PAPTER modélise l'évolution de la consommation selon diverses catégories d'équipement. Les simulations sous PAPTER obtenues (détail présenté en Annexe K.5) aboutissent à une variation de consommation globale telle que représentée ci après :

Tableau 56 – Variation de consommation électrique à Strasbourg, Agen et Lille en 2090

Variation consommation électrique	Strasbourg 2090	Agen 2090	Lille 2090
Bureaux (MWh)	+38,73	+148,22	+97,09
Hôtel (variation en MWh)	-22,80	+8,62	-17,78
Maternelle (variation en MWh)	-35,51	-23,12	-37,17
Commerce (variation en MWh)	-20,51	0,00	-23,39
Résidence P.A. (variation en MWh)	-77,44	-52,52	-77,09
Variation totale (en MWh)	-117,53	+81,20	-58,34
Variation par rapport à la situation actuelle	-6%	+4%	-3%

Ces résultats à considérer comme indicatifs montrent que d'un type de bâtiment à l'autre, les variations de consommation électrique liées au changement climatique peuvent fortement varier en valeur et en signe.

Ainsi, pour un pool fictif de bâtiments donné dans une ville, si le bilan global reflète une économie d'énergie (cas de Lille et Strasbourg), on remarque que certains types de bâtiments verront en revanche leur consommation spécifique augmenter (cas des bureaux, en relation avec la croissance des besoins de climatisation).

Enfin, d'une ville à l'autre, on remarque que l'effet du changement climatique peut se traduire de façon diamétralement opposée sur le plan de la consommation annuelle : le pool de bâtiment type construit avec PAPTER verrait sa consommation annuelle croître à Agen (+4%) alors que celle des villes plus septentrionales diminuerait (entre -3 et -6%).

Tout en gardant bien à l'esprit les limites de ces résultats et les simplifications opérées, le changement climatique pourrait avoir sur le plan énergétique des effets très différents selon les types de bâtiment qui constituent un espace urbain donné. Il serait prématuré

de tirer des bilans entre effets au Nord et effets au Sud du pays sur la base de ces seuls chiffres, mais il semble que d'une ville à l'autre les effets du changement climatique en termes de consommation électrique puissent être extrêmement contrastés.

Cette conclusion appelle donc à une prudence dans l'extrapolation de nos calculs pour la France métropolitaine à une région donnée. Cela appelle également à prendre en compte la dimension territoriale dans les évaluations précises ou les exercices de planification pour le secteur énergétique.

Il peut-être intéressant de noter, au vu des résultats détaillés présentés en Annexe K.4, que les différences (en termes de pourcentage) pour les projections de la ville d'Agen sont similaires aux différences qui existent actuellement entre Agen et Strasbourg. Ainsi, l'écart en pourcentage entre Agen « actuel » et Agen « futur » pour des bureaux est de -58% et +64% respectivement pour le chauffage et le refroidissement. Ces écarts sont comparables à la différence qui existe actuellement entre Agen et Strasbourg (-66% pour le chauffage et +45% pour le refroidissement). Bien qu'à interpréter avec précaution du fait des limites de l'étude présentées plus haut, ce résultat reste intéressant pour la compréhension des évolutions que l'on pourrait s'attendre à subir.

Cette étude préliminaire nécessiterait d'être approfondie :

- en calant les autres paramètres du climat futur (flux solaires et hygrométrie) ;
- en faisant des hypothèses sur des améliorations des modes constructifs des bâtiments (isolation, architecture), sur une augmentation des performances énergétiques de leurs équipements de chauffage et climatisation et sur des évolutions comportementales des occupants ;
- en intégrant cette démarche sur le parc de bâtiments tout en tenant compte de ses futures évolutions (composition et répartition géographique, etc.), pour avoir une image de ces effets à l'échelle du parc.

IV.3.2 Impact sur la disponibilité des ressources en eau pour le refroidissement et le turbinage

IV.3.2.1 Refroidissement

Les modélisations climatiques actuelles prévoient une hausse générale des températures (de l'air et des eaux de surface) à l'échelle de la France métropolitaine, ainsi qu'une augmentation en fréquence des événements extrêmes du type des canicules. Pour les précipitations, les données disponibles actuellement sont plus incertaines : les pluies sont des phénomènes de répartition spatiale très variables, la France est dans une zone climatique de transition pour les modèles de prévision des précipitations (va t-il pleuvoir plus fréquemment l'hiver ou non ?). Enfin, les travaux actuels de désagrégation spatiale des modèles du GIEC à l'échelle de la France donnent des résultats localisés ainsi que des modélisations des débits saisonnalisés à l'horizon 2050 de nombreux cours d'eau métropolitains assez différents des tendances globales³⁰⁰ du dernier rapport du GIEC.

³⁰⁰ Sur cette partie on pourra notamment consulter un mémoire de Doctorat réalisé au CERFACS/Météo France : Boé, 2007. Les désagrégations des modèles du GIEC réalisées montreraient une tendance à la baisse des précipitations et des débits hivernaux généralisée y compris dans la partie Nord (à l'inverse de modèles globaux qui prévoient plus de pluies hivernales). Au printemps et en été, les modélisations sont plus variables mais prévoient notamment un fort stress dans la quart Sud-Ouest.

Les tendances semblent donc indiquer qu'en période estivale, la température des eaux de surface devrait avoir tendance à augmenter (tendance déjà identifiée à l'heure actuelle) et les débits estivaux devraient baisser. Ces conditions extrêmes, rencontrées notamment pendant la canicule 2003, ont rendu le respect de la législation sur les rejets thermiques ponctuellement impossible dans la mesure où les températures d'eau en amont de certaines centrales dépassaient déjà les limites imposées par la réglementation pour les températures de rejet – avant même d'être prélevées par la centrale. Ainsi, un relâchement ponctuel et conditionnel de la législation a été autorisé lors de cet événement exceptionnel³⁰¹. Par ailleurs, des mesures techniques diverses ont été prises dans certaines centrales pour éviter des dysfonctionnements d'auxiliaires ou des arrêts préventifs par application de spécifications techniques (mise en place de systèmes provisoires de ventilation ou de réfrigération complémentaire).

En réponse à ces contraintes, le secteur énergétique a renforcé les mécanismes et mesures de gestion de ces grandes chaleurs. Les mesures d'adaptation prises ont été d'ordre organisationnel (arrêt programmé de tranche, déplacement des calendriers des travaux d'entretiens de certaines unités, meilleure anticipation des achats de capacités manquantes aux pays tiers, effacements volontaires, information du public, amélioration des interconnexions) et technique (investissement dans des équipements de refroidissement supplémentaires, nettoyage et rénovation des circuits de refroidissement existants, etc.)³⁰².

Le secteur énergétique estime aujourd'hui être préparé à faire face à d'éventuelles nouvelles vagues de chaleur, mais il est malgré tout difficile d'avoir des données très précises sur les coûts des mesures d'adaptation opérées :

- beaucoup de ces données sont protégées par le secret industriel ;
- plusieurs opérateurs ont déjà intégré ces coûts dans leurs schémas actuels de fonctionnement et ne les considèrent plus comme des coûts d'adaptation ;
- les coûts d'adaptation des futurs ouvrages pour résister aux canicules seraient difficiles à individualiser du coût global : le respect des normes actuelles inclut déjà une partie de ces surcoûts.

En 2006, les conséquences de la canicule ont été relativement limitées grâce aux actions entreprises par le secteur : en effet, la canicule a eu lieu en juillet, un mois un peu plus chargé en demande électrique que le mois d'août (durant lequel a eu lieu la canicule 2003). Si on peut en déduire que l'adaptation réalisée depuis 2003 a fonctionné, on peut aussi rappeler que cette canicule de 2006 fut beaucoup moins intense que celle de 2003.

Dans le cadre du travail d'estimation de l'impact encouru par le secteur énergétique pour le refroidissement des centrales, ont été retenues les données fournies par EDF et celles consignés dans un rapport au Sénat³⁰³ en 2004 :

- La consommation intérieure en France a été en augmentation de 1,4TWh entre août 2002 et août 2003 ;

³⁰¹Voir notamment Létard V. *et al.* (2004) pour un historique précis des contraintes réglementaires de refroidissement rencontrées durant la période caniculaire de l'été 2003.

³⁰² Un aperçu détaillé des mesures et programmes de recherche en cours sur ce sujet chez EDF est consigné dans Manoha B. *et al.*, 2007.

³⁰³ Létard *et al.*, *ibid.*

- Les niveaux de remplissage des réservoirs étaient très en dessous des normales saisonnières : la gestion de ces réservoirs était contrainte depuis plusieurs mois par la coordination des usages de l'eau (usages de production d'eau potable, de production énergétique, d'irrigation, de tourisme) ;
- Sur les semaines 32, 33 et 34 le mix énergétique EDF fait apparaître une baisse de 4% des volumes de production nucléaire et de 19% de l'hydraulique au fil de l'eau ;
- Des achats coûteux sur le marché spot ont été réalisés pour la compensation ;
- La perte de production nucléaire sur la période juillet-octobre 2003 pour respect de la réglementation s'élève à 5,3TWh (0,9 pour les températures d'air ; 3,5 pour les températures d'eau et 0,9 pour les étiages) ;
- Le groupe EDF estime la perte de la canicule à 300M€. Le programme qu'il a engagé pour rendre ses installations plus robustes dans la durée à une nouvelle canicule, dénommé « Grands Chauds » est évalué au même ordre de coût puisque compris entre -300 et -420 M€ en fonction des modifications qui seront effectivement décidées. La mise en œuvre de ce programme a commencé en 2007 et devrait se terminer en 2015.

IV.3.2.2 Enjeux économique de l'adaptation à la chaleur

Il est proposé ici d'estimer le coût potentiel « sans adaptation » des canicules aux horizons 2030, 2050 et 2100 en multipliant les coûts encourus en France en 2003 par le nombre de canicule de type 2003 modélisé à ces horizons.

Tableau 57 - Occurrences modélisées pour les canicules de type 2003³⁰⁴

Scénario	2010-2030	2010-2050	2010-2100
A2	[0 - 3]	[2 - 11]	[32 - 51]
B2	[0 - 1]	[1 - 4]	[18 - 25]

On en tire les coûts agrégés suivants aux différents horizons.

Tableau 58 – Coûts agrégés correspondants

Coût	2010-2030	2010-2050	2010-2100
A2 (G€)	[0 - 0,9]	[0,6 - 3,3]	[9,6 - 15,3]
B2 (G€)	[0 - 0,3]	[0,3 - 1,2]	[5,4 - 7,5]

Il convient de garder à l'esprit les limites de cette approche méthodologique :

- On se place dans l'hypothèse d'une économie constante : on suppose donc qu'une canicule de type 2003 qui se produirait en 2080 produirait les mêmes dommages. C'est une hypothèse très forte compte tenu des travaux d'adaptation débutés en 2007 par EDF pour limiter les pertes issues du diptyque chaleur/législation et qui conduit à une surévaluation du coût ;
- On se place dans l'hypothèse d'un événement ponctuel. Or une série d'événements ponctuels peut avoir un coût non-linéaire, plus élevé que la somme du coût de chaque événement. Par exemple, les réservoirs d'eau permettent de moyennner les précipitations sur plusieurs années. En conséquence, deux

³⁰⁴ Le détail de la méthodologie commune à l'ensemble des groupes de travail pour l'évaluation du nombre de canicules a été exposé en début du rapport du Groupe interministériel (Partie I).

sécheresses consécutives peuvent avoir un coup plus élevé que le double d'une sécheresse (cas du Brésil en 2001 où les ouvrages de gestion des eaux étaient calibrés pour faire face à une année de sécheresse, pas à deux). L'hypothèse d'événement ponctuel conduit à une sous-évaluation du coût ;

- On ne va considérer que les canicules de type 2003 : si une canicule est deux fois plus intense, elle ne comptera pas plus. Si une canicule est moins intense (type 2006), on ne comptabilise aucun impact ;
- En 2003, même si une grande partie de l'Europe avait été touchée par la canicule, certains pays avaient été épargnés ce qui avait permis de compenser certains manques de production. Dans le cas d'une canicule type 2003 plus étendue géographiquement, les compensations de production auraient été plus délicates.
- le modèle de quantification des épisodes caniculaires utilisé est commun au groupe interministériel. La partie méthodologie générale a présenté les limites et incertitudes associées à ce modèle ;

Sur la base des hypothèses retenues, en 2100 le coût associé aux événements caniculaires de type 2003 serait de 15,3 milliards € dans le scénario « sans adaptation à économie constante ».

Enjeux énergétique dans le cadre de la législation actuelle

Sur la base des données EDF, on peut aussi raisonner en « perte de TWh » dans les conditions de la législation actuelle et avec les limites connues en 2003. La canicule de 2003 a entraîné une perte de production de 5,3TWh uniquement pour cause de respect de la législation (*i.e* respect d'une température de rejet de 28°C et respect de la variation maximale de température). La reproduction de ce type événement sur le siècle, d'après le scénario commun de survenance d'événements caniculaires, amènerait aux manques à produire suivants pour respect de la législation :

Tableau 59 – Manques à produire liés aux canicules pour respect de la législation

Coût	2010-2030	2010-2050	2010-2100
A2 (TWh)	[0 - 15,9]	[10,6 - 58,3]	[169,6 - 270,3]
A2 (Mtep)	[0 - 1,4]	[0,9 - 5,0]	[14,6 - 23,3]
B2 (TWh)	[0 - 5,3]	[5,3 - 21,2]	[95,4 - 132,5]
B2 (Mtep)	[0 - 0,5]	[0,5 - 1,8]	[8,2 - 11,4]

Dans le scénario le plus pessimiste, la canicule entraînerait une perte cumulée de 270,3 TWh à l'horizon 2100. Ces chiffres sont à relativiser car ils correspondraient à une perte en période estivale, extrêmement sensible en termes d'approvisionnement. L'extremum modélisé correspond à 23,2 Mtep.

N.B. : point de vigilance : les pertes financières potentielles sur la base des événements caniculaires et les pertes en TWh pour le respect de la réglementation modélisées ne s'additionnent pas.

Productible hydroélectrique

La problématique est ici identique à celle du refroidissement. La canicule de 2003 a mis en évidence la vulnérabilité du secteur quand les pluies sont faibles et les réservoirs au plus bas :

- on ne peut pas dégager instantanément toute la puissance qui aurait été nécessaire ;

- le barrage doit se gérer en conformité avec la législation pour la gestion du cours d'eau (maintien du débit d'étiage, amortissement des crues, gestion concertée des usages de l'eau, etc.).

Dans cette partie, les données détaillées font défaut :

- les données ne sont pas publiques pour des questions de secret industriel ;
- les modèles de prévision des débits et du productible hydraulique en fonction des variations de précipitation et de température ne sont pas encore disponibles pour tous les bassins. La relation physique entre les paramètres climatiques et les débits reste complexe³⁰⁵ ;
- en termes de modélisation future, nous n'avons pas eu accès à des modèles climatiques désagrégés à l'échelle de chaque bassin versant français, ce qui rend l'appréciation précise de l'évolution délicate.

Afin de ne pas exclure cette thématique de notre étude, l'hypothèse retenue est d'estimer que le potentiel productible varie de la même façon que le débit. Cette hypothèse forte a été considérée comme acceptable dans le cadre du travail de notre groupe.

La production hydroélectrique française est de l'ordre de 70TWh/an dont 37TWh sont produits au fil de l'eau et 30TWh modulables (utilisés en période de pointe)³⁰⁶.

On valorise les résultats des travaux de désagrégation à l'échelle française menés en 2007 sur l'ensemble des modèles du GIEC³⁰⁷, ainsi que ceux présentés par EDF pour les bassins de la Loire et du Rhône sur la base de quatre modèles climatiques du GIEC et d'un modèle hydrologique (CEQUEAU)³⁰⁸ pour quantifier les variations de débit modélisées.

Les travaux présentés par le projet IMPEC d'EDF³⁰⁹ ont été centrés sur la Loire, l'Isère et le Rhône.

- la baisse du débit annuel de la Loire est incertaine. En revanche, la baisse en période de juin à novembre est de l'ordre de -30% ;
- pour le Rhône amont, la baisse du débit annuel est de -7% avec une baisse estivale de l'ordre de -17% ;
- pour le Rhône aval, la baisse du débit annuel est de -9% avec une baisse estivale de l'ordre de -21% ;
- pour l'Isère le débit moyen serait en baisse de -9% et de l'ordre de -26% en période d'étiage.

Sur les mêmes rivières, les travaux de Boé (2007) donnent des résultats moyens encore plus bas.

³⁰⁵ Boé, 2007

³⁰⁶ Ministère de l'Economie et des finances, 2006

³⁰⁷ Boé, 2007

³⁰⁸ Manoha *et al.*, 2007

³⁰⁹ Manoha, *ibid.*

- pour la Loire, baisse de 28% à l'année et de -28 à -46% en été ;
- pour l'Isère, la baisse annuelle est de l'ordre de -18% et -32% en période d'étiage.

Sur les baisses estivales, les deux travaux semblent indiquer une baisse de l'ordre de -25% pour le bassin du Rhône et de -30% pour la Loire. Cela aurait un impact significatif sur le productible associé et également sur le refroidissement des centrales nucléaires.

Pour les autres cours d'eau, on peut modéliser des ordres de grandeurs suivants³¹⁰. On insistera sur l'incertitude forte associée à ces chiffres³¹¹.

Tableau 60 – Modélisation de l'évolution des débits des cours d'eau

	Hiver	Printemps	Eté	Automne
Débits nationale) (tendance	Tendance incertaine sur la France		Baisse globale -30%	
Débits locale) (tendance	Arc alpin : +20% Jura : +10% Ailleurs : -10%	Htes alpes : +10% Ailleurs : -20 à -30%	Quart Sud Ouest et Alpilles : -50% Ailleurs : -30%	Quart Sud Est : -20% Ailleurs : -30%

Les deux séries de travaux laissent entrevoir, avec une forte incertitude, une légère baisse en hiver sauf pour le Jura et les Alpes, une baisse de l'ordre de -20% au printemps sauf dans les Alpes, une très forte baisse dans le Sud Ouest en été, puis une baisse générale de l'ordre de -30% en automne.

Compte tenu de l'incertitude de ces modélisations, on proposera de considérer que ces travaux s'accordent à l'horizon 2050 avec une baisse des débits moyens de l'ordre de -15% avec une baisse estivale de -30%.

Le productible affecté en conséquence s'élèverait à 10,5TWh/an à l'horizon 2050 (0,9Mtep/an). En dépit des incertitudes fortes sur les débits, cette hypothèse nous semble prudente. Comme pour les quantifications précédentes, nous n'effectuerons pas de cumul par période.

IV.3.3 Impact sur les énergies renouvelables

IV.3.3.1 Problématique

L'augmentation de la part des énergies renouvelables dans la production d'énergie, constitue une mesure d'atténuation du changement climatique. Or le changement climatique lui-même est susceptible d'avoir des impacts sur la production renouvelable.

Par énergies renouvelables, on entend les énergies éolienne, solaire, géothermique, marine et hydraulique, ainsi que l'énergie issue de la biomasse et des gaz (de stations d'épuration, de décharges et biogaz).

³¹⁰ Nos calculs d'après Boe, *ibid*.

³¹¹ Le lecteur se référera au rapport du Groupe Eau pour plus de précisions

Les évolutions climatiques anticipées auront essentiellement un impact sur le potentiel de production des énergies renouvelables comme l'éolien, dont la production dépend des conditions de vent, le photovoltaïque, dont la rentabilité est directement liée à l'ensoleillement et la biomasse, dont le rendement dépend des conditions climatiques.

Actuellement, les parts respectives de ces productions dans le mix énergétique sont très faibles et le changement climatique n'aurait alors, à mix énergétique constant, que des répercussions marginales sur l'équilibre du système, d'autant que les évolutions de vent ou d'ensoleillement attendues sur la France sont plutôt faibles. Toutefois, les mesures d'atténuation déjà décidées et celles qui seront inévitablement prises dans le futur pour respecter les engagements européens, auront pour conséquence d'accroître ces parts, ainsi que, parallèlement, l'importance potentielle des impacts du changement climatique sur ces productions.

Fin 2008, selon les données Observ'ER, la France se plaçait au 4^{ème} rang européen en terme de puissance éolienne installée, avec 3 404MW dont 948,9MW installés au cours de l'année, derrière l'Allemagne (23 902,8MW), l'Espagne (16 740,3MW) et l'Italie (3736,5MW). La France figurait ainsi parmi les 10 premiers marchés mondiaux de l'éolien en 2008.

Le Grenelle Environnement prévoit d'augmenter de 20Mtep la production annuelle d'énergie renouvelable d'ici 2020, en portant celle-ci à 37Mtep.

L'Assemblée nationale a défini l'objectif de 23% (part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale) lors de l'examen en première lecture du projet de loi de programme relatif à la mise en œuvre du Grenelle Environnement, en cohérence avec l'objectif accepté par la France dans le cadre de l'adoption du paquet « climat-énergie » au niveau européen. Le scénario de développement des énergies renouvelables à l'horizon 2020 élaboré par le comité opérationnel « énergies renouvelables » du Grenelle Environnement est le suivant :

- Pour l'éolien, cela représente en termes de puissance installée, un parc d'environ 25 000MW à l'horizon 2020 ;
- pour le solaire photovoltaïque environ 5 400MW.

Tableau 61 – Scénario de développement des énergies renouvelables sur la période 2006-2020

Production d'énergie renouvelable (hors biocarburants), en Mtep	2006	2020	2006/2020
Chaleur	9.7	19.7	+10.1
- Biomasse	8.8	15.0	+6.2
- Géothermie	0.4	2.3	+1.9
- Solaire	0.0	0.9	+0.9
- Déchets	0.4	0.9	+0.5
- Biogaz	0.0	0.6	+0.5
Electricité	5.6	12.9	+7.2
- Hydraulique	5.2	5.8	+0.6
- Eolien terrestre	0.2	3.6	+3.5
- Eolien en mer	0.0	1.4	+1.4
- Biomasse	0.2	1.4	+1.2
- Solaire photovoltaïque	0.0	0.5	+0.5
- Autres (géothermie, énergies marines, ...)	0.0	0.1	+0.1

IV.3.3.2 Impacts considérés par le groupe de travail

En ce qui concerne la filière bois-énergie, cette question n'est pas traitée dans le cadre de ce rapport. La variation de la ressource en bois est traitée par le groupe thématique « Forêt ».

Pour ce qui est de l'éolien, le peu de littérature disponible sur le lien entre le changement climatique et le régime des vents serait représentatif d'une grande incertitude des prévisions³¹². Le raisonnement à économie constante présente des limites, les membres du groupe ont souligné qu'il conviendrait de considérer un scénario comportant une puissance installée d'éoliennes plus importante.

Pour le photovoltaïque, l'effet du changement climatique sur l'incidence lumineuse est difficile à estimer, l'effet nébulosité pouvant être important et d'autant que le rendement par rapport à la luminosité varie selon les types de cellules solaires utilisées. L'effet de la température sur le rendement des cellules serait de l'ordre de -0,5% par degré supplémentaire : au vu de la progression technologique continue des rendements de ces cellules, la perte par effet chaleur de 0,5% par degré semble assez marginale.

On rappellera que la problématique d'adaptation des systèmes de production éolien et solaire photovoltaïque est très différente de la problématique des infrastructures ou des sites de production nucléaire et hydraulique à longue durée de vie. En effet la durée de vie significativement plus courte de ces installations (de l'ordre de 20 ou 25 ans) et

³¹² Sailor *et al.*, 2008. Les auteurs estiment l'impact du changement climatique sur la production éolienne dans le Nord-Ouest des Etats-Unis. Ils concluent que la production de printemps et d'été pourrait décroître de 40%, alors que la production d'hiver serait inchangée. Ce papier utilise deux scénarios d'émission (SRES A1B et A2) et quatre modèles climatiques (ECHAM5/MPI-OM, GFDL-CM2.1, GISS-ER, and MRI-CGCM2.3.2).

l'évolution technologique très importante attendue sur ces technologies en termes de productivité et de coûts, offrent une plus grande flexibilité d'adaptation à des conditions changeantes, notamment climatiques. Quatre ou cinq générations de matériel se succéderont d'ici l'horizon 2100, ce qui permettra de faciliter l'adaptation aux conditions climatiques et, vraisemblablement, de maintenir les niveaux de production attendus.

IV.3.3.3 Revue des connaissances disponibles et limites de l'analyse

Les études disponibles et examinées dans le cadre du groupe de travail concernent essentiellement les impacts du changement climatique sur la ressource éolienne.

Etude conjointe ADEME et CLIMPACT³¹³ sur les énergies renouvelables

L'ADEME et CLIMPACT réalisent une étude intitulée « Impact du changement climatique sur la production électrique à partir d'EnR ». L'étude doit s'étendre sur deux ans. Elle vise la modélisation de scénarios d'évolution des vents, du rayonnement solaire au sol et des précipitations. Un modèle spécifique a été développé : il fait la synthèse des modèles utilisés actuellement par le GIEC et les désagrège sur le territoire métropolitain. L'étude se donne pour objectif de contribuer à alimenter les décisions de programmation régionale d'implantation d'installations renouvelables.

Les résultats préliminaires de l'étude suggèrent une légère augmentation (+3,7%) des vents dans le Nord et une baisse dans le Sud (-3,4%) à l'horizon 2100.

Pour le rayonnement solaire, la hausse serait généralisée avec un extremum de +8,4% dans le centre de la France à l'horizon 2100. Cela ne prend pas en compte cependant le facteur nébulosité, encore très incertain.

Enfin, une baisse des précipitations annuelles serait observée pour l'ensemble du territoire, notamment dans le quart Sud-Ouest. Ces résultats restent toutefois peu significatifs.

L'étude prévoit également d'intégrer le développement des nouveaux modèles du GIEC et une mise à jour des résultats en conséquence. Le rapport de cette étude sera très prochainement rendu public par l'ADEME.

Les résultats des modèles présentés donnent les mêmes tendances que celles envisagées pour le groupe interministériel. Le groupe de travail souligne la nécessaire prudence dans l'exploitation pratique des tendances de vent sur le territoire. En effet outre la force du vent, sa régularité et sa prédictibilité sont des facteurs prépondérants pour la détermination du potentiel éolien. Or les modèles peuvent ne pas être pertinents à l'égard de ces facteurs.

Thèse « Impacts du changement climatique sur le potentiel éolien en France »³¹⁴

Cette thèse présentée en 2008 avait pour objectif de caractériser les impacts du réchauffement global sur le potentiel éolien en France et de quantifier les incertitudes associées. La complexité du système climatique ne permet pas la prise en compte de l'ensemble des paramètres climatiques et incite à la prudence dans les résultats.

³¹³ ADEME et CLIMPACT (en cours de publication)

³¹⁴ Najac, 2008

La description des caractéristiques de vent à 10m sur la période 1974-2002 a permis de souligner l'existence de forts contrastes géographiques, par exemple entre le nord-ouest et le pourtour méditerranéen, en termes de variabilité temporelle, d'état moyen et de cycle saisonnier. Il est apparu également que les moyennes saisonnières des vitesses de vent ne présentent pas de tendances significatives sur les 30 dernières années, à l'exception du nord de la France, qui présente une diminution significative.

L'étude souligne que pour étudier l'impact du réchauffement global, les modèles climatiques couplés océan / atmosphère ont une résolution spatiale trop faible, des méthodes de désagrégation spatiale doivent donc être mises en œuvre. Trois familles de méthodes ont ainsi été utilisées : dynamiques, statistiques et statistico-dynamiques.

L'étude a montré préalablement que les changements de circulation atmosphérique de grande échelle au niveau européen n'étaient pas suffisants pour expliquer les changements des variables locales (types de temps).

Les méthodes de désagrégation, statistiques comme statistico-dynamiques, permettent de reproduire correctement les principales caractéristiques des vents à 10m en France. En appliquant ces méthodes avec 14 modèles climatiques, les résultats sont cohérents pour les périodes allant jusqu'à 2100 : on constate une diminution de la vitesse moyenne du vent sur toute la France associée à une augmentation des flux de Nord, pour les mois d'avril à septembre et, pour octobre à mars, une augmentation dans le Nord et une diminution dans le Sud associées à une augmentation des flux de sud-ouest.

Il est apparu que l'incertitude totale était généralement dominée par l'incertitude due aux modèles climatiques. L'ordre de grandeur des changements obtenus indique des variations relativement faibles à l'horizon 2050.

Etudes en Allemagne et stratégie d'adaptation

Il existe, au sein de l'Agence fédérale de l'environnement (*Umweltbundesamt*), un groupe de travail sur les conséquences du changement climatique. Son rapport le plus récent (approuvé par le cabinet fédéral le 17 décembre 2008³¹⁵) souligne qu'aucune tendance générale significative ne peut être dégagée pour l'instant pour l'éolien et le solaire photovoltaïque. Les suivis des vitesses de vent moyennes montrent quelques périodes de fluctuations, qui ne permettent pas de dégager une véritable tendance.

Plus généralement, l'étude considère que les changements climatiques peuvent avoir des effets sur le rendement et la sécurité des installations renouvelables et donc sur la production, incitant les autorités administratives à prendre en considération ces aspects pour la planification des énergies renouvelables. Les impacts concerneront la biomasse, les installations hydroélectriques (modification des quantités des précipitations), ou encore les installations solaires et éoliennes, dont les exigences de stabilité devront être accrues du fait de la plus forte occurrence des vents forts.

Cependant, le rapport souligne également que les structures de production renouvelables décentralisées, diversifiées et complémentaires, contribuent à améliorer la sécurité d'approvisionnement, même en cas d'événements extrêmes³¹⁶.

³¹⁵ Umweltbundesamt/UBA, 2008

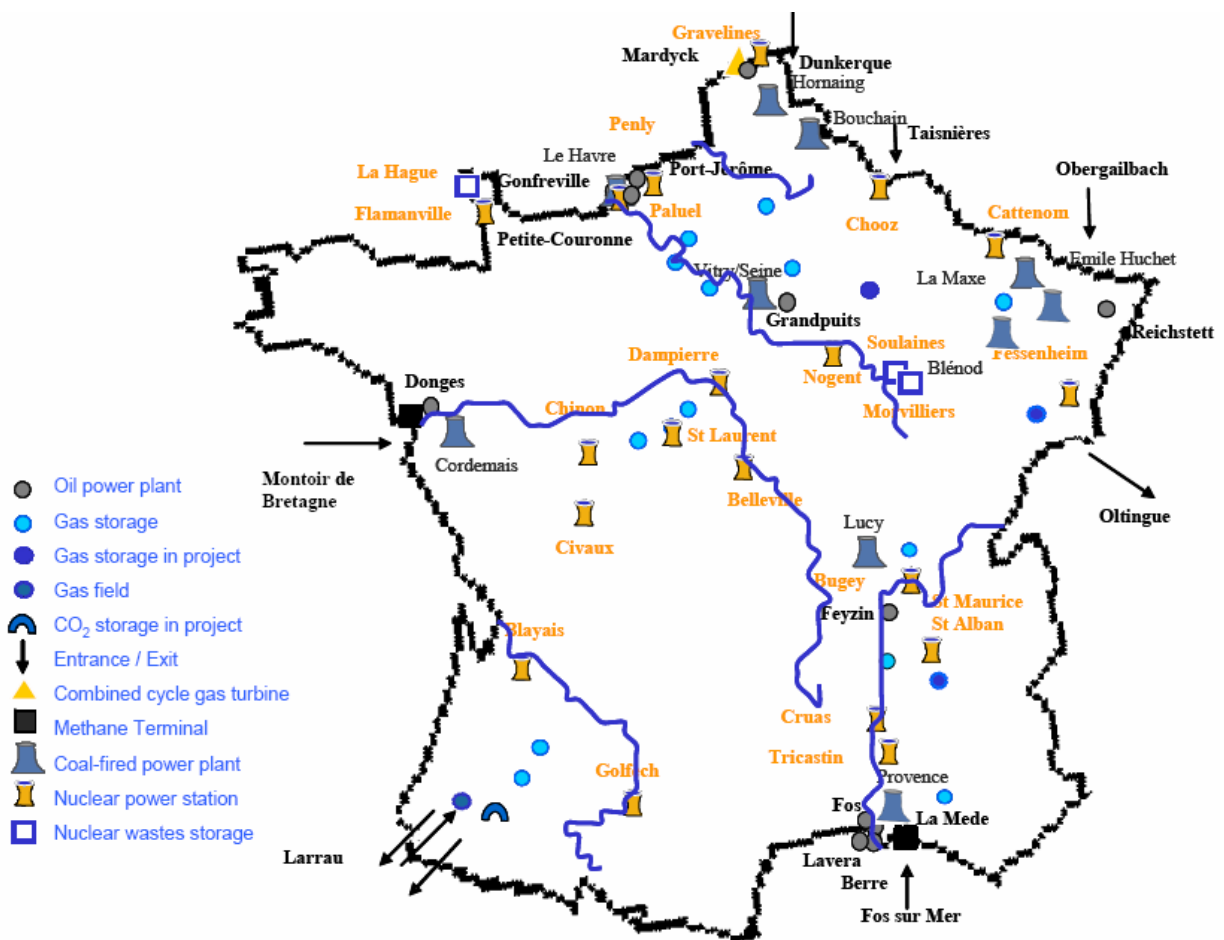
³¹⁶ Il faut cependant rester prudent, car la multiplication des micro-unités décentralisées de production électrique complexifie fortement la gestion du réseau global, notamment en ce qui concerne la nécessité de garantir un approvisionnement minimal constant.

IV.3.4 Impact sur les infrastructures énergétiques

La plupart des infrastructures énergétiques sont statiques et ont une durée de vie telle qu'elles pourraient être confrontées aux effets du changement climatique (par exemple, il faut environ dix ans pour construire une centrale nucléaire, elle sera exploitée au moins durant trente années et devra être ensuite démantelée). Le groupe a analysé les conséquences d'une part de la hausse des températures de l'air et de l'eau et d'autre part de l'élévation du niveau de la mer.

Comme dans le reste du document, les événements de type inondations et tempêtes ne sont pas pris en compte du fait (i) de l'absence de consensus scientifique actuel sur la variation des fréquences de ces événements sur le territoire métropolitain et (ii) de l'incertitude concernant le lien entre changement climatique, tempêtes et inondations pour la France³¹⁷.

La carte suivante présente la localisation des infrastructures de production et de stockage d'énergie.

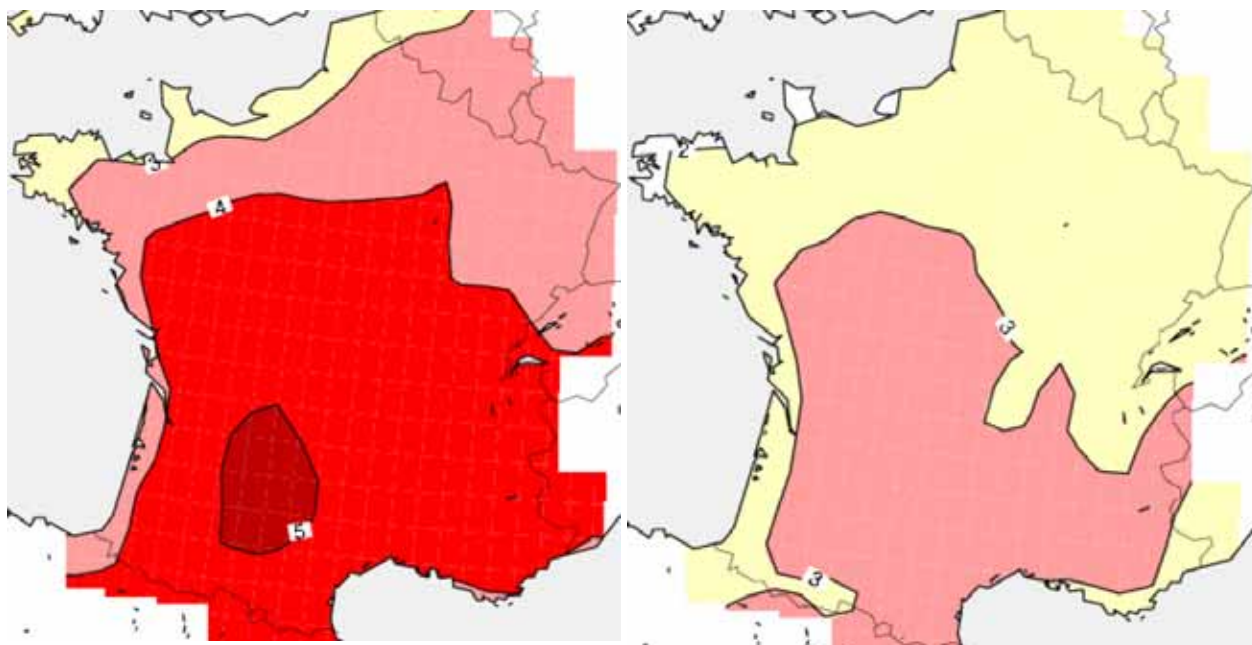


³¹⁷ Pour une analyse sur les évolutions possibles des inondations sur une sélection de bassins versants, le lecteur se reportera au rapport du groupe Risques naturels et assurances.

IV.3.4.1 Élévation des températures

Les centrales électriques nécessitent des systèmes de refroidissement afin de maintenir une plage de température permettant de garantir un bon rendement de production énergétique.

Les modèles actuels pour la France prévoient globalement une hausse assez marquée des températures estivales, notamment pour les scénarios A2.



Carte 6 - prévisions d'écart de température estivale (°C) entre la fin du 21^{ème} et la fin du 20^{ème} siècle selon les scénarios A2 (à gauche) et B2 (à droite). (© Météo-France 2007)

La plupart des infrastructures seront ainsi soumises à une contrainte de chaleur plus prononcée. Pour le secteur gazier, l'impact sur les infrastructures ne devrait pas être significatif : le stockage et le réseau de transport gazier sont déjà enterrés. Pour le secteur des produits pétroliers, les infrastructures de distribution sont majoritairement enterrées et ne devraient donc pas subir de contrainte particulière. Pour le secteur électrique, la question de l'impact sur les capacités de transport électrique n'a pu être approfondie, néanmoins la hausse des températures modélisée ici laisse entrevoir une augmentation potentielle du risque de feux de forêt et donc de rupture de l'approvisionnement (cf. IV.2.4.1).

Pour le refroidissement des centrales, le groupe de travail a déjà estimé un coût de l'impact (cf. IV.3.2) : la plupart des centrales actuelles devraient être en effet encore en

³¹⁸ Mansanet-Bataller *et al.*, 2008

activité en 2030, voire en 2050 (tendance actuelle à prolonger la durée d'exploitation de l'unité de 40 à 60 ans).

Plusieurs dispositions actuelles sur le parc nucléaire peuvent permettre de gérer la contrainte chaleur³¹⁹ :

- la sûreté de chaque centrale nucléaire est réévaluée tous les dix ans : cette réévaluation prend notamment en compte les effets identifiés du changement climatique (risque d'inondation, débit d'étiage, vents de chaleur, chaleur dans les structures, température dans les locaux et les circuits auxiliaires). On vérifie notamment que les marges de sécurité restent opérationnelles sous des projections climatiques sur les dix années à venir ;
- dans le cadre de la construction du nouvel EPR, les effets du changement climatique pour la durée de vie prévue de l'installation sont pris en considération dans la construction. Une provision pour l'aménagement d'ouvrages de protection notamment contre le changement climatique est également prévue et permet de couvrir *a minima* les besoins éventuels pour les 10 ans séparant deux réévaluations de sûreté ;
- depuis 2003, EDF a mis en place des mesures destinées à amortir l'impact des vagues de chaleur (Programme « Grands Chauds ») : augmentation des surfaces d'échange des réfrigérants, installation de climatisation dans les locaux soumis à une contrainte température, réorganisation des tranches, de l'entretien et modification des seuils de sécurité (dans le respect des normes de conception) ;
- un guide de l'ASN pour les inondations et autres aléas climatiques est en cours de réalisation. Sa publication est prévue pour 2010 et intègrera un volet spécifique « changement climatique ». Il généralisera notamment les mesures d'adaptation aux risques climatiques réalisées pour l'EPR Flamanville ;
- enfin, il est à noter que suite aux évènements de 2003, l'ASN dispose d'une procédure de « décisions homologuées » qui lui permet, en cas d'urgence sur le parc (du point de vue de la nécessité de production), d'adapter les règles applicables aux températures de rejet en préservant la protection de l'environnement.

IV.3.4.2 Elévation du niveau de la mer

L'évaluation de l'impact de l'élévation du niveau de la mer est encore à ses débuts sur le territoire métropolitain. Jusqu'à une date récente, la remontée des eaux marines était estimée à quelques dizaines de centimètres, ce qui en première approximation concernait une frange assez restreinte et incertaine du littoral. Ainsi le GIEC, dans son 4^{ème} rapport (2007), prévoyait les tendances suivantes hors effet d'une modification rapide de la dynamique des glaces polaires.

³¹⁹ Ce paragraphe est issu de la contribution de l'Autorité de Sûreté Nucléaire aux travaux de notre groupe thématique ainsi que d'un descriptif du programme « Grands Chauds » par EDF.

Tableau 62 – Evolution des températures et du niveau de la mer au niveau mondial à la fin du XXI^{ème} siècle(GIEC, 2007)

Table SPM.3. Projected global average surface warming and sea level rise at the end of the 21st century. {10.5, 10.6, Table 10.7}

Case	Temperature Change (°C at 2090-2099 relative to 1980-1999) ^a		Sea Level Rise (m at 2090-2099 relative to 1980-1999)
	Best estimate	Likely range	Model-based range excluding future rapid dynamical changes in ice flow
Constant Year 2000 concentrations ^b	0.6	0.3 – 0.9	NA
B1 scenario	1.8	1.1 – 2.9	0.18 – 0.38
A1T scenario	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.45
B2 scenario	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.43
A1B scenario	2.8	1.7 – 4.4	0.21 – 0.48
A2 scenario	3.4	2.0 – 5.4	0.23 – 0.51
A1FI scenario	4.0	2.4 – 6.4	0.26 – 0.59

Table notes:

^a These estimates are assessed from a hierarchy of models that encompass a simple climate model, several Earth System Models of Intermediate Complexity and a large number of Atmosphere-Ocean General Circulation Models (AOGCMs).

^b Year 2000 constant composition is derived from AOGCMs only.

Néanmoins, des publications plus récentes modélisent des élévations beaucoup plus importantes. Certains auteurs estiment des élévations de l'ordre de 120cm³²⁰ d'autres des valeurs bien plus extrêmes³²¹. Ces travaux en cours pourraient amener le GIEC à mettre à jour les scénarios de consensus scientifique actuels sur cette élévation.

Pour le présent rapport, l'hypothèse commune au groupe interministériel est une élévation de 100 cm d'ici la fin de siècle. L'impact de la remontée du niveau de la mer sur les réseaux énergétiques n'a pas pu être évalué dans ce rapport. La plupart des études existantes se sont focalisées sur des zones bien délimitées³²² et encore très peu nombreuses en France.

Pour ce qui est des infrastructures de production et de stockage, la remontée même extrême du niveau de la mer devrait se faire de façon assez progressive. Ainsi, certaines des structures pourraient s'adapter spontanément en étant reconstruites quelques mètres plus hauts ou plus vraisemblablement en étant protégées par des ouvrages spécifiques (digues, murets,..). L'élévation des ouvrages de protection pourrait être envisagée le cas échéant selon la durée de vie de l'ouvrage.

L'ASN a communiqué à notre groupe de travail la carte des cotes en altitude des plates-formes d'implantation du parc nucléaire français (cf. Annexe K.7). Seules deux plates-formes ont une altitude inférieure à 10 mètres : Gravelines (5,16m) et le Blayais (4,5m). Ces cotes en altitude représentent uniquement la plate-forme : les réacteurs sont situés à des altitudes plus élevées et des systèmes de protection sont également en place afin de contrer les possibles effets de déferlante, d'inondation ou de houle. Ainsi les données quantitatives ne mettent pas en évidence une sensibilité majeure à la remontée du

³²⁰ Rahmstorf, 2006

³²¹ Hansen, 2007. Cet auteur estime que si les tendances actuelles de modification de la dynamique de fonte aux Pôles se poursuivent, une hausse de l'ordre de 5 mètres ne serait pas à exclure d'ici 2100.

³²² Voir notamment Vinchon *et al.*, 2009.

niveau de la mer sur les centrales les moins élevées, même d'ici à leur fin de vie et leur démantèlement à l'horizon 2050. Par ailleurs, le nombre d'unités de production en basse altitude représente moins de 15% du potentiel de production nucléaire métropolitain.

Pour le secteur du gaz, les terminaux méthaniers devront prendre en compte cette contrainte lors de leur reconstruction (les terminaux actuels seront déjà remplacés à l'horizon 2050).

En revanche, la remontée du niveau de la mer pourrait rendre nécessaire à moyen terme l'adaptation des ouvrages de protection et des unités de pompage littorales qui acheminent l'eau de refroidissement³²³.

IV.3.4.3 Mesures d'adaptation envisageable

Cette partie présente quelques mesures pour l'adaptation des infrastructures aux hausses des températures et du niveau de la mer. Quelques éléments de coûts préliminaires sont donnés à titre indicatif mais n'ont pas pu être calculés de façon plus robuste par manque de données.

Refroidissement

Les travaux d'adaptation aux fortes chaleurs du parc nucléaire existant sont amorcés depuis plusieurs années. Les mesures réalisées sont d'ordre organisationnel et d'équipements/rénovation du matériel de refroidissement existant comme nous l'avons évoqué plus haut.

Aujourd'hui, EDF est soumis à une obligation double pour le rejet des eaux de refroidissement dans les rivières :

- ne pas excéder une certaine quantité de réchauffement de l'eau prélevée³²⁴ ;
- ne pas rejeter d'eau de température supérieure à une certaine valeur (en général 28°C).

Il peut actuellement arriver que les eaux des rivières voient leur température amont s'approcher, voire dépasser le seuil de 28°C « naturellement », c'est-à-dire en amont de la centrale, avant le prélèvement pour les circuits de refroidissement. Face au réchauffement climatique, il est fortement probable que des températures amont supérieures à 28°C seraient de plus en plus souvent dépassées et pour des périodes plus longues. Deux alternatives d'adaptation se posent :

- maintien de la législation actuelle (établie sans prise en compte du réchauffement climatique) ce qui rendrait délicate la réponse à la demande lors des périodes chaudes en été ;
- adaptation de la législation actuelle pour prendre en compte l'évolution du climat mais avec un effet à étudier pour l'environnement aquatique et à minimiser le cas échéant.

³²³ Communication de l'ASN à notre groupe de travail

³²⁴ Il est important de noter que l'élévation de la température de l'eau lors du refroidissement d'une centrale est de l'ordre de 0,1 à 0,3°C en période chaude. Ceci reste très faible par rapport aux variations diurnes des températures des cours d'eau.

Dans les deux cas, des innovations sont espérées pour minimiser l'échauffement : réfrigérants de purges des réfrigérants principaux par exemple.

Il existe par ailleurs des technologies de refroidissement qui n'utilisent pas d'eau. A l'heure actuelle, elles ont été développées pour de petites unités (inférieures à 1 000Mwe) en climat aride. Leur développement en réponse à la contrainte en eau ne semble toutefois pas encore à l'ordre du jour car : (i) leur performance sur de grosses unités doit être encore évaluée, (ii) elles génèrent des courants d'air chaud très importants donc l'impact climatique local est mal connu et (iii) elles se traduisent par des pertes de rendement des centrales.

Remontée du niveau de la mer

Les deux unités qui seraient les plus concernées (Le Blayais et Gravelines) totalisent un potentiel de 9 100MW produisant environ 64TWh/an (ou 5,5Mtep). Ces centrales ont toutefois déjà subi les adaptations nécessaires, sous forme de renforcement de digues ou de mise en place de murets de protection. Le relèvement des ouvrages de protection dans les mêmes proportions que la remontée du niveau de la mer reste ainsi la mesure d'adaptation privilégiée, mais dont le coût n'est pas rendu public.

Pour les autres centrales, leur altitude actuelle les rend moins exposées à la remontée du niveau de la mer. Néanmoins, la hausse du niveau de la mer devrait vraisemblablement entraîner une exposition plus fréquente aux effets des tempêtes ou des fortes marées et nécessitera donc un suivi des ouvrages de protection en conséquence. Le coût de ce type d'ouvrage de protection pour les centrales énergétiques n'est pas connu.

Dans le cadre du scénario de remontée du niveau de la mer envisagé dans le cadre de ce rapport (35cm en 2050 et 100cm à l'horizon 2100), aucun nouveau redimensionnement important des ouvrages de protection n'est envisagé d'ici l'horizon 2050 par EDF. A cet horizon, nombre de centrales actuelles seront probablement en déclassement. Les travaux de protection réalisés sur les centrales du Blayais et de Gravelines n'ont pas affecté le fonctionnement de ces centrales.

IV.4 Analyse et discussion des résultats

IV.4.1 Récapitulatif des résultats

En continuité du travail précédent, les résultats seront présentés en Mtep. A ce stade, aucun chiffrage financier ne sera réalisé au vu de la difficulté à trouver un prix de marché consensuel aux diverses énergies considérées dans ce rapport. Les résultats sont présentés aux horizons 2030, 2050 et 2100, sans cumul.

Tableau 63 – Récapitulatif des résultats

Impacts (Mtep)	B2			A2		
	2030	2050	2100	2030	2050	2100
Gaz naturel résidentiel, tertiaire et petites industries	-[1,8 ; 2,4]	[-1,6 ; -2,1]	- [2,5 ; 3,9]	- [1,3 ; 1,7]	- [1,9 ; 2,5]	- [3,9 ; 5,0]
Fioul résidentiel et tertiaire	-0,6	-0,7	-0,8	-0,5	-0,7	-1,5

Consommation électricité chauffage et climatisation	-0,8	-0,7	-1,2	- 0,6	-0,8	-1,5
Climatisation véhicules 45%	0	0,3	0,6	0,1	0,3	0,8
Canicules type 2003 centrales nucléaires*	0	[0,0 ; 0,1]	0,2	[0,0 ; 0,1]	[0,0 ; 0,1]	[0,3 ; 0,4]
Perte hydroélectricité productible	-	0,9	0,9		0,9	0,9
Bilan sans adaptation	-[3,8 ; 3,2]	-[2,2 ; 1,8]	-[4,2 ; 2,8]	-[2,6 ; 2,3]	-[2,7 ; 2,2]	-[5,9 ; 4,9]
Adaptation spontanée (Mtep)						
Climatisation résidentielle spontanée		0,5	1,0		0,5	1,0
Climatisation véhicules 90%	0,4	0,7	1,0	0,5	0,7	1,2
Bilan avec adaptation spontanée	-[3,4 ; 2,8]	-[1,0 ; 0,6]	-[2,2 ; 0,8]	-[2,1 ; 1,8]	-[1,5 ; 1,0]	-[3,7 ; 2,7]
Adaptation planifiée (Mtep)						
Redimensionnement des ouvrages de protection**	-	-	-	-	-	-
Bilan impacts et adaptation (Mtep)	-[3,4 ; 2,8]	-[1,0 ; 0,6]	-[2,2 ; 0,8]	-[2,1 ; 1,8]	-[1,5 ; 1,0]	-[3,6 ; 2,6]

(*) : mesures ayant été calculées sans possibilité d'annualisation, on les a rapportées en ratio annuel.

(**) : cette mesure d'adaptation étant peu probable, nous n'avons pas chiffré son impact.

La quantification des impacts fait apparaître dans le cadre des hypothèses retenues :

- une tendance d'économie d'énergie dans le scénario d'économie constante : entre 1,8 et 5,9Mtep d'énergie ne seraient pas consommés (soit entre 1 et 3,3% de la consommation actuelle³²⁵) ;
- une influence négative de l'adaptation spontanée en climatisation sur la base des tendances actuelles : l'économie d'énergie ne serait plus comprise qu'entre 0,6 et 3,7Mtep selon les scénarios d'adaptation spontanée développés ou les horizons ;
- les rubriques qui verraient leur consommation augmenter seraient celles liées au refroidissement : une forte hausse de la demande estivale est donc à anticiper en lien avec le réchauffement climatique ;
- un effet très marginal en cas de nécessité de protection des plates-formes de certaines centrales.

Le développement spontané de la climatisation résidentielle et automobile amputerait la moitié des économies d'énergies liées au réchauffement du climat. La recherche d'alternatives à cette climatisation généralisée est donc nécessaire notamment de façon

³²⁵ La consommation d'énergie finale en France en 2007 est estimée à 177,91Mtep par le SOeS

indirecte via le développement de l'isolation des bâtiments anciens et l'élargissement des objectifs du Grenelle sur la baisse de consommation énergétique des logements neufs.

Il est difficile de conclure sur la pertinence économique des mesures planifiées de l'adaptation, compte tenu des données disponibles. Par effet indirect, la promotion de l'isolation garde du sens dans la mesure où elle amplifierait l'économie d'énergie.

Globalement, le secteur de l'énergie ne semble pas spécialement impacté par le réchauffement climatique : l'effet climat entraînerait un repli de plus de 3% de la consommation énergétique nationale dans un scénario d'économie constante. Ce repli pourrait diminuer de moitié selon le niveau de développement de la climatisation dans le futur.

La variabilité au niveau territorial est élevée : la transposition directe de ces chiffrages à un échelon infra national serait probablement source d'erreurs. Néanmoins le fait d'estimer que les replis moyens de consommation au Nord du pays seraient plus importants que ceux de la moitié Sud est assez cohérent avec des études similaires menées à l'étranger³²⁶.

Les contraintes de fourniture d'énergie en période estivale devraient augmenter si la climatisation se développe, bien qu'en parallèle la consommation nationale annuelle puisse être en replis pour un scénario d'économie constante.

IV.4.1.1 Caractérisation de l'incertitude

Comme indiqué précédemment, ces résultats doivent être contextualisés au vu des incertitudes liées à nos outils et à nos modèles :

- l'ensemble des données utiles pour réaliser les quantifications ne sont pas toujours accessibles ou existantes : des méthodologies alternatives ont ainsi pu être explicitées mais elles ont tendance à augmenter le degré d'incertitude de ces résultats ;
- le modèle climatique utilisé présente un certain nombre d'incertitudes et les experts du groupe estiment qu'il pourrait sous estimer les tendances de réchauffement (sur la base d'une comparaison avec les données des dernières années). Le recours à ce seul modèle semble plutôt de nature à sous estimer l'impact du changement climatique qu'à le surestimer ;
- l'effet territorial peut sensiblement différer de la tendance agrégée au niveau national.

IV.4.1.2 Limites

Elles sont de différente nature :

³²⁶ En Grèce, de climat moyen plus doux, Cartalis *et al.* (2001), estiment que le gain en chauffage hivernal serait absorbé par le surplus de consommation de refroidissement estival. Au Québec (Canada), Lafrance et Desjarlais (2006), estiment que le replis de consommation hivernale excèdera le surplus de demande estivale pour le refroidissement.

- L'hypothèse d'économie constante fait que les résultats ici annoncés auront de fortes chances de varier en cas de modification du cycle économique à très court terme ;
- L'ensemble des impacts et des mesures d'adaptation n'a pas pu être balayé ni quantifié : les chiffres annoncés ici constituent donc une étape partielle ;
- Un chiffrage sur l'impact cumulé sur plusieurs années des effets du changement climatique aurait été un exercice complémentaire intéressant mais se heurte à de nombreuses difficultés méthodologiques.

IV.4.1.3 Possibilités de territorialisation

L'éclairage territorial réalisé sur les cas d'Agen, de Lille et de Strasbourg met bien en évidence que la tendance agrégée au niveau national masque des impacts régionaux très différenciés. Ainsi, quand les mesures considérées modélisent une baisse de consommation macro de 4%, il est fort probable que cette économie soit plus soutenue dans les parties « froides » du territoire que dans les parties plus « chaudes », ou en fonction des types d'activités économiques locales.

Les chiffres exprimés ici pour l'échelon métropolitain ne doivent surtout pas être transposés tels quels à l'échelle locale : il y a un enjeu fort pour que chaque territoire puisse adopter une approche similaire et l'« adapter » à ses spécificités. La démarche utilisée dans ce rapport peut aider à définir les enjeux prioritaires et les mesures d'adaptation présentant le meilleur ratio coût-bénéfice.

IV.5 Besoins spécifiques et pistes identifiées pour poursuivre l'analyse

IV.5.1 Pour affiner la méthodologie utilisée

Quatre pistes d'affinement de la méthodologie pourraient être considérées :

- La plupart des calculs étant issus d'un modèle, il serait intéressant de pouvoir actualiser ce modèle et de le confronter à des modèles différents. La mise en relation des données pourrait permettre d'affiner certains calculs et d'améliorer la robustesse des chiffres qui en sont issus ;
- Il serait également intéressant de calculer les impacts sur la base des données annualisées d'un pool de modèles et d'ensuite de les agréger aux différents horizons. Cela permettrait de quantifier l'impact cumulé quantitatif et économique afin d'en tirer des éléments de macroéconomie (impact en points de PIB par exemple). Dans le travail présent, on a souvent du se contenter d'afficher des données annuelles des horizons, car l'établissement d'une moyenne ou d'un cumul pluriannuel posait des problèmes méthodologiques ;
- L'affinement des données au niveau territorial apporterait un éclairage très utile en termes de planification ;

- La méthodologie actuelle gagnerait en précision si certaines données sources avaient pu être disponibles³²⁷.

IV.5.2 Pour élargir le champ des impacts et des mesures pris en compte

Le temps imparti n'a pas permis d'approfondir la question des mesures d'adaptation, mais quelques éléments pourraient faciliter l'élargissement des impacts et des mesures à prendre en compte :

- Le renforcement du dialogue avec les opérateurs énergétiques exposés aux effets du changement climatique. Le groupe de travail a permis d'être informé de nombreux programmes de recherche appliquée en cours ;
- L'élargissement de la concertation, selon une modalité à définir, afin d'enrichir le panel d'expertise pouvant proposer des mesures de quantification d'impact et de mesures adaptatives ;
- La définition de secteurs clés en termes économique ou stratégique qui pourraient focaliser l'attention du secteur énergétique et donc être privilégiés dans le cadre des travaux de recherche appliquée ;
- L'intégration des DOM-COM dans l'évaluation quantitative des impacts, des mesures d'adaptation et des coûts associés.

³²⁷ Il serait notamment intéressant par exemple d'avoir quelques données sur le taux réels de climatisation des ménages français en lieu des estimations actuelles.

V Rapport du Groupe Tourisme

V.1 Introduction

V.1.1 Quelques rappels d'éléments significatifs de l'activité touristique en France

Plusieurs rappels méritent d'être effectués, qui conditionnent la bonne prise en compte des activités touristiques relativement au changement climatique.

La consommation touristique en France métropolitaine se chiffre à 117,6 milliards d'euros en 2007 : pour 65% imputable aux touristes Français et 35% due aux dépenses des touristes étrangers en France. On dénombre environ 800 000 emplois dans les activités caractéristiques du tourisme (hébergement principalement) répartis dans 200 000 entreprises, pour l'essentiel des TPME. Les activités touristiques pèsent d'un poids important dans l'économie nationale (6,2% du PIB 2007).

Cette activité touristique est inégalement répartie sur le territoire métropolitain : fort impact en PACA, Rhône-Alpes et Ile-de-France par exemple ; impact nettement moindre dans les régions du Nord et de l'Est. Il faut également rappeler la diversité des « espaces-temps » touristique : la France est le pays des « micros-climats », tant d'un point de vue géographique, météorologique que culturel ; d'où l'extrême variété des destinations touristiques locales, dont la fréquentation tend à s'étaler tout au long de l'année.

Cette fréquentation touristique est par ailleurs multiforme et multi-clients : on distingue le tourisme « d'agrément » (voyages et séjours personnels, balnéaire ou de sports d'hiver par exemple), du tourisme lié aux activités « d'affaires » (30-40% de la fréquentation hôtelière dans les villes françaises).

Le tourisme hexagonal bénéficie du socle de la fréquentation touristique nationale, puisque les Français, qui partent en moyenne annuelle pour 65% d'entre eux en vacances, effectuent à 85% leurs séjours en France. Pour les deux-tiers environ cette fréquentation touristique de Français s'effectue en hors du secteur marchand, chez la famille, des amis ou en résidences secondaires. La consommation touristique des Français est fortement concentrée socialement, avec environ 5% des « partants » qui représentent en fait plus 25% des voyages et séjours.

La France est également une destination touristique de prédilection pour une clientèle étrangère (80 millions d'arrivées en 2008), à plus de 85% européenne, mais où la part des clientèles « émergentes » et lointaines s'accroît (Brésil, Chine...).

Sans que ces rappels soient bien sûrs exhaustifs, ils constituent autant de points qu'il faudrait pouvoir prendre en compte pour évaluer l'impact du changement climatique : ainsi certaines formes de tourisme (urbaine par exemple), certaines catégories de touristes (ceux plus aisés notamment), et bien sûr certaines destinations touristiques (celles pluri-actives notamment), peuvent être mieux armés pour s'adapter rapidement.

Il faut souligner à la fois la grande stabilité des fréquentations touristiques sur la longue durée (maintien de la prééminence du balnéaire par exemple), mais également la forte réactivité (à la marge) des clients et des professionnels face aux perturbations ponctuelles du « système touristique » : rééquilibrage des fréquentations estivales lors de la canicule 2003, au profit du Grand Ouest ; modification des comportements de dépenses face à la crise économique actuelle, au détriment de la restauration, par exemple.

Les facteurs climatiques influent dans le processus décisionnel du départ et du choix de lieu de vacances ou de séjours, mais ils jouent de façon complexe et évolutive avec d'autres facteurs : le prix bien sûr, mais aussi également d'autres variables liées à l'expérience touristique acquise, ou bien sûr aux liens (familiaux, résidentiels...) des individus.

Enfin, il faut souligner que l'horizon temporel des professionnels du tourisme - secteur privé pour l'essentiel – est à relativement court terme : pour les tour opérateurs, c'est celui de la saison ; pour les gestionnaires d'équipements de loisirs par exemple, c'est celui du moyen terme (2010-2020). Ce sont principalement les gestionnaires d'hébergements « en dur » qui se projettent à un horizon 2030 et au-delà, dans une logique de gestion de leur parc existant plus que dans une perspective d'investissement dans de nouvelles implantations : 2050 n'apparaît pas, en l'état des représentations, comme un horizon vraiment mobilisateur.

V.1.2 Objectif

Du fait des caractéristiques propres à l'activité touristique rappelées ci-dessus, mais également de l'impossibilité matérielle de l'administration du Tourisme, en recomposition³²⁸, de réunir un groupe de travail ainsi que de mobiliser des compétences *ad hoc*, une option « basse » a été adoptée pour le présent rapport, qui comporte deux apports principaux :

- d'une part (partie III) le résultat de la construction et de la mise en œuvre de l'indice climato-touristique de Mieczkowski sur le territoire Français ;
- d'autre part (partie IV), les principaux résultats de l'étude effectuée sur les « Préférences climatiques des Français »³²⁹.

V.2 Rappel des résultats de la phase 1 : parti méthodologique adopté en phase 2

La production du rapport de première phase du groupe interministériel s'est appuyée sur les analyses issues de la réalisation en 2006, pour le compte de la direction du tourisme, d'une étude exploratoire intitulée « Changement climatique et développement durable du tourisme » (TEC consultants), étude qui s'appuie sur le scénario A2 du GIEC (c'est-à-dire un réchauffement de 3 à 4°C à l'horizon 2100).

V.3 Principaux points de vulnérabilité touristiques

La première phase des travaux du groupe interministériel a permis de mettre en évidence les impacts suivants :

- diminution du manteau neigeux, avec un impact probable sur les activités de sports d'hiver;

³²⁸ Il faut rappeler que la direction du tourisme a cessé d'exister début janvier 2009, et que ses effectifs ont été intégrés depuis au sein de la Direction générale de la compétitivité de l'industrie et des services (DGCIS) du ministère de l'Economie de l'Industrie et de l'Emploi (MEIE)

³²⁹ Etude CREDOC-TEC à paraître juillet 2009, co-financée par la DGCIS-MEIE, la DIACT et le MEEDDM – CGDD/SEEI/ERNR3.

- baisses des réserves en eau (localement et selon les saisons) et restrictions, tensions, voire conflits d'usages entre activités touristiques et autres utilisations, qui pourraient affecter pour partie certaines activités touristiques ;
- remontées du niveau de la mer et l'érosion du littoral, dont le rapport de 2006 avait noté le caractère de moindre urgence, mais qui pourrait être revu « à la hausse », au moins localement, du fait des nouvelles données scientifiques diffusées depuis ;
- Les risques sanitaires, risques naturels et événements extrêmes, l'érosion de la biodiversité apparaissent également au titre des facteurs de vulnérabilité des activités et destinations touristiques, relativement au changement climatique. Avec le cas spécifiques des récifs coralliens des territoires d'Outre-mer, dont la vulnérabilité est particulièrement élevée.

V.3.1 Impacts généraux envisageables : vers une redistribution des flux touristiques ?

Une des hypothèses les plus souvent évoquées concerne l'éventualité de redistributions des flux touristiques, liées au changement climatique : à l'échelle des destinations touristiques locales, régionales. Redistributions également envisageables au niveau d'ensembles géographiques plus vastes (bassin méditerranéen par exemple), et donc entre les pays (à l'échelle mondiale, entre France et Espagne par exemple).

Ces redistributions pourraient être liées à des comportements éventuels de retraits de la clientèle par rapport à des destinations touristiques défavorisées par le changement climatique : effets négatifs de la hausse des températures au-dessus d'un seuil de confort touristique, pour la partie méditerranéenne par exemple. Ces retraits bénéficieraient à l'inverse à des territoires dont l'attrait touristique pourrait au contraire s'avérer renouvelé par les évolutions climatiques : fraîcheur estivale de la moyenne montagne, en arrière pays de la côte méditerranéenne, appréciée par une clientèle croissante de « seniors » ; nouvel attrait de la côte Normande, par exemple. Ces redistributions jouant également selon les saisons et l'évolution de celles-ci.

Les impacts globaux pourraient ainsi être donc négatifs (c'est l'appréhension générale) ; mais localement, la balance pourrait s'avérer positive pour certaines destinations et acteurs touristiques. D'où la nécessité d'éviter en la matière des raisonnements trop généraux et globalisant. En tout état de cause, on constate une carence de chiffres solides sur l'impact des variations climatiques sur le tourisme.

V.3.2 Au-delà de l'impact des variations climatiques : l'influence du coût des transports, des facteurs socioculturels...

L'importance de la fréquentation touristique d'une destination dépend, au-delà de son attrait climatique, de bien d'autres paramètres : économiques, culturels, sociaux... Outre l'influence du changement climatique, et en interactions avec lui, trois grands facteurs sont susceptibles d'influencer fortement les fréquentations : les variations de coût des transports, les changements de comportements d'ordre socioculturels, et le jeu de la concurrence au sein d'une société « d'hyper-choix » touristique.

L'élévation durable du coût des transports, qu'elle soit liée à une pénurie des ressources fossiles, ou aux politiques d'atténuation des mobilités qui pourraient être mises en œuvre dans la période, pourrait par exemple pénaliser les destinations de longue distance et favoriser celle de proximité (facteur plutôt favorable à la fréquentation de la France).

Les comportements touristiques (voyages et séjours) pourraient évoluer en relation à ces variations du coût des déplacements, mais également en fonction d'autres paramètres, économiques (inégalités croissante de revenus) ou culturels (place grandissante des échanges virtuels) : avec par exemple moindres taux de départs, la fréquentation de périmètres touristiques plus réduits... Au total, des changements de pratiques touristiques ne sont pas à exclure sur la longue période : par exemple pour ce qui concerne les comportements d'héliotropisme ; ou encore en faveur de l'accroissement sensible de séjours hors saison estivale.

Au total, trois constats ont été effectués à l'issue de la première phase du travail :

- les effets du changement climatique pour les entreprises et les destinations s'inscrivent dans l'évolution d'un système touristique concurrentiel, dont l'ensemble des acteurs cultivent une forte réactivité face au changement ;
- c'est au niveau le plus fin des destinations touristiques régionales que devraient être estimés les effets du changement climatique ;
- les touristes gardent l'entière liberté d'adapter leurs comportements de consommation touristique.

D'où la nécessité d'améliorer la connaissance des représentations, attitudes et comportements des différents acteurs touristiques, tant clients qu'opérateurs. C'est à cette nécessité qu'a répondu le lancement fin 2008, en co-financement Direction du tourisme, MEEDDM (CGDD/SEEI/ERNR3) et la DIACT, d'une première étude sur « les représentations et attitudes des touristes relativement au climat et à la météo ».

Pour des raisons matérielles précédemment exposées, le groupe tourisme a en fait été restreint au comité de pilotage de l'étude (DGCIS, CGDD, DIACT).

V.3.3 Mesures d'adaptations

V.3.3.1 Adaptation spontanée

Du fait des caractéristiques du secteur rappelées ci-dessus, les adaptations attendues sont principalement spontanées, tant de la part des touristes que des opérateurs touristiques.

L'enneigement artificiel : pour ce qui concerne les opérateurs, la « mesure-phare » d'adaptation spontanée a consisté, déjà depuis plus d'une dizaine d'année, en la généralisation de l'installation de canons à neige dans les stations de sports d'hiver du territoire, (à l'identique d'autres destinations en Europe et Nord-Amérique), pour assurer la fiabilité de l'enneigement.

Le rapport de l'OCDE 2007³³⁰ établit que sur 666 domaines skiables alpins, le nombre de domaines fiables chuterait à 500 dans le cas d'un réchauffement de 1°C, à 404 dans le cas d'un réchauffement de 2°C et à 202 dans le cas d'un réchauffement de 4°C. Avec bien sûr une hétérogénéité spatiale des impacts selon les pays de l'Arc Alpin et les caractéristiques propres de chaque domaine skiable.

Face à ces impacts, le recours à la neige artificielle est apparu pour les opérateurs locaux depuis déjà plus d'une décennie comme la principale stratégie d'adaptation. En France en 2007, 4850 ha soit 19% des 26 000 ha de pistes étaient équipées en neige de culture³³¹.

³³⁰ OCDE, 2007

³³¹ODIT France, 2008

SI la neige artificielle se révèle rentable en première analyse, les estimations ne tiennent en fait compte que des coûts financiers à la charge des exploitants des domaines skiables, et minorent les répercussions potentielles de la consommation d'eau et d'énergie ou les effets sur le paysage et les écosystèmes. De plus, il est patent que si la hausse des températures dépasse un certain seuil, la production de neige artificielle ne sera plus viable de toute façon.

L'artificialisation des sites et pratiques touristiques : au-delà du seul exemple de l'enneigement artificiel, on peut également faire l'hypothèse d'une artificialisation croissante d'autres pratiques touristiques : dans le nautisme, à l'exemple des « bulles » des Center Parcs, ou des stades nautiques créés de toute pièce, ou encore concernant également certains golfs... Nombre de loisirs sportifs dit « de nature » tendent pour partie à se développer « hors-sol », détachés des contingences climatiques et paysagères locales. Cette évolution se renforcerait d'autant si elle était portée par une inversion de paradigme du rapport à la « nature » (éventuel détachement). Un renversement qui amènerait alors à une moindre prise en compte des nécessités d'adaptation !

On peut rattacher également à cette catégorie les mesures de protection (celles spécifiques aux hébergements et équipements touristiques) prises face à la remontée du niveau de la mer (dont les estimations du GIEC devraient être revues à la hausse) et les mesures de compensation des volumes de sables emportés (maintien de l'activité balnéaire).

Le développement de la climatisation des hébergements (hôtels) et équipements touristiques constitue un autre cas d'adaptation spontanée (suite canicule 2003), dont l'ampleur pourrait s'accroître (cf. estimation du groupe Energie concernant le secteur résidentiel).

On remarquera que nombre des exemples cités jusqu'ici vont à des degrés divers à l'encontre des efforts d'atténuation du changement climatique.

Autre cas d'adaptation spontanée, les politiques ou pratiques locales d'arbitrages de l'accès aux ressources en eau lors de périodes de sécheresse, dans leur impact sur les activités touristiques locales (étiages insuffisant pour des pratiques balnéaires lacustres par exemple).

V.3.3.2 Adaptation planifiée

Pour ce qui est des adaptations planifiées, peuvent seulement être évoqués les politiques de diversification de l'offre touristique, particulièrement pour les stations de montagne : diversification des activités et des sources de revenus en hiver (hors ski) ; développement d'un « tourisme des quatre saisons », pour réduire la dépendance par rapport à la neige... Le rapport OCDE précité donne ainsi un (rare) exemple d'adaptation planifiée, par des mesures de soutien apportées par les conseils généraux de Savoie, Haute-Savoie et de l'Isère.

Qu'en est-il pour ce qui concerne les comportements d'adaptation des clients de l'offre touristique face à un éventuel accroissement des impacts du changement climatique ? Plus largement, qu'en est-il de la relation liant climat et fréquentation touristique ? Une fois paramétré cette relation, en quelle proportion le changement climatique peut-il influencer la fréquentation touristique d'une destination, d'un territoire ?

Dans un premier temps, on utilisera les résultats d'une modélisation sur les départements français de l'indice ICT de Mieczkowski, issue de l'étude réalisée à la demande du Groupe interministériel par le CIRED et SOGREAH pour comparer les évolutions attendues selon les départements, relativement aux scénarios A1B et A2 du GIEC, à l'horizon 2100.

Dans un second temps, on exposera sommairement quelques résultats d'une étude en cours, commanditée par la direction du Tourisme, la DIACT et le MEEDDAT (CGDD/SEEI/ERNR3), qui apportent des premiers éléments de connaissances sur les comportements des clientèles françaises face à l'évolution des paramètres climatiques (voir ci-après, partie V.6).

V.4 Climat et tourisme : quelques rappels³³²

Auparavant, on resituera rapidement quelques éléments acquis sur les composantes du « confort touristique ».

V.4.1 Confort thermique et confort hydrique, deux composantes du confort touristique

Les chercheurs ont depuis un certain nombre d'années essayé de mettre en relation le confort physique de touristes avec une variété de variables climatiques, et d'identifier pour celles-ci des plages et des seuils. Les bio-météorologues sont à l'origine de ce type de travail qui a conduit à la construction d'indices. Ces travaux intègrent en les agrégeant une sélection de paramètres climatiques et fournissent une estimation des conditions favorables au tourisme.

Deux points apparaissent essentiels en matière d'agrément climatique pour un séjour touristique : l'ensoleillement (le touriste ressent surtout le besoin d'un ensoleillement régulier) et l'absence de précipitations diurnes (les séquences prolongées de mauvais temps sont les plus cruellement ressenties par les touristes).

Les recherches ont porté également sur la notion de « confort thermique » : la vie de plein air et l'activité balnéaire apparaissent compromises en dessous d'une température de 18°C, qui correspond au seuil où les mécanismes de lutte contre le refroidissement de mettent à fonctionner et où débute la sensation de fraîcheur chez un sujet au repos n'exerçant pas d'activités physiques particulières.

On peut se demander s'il existe une limite de température supérieure : il semblerait qu'au-delà de 31°C les conditions de température deviennent éprouvantes. On peut également fixer comme une limite supérieure 33°C, ce qui correspond à la température moyenne de la peau nue. L'étude en cours du CREDOC, associé au bureau d'études TEC (évoquée ci-après), apporte des éléments complémentaires sur la perception des touristes français sur ce sujet.

Autre notion complémentaire celle de « confort hydrique » : il est en effet très simplificateur d'apprécier le confort thermique à partir de la seule température, la notion de confort étant dépendante d'une combinaison de paramètres. Le confort résulte en particulier d'une combinaison de la température et du vent et également par l'état hygrométrique. L'humidité ne fait pas qu'influencer le confort thermique, mais également conditionne les échanges respiratoires.

L'ensemble de ces paramètres a permis de définir des « plages » qui peuvent être considérées comme optimum pour les touristes en termes de température, de dépense énergétique, de contenu en eau de l'atmosphère, etc.... Cependant, les conditions qui paraissent en fait acceptables est sensiblement plus large : il faut en fait également prendre en compte les capacités d'adaptation du touriste qui dépendent d'un certain nombre de facteurs tels que sa santé, son âge etc....

³³² A partir des travaux de Jean-Paul Céron

Une fois la liste des paramètres établie et les mécanismes par lesquels ils agissent explicités, il reste à préciser leur importance respective et la manière dont ils se combinent. Ceci a conduit à deux méthodes concurrentes : l'élaboration de types de temps, plus ou moins favorables à l'activité touristique ; et la construction d'indices synthétiques de confort climatique

V.4.2 La méthode des types de temps (pour mémoire)

Jean-Pierre Besancenot a présenté dès les années 1970, une typologie élaborée où chaque type de temps est défini par une combinaison des paramètres fondant les préférences et exigences climatiques des touristes³³³. Chaque « climat » est ainsi défini comme une combinaison de type de temps qui en première analyse s'avère plus ou moins favorable au tourisme. Ce type de catégorisation permet de développer pour les différents types de destinations et les différentes saisons un discours *a priori* sur leur potentiel climatico-touristique.

V.4.3 Les indices synthétiques : l'indice climato-touristique (ICT de Mieczkowski)

Les indices climatiques pour le tourisme sont donc dans leur forme la plus sophistiquée, une fonction de sensations thermiques, de considérations esthétiques et de seuils de nature physique en ce qui concerne la pluie et le vent. De tels indices peuvent être utilisés pour évaluer l'attractivité des destinations. La pertinence de ce type de travail est cependant source de débats.

Datant des années 1980, l'indice de Mieczkowski, a été largement utilisé dans la littérature³³⁴. Il est constitué de la somme pondérée de 5 sous-indices : deux indices de confort, un indice pluviométrique, un indice d'ensoleillement et un indice anémométrique. L'auteur fournit un ensemble de tableaux et d'abaques qui permettent en fonction des données climatiques locales de déduire la valeur de chaque sous indice. Une plage des valeurs favorables au tourisme est fournie. Les scores égaux ou supérieurs à la borne supérieure de la plage sont qualifiés d'excellents etc. L'ambition de cet indice est permettre de comparer entre elles des destinations à l'échelle mondiale selon les époques de l'année. Les calculs ont été effectués pour environ 450 destinations ce qui permet d'obtenir des cartes mondiales des climats favorables ou défavorables au tourisme selon les saisons.

Depuis lors de nombreux travaux ont essayé d'améliorer les indices de confort climatiques censés être pertinents pour les touristes. Ces travaux ont pour point commun d'intégrer les différents paramètres climatiques et de définir les conditions propices au tourisme comme étant celles où la dépense énergétique de l'individu pour maintenir

³³³Paramètres : durée d'insolation, nébulosité en milieu de journée, durée des précipitations de 6 à 18 heures, hauteur des précipitations de 6 à 18 heures, température maximale, vitesse du vent en milieu de journée. Les types de temps retenus peuvent différer selon les saisons. Ainsi Besancenot définit pour l'été (juin-septembre) les types suivants : très beau temps ensoleillé, beau temps ensoleillé, temps frais ensoleillé, beau temps avec couverture nuageuse partielle, beau temps avec bref épisode pluvieux, temps chaud et lourd, beau temps avec vent fort, temps défavorable et temps pourri. Les sept premières catégories se prêtent aux activités touristiques avec éventuellement des réserves. Les différents types de temps journaliers se combinent dans les différentes régions du monde en proportion variée pour définir des types de climat (par exemple tropical sec, méditerranéen etc...).

³³⁴ Mieczkowski, 1985 ; Scott et McBoyle, 2001 ; Scott, McBoyle, et Schwartzentruber, 2004 ; Amelung, Nicholls et Viner, 2007 ; JRC PESETA, 2007

l'équilibre thermique de son corps reste proche de celle nécessitée par le fonctionnement métabolique de base du corps.

Certains travaux récents tentent d'aller un peu plus loin en intégrant en supplément par exemple des considérations dites « esthétiques », lesquelles se résument en fait à la prise en compte de la couleur du ciel. L'indice climatique pour le tourisme est ainsi défini comme une fonction des sensations thermiques de l'individu, de l'attrait esthétique du ciel (de clair à couvert) et de seuils de nature physique en matière de pluie et de vent.

V.5 Evaluation quantifiée de l'impact du changement climatique sur le tourisme : l'approche de l'ICT

Dans cette étude, pour chaque département est analysé sur la base du ICT de Mieczkowski, « l'attractivité climatique » des mois de juillet - août, en moyenne sur la période de référence 1980-2000. L'analyse de l'évolution des données à l'horizon 2100 permet ensuite d'estimer pour quels départements l'ICT sera particulièrement impacté, permettant de comparer les évolutions attendues selon les départements en ordres de grandeur (sans toutefois tirer de conclusions sur la fréquentation touristique).

V.5.1 Remarques préalables : intérêts et limites des indices

V.5.1.1 Intérêt de la méthode

Cette évaluation quantitative de phénomènes sociaux et naturels représentée sous la forme d'un indice permet :

- d'agréger des variables hétérogènes (les variables climatiques participant au bien-être thermique et de confort du touriste) pondérées selon leur importance, dans une formule mathématique simple ;
- de calculer l'index de manière uniforme ;
- et enfin d'analyser comparativement des zones du point de vue des touristes sur la base de valeurs numériques (la méthode appliquée ne donne en effet pas lieu à des résultats en valeur absolue, mais essentiellement en valeurs relatives permettant l'exercice de comparaison).

V.5.1.2 Limites des indices

Le climat : un facteur de décision parmi d'autres dans la demande touristique

Le climat constituant un facteur de décision parmi d'autres dans les choix des touristes.

L'attractivité touristique globale d'une zone dépend en effet d'un grand nombre de facteurs, tels que la présence d'infrastructures adaptées, la distance, l'offre d'activités, le patrimoine, la nature, et l'offre culturelle sur le territoire³³⁵ ou encore le prix du séjour.

³³⁵ En ce sens, cette analyse peut venir en complément de l'étude menée par le groupe sur les comportements des touristes, qui vise à identifier la part du facteur « climat » dans les choix de destination, à partir d'un travail d'enquête. Les résultats de l'étude « comportements » permettront de relativiser ceux que nous obtiendrons à l'issue de ce travail.

L'importance du facteur climat diffère également selon les régions et le type d'activités : les activités de plage et de plein air sont par exemple plus sensibles au climat que le tourisme de ville³³⁶. En zone méditerranéenne, si le climat constitue un atout de taille qui attire les touristes, dans des régions moins clémentes, le climat n'est pas le facteur le plus important de décision de séjour.

Enfin, les indices ne prennent aucunement en compte les contextes culturels divers, dont on sait à quel point, au plan sociologique, géographique et historique, ils peuvent influencer les sensations ressenties par les touristes. Des travaux récents s'attachent donc à valider l'indice climatique pour les touristes sur la base d'études de terrain.

La question du choix et de la pondération des aléas climatiques étudiés

Un certain nombre d'impacts du changement climatique susceptibles de se répercuter sur la demande et l'offre touristique ne sont pas considérés. Les aléas climatiques choisis sont restreints aux températures, précipitations, vents et ensoleillement et ne rendent compte ni de la variabilité du climat, des phénomènes extrêmes (feux de forêt, canicules, inondations, risques côtiers), de l'érosion de la biodiversité ou encore de la baisse de disponibilité de l'eau.

Les indices bioclimatiques posent par ailleurs des problèmes classiques de pondération, comme c'est le cas pour de nombreux indices agrégeant des grandeurs de natures différentes. S'il existe un consensus scientifique autour du calcul du confort thermique humain³³⁷, le principal désaccord réside dans la décision d'accorder le plus grand poids (50% de la valeur totale de l'ICT) au confort thermique, alors que celui-ci est en grande partie lié à la perception du sujet. L'ICT est fondé sur des appréciations qualitatives de certaines variables (attribution de notes allant de 1 à 5) ce qui implique une certaine subjectivité, et des seuils fixés de manière artificielle (sur la base de la « meilleure approximation possible de l'opinion de la majorité des personnes concernant le confort thermique »³³⁸).

Le caractère évolutif de la notion de confort climatique

La méthode employée repose sur l'hypothèse selon laquelle la notion de confort climatique est figée. Or celle-ci est fort probablement évolutive dans le temps, en raison notamment de l'adaptation « naturelle » du corps humain à l'évolution de son environnement.

La non-prise en compte de l'adaptation

Les indices de confort climatique n'incluent pas la prise en compte de la capacité d'adaptation des touristes et des acteurs du secteur à des conditions climatiques diverses. Diversifier les activités proposées ou encore jouer sur le confort thermique dans les infrastructures d'accueil sont autant de mesures que peuvent – et devront – prendre les acteurs du secteur pour contrecarrer les impacts potentiellement négatifs des évolutions climatiques sur le secteur. Encore une fois, il est difficile de déduire une relation directe entre ICT et fréquentation touristique.

Des conclusions insuffisantes pour guider la politique touristique

Au vu de la multiplicité et de la complexité des facteurs influençant les choix de destination des touristes, l'évolution de l'ICT en un lieu donné ne conditionne pas

³³⁶Amelung, 2005

³³⁷ Mieckowski, 1985

³³⁸ Mieckowski, 1985

forcément l'évolution de la fréquentation touristique. Ainsi, si l'ICT d'un département augmente (diminue), nous ne pouvons en tirer de conclusions directes sur l'évolution de la fréquentation. Une région connaissant un ICT élevé peut en effet connaître une faible fréquentation touristique, et vice-versa. Les indices en tant que tels sont en conséquence d'une utilité limitée pour guider des politiques touristiques.

En l'état actuel, ces travaux fournissent donc des résultats pour un nombre limité de destinations et sont fondés sur des échantillons de taille réduite. Ils ne permettent pas de façon satisfaisante d'analyser les différences des attentes des touristes selon leur origine (pays « émetteur »).

V.5.2 Périmètre de l'évaluation

L'évaluation est réalisée pour la France métropolitaine, à l'échelle des départements. Elle vise à évaluer l'impact du changement climatique sur le tourisme estival à l'horizon 2100. Elle exploite les résultats d'une étude réalisée à la demande du Groupe interministériel par le CIRED et SOGREAH.

V.5.3 Scénarios et hypothèses climatiques

Deux scénarios sont étudiés : le scénario A1B, que l'on peut considérer comme un scénario « optimiste » et un scénario plus pessimiste, le scénario A2.

Le changement climatique est représenté ici par l'évolution des seuls paramètres températures (températures moyennes et maximales) et précipitations (précipitations moyennes), estimée par le modèle Arpège-Climat de Météo-France.

Notons que si l'évolution des températures est relativement bien cernée par les modèles climatiques, l'évolution du régime de précipitations est soumise à une incertitude plus importante.

V.5.4 Etape 1 – Calcul de l'ICT et de son évolution à 2100

V.5.4.1 Méthode

On se base ici sur l'indice (ICT) de Mieczkowski, présenté précédemment.

Il vise à évaluer les paramètres climatiques pertinents pour le tourisme en général. Il comporte sept variables climatiques mensuelles à partir desquelles sont élaborés cinq sous indices

- CID : Indice de confort thermique pendant la journée (°C), calculé à partir de la température maximale et de l'humidité relative ;
- CIA : Indice de confort thermique journalier (°C), calculé à partir de la température moyenne et de l'humidité relatives ;
- P : Précipitations totales mensuelles (mm) ;
- S : Heures d'ensoleillement (h/jour) ;
- W : Vitesse du vent (km/h).

Chaque sous indice fait l'objet d'une cotation (maximum : 5). Une pondération rend compte de son importance.

$$ICT = 2 * [(4*CID) + CIA + (2*P) + (2*S) + W]$$

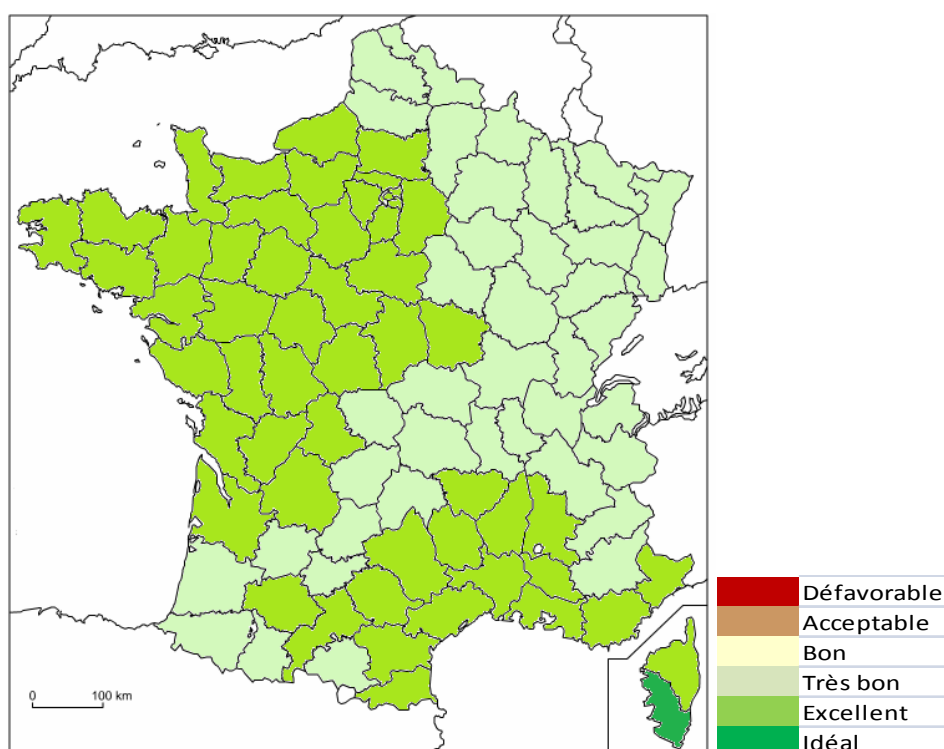
L'index ICT, variant de -30 à 100, permet de définir si un climat est favorable ou non au tourisme. Le Tableau 64 présente le système de notation de l'ICT, tel qu'utilisé dans le programme PESETA.

Tableau 64 – Système de notation de l'ICT (adapté du programme JRC- Peseta)

Valeur numérique de l'indice	Description du niveau de confort de l'activité touristique
>90	Idéal
> 80	Excellent
70-79	Très bon
60-69	Bon
40-59	Acceptable
< 40	Défavorable

V.5.4.2 Résultats

La situation actuelle



Carte 7 – ICT des mois d'été (juillet, août) sur la période de référence 1980 - 2000

Cette première carte indique des conditions climatiques actuelles favorables au tourisme estival sur l'ensemble du territoire. Les résultats pour la période de référence sont « excellents » sur une partie Sud, des Alpes-Maritimes au Gers en passant par la Drôme et l'Ardèche ; et une grande partie Ouest de la France, intégrant le nord de l'Aquitaine, le Centre, la Bretagne et la Normandie. La Corse du Sud se démarque, avec un climat jugé

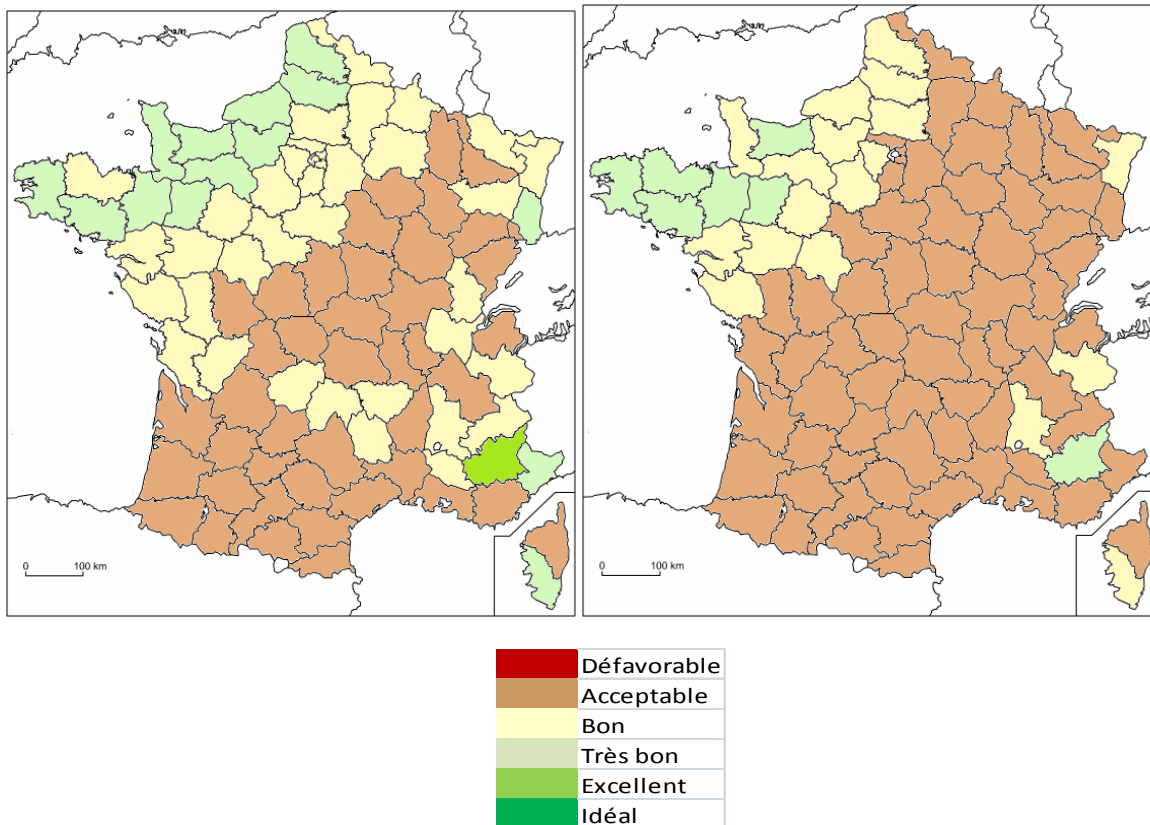
« idéal » sur la période de référence. Sur le reste du territoire, le TCI est jugé « très bon ».

Impact du changement climatique sur l'ICT

La Carte 2 présente l'ICT pour chaque département en 2100, pour les scénarios A1B et A2. On remarque une nette évolution de l'indice : tous les départements – sauf les Alpes de Haute Provence dans le scénario A1B – voient leur ICT diminuer. Ici, on remarque un effet « altitude » positif pour le confort climatique, tandis que sur la période de référence, l'effet semble inverse.

Scénario A1B

Scénario A2



Carte 8 – ICT des mois d'été (juillet-août) en 2100, selon les scénarios A1B et A2

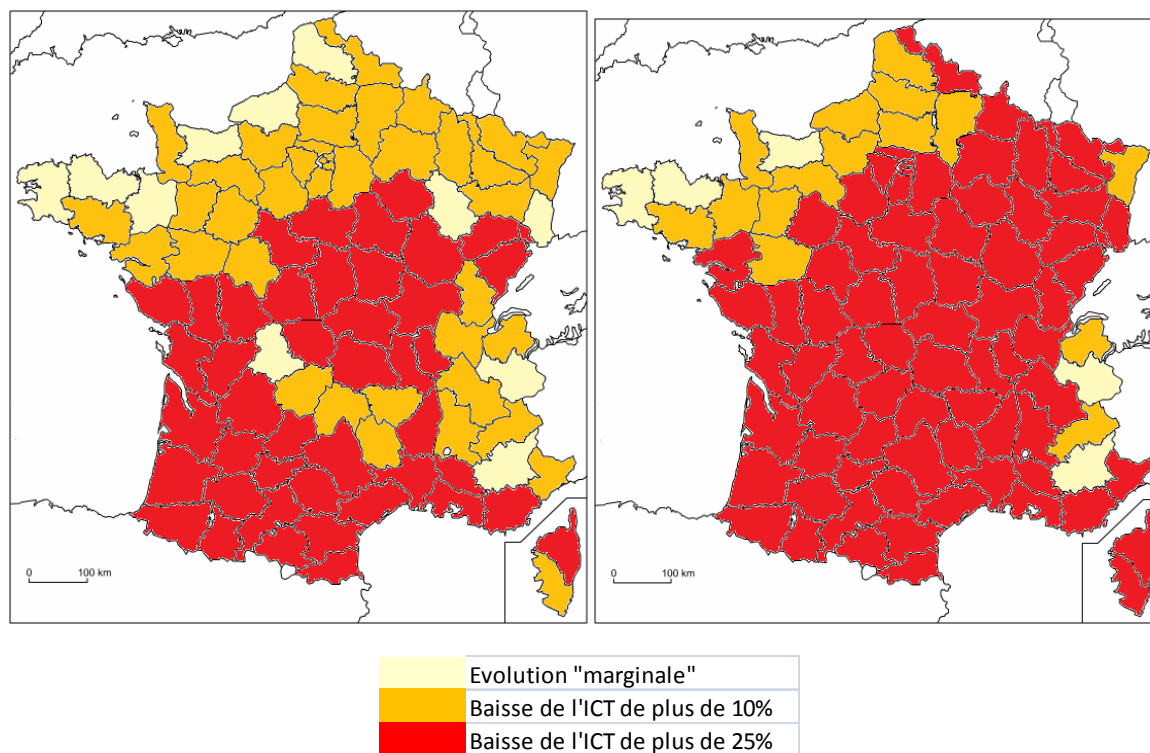
Etant donné les limites de la méthode de l'ICT énoncées plus haut, c'est en termes d'évolution de l'ICT qu'il faut analyser les résultats, et non en termes de valeur absolue de l'ICT.

La Carte 3 représente les évolutions de l'ICT selon les deux scénarios considérés, à horizon 2100. Trois catégories sont distinguées, selon l'importance de l'évolution de l'ICT (en %) :

- Evolution « marginale » de l'ICT (comprise entre +5 et -10%)
- Baisse de l'ICT comprise entre -10 et -25%
- Baisse de l'ICT supérieure à -25%

Scénario A1B

Scénario A2



Carte 9 – Evolution de l'ICT des mois de juillet et août (en %) en 2100 selon les scénarios A1B et A2, par rapport à la période de référence 1980 – 2000

Les projections pour la période 2080-2100 laissent entrevoir, quel que soit le scénario considéré, une dégradation du climat favorable au tourisme sur la grande majorité des départements français.

Cette évolution s'explique principalement par la dégradation de l'indice CID, indice de confort thermique calculé à partir de la température maximale. Celle-ci devient en effet trop élevée à 2100 pour permettre des conditions de confort optimales.

Dans le scénario A1B, quelques départements localisés dans le Nord-ouest et dans les Alpes connaîtront une évolution de leur ICT estival plus marginale (comprise entre -10 et +5%). Notons que seul un département, les Alpes de Haute-Provence, verra une amélioration de son ICT estival. Le quart Nord de la France, les Alpes et le Sud du Massif Central verront également une dégradation moins marquée que le reste de la France, avec une baisse de leur ICT comprise entre -10 et -25%. La dégradation est plus importante dans le Sud-ouest, le Centre de la France et en Provence (chute de l'ICT supérieure à 25%).

Selon le scénario A2, les projections pour la période 2080-2100 sont plus négatives que pour le scénario A1B. La majorité des départements français voit son ICT estival diminuer de plus de 25%. L'extrême Nord-ouest (incluant une partie de la Bretagne et de la Normandie) et quelques départements des Alpes seront moins touchés par cette évolution.

Si seul l'horizon 2100 est étudié en détail ici, il est important de noter que ces dégradations s'amorceront dès le moyen terme. Bien que l'évolution soit moins sévère en 2050, la dégradation s'amorce. Seuls 6 départements (certains départements de PACA et de Bretagne notamment), connaîtront, en 2050, un impact positif du changement climatique sur leur ICT.

Notons enfin que d'ici 2100, aucun département ne verra son ICT estival évoluer vers une situation « défavorable ». Celui-ci restera « très bon », « bon » ou du moins « acceptable » (dans la majorité des départements sous A2) sur l'ensemble de la France métropolitaine.

V.5.5 Etape 2 – Traduction en termes monétaires

La seconde étape de l'analyse consiste à traduire ces évolutions possibles en termes de coûts monétaires pour le tourisme. L'évolution de l'ICT ne permettant pas de tirer de conclusions directe sur l'évolution de la fréquentation touristique, on propose de raisonner en termes de « chiffre d'affaire à risque ».

V.5.5.1 Méthode

Raisonnant à économie constante, on considère le chiffre d'affaire estival actuel des départements.

Les données que nous utilisons proviennent d'une enquête réalisée par la Direction du Tourisme en 2005 : « Mobilité touristique et population présente », qui fournit, pour l'année 2005 :

- La population résidente par département ;
- La population présente par mois et par département ;
- Le nombre de nuitées annuelles par départements ;
- Les comptes annuels du tourisme fournissent par ailleurs, pour 2005, le la consommation du secteur touristique à l'échelle nationale.

Les étapes de calcul sont les suivantes :

- Répartition du chiffre d'affaire annuel par département, à partir du nombre de nuitées annuelles ;
- Estimation du chiffre d'affaire mensuel par département, à partir du rapport « population présente par mois » / « population résidente » ;
- Estimation d'un chiffre d'affaire potentiellement « à risque », à partir des résultats d'évolution de l'ICT.

V.5.5.2 Résultats

Cet exercice **ne permet pas de déterminer précisément le coût du changement climatique pour le tourisme estival**, surtout à l'échelle nationale. Le changement climatique pourrait en effet se traduire par une redistribution des flux touristiques entre les départements (donc sans perte nette), à l'échelle internationale (redistribution qui dépendra des conditions climatiques des pays émetteurs et des autres destinations), mais également entre les saisons.

On peut néanmoins relever que sous **A1B**, les départements dont l'ICT estival diminue de plus de 25% représentent actuellement plus de 10 milliards d'euros de chiffre d'affaire pour les mois de juillet-août ; ceux dont la baisse d'ICT est comprise entre **10 et 25%**, plus de 18 milliards d'euros. On pourrait dès lors considérer que **45 à 82% du chiffre d'affaire actuel pour le tourisme estival serait potentiellement menacé** par le changement climatique si aucune mesure d'adaptation n'est mise en œuvre. Sous **A2**, **cette fourchette se situerait entre 76 et 90% du chiffre d'affaire actuel.**

V.5.6 Conclusion et mise en perspective

Un impact négatif pour l'ICT estival

Le changement climatique se traduira en été par une dégradation des conditions climatiques favorables au tourisme. Cette dégradation est moins marquée dans la moitié Nord de la France (Côte Nord-Ouest particulièrement), ainsi que certains départements des Alpes. A première vue, ces conclusions pourraient contredire l'hypothèse largement répandue selon laquelle il y aurait des « grands gagnants » du changement climatique. L'analyse nous indique ici que même au Nord, même si dans une moindre mesure, dans les scénarios retenus, les températures maximales atteintes en été pourraient devenir trop élevées pour permettre un confort maximal des touristes.

Vers un développement du tourisme aux intersaisons ?

En revanche, ce ne sera pas le cas à d'autres périodes de l'année. Le calcul de l'ICT pour les mois de mai et juin nous indique en effet, une hausse de la valeur de l'ICT dans la grande majorité des départements ; avec un climat proche des conditions estivales actuelles (ICT « très bon » ou « excellent » sous A2 en 2100 ; alors qu'il est aujourd'hui qualifié que de « bon » dans une vingtaine de départements).

De manière générale, ce travail indique que dans tous les départements sans exception, le secteur du tourisme devra s'adapter aux manifestations futures du changement climatique.

V.6 Les préférences climatiques exprimées par les touristes

V.6.1 Analyse des représentations des touristes Français (étude CREDOC-TEC)

Que ce soit avec l'approche des indices climato-touristiques ou avec celle des types de temps, on se situe dans un univers de « dire d'experts » sur ce qui est acceptable ou préférable pour les touristes, sans que ces études soient basées sur des perceptions effectives.

Diverses études internationales ont montré, en ce qui concerne les décisions de voyage que prennent les touristes, l'importance de la perception (ou la représentation) que ceux-ci ont du climat de la destination. On a déjà souligné que les décisions de séjours se prennent dans un cadre socioculturel où les préférences climatiques ne sont qu'un des facteurs de décision. Les perceptions du climat sont le plus souvent fortement conditionnées par des effets de mode, par la présentation et la publicité que font les acteurs du tourisme : déjà à une époque où la prégnance de médias était bien plus faible qu'aujourd'hui on a pu voir leur rôle décisif dans la mise en valeur de la Côte d'Azur au détriment des destinations de la Manche.

Le rôle du climat dans la construction des destinations touristiques mérite ainsi d'être fortement relativisé : à potentialités égales, les modèles sociaux dominants de la demande, les volontés locales d'accueil et d'aménagement jouent un rôle largement déterminant. De même la fréquentation touristique étrangère de la France relève

également largement de logiques desquelles les conditions climatiques peuvent être largement absentes.

Ces limites étant rappelées, il n'en reste pas moins essentiel d'améliorer la connaissance des comportements touristiques en relation au climat, qu'il reste très imparfaite, en particulier sur les questions suivantes :

- quelle est la plage des préférences climatiques chez les touristes en termes de conditions optimales pour chaque variable (température, vent...) ? Les préférences des touristes sont-elles homogènes et un climat optimal commun à tous peut-il être identifié ?
- quelle est l'importance relative des différentes composantes du climat pour les touristes : la température est-elle le paramètre principal ?
- dans quelle mesure les préférences climatiques des touristes varient-elles selon les destinations et les origines des touristes ?

V.6.2 Les préférences climatiques exprimées par un échantillon de touristes Français

C'est en grande partie pour apporter ces éléments de connaissance que la Direction du Tourisme (Ministère de l'Economie), la DIACT (Délégation interministérielle à l'aménagement et à la compétitivité du territoire) et le MEEDDM (CGDD/SEEI/ERNR3) ont commandé, dans le cadre de leur contribution au Groupe interministériel, une étude sur « La météorologie, le climat et les déplacements touristiques : comportements et stratégies des touristes ».

L'étude réalisée par le CREDOC et le cabinet TEC associés, en cours d'achèvement, s'intègre dans l'étude « Météo/climat et déplacements touristiques ». Elle s'inscrit dans le cadre des études sur les « préférences exprimées » des touristes, études qui doivent permettre ensuite de mieux renseigner les modèles de simulation sur les pratiques effectives des touristes.

V.6.3 Précisions quant à l'approche méthodologique de l'étude

Trois modes d'approche ont été adoptés, qui donneront lieu à une analyse par croisement au final³³⁹:

- une première étape d'étude quantitative auprès d'un échantillon représentatif des internautes porte sur la place du climat et de la météo dans les processus de choix touristiques, les opinions quant à la température et enfin les attitudes par rapport à des phénomènes météorologiques extrêmes (1643 projets et séjours décrits, plutôt marchands, plutôt longs séjours estivaux, en majorité des séjours à la mer) ;
- une seconde étape d'étude qualitative : avec trois réunions de groupe à Paris, Nantes et Marseille, qui ont permis d'approfondir les réponses ci-dessus et de recueillir les perceptions quant à l'impact touristique du « changement climatique »
- une mise en perspective de ces résultats à été faite par le groupe de chercheurs européens e-CLAT, spécialisé sur ce thème « climat et tourisme ».

³³⁹ Le rapport final de l'étude n'étant pas produit au moment de cette rédaction, les éléments ici repris gardent un caractère non définitif.

V.6.3.1 L'importance du facteur climat dans la décision de départ : (exploitation du questionnaire)

Si le climat n'est pas le premier facteur de choix (le coût financier constitue la première variable), 43% des répondants citent le climat comme l'un des éléments les plus importants dans la prise de décision, lorsqu'ils ont la possibilité de choisir entre plusieurs destinations en France (en lui accordant une importance sensiblement égale à la qualité des paysages et sites par exemple).

A l'inverse, cette sensibilité est plus faible pour les personnes âgées de 60 ans et plus, pour les personnes ne déclarant pas d'enfants de moins de 15 ans au foyer, les touristes résidents des régions Ouest, Sud-Ouest et Méditerranée et les touristes déclarant moins de 1000.

Le climat est évidemment important pour les projets de séjour ayant pour mode d'hébergement principal le camping, comme pour les activités de plein-air (la baignade par exemple) et les séjours de plus de 8 nuits.

V.6.3.2 Les craintes des touristes relativement aux données climatiques

Premières craintes des touristes, le temps pluvieux (et dans une moindre mesure, le froid).

Tableau 65 - Pour vous, quels sont les éléments du climat qui pourraient nuire le plus à la réussite de ce futur séjour (3 réponses possibles) ? (Enquête CREDOC-TEC, 2009³⁴⁰)

Un temps pluvieux	76%
Une température trop basse	35%
Un vent violent	24%
Un faible ensoleillement	18%
Une température trop élevée	13%
Une vague de sécheresse	7%
Un temps orageux	6%
Aucun	4%
Un temps instable	2%
Autres	0%
Total	185%

La chaleur et la sécheresse suscitent peu d'appréhension : seuls 13% des répondants citent une température trop élevée et la sécheresse est crainte par moins d'un touriste sur dix.

Cette crainte du temps froid est plus accentuée pour les projets de séjours à la mer et les activités balnéaires. De même, la crainte du temps pluvieux s'accroît pour les projets de séjours avec des activités sportives de plein air. L'appréhension de la sécheresse est plus accentuée elle pour les séjours à la campagne. Celle du vent violent pour les séjours à la montagne et en ville. Et enfin la crainte du temps orageux concerne surtout les séjours prévus à la montagne.

Enfin, pour ce qui est de l'hébergement, les touristes envisageant de camper montrent évidemment une appréhension marquée vis-à-vis du temps pluvieux, du temps froid et du vent violent. Les touristes prévoyant d'être hébergés par leur famille ou leurs amis

³⁴⁰ Echantillon de 1643 internautes interrogés sur un projet de séjour en France entre mars et septembre 2009.

témoignent par contre d'une faible sensibilité au « mauvais temps » (temps pluvieux, temps froid et faible ensoleillement).

A partir de quelle température fera-t-il trop chaud ?

Pour leurs séjours de 2009, la température à partir de laquelle les touristes considèrent qu'il fera trop chaud est en moyenne de 32°C

L'âge et, de façon moindre, la région de résidence jouent ; mais on ne note d'écart significatif, ni selon le sexe, ni selon la présence ou non d'enfants de moins de quinze ans.

Mais par contre apparaissent des variations selon les séjours prévus : outre la période du départ, le mode d'hébergement, l'environnement du séjour et les activités prévues influent sur la sensibilité à la chaleur. Ainsi la température ressentie comme « trop chaud » varie entre :

- 34°C pour les séjours en camping et pour l'activité de baignade qui correspond à des séjours d'été.
- 30°C pour les séjours en montagne.

A partir de quelle température fera-t-il trop froid ?

Pour leurs séjours 2009, la température moyenne à partir de laquelle les touristes considèrent qu'il fera trop froid est en moyenne de 14°C.

L'âge et la région de résidence jouent : ce seuil est de 12°C pour les plus de 60 ans ; 15°C pour les résidents des régions Nord, Sud-ouest et Centre-est, contre seulement 13°C pour ceux de la région Méditerranée.

Par contre, on ne note d'écart significatif, ni selon le sexe, ni selon la présence ou non d'enfants de moins de quinze ans au foyer.

Outre la période du départ, le mode d'hébergement, l'environnement du séjour et les activités prévues influent sur la sensibilité au froid :

- 12°C pour un hébergement chez la famille ou les amis, en résidence secondaire, à l'hôtel ou en pension ;
- 17°C pour les séjours en camping ;
- 9°C pour les séjours en montagne et en ville ;
- 17°C pour l'activité de baignade ;
- 13°C pour les visites de musées, d'expositions et de sites.

V.6.3.3 La perspective d'un phénomène extrême : effets sur les projets de séjour ?

Une faible sensibilité à la canicule

L'hypothèse d'une canicule, définie comme « l'annonce par la météorologie nationale d'une canicule, soit une succession de journées à plus de 35°C, associée à une succession de nuits très chaudes et à une vague de sécheresse » a été testée. Les résultats sont présentés dans le Tableau 66.

Tableau 66 - Pensez-vous que cette information va modifier votre projet de séjour (2 réponses possibles) ? (Enquête CREDOC-TEC, 2009)

Vous décidez	En %
D'annuler	8
De raccourcir la durée du séjour	9
D'opter pour une autre destination	8
De changer d'hébergement	9
D'organiser des activités alternatives	20
De ne rien modifier	70

Une large majorité des répondants déclarent qu'ils décideront de ne rien modifier à leur projet de séjour. Principal changement : l'organisation d'activités alternatives (23% des projets seraient modifiés à la marge, au profit avant tout, de l'organisation d'activités alternatives (culturelles, convivialité...) ; et pour partie d'un hébergement de plus grand confort (fraîcheur, climatisation...).

En cas de période caniculaire, les séjours les plus touchés par une annulation, ou encore un raccourcissement de la durée ou enfin le choix d'une nouvelle destination sont les séjours à la campagne ; ceux avec un hébergement à l'hôtel ou en pension de famille ; et les séjours de 4 à 8 nuits.

Hors référence explicite à la « canicule », la chaleur est spontanément bien accueillie par les répondants. La chaleur est perçue comme un bénéfice par une majorité de répondants. Le terme évoque des activités de plein air, synonymes de vacances, d'été et de rupture avec le quotidien. A l'extrême, il est porteur de représentations liées à une proximité retrouvée avec la nature.

La canicule en France est perçue comme étant d'une moindre amplitude que dans les pays du Sud. Alors que le souvenir de la canicule de 2003 est encore bien présent dans les mémoires, on pense être désormais plus à même d'adopter les bons comportements si le même phénomène climatique venait à se reproduire. Spontanément, en cas de canicule, les répondants cherchant à s'informer, le feraient prioritairement par internet.

La canicule est diversement ressentie :

- Selon le lieu : une température très élevée suscite des ressentis différents ;
- Selon que l'on est en ville ou à la mer, que l'on travaille ou que l'on est en vacances... ;
- Selon le mode d'hébergement : le mode d'hébergement et les conditions de confort associées, modifient sensiblement la perception d'une canicule ;
- Selon les perceptions de chacun : pour certains, et après plusieurs étés pluvieux, la « canicule » est presque synonyme de vacances réussies, associées à une garantie de beau temps et à un certain exotisme ; pour d'autres, une chaleur perçue comme excessive est rédhibitoire.

Les comportements d'adaptation à la canicule : une majorité de personnes déclare ne pas modifier la destination prévue pour le séjour. Les dates de congés, imposées pour une majorité de personnes, ne peuvent être remises en cause par une canicule.

Même si l'association canicule/enfants est considérée comme un risque majeur, sauf événement spécifique, la canicule ne constitue pas un motif d'interruption du séjour.

Une forte sensibilité au temps anormalement pluvieux et froid

Quelle attitude « En cas d'annonce par la météorologie nationale, d'une période anormalement pluvieuse et froide, soit plusieurs heures quotidiennes et une température sensiblement inférieure aux normales saisonnières » ?

Tableau 67 - Pensez-vous que cette information va modifier votre projet de séjour (2 réponses possibles) ? (Enquête CREDOC-TEC, 2009)

Vous décidez :	En %
D'annuler	21
De raccourcir la durée du séjour	19
D'opter pour une autre destination	19
De changer d'hébergement	7
D'organiser des activités alternatives	22
De ne rien modifier	40

Confirmant leur crainte à l'égard du « temps pluvieux » et/ou « trop froid », moins de la moitié des répondants déclarent qu'ils décideront malgré tout de ne rien modifier à leur projet de séjour.

La moitié (50%) des projets seraient profondément modifiés, avec l'annulation du séjour (21% des répondants) ; le raccourcissement de la durée du séjour (19%) ; et/ou la recherche d'une autre destination (19%).

Des réactions différenciées :

- Selon le climat du lieu de résidence : des réactions atypiques pour plusieurs Marseillais, pour qui la pluie ou le froid ont quasi valeur d'événement « exotique » au regard de leur environnement de vie, et qui paraissent peu gênés par la perspective d'un séjour anormalement froid et pluvieux ;
- Selon le mode d'hébergement : certains hébergements, comme le camping, sont mal adaptés au temps pluvieux ;
- Selon les activités prévues : les activités culturelles sont « mécaniquement » favorisées par le mauvais temps, au détriment des activités de plein air ;
- Selon l'engagement auprès du prestataire : un engagement financier préalable impose le maintien du séjour, indépendamment des conditions météorologiques (explique en partie le succès des réservations de dernière minute).

Mais, globalement, ce scénario suscite davantage de réactions négatives que celui de la canicule. Excepté pour le groupe de Marseille, un temps pluvieux et froid constitue une gêne majeure pour de nombreuses personnes. Globalement, on préfère le soleil – et même la canicule – à un temps froid et pluvieux. Alors que le séjour touristique répond à des attentes de rupture avec le quotidien, la canicule est un état climatique exceptionnel pour une majorité de Français, alors qu'un temps froid et pluvieux relève de conditions météo familières (toutefois, les deux derniers étés, particulièrement maussades, influencent peut être ces perceptions).

V.6.3.4 « Dérèglement » plutôt que changement climatique ?

Les enquêtés témoignent d'un ressenti en décalage avec l'information transmise par les médias. Aux idées de « réchauffement » ou de « changement » climatique, les répondants préfèrent celle de « dérèglement climatique ».

Le terme « dérèglement climatique » renvoie à la perception d'une caractéristique essentielle du changement climatique : l'imprévisibilité. L'aspect aléatoire du phénomène en renforce le caractère anxiogène. La perception des saisons évolue : pour la quasi-totalité des répondants, les intersaisons tendent à s'estomper. Surtout, la saison tend à être remise en cause en tant qu'indicateur des conditions météo. La fonte accélérée des glaces, bien que connue de tous, n'est perçue comme un phénomène présentant un risque direct que par une minorité de répondants.

Pour les autres, le phénomène, bien que préoccupant, apparaît déconnecté des réalités quotidiennes. Ainsi, les risques d'inondations liés à des phénomènes extrêmes éventuellement croissants sont évoqués, mais pour des pays lointains et mal connus.

Cependant, la perception d'une accélération des manifestations du changement climatique en accentue l'effet anxiogène. Cet effet anxiogène est puissant, mais confus : on ne sait, ni quand, ni de quelle façon, va se concrétiser la menace, ni quel sera son impact sur la vie quotidienne. Une majorité de personnes pense que la France métropolitaine, du fait d'un climat tempéré, sera un des derniers espaces à souffrir des effets du changement climatique. D'autres, moins nombreux, pensent que la France sera impactée au même titre que les autres pays.

Ceci montre bien la nécessité d'une action pédagogique spécifique auprès des opérateurs touristiques et collectivités locales, pour atténuer cet effet anxiogène et le relativiser avec une solide mise en perspective historique du climat sur des cycles longs.

V.6.3.5 « Quelles répercussions pourrait avoir le changement climatique sur vos séjours touristiques en France? »

Dans un contexte de crise et d'instabilité de l'emploi, les incertitudes les plus fortes à propos du futur, se concentrent sur les revenus, et non sur le changement climatique. Pour les jeunes, la nécessité d'assurer la charge financière liée à la présence d'enfants et à l'accès à la priorité s'y ajoute les incertitudes relatives au changement climatique sont perçues comme un frein à la production de réponses fiables. Les destinations les plus ensoleillées - en premier lieu la côte méditerranéenne - pourraient être délaissées au profit de destinations moins touchées par des chaleurs excessives.

Les dates de départ - notamment pour les vacances d'été - pourraient être revues de façon à privilégier les périodes moins propices à la canicule. On imagine le développement de « vacances humanitaires », dans le but d'aider les pays dont les ressortissants sont victimes de catastrophes liées au changement climatique. Le terme « vacances écologiques » ne semble pas faire référence à un concept ou à des pratiques clairement spécifiées.

V.7 Conclusions et pistes de travail

Les deux analyses proposées ici – indice de confort climatique et perception des touristes face au climat et au changement climatique, fournissent des informations intéressantes et complémentaires sur les évolutions possibles du tourisme liées aux évolutions du climat. On pourra retenir que :

- Le changement climatique se traduirait, en été, par une dégradation de l'attractivité climatique des destinations de France métropolitaine, la côte Nord étant potentiellement moins impacté par ces évolutions. Les fortes chaleurs estivales sont les principales responsables de cette dégradation.
- La traduction de ces évolutions en termes de fréquentation touristique n'est néanmoins pas directe. En effet, l'enquête « TEC-Credoc » nous indique que si le climat tient une place importante dans les choix de destinations, la sensibilité aux fortes chaleurs et la perception même de ce qu'est une chaleur excessive diffèrent selon des paramètres tels que la période du départ, le mode d'hébergement, l'environnement du séjour. De même, on ne relève aujourd'hui qu'une faible sensibilité des choix de destination des touristes aux canicules.
- Ce sont principalement la variabilité climatique, ainsi que les temps froids et pluvieux qui ont une influence notable sur les séjours touristiques. Ces derniers éléments laisserait présager une évolution favorable du confort climatique en hiver et aux intersaisons.

Ces conclusions ouvrent des pistes de recherches et de travaux complémentaires pour améliorer la compréhension des impacts du changement climatique sur le tourisme et favoriser l'adaptation du secteur.

V.7.1 Améliorer l'analyse de l'évolution de la demande touristique...

La notion de confort climatique est évolutive et dépend de nombreux facteurs – culturels notamment. Un **travail d'enquête**, tel que celui amorcé par l'étude TEC-Credoc, pourrait être utilisé dans le cadre d'une mise à jour de l'indice de confort climatique, voire la création d'un indice qui corresponde davantage aux spécificités des touristes français et à leur perception du climat.

Il serait par ailleurs intéressant d'approfondir l'analyse, en définissant un indice plus global, intégrant par exemple des paramètres de pondération en fonction des activités proposées, du milieu ou encore type de touristes présents. On pourrait ainsi imaginer intégrer à l'analyse une **réflexion sur les mesures d'adaptation** du secteur (activités proposées, publics visés) et estimer leur impact sur l'évolution de l'indice.

Pour réaliser une analyse plus globale de l'impact du changement climatique sur le tourisme, chaque flux significatif de touristes devrait être étudié de manière intégrée, en prenant en compte les effets des changements climatiques sur **l'ensemble des secteurs dont dépend l'attractivité touristique** (infrastructures, paysages, patrimoine...). Or une telle analyse requiert de fortes exigences en termes d'exhaustivité et **d'uniformité des bases de données**. Dans la pratique les données climatiques sont basées sur des points de grille et au pas de temps journalier voire mensuel, tandis que les bases de données touristiques sont plutôt annuelles et disponibles à l'échelle d'un pays³⁴¹.

³⁴¹ Amelung, 2005, p.107

L'observation des effets des changements climatiques sur la **saisonnalité touristique** est une autre piste de recherche pour le futur. L'analyse basée sur l'ICT pose l'hypothèse d'une indifférence temporelle des touristes. Or on observe par exemple que les vacances scolaires représentent une « fenêtre d'opportunité » pour la planification des vacances³⁴². Quid de ces motivations « de calendrier » si les conditions climatiques deviennent moins attractives ?

V.7.2... et la compléter par l'analyse de l'évolution de l'offre touristique

En complément de cette approche par la demande touristique, il apparaît tout aussi nécessaire de mieux connaître la position des opérateurs touristiques nationaux en matière d'adaptation au changement climatique. Si ces opérateurs touristiques développent progressivement des démarches « éco-responsables », pour l'essentiel ces actions ressortent plutôt du versant des efforts d'atténuation des contributions du Tourisme au réchauffement planétaire.

Les réflexions et actions en termes d'adaptations des grands opérateurs touristiques (hébergeurs, tels Pierre et Vacances, le groupe Accor...par exemple) semblent en fait apparaître moins nettement, à l'exception notable de l'économie des sports d'hiver, des activités fortement dépendantes de la ressource en eau, ou du tourisme d'outre-mer.

Cette faible prise en compte actuelle tient pour partie à l'horizon temporel des adaptations, jugé encore lointain, mais également à une connaissance insuffisante des impacts précis, localisés, sur des équipements touristiques existants, pour l'essentiel (en partie faute d'éléments scientifiques).

Il est donc nécessaire dans un premier temps d'apprécier le degré de sensibilité des opérateurs touristiques face au changement climatique, en mettant en évidence les freins qui entraveraient une bonne prise en compte par les opérateurs du secteur Tourisme des évolutions climatiques à venir. Dans un second temps, cette analyse serait reliée aux actions aux politiques de soutien et d'incitation des pouvoirs publics, existantes, pour éventuellement faire évoluer celles-ci.

³⁴² Amelung, 2007, p. 286

**VI Rapport du Groupe Infrastructures de
transport et cadre bâti**

VI.1 Introduction

VI.1.1 Composition et organisation du « groupe »

La présidence du Groupe de travail constitué au sein du MEEDDM a été confiée à Lionel MOULIN, chef de la Mission Risques – Environnement – Santé au Service de la Recherche de la DRI (CGDD). L'organisation du travail s'est effectué de la façon suivante : le groupe de travail n'a pu se réunir, mais une réunion en comité restreint s'est tenue le 6 avril associant la DRI, la DGEC et la DGITM assistée du SETRA. Sur le plan de la méthode de travail, ce Comité restreint composé de Lionel MOULIN, Bertrand REYSSET, Jean-Bernard KOVARIK, Béatrice ADOLEHOUME et André LEUXE, s'est appuyé sur un réseau d'experts qui ont été consultés en tant que de besoin.

- SETRA – CTOA (Thierry KRETZ)
- SETRA – CTOA – DM (Gilles LACOSTE)
- SETRA – CSTR (Pascal CHAMBON)
- SETRA - CSTR – ENV (Pierre SKRIABINE et Yves DANTEC)
- SETRA – CSTR – TCE (Thomas CAILLOT)
- CETE de l'Ouest – DIE – ENV (Guy DESIRE)
- CETMEF (Philippe SERGENT)
- CETMEF – DTELE (Guillaume PENSIER)
- CETMEF – DELCE (Joël L'HER)
- CETMEF – DELCE – DHSM (Céline PERHERIN et Amélie ROCHE)

Ces experts ont apporté des contributions significatives à la réflexion dans leur domaine de compétences respectives (dont on retrouvera les éléments dans le présent rapport et dans le tome des Annexes). Le réseau des CETE et des Laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées ont été sollicités par l'intermédiaire du SETRA et du CETMEF, têtes de réseau.

Ont également été associés aux travaux et consultés :

- DGITM – DIT (Guy POIRIER et Alain COSTILLE)
- DGITM – DIT (Pascal LECHANTEUR)
- DGITM – DIT (Jean LEVEQUE et Bernard LUCAS)
- DGITM – DIT (Didier BOUNY)*

Le CSTB (Jean-Luc SALAGNAC) était en charge de la réflexion sur le cadre bâti.

VI.1.2 Synthèse et résultats : infrastructures de transport

Les travaux ne concernent que le réseau routier national non concédé.

Il ressort du travail effectué que l'on ne dispose pas dans notre pays d'observations permettant de mesurer les effets de la canicule sur le moyen et long terme.

Plusieurs approches ont été examinées, mais il est impossible d'établir des corrélations entre les dommages subis par les infrastructures et les dépenses de réparation engagées qui autoriseraient à les imputer aux effets de la canicule.

Nous ne disposons que de quelques observations ponctuelles de terrain relevées lors de la canicule de 2003 dont les experts estiment, sur ces bases limitées, qu'elles ne semblent pas remettre en cause le référentiel technique relatif à la structure des chaussées. Mais il n'a pas été possible de mettre en évidence des effets de seuil de température combinés à des structures de trafics lourds ni de déterminer quels seraient les impacts de séquences répétitives de canicule combinées ou non à des structures de trafics intensifs et lourds.

La mise en place d'observations et le lancement de travaux de recherche sur ce point permettront d'éclairer plus précisément les effets.

L'étude de *benchmarking* montre qu'il n'existe que peu d'éléments chiffrés disponibles sur ce sujet dans les pays étrangers et ceux-ci sont difficilement utilisables et transposables de façon pertinente dans notre pays. La tentative de chiffrage par application d'un pourcentage forfaitaire au budget annuel moyen d'entretien du patrimoine considéré, pourcentage issu d'une revue de la littérature internationale, doit être considérée avec une extrême prudence.

S'agissant des risques côtiers pour les infrastructures de transport, il a été examiné, sur la base des hypothèses de travail de la DGEC et des éléments d'études disponibles, les vulnérabilités aux submersions temporaires et aux submersions définitives au travers de plusieurs approches.

Outre une approche à caractère méthodologique théorique, développée par la DGITM/SAGS/EP avec l'appui du CETMEF qui propose un surcoût relatif actualisé sur 40 ans exprimé en pourcentage de la valeur patrimoniale en cas de submersion définitive et en pourcentage du coût d'endommagement en cas de submersion par intermittence, deux approches « de terrain » sont développées :

- Une approche fondée sur une étude pilotée par le CETMEF en liaison avec les CETE de l'Ouest et CETE Méditerranée qui identifie les zones basses potentiellement concernées par les submersions en métropole, sur la base d'hypothèses de cotes de référence qui correspondent au niveau centennal actuel et ce niveau +/- 1m. Des linéaires d'infrastructures routières vulnérables sont quantifiés et permettent d'appréhender un coût de submersion en fourchettes.
- Enfin, une approche portée par le BRGM qui intéresse exclusivement le littoral du Languedoc-Roussillon. Les zones de submersion permanente sont situées à moins d'un mètre au dessus du niveau zéro NGF, qui est la cote assimilée au trait de côte actuel.

Ces études sont néanmoins très partielles, car des hypothèses simplificatrices sont rendues nécessaires pour parvenir à un chiffrage et ce travail renvoie à des études locales précises pour vérifier et confirmer les chiffrages.

VI.2 Liste des impacts étudiés

VI.2.1 Rappel : état des connaissances sur les impacts du changement climatique pour le secteur

VI.2.1.1 Impacts du changement climatique sur les infrastructures

Les risques de dommages et de perturbations sur les réseaux de transports pourraient augmenter du fait de la perturbation du cycle de l'eau et des conditions de température ou de vent. La modification de la teneur en eau ou de la température des sols sera à l'origine d'une recrudescence des aléas gravitaires - glissement de terrain, chute de bloc -, accroissant le risque d'endommagement des voies de transport : hausse de fréquence des dommages, et apparition de dommages dans des zones jusqu'ici épargnées. Des sécheresses plus fréquentes devraient par ailleurs augmenter les risques d'incendies dans certaines zones, avec des impacts sur les infrastructures. S'agissant du risque d'inondation, certaines infrastructures pourraient y être soumises alors qu'elles ne l'étaient pas auparavant, en particulier dans le cas d'inondations liées au ruissellement en milieu urbain ou périurbain, ou l'être de façon plus intense.

Une grande partie des aléas précédemment exposés peut se traduire par des évolutions lentes qui n'ont pas les mêmes impacts : ainsi, la modification des écoulements dans les sols liée aux modifications du régime des pluies ainsi que la modification des températures peuvent provoquer des instabilités des sols qui supportent les infrastructures ou les ouvrages, voire remettre en cause de la stabilité des structures elles-mêmes. Une augmentation de la durée d'insolation pourrait par ailleurs produire des désordres sur les enrobés et les enduits au niveau routier, une baisse de la durabilité de certains produits ou ouvrages de constructions et des dommages sur les infrastructures ferroviaires.

Il est certain que les conditions d'exploitation des infrastructures vont être impactées à la fois par la gestion de nouvelles crises (ou à des fréquences différentes) mais aussi de façon quotidienne parce que l'environnement des infrastructures ou son utilisation pourrait s'en trouver significativement modifié.

Le changement climatique pourrait aussi, à côté des questions liées à la conception et à la mise à niveau des infrastructures et à l'exploitation, modifier les modalités d'entretien, ainsi que la pression exercée par l'infrastructure sur son environnement (exemple de la modification de l'impact des rejets polluants de l'assainissement routier du fait de l'élévation de la température des cours d'eau et des lacs). Enfin, les modalités d'usage des infrastructures devraient évoluer, tant s'agissant du choix des consommateurs, que des conditions de circulation.

Pour anticiper sur les aspects d'adaptation, ce premier diagnostic indique que les premiers impacts viennent d'une augmentation des risques en particulier des inondations. En ce sens, on peut d'ores et déjà dire que toutes les solutions qui visent à la fois à identifier la vulnérabilité et à réfléchir à la gestion des crises sont des solutions sans regret car elles servent de toute façon la situation actuelle.

VI.2.1.2 Impacts du changement climatique sur le cadre bâti

Les bâtiments, dont une des fonctions principales est la protection des personnes et des biens contre les conséquences directes et indirectes des aléas climatiques, sont concernés à divers titres par la perspective d'une nouvelle donne climatique. Quatre

principaux aléas peuvent être relevés : inondation, retrait-gonflement des argiles, vent, et canicules.

Afin de gérer les incertitudes sur l'ampleur et les manifestations du changement climatique, certains préconisent le concept d'aménagements réversibles (ceci est valable pour les infrastructures comme pour le cadre bâti) déjà promus dans un autre contexte (celui de la restauration des milieux dans une approche où l'on considère une opération sur l'ensemble de son cycle de vie) pour faciliter l'adaptation. Il convient également de s'interroger sur le rôle que pourrait jouer la végétation en milieu urbain en lien avec ses impacts sur des « micro-climats », mais aussi de façon plus générale pour son rôle sur les crues ou sur la tenue des sols.

VI.2.2 Liste des impacts retenus pour la quantification

Concernant la thématique « infrastructures de transport », ce rapport s'intéresse uniquement à deux aléas spécifiques :

- Les dommages liés aux submersions (permanentes et temporaires) issue de la remontée du niveau de la mer ;
- Les dommages liés aux canicules.

L'étude de ces deux aléas a été restreinte au réseau routier national pour des raisons de disponibilité de données

Le cas de l'impact du changement climatique sur les ports, les voies navigables continentales, les routes ne relevant pas du réseau routier national non concédé, les réseaux ferrés et les réseaux de transport en commun urbain, n'a pas pu être considéré. Les contacts partiels auprès de quelques professionnels du secteur ont mis en évidence un manque de données quantitatives d'évaluation de l'impact. Il n'a donc pas été possible à ce stade d'intégrer les données de ces réseaux et infrastructures, ni de procéder à une analyse dans le présent rapport. Pour ces catégories d'infrastructures de transport, il conviendra dans un second temps de procéder à un travail associant les collectivités locales, les établissements publics et les sociétés concernés afin de conduire l'analyse des impacts.

Compte tenu de sa fonction support à de nombreuses activités, la thématique « cadre bâti » a été traitée dans plusieurs rapports (groupes énergie, tourisme, santé ainsi que risques naturels et assurances). Toutefois, une synthèse des connaissances et des besoins de recherche est proposée en fin de rapport.

VI.2.3 Analyse des limites

Du fait de la période limitée pour la réalisation de ce travail, il porte sur le coût de l'inaction et non sur la détermination et l'évaluation de mesures d'adaptation.

La réflexion est centrée sur les grands réseaux d'infrastructures nationales métropolitaines gérés directement par l'Etat (routes nationales) pour des raisons de disponibilité de données chiffrées, notamment en termes de valeur monétaire. Le travail d'identification de vulnérabilité potentielle du réseau routier à des aléas du changement climatique est un thème assez récent. Il a donc été choisi de focaliser dans un premier temps le travail sur le réseau routier national (RRN) non concédé métropolitain sur lequel les données à notre disposition étaient les plus robustes ou simplement les plus accessibles. La DGITM estime utile et opportun de prévoir d'anticiper également le coût de la dégradation des réseaux départementaux et communaux. Bien que ces réseaux ne soient pas gérés par l'Etat, ils ont une métrique quantitativement importante qui sera également susceptible d'être impactée par le changement climatique. S'agissant du

réseau des autoroutes concédées, l'attention doit absolument être portée sur la charge économique pour les sociétés concessionnaires que pourraient représenter les mesures d'adaptation spontanées ou planifiées qui s'avèreraient nécessaires.

Les coûts négatifs (gains) liés à des périodes de gel moins intense ou plus courtes, ou à de moindres chutes de neige, ne sont pas évalués (le rapport consigne à toutes fins utiles quelques éléments à cet effet). L'examen de la littérature sur ce sujet pointant de nombreuses incertitudes sur ces gains supposés. Il n'existe pas à notre connaissance de travaux d'échelle nationale sur le sujet en France. Les publications étrangères de donnent pas de tendance globale sur les coûts de viabilité hivernale et sont restreintes à des pays de climat et relief très différents du cas français.

Les phénomènes climatiques comme les augmentations des tempêtes et des inondations, qu'ils présentent ou non des modifications attribuables au changement climatique, ne sont pas étudiés ici, dans la mesure où, en l'état des connaissances actuelles l'évolution de ces phénomènes est très incertaine

En tout état de cause, la présente analyse contribue bien davantage à synthétiser une connaissance encore imparfaite sur les enjeux relatifs aux impacts du changement climatique sur les infrastructures routières qu'à déterminer précisément le coût de ces impacts, qui s'avère être un exercice délicat qui nécessite la mise en place d'observatoires adéquats et le lancement de travaux d'études et de recherches, afin de disposer de bases adaptées objectives pour effectuer un chiffrage étayé par une démarche scientifique.

Enfin, la thématique « urbanisme », initialement intégrée au groupe, n'a pas été traitée faute de pouvoir mobiliser des compétences dans ce domaine. Parmi les quatre principaux aléas identifiés (risques d'inondation, retrait gonflement des argiles, vent et chaleur urbaine), les deux premiers ont été traités par le groupe sur les risques naturels. La question de la chaleur urbaine étant encore un sujet de recherche émergent, quelques éléments qualitatifs sont consignés en fin de rapport avec l'expertise du CSTB, dans le cadre de collaborations avec Météo-France. La question de l'isolation contre la chaleur étant traditionnellement liée à la thématique d'atténuation des émissions de GES et d'économie d'énergie, elle n'a pas été reprise dans ce rapport.

VI.3 Les infrastructures routières en France

Pour tenter d'appréhender au mieux les impacts du changement climatique sur les infrastructures routières, il est apparu nécessaire au préalable de situer les enjeux globaux des réseaux d'infrastructures (description physique), de trafics (voyageurs et marchandises) qu'ils supportent, de valeur patrimoniale qu'ils représentent, enfin en termes d'activités économiques qu'ils génèrent.

VI.3.1 Les éléments physiques des réseaux français d'infrastructures

Le Tableau 68 ci-dessous fournit une description physique des différents réseaux de transport en France et de leurs évolutions. Il permet de situer les différents réseaux d'infrastructures en termes d'importance relative.

Tableau 68 - Linéaires (en kilomètres) des différents réseaux français de transport terrestre (CGDD – SOeS)³⁴³

	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2006	2007
Réseau routier	-	-	-	1 014 082	989 780	1 007 167	1 013 873	1 027 002
Réseau routier national	33 377	34 235	35 112	36 393	36 576	37 138	21 060	20 638
Autoroutes concédées	3 707	4 603	5 489	6 321	7 180	7 917	8 217	8 279
Autoroutes non concédées	1 155	1 297	1 349	1 975	2 446	2 573	2 625	2 612
Routes nationales	28 515	28 335	28 274	28 097	26 950	26 648	10 218	9 747
Réseau routier départemental	-	-	-	368 054	359 055	359 699	377 205	377 377
Routes locales	-	-	-	609 635	594 149	610 330	615 607	628 987
Réseau ferroviaire	34 362	34 676	34 070	31 940	31 397	30 871	30 883	31 154
Lignes grande vitesse (LGV)	0	389	709	1 253	1 281	1 548	1 548	1 876
Lignes classiques parcourues par des TGV		1 876	4 013	4 554	5 252	6 108	6 610	7 842
Autres lignes exploitées	34 362	32 411	29 348	26 133	24 864	23 215	22 725	21 436
Voies fluviales navigables	8 568	8 500	8 500	8 500	8 501	8 501	8 501	8 501
dont voies navigables fréquentées	6 568	6 324	6 197	5 962	5 789	5 791	5 497	5 444

Comme on le constate, les seuls linéaires d'infrastructures exprimés en kilomètres laissent apparaître de fortes différences selon les réseaux. Les grandes tendances générales montrent le poids prépondérant de la route. Néanmoins, rapportée à leur importance relative, la valeur d'usage des réseaux³⁴⁴ fait que chacun joue un rôle significatif dans l'économie du pays. En outre, les nouvelles orientations des pouvoirs publics après le Grenelle de l'Environnement se traduiront par une part croissante des modes non routiers (moins polluants, et peu émetteurs d'effet de serre) dans le transport des voyageurs comme des marchandises.

La route est le premier réseau d'infrastructure par son importance en longueur de réseau et par la quantité de trafics de voyageurs et de marchandises qu'elle supporte. Le tableau 70 recense selon les données publiées les plus récentes (année 2007) 8279 km d'autoroutes concédées, 2612 km d'autoroutes non concédées et 9747 km de routes nationales soit un total pour le réseau routier national de 20638 km. Le 46^{ème} rapport « Les comptes des transports en 2008 » de la Commission des comptes des transport de la nation (CCTN) indique en outre un patrimoine départemental et communal s'élevant respectivement à 377 377km et 628 987km en 2007.

Le Tableau 69 ci-dessous résume ces différentes données. Il montre que si le linéaire du réseau routier national non concédé, géré directement par l'Etat, ne représente qu'une très faible proportion (1,2%) du linéaire total du réseau routier français, la réalité est en revanche toute autre en terme d'usage puisqu'il supporte à lui seul plus du quart des circulations (25,5%) globales sur les routes françaises, exprimées en véhicules-kilomètres. La focalisation de l'étude sur le réseau national est donc insuffisante sur le plan quantitatif mais permet de prendre en compte néanmoins un réseau stratégique pour l'économie nationale.

Tableau 69 - Les grands chiffres des réseaux routiers français en 2007 (CGDD – SOeS)

Gestionnaire	Type de voie	Longueur ³⁴⁵ (km)	Trafic ³⁴⁶ (milliards de véh.km)
Etat (MEEDDAT)	Routes nationales	9 747km	97 (17,3%) ³⁴⁷

³⁴³ CGDD, SOES, 45^{ème} Rapport de la Commission des Comptes des Transports de la Nation MEEDDAT

³⁴⁴ La valeur d'usage des différentes infrastructures dépend du marché des biens transportés, de l'utilité du transport.

³⁴⁵ au 1^{er} janvier 2008

³⁴⁶ résultats de l'année 2007

Etat (MEEDDAT)	Autoroutes non concédées	2 612km	46 (8,2%)
Sociétés concessionnaires	Autoroutes concédées	8 279km	82 (14,6%)
Départements	Routes départementales	377 377km ³⁴⁸	335 (59,8%)
Communes	Routes communales (urbain inclus)	628 987km	
TOTAL	Ensemble des voies routières	1 027 002km	560 (100%)

S'agissant des trafics de marchandises de l'année 2007, la route a acheminé près de 87% des tonnes.kilomètres effectuées sur l'ensemble des réseaux français (déduction faite du trafic des oléoducs). Le transport ferroviaire a quant à lui acheminé un peu plus de 11% des tonnes.kilomètres, tandis que la voie d'eau représentait 2% des tonnes.kilomètres.

Pour le transport de voyageurs, on retrouve le poids prépondérant de la route puisqu'en 2007, elle a représenté 83,8% des voyageurs.kilomètres effectués sur la totalité des réseaux d'infrastructures terrestres (hors aérien), tandis que le transport ferroviaire interurbain transportait environ 8% des voyageurs.kilomètres et le transport collectif 8,2% dont 4% pour le transport routier interurbain et 4,2% pour les transports urbains.

VI.3.2 L'enjeu économique global des infrastructures de transport

Il faut souligner l'importance de la branche transport dans l'économie française. Selon les comptes publics (source INSEE), la valeur ajoutée de la branche transport a représenté en 2007 en prix courants 71,5 milliards d'euros soit 4,2% du PIB français. Les seules dépenses de production en infrastructures de transport, tous modes cumulés représentent environ 0,6% du PIB.

Le Tableau 70 ci-après décrit les quantités de productions globales par secteur de la branche des transports dans l'économie nationale.

³⁴⁷ Sur l'ancien RRN avant la décentralisation de 2006

³⁴⁸ Estimation

Tableau 70 - Production de la branche transport et évolutions des moyennes annuelles en % (Insee – Comptes des transports)

	2007 niveau	Evolutions			2008 niveau	2008 Structure
		Volume	Prix	Valeur		
Transport ferroviaire de voyageurs	8 114	6,5	2,0	8,6	8 812	5,6
Transport ferroviaire de marchandises	1 925	-4,7	0,1	-4,6	1 836	1,2
Transport urbain de voyageurs	9 555	6,4	0,9	7,4	10 259	6,5
Transport routier interurbain de voyageurs	4 804	8,9	-1,2	7,6	5 170	3,3
Autres transports terrestres de voyageurs	3 598	2,6	2,3	5,0	3 778	2,4
Transport urbains et routiers interurbains de voyageurs	17 957	6,3	0,6	7,0	19 207	12,3
Transport routier de marchandises	41 474	-5,3	5,2	-0,4	41 309	26,4
Autres transports terrestres de marchandises	3 283	1,8	5,4	7,3	3 524	2,2
Transport routier et autre transport de marchandises	44 757	-4,8	5,2	0,2	44 833	28,6
Transport fluvial	574	2,4	9,1	11,7	641	0,4
Transport maritime	10 646	3,7	5,6	9,5	11 659	7,4
Transport aérien de voyageurs	15 474	3,0	4,2	7,4	16 615	10,6
Transport aérien de marchandises	2 730	1,9	6,3	8,4	2 959	1,9
Transport aérien	18 204	2,9	4,5	7,5	19 573	12,5
Manutention	2 378	0,9	3,4	4,3	2 481	1,6
Entreposage	7 953	0,0	7,8	7,7	8 568	5,5
Manutention et Entreposage	10 331	0,2	6,8	6,9	11 049	7,1
Gestion d'infrastructure	22 068	2,7	2,9	5,7	23 331	14,9
Messagerie, fret express	5 115	1,1	0,6	1,7	5 204	3,3
Affrètement, organisation de transports internationaux et transport spatial	10 228	-1,6	4,6	2,9	10 521	6,7
Ensemble transports	149 919	0,6	3,9	4,5	156 666	100,0
dont transport de voyageurs	42 476	5,1	2,1	7,3	45 563	29,1
dont transport de marchandises	59 701	-3,0	5,3	2,1	60 977	38,9
dont autres	47 742	1,1	3,8	4,9	50 105	32,0

Cette branche de l'activité économique fournit une des conditions nécessaires à l'activité économique du pays. Les infrastructures de transports terrestres permettent d'acheminer (hors pétrole) le commerce extérieur du pays (exportations et importations de biens, hors services) ainsi qu'une part très importantes des consommations intermédiaires des produits industriels manufacturés et agricoles.

VI.3.3 Estimation de la valeur à neuf du patrimoine routier national non concédé

La valeur à neuf du RRN au 01/01/2006 s'élève à environ 106 milliards d'euros TTC, valeur 2006, pour un RRN de 13 724km (y.c. DOM).

La méthode utilisée peut toutefois être améliorée pour réduire les incertitudes d'estimation dans le futur et surtout pour réduire les écarts entre la « valeur d'acquisition » et la « valeur statistique ».

Une actualisation du coût du patrimoine routier a été réalisée aux conditions économiques d'août 2008 : l'estimation se chiffre à 121,309 Md€ (milliards d'euros) et correspond au coût de reconstruction à neuf du réseau routier national (non concédé) en service au 31 décembre 2007 (longueur du réseau : 12 359km).

Le coût total (chaussées et ouvrages d'art) de remise en état du réseau routier national en service au 31 décembre 2007, exprimé dans les conditions économiques de 2008, a été estimé à 3,014Md€ (milliards d'euros).

Il en résulte une valeur patrimoniale moyenne de 9,815 millions d'euros 2008 par km de réseau national soit (arrondi à 10M€/km). Le coût moyen de remise en état (chaussées

et ouvrages d'art) du réseau routier national non concédé, vu son état actuel, peut être estimé à environ 244k€ par km (arrondi à 0,25M€/km).

VI.4 Analyse détaillée sur le cas des canicules

VI.4.1 Approche technique de la vulnérabilité des chaussées aux épisodes de forte chaleur

Les éléments qui suivent sont tirés des références suivantes : *Conception et dimensionnement des chaussées* (Sétra/LCPC), *Catalogue des structures de chaussées neuves* (Guide technique/Sétra/LCPC, 1998).

VI.4.1.1 Classes de climat et classes de trafic

Le type de climat sert à l'établissement d'un projet routier et dépend donc évidemment de sa localisation géographique, de son orientation et de son exposition. De ce fait, il n'y a pas de cartographie établie pour le climat, qui donc être défini pour chaque projet. Le guide d'application des normes fournit cependant des données météorologiques et les classes de climat associées pour 46 stations françaises.

La doctrine technique routière définit trois classes de climat en fonction des températures minimale d'hiver et maximales d'été. Ces trois classes de climat sont données à titre indicatif dans le guide d'application des normes (SETRA - 1994) :

- Type 1 à dominante océanique (moyenne des températures minimales janvier-février $\geq 0^{\circ}\text{C}$ et moyenne des températures maximales juillet-août $\leq 27^{\circ}\text{C}$) ;
- Type 2 à dominante méridionale ($\geq 0^{\circ}\text{C}$ en l'hiver et $> 27^{\circ}\text{C}$ en été) ;
- Type 3 à dominante continentale ou montagnaise ($< 0^{\circ}\text{C}$ l'hiver).

Ces classes sont couplées avec le trafic pour donner deux niveaux de sollicitation : sollicitation forte (si le trafic est intense) et/ou sollicitation faible (si le trafic est modéré).

VI.4.1.2 Dimensionnement des structures de chaussées

Le calcul de dimensionnement des chaussées bitumineuses est fait pour une température constante dite *température équivalente*. Elle est telle que la somme des dommages subis par la chaussée pendant une année, pour une distribution de températures donnée, soit égale au dommage que subirait la chaussée soumise au même trafic à température constante.

Cette température équivalente est fixée à 15°C pour l'ensemble du territoire français.

L'augmentation de la température moyenne extérieure produit deux effets allant en sens inverse : une baisse de la rigidité des matériaux bitumineux et une augmentation de leur résistance à la fatigue.

La chaussée doit aussi faire l'objet d'une vérification au gel / dégel, qui consiste à comparer un indice de gel atmosphérique de référence (IR) et un indice de gel de la structure considérée (IA). Dans le cas des chaussées semi-rigides, c'est cette vérification au gel / dégel qui est prépondérante et non celle relative à la chaleur.

L'indice de gel atmosphérique, qui est la somme des températures négatives d'un hiver, a un impact direct sur le dimensionnement des structures de chaussées (et notamment l'épaisseur de matériaux non gélifs) puisque l'inégalité $IR < IA$ doit être vérifiée sinon des barrières de gel doivent être mises en place.

VI.4.1.3 Choix des matériaux, formulation des enrobés

Les dégradations qu'il est possible d'observer en cas d'augmentation de température moyenne et d'allongement des périodes de canicules sont l'orniérage par fluage et le ressuage³⁴⁹. Il est également possible d'observer de la fissuration par le bas, liée à l'assèchement des sols.

L'incidence des variations climatiques sur une formule d'enrobé est relativement faible. Dans une formule d'enrobé, la variation de température joue sur la viscosité du liant (plus la température est élevée, moins le liant est visqueux).

Si le prescripteur est responsable de sa formule, il peut imposer une classe de bitume adaptée au climat. Le Guide d'Application des Normes (SETRA / LCPC – 1994) donne des recommandations à ce sujet.

D'une façon générale, le prescripteur demande un niveau de performance à atteindre pour différentes caractéristiques du matériau (comme la maniabilité, la tenue à l'eau, l'orniérage...). Les essais permettant de mesurer ces caractéristiques s'effectuent à des températures normalisées représentant une moyenne nationale. Tenant compte de son expérience et de la connaissance de son environnement, le gestionnaire peut adapter ses prescriptions en étant plus sévère. Par exemple, un climat méditerranéen, plus chaud que la moyenne nationale, pourra nécessiter un niveau de performance à l'essai d'orniérage plus élevé qu'en Alsace, cela pour un même niveau de service souhaité.

On rappellera que les chaussées en France ont une homogénéité de conception pour leur couche d'ancrage (Nord et Sud sont similaires). C'est principalement la couche de roulement qui va donc différer et être adaptée selon les « types de climat ». Cette couche étant elle-même soumise à un renouvellement régulier, l'adéquation entre couche de bitume et évolution du climat ne poserait pas de défi technique complexe.

VI.4.1.4 Analyse

Seul le dimensionnement à l'orniérage est vraiment concerné par le changement climatique. Si certaines formules sont, par leur squelette granulaire, moins sensibles naturellement, pour les autres, l'augmentation des températures conduit à faire évoluer les prescriptions sur la nature du liant bitumineux. En tout état de cause le climat pourra induire un « sur-classement » mais pas de changement de type de produit. Ainsi, selon les experts « chaussées » du SETRA et du LCPC :

- L'impact économique est difficilement évaluable. La raison en est que les prix sont donnés en moyenne par type de produit générique. Même si, pour un même produit, il y a des variations sensibles de prix selon les régions, la qualité et la disponibilité de la ressource et l'importance de l'offre ;
- Le coût du changement de formulation lié aux différences de climat ne semble pas significatif.

³⁴⁹ Phénomène de remontée du bitume à la surface des chaussées.

Il vient que le climat aurait une incidence négligeable sur les chaussées, sauf pour une structure de trafic située entre 300 et 750 PL/jour (trafic T1). Dans l'appréhension du comportement du matériau, le paramètre climatique reste secondaire vis à vis du trafic.

En conséquence :

- Le nombre de cas concernés par un changement de « type de climat » semble limité ;
- Le principal critère de définition de la sollicitation de la structure de la chaussée reste le trafic ;
- L'altitude est également une donnée qui compte peut-être davantage que le climat ;
- Le « niveau des basses températures », le gel jouent un rôle au moins aussi important que le « niveau des hautes températures » dans le dimensionnement des chaussées.

VI.4.2 Evaluation économique du coût d'une canicule pour le réseau routier

VI.4.2.1 Eléments de méthode

Trois approches complémentaires ont été menées pour apprécier l'impact de l'augmentation d'occurrence des canicules, correspondant chacune à 3 sources d'information différentes.

La première approche s'est appuyée sur une enquête de terrain, auprès des services déconcentrés, menée conjointement par le LCPC et le SETRA après l'épisode de canicule de 2003.

La seconde approche s'est appuyée sur l'examen des données budgétaires, afin de déceler d'éventuels surcoûts d'entretien pendant l'année 2003, combiné à l'examen simultané de la base de données des Indices de Qualité des Routes Nationales et des Ouvrages d'Art (IQRN et IQOA) du système d'évaluation et de suivi des chaussées du réseau routier national non concédé, afin de déceler d'éventuelles dégradations de la qualité en cas de remise en état non effectuée. Cette démarche a été examinée, même si les indices ne sont pas *a priori* construits pour cela.

La troisième approche est une évaluation par *benchmark* sur une base bibliographique étrangère. Il s'agit d'une tentative de chiffrage en s'appuyant sur des évaluations plus avancées que ce qui est disponible en France, en s'appuyant sur les éléments de la bibliographie britannique et australienne. C'est un chiffrage « par défaut » du fait de l'absence d'études comparables en France et afin de donner des ordres de grandeurs par une transposition brute de cas étrangers au cas français (les limites méthodologiques et quantitatives seront clairement détaillées ensuite).

VI.4.2.2 Limites et incertitudes

On ne dispose pas en France d'observations des effets des canicules dans le moyen ou long terme. L'essentiel de la présente évaluation repose sur une extrapolation des effets de l'épisode de l'été 2003, c'est-à-dire d'un phénomène isolé, combiné avec des appréciations chiffrées issues de travaux britanniques et australiens exprimées en pourcentage du coût d'entretien des routes. Ces évaluations ont été élaborées dans un

contexte climatique plus ou moins éloigné du nôtre avec des référentiels techniques non comparables et des conditions d'exploitation (types de trafic supportés) différentes.

L'exercice de monétarisation demandé est par lui même complexe. Il est ici réalisé dans le cadre d'une démarche exploratoire. Les évaluations sont approximatives et très schématiques. Elles se limitent à chiffrer la valeur patrimoniale globale du réseau et les éventuels coûts des réparations. Elles ne tiennent pas compte des caractéristiques ou configurations locales, ni des effets de réseau (l'indisponibilité localisée d'une section d'infrastructures a des effets sur une étendue plus importante du fait de la coupure de la voie de communication), ni de la valeur d'usage de l'infrastructure.

Un travail complémentaire devrait être mené sur le réseau départemental, et les voiries secondaires, ainsi que sur le champ de l'exploitation et du matériel roulant, avec les opérateurs. En effet, les enjeux en termes de coûts liés au changement climatique ne peuvent être exclusivement centrés sur une bonne disponibilité du réseau national concédé et non concédé. Car il faut pouvoir accéder à ce réseau structurant par des infrastructures de desserte, et ceci dans de bonnes conditions de qualité de service. Tout parcours qui emprunte le réseau principal débute et se termine nécessairement par un trajet de desserte locale ou sur un réseau dit secondaire. Comme indiqué plus haut, en raison de la disponibilité ou de l'accessibilité de données dans nos délais de travaux, cet aspect n'a pas pu être examiné dans ce rapport.

Notons enfin qu'il s'agit d'une évaluation en moyenne qui masque les disparités locales, car les secteurs géographiques du territoire ne seront probablement pas touchés de la même façon (paramètre climatiques et/ou morphologiques divers).

VI.4.2.3 Une évaluation basée sur l'enquête de terrain de 2003

Relevé des désordres physiques et vulnérabilités

Le SETRA (direction d'étude « Techniques de Construction et d'Entretien ») et le LCPC ont réalisé une enquête auprès des différents correspondants du réseau scientifique et technique chargés de la veille technique des chaussées. L'enquête ne concerne que l'épisode de canicule de l'été 2003, ce qui réduit la portée des résultats. Néanmoins, il peut être dégagé les éléments techniques de synthèse, décrits ci-après.

Ce bilan montre que les chaussées, dans leur ensemble, se sont plutôt bien comportées face à la canicule et que cette dernière n'a pas engendré de désordres généralisés mettant en cause la pérennité des structures de chaussées ni des ouvrages d'art.

Toutefois, les éléments recueillis révèlent un certains nombre de désordres ponctuels sur les chaussées et les ouvrages d'art, comme l'indique le tableau annexé.

Des désordres ont été observés sur les ouvrages d'art, causés par la sécheresse provoquant un retrait des sols et des remblais, notamment des sols argileux³⁵⁰ : des cas d'apparition de fissures au droit des ponts et d'affaissements de remblais sont signalés. Aucun désordre généralisé n'a été détecté sur les ouvrages d'art à l'issue de la canicule 2003.

L'influence des fortes chaleurs sur le comportement mécanique des chaussées est généralement le suivant :

³⁵⁰ Voir le Rapport Risques naturels et assurance pour une description de l'aléa Retrait-gonflement des argiles

- Le phénomène de dessiccation des sols occasionnant des problèmes de portance de la chaussée est plus préoccupant même s'il n'y a pas eu de catastrophe généralisée suite à cette canicule ;
- Sur les routes secondaires, lorsque des enduits ont été mis en œuvre, il peut apparaître un phénomène de ressuage. Le traitement généralement appliqué est un gravillonnage des zones concernées ;
- L'orniérage apparaît sur les enrobés.

En ce qui concerne les chaussées :

- Les enduits et les enrobés coulés à froid ont ressué de façon plus marquée à l'été 2003. Il n'a néanmoins pas été identifié si les sections en cause concernent des chantiers neufs ou réalisés l'année précédente à une période peu favorable, ce qui peut être une cause aggravante (ou même principale) des désordres dus à la canicule ;
- Il est observé, pour les chaussées à base de liants hydrauliques, une multiplication importante des fissures transversales avec apparition de bourrelets dus au « flambement » des dalles. Ce phénomène est lié aux fortes chaleurs.

Analyse

Il serait intéressant de réaliser un exercice consistant à différencier les coûts d'infrastructure en fonction des classes de climat définies par la doctrine technique routière (actuellement, seules les estimations moyennes du coût patrimonial par kilomètre des chaussées et du coût de réparation des dommages subis par le patrimoine en fonction des IQRN, sont disponibles).

En tout état de cause, la faiblesse des désordres observés et les incertitudes sur leurs causes ne permettent pas à ce jour, selon les experts de groupe de travail, de remettre en cause les spécifications pour la construction et l'entretien des chaussées.

Cela conforte l'idée que les spécifications actuelles confèreraient au réseau RRN une assez bonne adaptabilité au changement climatique, sous réserve des effets de seuil de température combinés à des sollicitations de trafic lourd et des effets dus aux périodes répétitives de canicule, non évalués à ce jour.

L'attention est appelée sur les effets de la dessiccation des sols qui, dans un contexte de changement climatique de type canicule 2003 et avec des canicules répétées, entraîneraient des désordres se propageant depuis les fondations des ouvrages d'art et obligerait à des travaux de réparation d'un tout autre ordre de grandeur que ce qui a été observé en 2003.

VI.4.2.4 Une évaluation par l'examen d'indicateurs globaux

Les données budgétaires

Les éléments disponibles sont les chroniques de dépenses d'entretien à l'échelon national.

Tableau 71 - Dépenses budgétaires annuelles

Programmes (AE en Millions)	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008

d'€)												
Entretien courant, exploitation, Viabilité Hivernale											199	173
Entretien préventif des chaussées	343	340	364	365	372	392	392	389	363	241	89	130
Réparations des chaussées	38	52	66	66	66	66	66	66	60	40	54	42
Réparation Ouvrages d'Art	38	40	43	55	55	61	61	61	59	39	26	26
Mise en sécurité des tunnels				11	27	27	29	29	28	57	59	85
COÛT TOTAL	419	432	473	497	520	546	548	545	509	377	426	456
LINEAIRE (km)	31148	31105	31062	30935	30830	30694	30867	30682	30496	12941	12228	12379
Coût (k€) / km (hors tunnels)	13,452	13,888	15,228	15,710	15,991	16,909	16,814	16,818	15,773	24,728	30,013	29,970

Les dépenses sont agrégées au niveau national et ne sont pas distinguées selon le motif (ou la nature) de l'intervention. Il n'est donc pas possible d'isoler uniquement le facteur « surcoût du changement climatique ou de la canicule ».

En outre, les enveloppes budgétaires étant par nature « imperméables » à court terme aux variations exogènes, les réparations engagées imputables à ces phénomènes, sont financées sur l'enveloppe globale initialement prévue. Ceci signifie que d'autres dépenses sont reportées aux exercices budgétaires suivants et c'est pourquoi l'approche budgétaire doit être complétée par un regard sur l'évolution de l'indice de qualité des infrastructures : à budget constant, la qualité de la route est elle stable

La plupart du temps ce sont les couches de surface régulièrement refaites - que l'on appelle entretien préventif des chaussées - qui sont différées afin de permettre les interventions.

Le lissage qui résulte des contingences budgétaires entraîne donc des imprécisions qui ne permettent pas de s'avancer vers une estimation du coût des dommages.

Pour l'ensemble de ces raisons, les données budgétaires ne permettent pas de repérer un effet sensible sur les dépenses d'entretien dues à la canicule de l'été 2003. Même si elles n'excluent pas l'existence de surcoûts éventuels, on n'a pas de sursaut identifiable à l'issue de la canicule.

Les indices de qualité des infrastructures

Cette approche consiste à examiner si, sur une période longue ayant connu des épisodes climatiques significatifs, il est possible de constater et de chiffrer une dépréciation sensible des chaussées et des ouvrages d'art.

Chaussées (IQRN)

La méthodologie IQRN est utilisée pour deux objectifs principaux :

- évaluer le coût de dépréciation des chaussées du réseau routier national non concédé dans le cadre de la valorisation du patrimoine ;

- apprécier l'évolution de l'état global des chaussées du réseau national, afin d'évaluer l'efficacité des politiques d'entretien ; et définir et répartir au mieux les moyens nécessaires pour l'entretien.

Le système de notation est basé sur un relevé visuel des dégradations de chaussée, des mesures de déformations transversales et des mesures d'adhérence sur l'ensemble du réseau.

La nomenclature de classement des types de voies routières est, depuis 1995, la suivante :

- Voies Rapides Urbaines (VRU)
- Voies à Caractère Autoroutier (VCA)
- Grandes Liaisons d'Aménagement du Territoire (GLAT)
- Routes Nationales de Liaison (RNL)
- Routes Nationales Ordinaires (RNO)

Tableau 72 - Evolution des indicateurs depuis 1997 sur les différents types de voies

Hierarchie	IQRN 1995-1996-1997	IQRN 1996-1997-1998	IQRN 1997-1998-1999	IQRN 1998-1999-2000	IQRN 1999-2000-2001	IQRN 2000-2001-2002	IQRN 2001-2002-2003	IQRN 2002-2003-2004	IQRN 2003-2004-2005	RRN au 01/01/2006 (IQRN 2003-2004-2005)	RNS au 01/01/2007 (IQRN 2004-2005-2006)	RNS au 01/01/2008 (IQRN 2004-2005-2006)
VRU	95%	94%	91%	89%	88%	91%	89%	90%	90%	91%	89%	89%
VCA	94%	93%	92%	91%	92%	91%	91%	91%	91%	91%	89%	88%
GLAT	88%	88%	87%	86%	86%	88%	89%	87%	85%	84%	83%	81%
RNL	86%	86%	84%	85%	85%	86%	86%	86%	85%	79%	83%	83%
RNO	88%	88%	88%	88%	88%	88%	88%	87%	86%	83%	79%	80%
"RRN"	89%	89%	87%	87%	87%	88%	88%	87%	87%	87%	86%	85%

Il s'agit là des indicateurs moyens agrégés au niveau national. La lecture du tableau montre qu'il y a globalement une dégradation de l'état général des chaussées depuis les années 1995/1997.

Celle-ci est très liée aux moyens qui ont été accordés à l'entretien routier pendant cette période. Les différents rapports d'évaluation ou d'audit s'accordent à dire, de même que l'ensemble des experts, que le taux de renouvellement des chaussées a de fait été insuffisant par rapport aux standards, ce qui a conduit à cet infléchissement de la note IQRN.

Les enquêtes auprès des services d'entretien et les comptes annuels ne détectent pas d'effets significatifs de la canicule de l'été 2003 à l'échelle nationale en termes de dégradations des chaussées. Toutefois, il est probable que l'effet de la canicule sur un réseau en moins bon état et partiellement dégradé sera plus sensible et important que l'impact sur un réseau en meilleur état.

Ouvrages d'art (IQOA)

Le même type d'analyse vaut en ce qui concerne l'état des ouvrages d'art, traduit par l'IQOA.

IQOA (Image Qualité des Ouvrages d'Art) est une méthode de recensement et d'évaluation des ponts. A ce titre, elle permet de recueillir des données d'inventaire et d'état sur le patrimoine des ponts du réseau routier national, où son application a été rendue obligatoire.

Sur la base d'une visite tous les trois ans, elle permet de relever les désordres apparents de chaque ouvrage et de leur attribuer une note selon leur gravité et leur étendue. La classe globale d'un ouvrage est généralement la note la plus élevée attribuée aux désordres détectés sur l'ouvrage.

Le constat fait sur les indices IQOA rejoint celui des indices de qualité du RRN (IQRN). On observe une dégradation lente des ouvrages qui nécessite une surveillance et des interventions d'entretien et de réhabilitation afin de maintenir une bonne qualité de service sur le réseau.

Analyse

Cette deuxième approche par les données budgétaires et les indices de qualité du Réseau Routier National non concédé et des ouvrages d'art tend à rejoindre les conclusions de la première approche s'appuyant sur les observations de terrain pendant l'épisode de canicule de l'été 2003.

En tout état de cause, comme le montrent les données budgétaires, nous ne disposons pas des éléments permettant d'établir une quelconque relation entre la dégradation du réseau, le motif recherché de cette dégradation et les dépenses engagées pour la réparation des dommages au réseau.

VI.4.2.5 Une évaluation par benchmark sur des études étrangères

Il n'existe pas d'évaluation des impacts des coûts au niveau national en France. Afin d'estimer néanmoins un coût potentiel, on propose d'examiner à titre exploratoire des données bibliographiques issues de l'étranger et de les translater de façon mécanique au réseau français.

Les bases bibliographiques figurent en Annexe L.5 et concernent un peu plus d'une quinzaine d'études étrangères et françaises. D'une manière générale, assez peu de travaux ont actuellement identifié et chiffré le surcoût spécifiquement dû aux effets du changement climatique. Certaines sont plutôt qualitatives, ou bien tentent de donner quelques éléments quantitatifs, mais de façon très imparfaite et peu étayée.

Les limites d'un tel exercice méritent d'être rappelées, puisqu'il n'est pas établi que les conditions climatiques étrangères soient identiques à celles de la France, ni que les normes techniques pour la structure des chaussées des réseaux des autres pays soient comparables, ni encore que les conditions d'exploitation (type de trafic supportés) soient voisines. Or l'on sait précisément que la combinaison des effets d'un trafic de véhicules lourds avec de fortes chaleurs est pénalisant pour la chaussée. Il resterait donc à réaliser – comme pour toute application de méthode étrangère – une analyse de toutes les données disponibles pour s'assurer que la transposition des données d'un pays à l'autre a un sens.

Avec toutes ces réserves, nous avons néanmoins repris les éléments de chiffrages de l'effet des canicules et nous nous sommes risqués à utiliser ces éléments, en admettant

que l'impact de l'augmentation d'occurrence puisse être assimilé à l'addition des effets de canicules isolées.

Les britanniques³⁵¹ sont pratiquement les seuls à avoir avancé des chiffres. Ils estiment que, les années de canicule, ils consacreront 15% de leur budget annuel d'entretien dans la réparation des dégâts (pas de variations attendues pour la saison hivernale, ce qui peut être discuté). Pour cette estimation, ils ont travaillé à des échelles territoriales très localisées en utilisant des données budgétaires (surcoûts d'entretien durant la canicule de 2003).

Les australiens³⁵² prévoient un effet global du changement climatique (chaleur, pluie, etc.) négligeable sur le coût d'entretien global. Les variations sont de l'ordre de -2 à +4% annuellement.

En France, les coûts annuels d'entretien du réseau national non concédé sont de 426M€ et 456M€ respectivement en 2007 et 2008.

Si l'on applique le pourcentage britannique, le coût d'une canicule représenterait en France sur l'année considérée une somme variant entre 64M€ et 70M€. Sur la base des projections communes au groupe de travail sur le nombre de canicules (cf. Partie 1, Chapitre II.2.3), on aurait les montants théoriques cumulés suivants aux différents horizons :

Tableau 73 - Hypothèses communes au groupe de travail

Scénario	2030	2050	2100
A2	[0 - 3]	[2 - 11]	[32 - 51]
B2	[0 - 1]	[1 - 4]	[18 - 25]

Tableau 74 - Extrapolation brute du cas anglais au cas français : surcoûts cumulé des épisodes de canicule en hypothèse d'économie constante :

Scénario	2030 (G€)	2050 (G€)	2100 (G€)
A2	[0 - 0,21]	[0,14 - 0,77]	[2,24 - 3,57]
B2	[0 - 0,07]	[0,07 - 0,28]	[1,26 - 1,75]

Si l'on applique les pourcentages australiens, le surcoût annuel du changement climatique en France sur l'année considérée une somme variant entre -9M€ et +18M€. Dans la fourchette haute (18M€ annuel), cela serait comparable avec le cumul obtenu à l'horizon 2100 pour le cas anglais.

Ces chiffres doivent être considérés très prudemment car ils se reportent à des exemples à l'étranger transposés directement au cas Français. Les surcoûts annuels potentiels estimés n'ont pas été corroborés durant l'épisode de canicule 2003.

VI.5 Analyse détaillée sur le cas des submersions

On cherche ici à évaluer le coût des submersions marines – temporaires et permanentes – sur les infrastructures de transport et plus particulièrement, sur le réseau routier. Ce travail reprend de nombreux éléments des textes cités en référence. Il a été rédigé avec notamment les contributions de la DRI, de la DGEC, du CETMEF (DELCE) et du SETRA (CSTR-ENV).

³⁵¹ DEFRA, 2006 et Hudson, 2006

³⁵² Austroads, 2004

VI.5.1 La vulnérabilité des ouvrages côtiers

VI.5.1.1 Traits de côte et cotes centennales

Le trait de côte est défini comme la laisse des plus hautes mers astronomiques de coefficient 120, avec des conditions météorologiques normales.

Le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) a produit en collaboration avec le Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales (CETMEF) une cartographie des niveaux marins extrêmes le long des côtes de France (uniquement Manche et Atlantique). Ce travail a été mis à jour en 2008 et fait suite à l'étude initiale de 1994.

Les cotes atteintes par une submersion centennale sont très différentes suivant les régions françaises :

- le niveau centennal est estimé à 1,5 m NGF en Méditerranée ;
- sur la façade Manche et Atlantique, il va de 3 à 8 m NGF.

L'étude des lois de distribution des niveaux extrêmes de pleine mer sur les façades Manche et Atlantique montre qu'une augmentation de la cote comprise entre 20 et 30cm suffirait à multiplier la période de retour par 10. Le niveau centennal actuel se situerait donc, sur ces façades, approximativement entre 40 et 60cm au-dessus du niveau de submersion annuel.

Le zéro NGF est le niveau moyen de la mer à Marseille. Cette considération reste insuffisante pour établir une relation précise avec le trait de côte en Méditerranée, mais on peut présumer, comme l'a fait l'étude de cas du Languedoc-Roussillon³⁵³, que ces deux niveaux sont proches l'un de l'autre.

VI.5.1.2 Submersions temporaires et submersions définitives

La vulnérabilité est liée au coût de submersion. Mais le coût d'un dommage causé par un événement ponctuel est très loin du coût de destruction du bien. Aussi définit-on, par simplification, deux approches contrastées de « submersion temporaire » ou « intermittente » et de « submersion définitive ». On se placera donc dans l'un ou l'autre cas selon la cote d'implantation de l'ouvrage.

L'appréciation du risque de submersion s'effectue classiquement en référence au niveau centennal.

Dans le cadre du Groupe interministériel, on reprendra uniquement l'hypothèse d'une remontée de la mer de 100 cm à l'horizon 2100, conformément aux choix opérés par les autres groupes de travail.

La *submersion définitive* concerne les parties de réseau situées sous le trait de côte actuel +1m. Le coût à prendre en compte est la valeur patrimoniale. Les réseaux seront valorisés selon leur valeur patrimoniale moyenne, sans considération de pondération locale (il existe cependant des disparités locales françaises selon le type de voirie et la région considérée).

³⁵³ Voir rapport du groupe Risques naturels et assurance

On considérera qu'il y a risque de *submersion temporaire* pour toute partie du réseau exposé à un risque de submersion d'une période de retour supérieure à 100 ans, donc implantés au-dessus de la cote centennale actuelle +1m.

On rappelle que les zones basses situées sous les niveaux extrêmes centennaux actuels (zone ayant actuellement la probabilité de 1/100 par an d'être inondée au moins une fois ou 64% sur 100 ans) correspondent à l'aléa submersion marine tel qu'il est défini dans le Guide méthodologique « Plans de Prévention des Risques Littoraux - PPRL »³⁵⁴.

Il y a une certaine probabilité que les infrastructures soient assez fortement endommagées dans certaines régions par des submersions temporaires dont la périodicité et les durées, de même que la violence des éléments marins, ne sont pas identiques d'une région à l'autre. Cependant faute d'éléments spécifiques relatifs au coût de remise en état après submersion, on fait l'hypothèse que le coût des réparations des dommages liés à une submersion temporaire d'une ampleur significative varierait entre 1 et 2 fois le coût moyen annuel kilométrique de remise en état du réseau routier national, tel qu'il résulte du calcul du coût du patrimoine routier.

Les ouvrages situés entre le trait de côte actuel +1m et la cote centennale actuelle +1m seront assimilés, pour le chiffrage et par précaution, à la zone de submersion définitive. Ils sont en effet soumis à l'aléa de submersion marine au sens des PPRL.

VI.5.2 Evaluation quantifiée des impacts du changement climatique et de l'adaptation – le cas des submersions

La vulnérabilité des infrastructures de transports aux risques côtiers a été appréhendée au travers d'approches développées par le Groupe Risques naturels et Assurance.

Une première approche à caractère méthodologique, développée par la DGITM/SAGS/EP avec l'appui du CETMEF³⁵⁵, propose une formulation du surcoût actualisé sur 40 ans dû à l'augmentation de la probabilité de submersion des ouvrages et équipements situés à des cotes au-dessus du trait de côte actuel. Le surcoût est exprimé en pourcentage de la valeur patrimoniale en cas de submersion définitive, en pourcentage du coût d'endommagement en cas de submersion intermittente. Une application numérique de ces pourcentages est proposée pour le littoral Manche et Atlantique.

L'étude pilotée par le CETMEF en collaboration avec le CETE de l'Ouest et le CETE Méditerranée, identifie en France métropolitaine les zones basses situées sous trois cotes de référence définies par rapport au niveau centennal actuel et ce niveau +/- 1 m, sur l'ensemble du littoral métropolitain. Ces zones basses sont réputées potentiellement impactées par des submersions marines. Les linéaires d'infrastructure présents dans chacune de ces trois zones sont quantifiés et servent de base à l'évaluation du coût de submersion des infrastructures routières vulnérables.

Enfin une autre étude portée par le BRGM³⁵⁶ s'intéresse au littoral du Languedoc-Roussillon. Elle considère les zones de submersion permanente situées à moins d'1m au-dessus du zéro NGF, cote assimilée au trait de côte actuel³⁵⁷.

Ces évaluations reprennent de nombreux éléments bibliographiques cités en référence. Outre le travail de la DGITM, elles tiennent compte notamment des contributions de la DGEC et du CETMEF (DELCE) et du SETRA (CSTR-ENV).

³⁵⁴ MATE, 1997

³⁵⁵ Centre d'études techniques maritimes et fluviales

³⁵⁶ Bureau des Recherches Géologiques et Minières

³⁵⁷ Voir rapport du groupe Risques naturels et assurance

Périmètre des évaluations

La réflexion est centrée sur les grands réseaux d'infrastructures nationales métropolitaines gérés directement par l'Etat (routes nationales), sur lesquelles des données de coûts moyens existent. Toutefois la DGITM estime utile et opportun de prévoir d'anticiper également le coût de la dégradation des réseaux départementaux et communaux, sans oublier les réseaux ferroviaires etc. Cela nécessiterait des recherches complémentaires qui n'ont pas pu être menées durant le temps imparti à nos travaux

Seuls sont pris en compte les linéaires des routes submergées, de point à point, sans considération d'accessibilité à l'infrastructure considérée ni prise en compte de la totalité de la section de route pouvant être rendue indisponible, en fonction des possibilités d'accès et de son rôle de desserte du territoire concerné.

L'impact sur l'utilité réelle de la route n'est pas non plus pris en compte : les pertes d'usage (perte de valeur socio-économique en raison de l'indisponibilité d'une infrastructure de transport) ne sont pas approchées.

L'élévation du niveau marin est le seul impact du changement climatique étudié, à l'exclusion notamment du risque d'érosion.

Principales hypothèses de travail

La DGEC a demandé de chiffrer l'impact d'une élévation de 1 mètre du niveau de la mer sur les parties concernées des réseaux d'infrastructures de transport :

- pour une submersion définitive : les ouvrages correspondant sont situés à une cote inférieure au trait de côte +1m. Le coût pourrait correspondre à la perte de valeur patrimoniale ;
- pour une submersion par épisodes. Les ouvrages correspondants sont situés au-dessus du trait de côte +1m. Le coût peut être apprécié en appliquant au linéaire concerné un coût unitaire de dégradation, à déterminer par référence au coût de remise en état.

L'impact du changement climatique sur le niveau marin est appréhendé comme une « translation d'ensemble d'un mètre » : ainsi le nouveau trait de côte serait le trait de côte actuel +1m, le nouveau niveau de submersion centennale serait le niveau actuel de submersion centennale +1m, etc.

On se place à économie constante, en étudiant le réseau actuel.

Limites et incertitudes

Sont présentées les synthèses de trois regards complémentaires sur la question des vulnérabilités liées aux submersions marines. Les résultats doivent être comparés avec prudence car ils ne portent pas sur les mêmes objets, et couvrent au demeurant des champs géographiques différents.

Seules les cotes d'établissement des ouvrages d'infrastructures ont été prises en considération, à l'exclusion des éventuels ouvrages ou barrières de protection, qu'elles soient naturelles ou construites à dessein par l'homme.

C'est un travail plus fin à un niveau local qui permettra de prendre en considération les cotes de protection des ouvrages au lieu des cotes d'implantation.

Les deux études de terrain disponibles sont basées sur des références topographiques non entièrement compatibles avec les hypothèses de travail énoncées ci-dessus. La vulnérabilité des infrastructures est appréhendée de part et d'autre de la cote de submersion centennale ou par référence au trait de côte, la relation entre ces deux cotes n'étant ni immédiate ni généralisable à l'ensemble des littoraux français.

Une mise en garde doit être faite sur l'emploi de l'expression « trait de côte » dans les développements qui suivent. *Stricto sensu* le trait de côte renvoie au niveau d'eau atteint par la marée astronomique alors que les niveaux extrêmes de la mer renvoient aux surcotes météorologiques. Ces deux notions ne peuvent donc pas être reliées de manière simple. Le « trait de côte », dans ce document, fait appel à « un niveau altimétrique » vu comme une ligne fictive, intersection du niveau marin pour une marée de coefficient 120 et de la topographie. Si l'on peut admettre en Méditerranée que le trait de côte soit assimilé au niveau « zéro » NGF, ce n'est pas le cas en Manche-Atlantique.

Ceci explique que des hypothèses complémentaires fortes, avec une certaine part d'arbitraire, ont été rendues nécessaires pour parvenir à une appréciation – qui demeure encore dans une large fourchette – des possibles surcoûts occasionnés par la remontée du niveau de la mer.

VI.5.2.1 Approche par le surcoût relatif (Manche et Atlantique)

Il s'agit de déterminer, sur une durée de 40 ans (soit la période 2010 – 2050), le surcoût actualisé dû au changement climatique sous l'effet d'une remontée du niveau moyen de la mer de +1m supposé intervenir en une seule fois dès 2010. Une autre approche devrait être mise en œuvre si l'on considérait une remontée progressive.

Le patrimoine se trouvant exposé à une probabilité de submersion accrue, le surcoût du changement climatique est caractérisé par l'augmentation de sa vulnérabilité.

L'Annexe L.6 détaille le cadre théorique de l'analyse statistique de la variabilité du niveau de la mer puis présente, pour les ouvrages exposés sur le littoral de la Manche et de l'Atlantique, une appréciation *en relatif* de la valeur du surcoût comme un pourcentage du « coût de submersion ».

Il est nécessaire de poser des hypothèses très simplificatrices. En particulier on caractérise la submersion par le simple dépassement de la cote de l'ouvrage ou de sa protection par le niveau marin statique, sans prise en compte des phénomènes de franchissement par la houle. On ne prend pas en compte non plus la cinétique de la submersion (lente ou brutale).

Le niveau zéro est défini comme le niveau submergé avec certitude tous les ans, c'est-à-dire dont la période de retour est de 1 an.

Sous ces hypothèses, avec la valeur moyenne du « h » local (0,24m) qui caractérise la distribution statistique des niveaux marins sur le littoral de la Manche et de l'Atlantique, les éléments de patrimoine qui présentent *individuellement* le plus fort surcoût sur 40 ans – en valeur 2010 avec une actualisation au taux de 4% – sont :

- les éléments dont le niveau de protection actuel est situé entre le niveau zéro et +1m, pour lesquels le changement climatique conduit à une submersion permanente : le surcoût du changement climatique est considéré comme étant égal à 100% de la valeur du patrimoine concerné ;
- les éléments dont le niveau de protection actuel est situé entre le niveau zéro +1m et le niveau zéro +1m50 (soit jusqu'à une cote proche du nouveau niveau centennal) : il est proposé de considérer que la submersion y est suffisamment

fréquente pour que le surcoût du changement climatique soit calculé par référence à la valeur du patrimoine ; il s'établirait alors dans une fourchette qui varie de 15% à 100% de la valeur du patrimoine selon la cote de protection ;

- les éléments dont le niveau de protection actuel est situé entre le niveau zéro + 1m50 et le niveau zéro + 2m (soit au-dessus du futur niveau centennal) : il est proposé de considérer que les submersions sont suffisamment rares et espacées pour que le surcoût du changement climatique y soit calculé par référence au coût annuel d'une submersion intermittente ; il s'établirait dans une fourchette qui varie de 0,1% à 17% de ce coût annuel selon la cote de protection.

On ne saurait pour autant s'autoriser à négliger les infrastructures protégées au-dessus du niveau zéro + 2m. En effet, si le surcoût individuel est faible (inférieur à 0,1% du coût annuel de submersion intermittente), le surcoût cumulé sur plusieurs éléments peut atteindre des valeurs très importantes pour peu que le patrimoine lui-même soit considérable.

VI.5.2.2 Approche de la vulnérabilité des routes nationales par l'étude topographique des zones basses

Méthodologie

La cartographie des zones basses est un indicateur pertinent pour connaître la vulnérabilité des territoires littoraux aux submersions marines. Le terme « zones basses » correspond dans cette approche aux zones topographiques situées sous les niveaux extrêmes centennaux. L'impact du changement climatique sur l'étendue de ces zones de vulnérabilité est donc appréhendé au travers de la cartographie des zones situées sous les niveaux extrêmes centennaux actuels +1m. Ceci permet de simuler les zones potentiellement submergées par un événement centennal si le niveau marin s'élevait d'1m.

La méthode employée consiste à superposer des niveaux marins extrêmes à la topographie.

Pour ce faire, trois bases de données principales ont été utilisées : le trait de côte Histolitt (IGN-SHOM), la BD Topo Pays® de l'IGN et les résultats de l'étude « Statistiques des niveaux marins extrêmes de pleine mer Manche et Atlantique »³⁵⁸.

Compte tenu de l'incertitude altimétrique de la BD Topo Pays® et afin d'étudier le possible impact de remontée de niveau marin, il a été choisi d'identifier plusieurs zones « emboîtées » situées respectivement :

- sous le niveau marin centennal actuel moins 1 mètre ;
- sous le niveau marin centennal actuel ;
- et sous le niveau marin centennal actuel plus 1 mètre.

Les linéaires au-dessus des « niveaux marins centennaux +1m » n'ont pas été déterminés, mais ils demeurent concernés par les submersions temporaires.

Ces trois zones permettent de voir :

³⁵⁸ SHOM-CETMEF, 2008

- la marge estimée d'incertitude du MNT de la BD Topo Pays® (marge non fournie par l'IGN) ;
- si les territoires concernés par les zones basses évoluent fortement en fonction des trois niveaux pour « estimer » un possible impact du changement climatique en cas d'augmentation du niveau moyen de la mer.

Il est important de rappeler que la cartographie des zones basses peut permettre d'approcher les zones inondables par submersions marines, mais qu'elle simplifie fortement les phénomènes. Elle ne tient par exemple en aucun cas compte des aménagements côtiers ou des barrages présents sur certains estuaires. Elle peut donc être qualifiée de sécuritaire de ce point de vue concernant l'étendue de la zone inondée. Elle ne prend pas en compte les franchissements. Les métriques calculées représentent donc un réseau/capital potentiellement exposé.

Inventaire physique des infrastructures routières

Les informations relatives aux infrastructures de transport proviennent de la base de données BD Topo Pays®, qui intègre des données de précision métrique relatives aux bâtiments, aux réseaux routier, ferroviaire, électrique et aux réseaux hydrographiques, qui permettent de réaliser des analyses fines. Depuis 2008 sa couverture est homogène sur l'ensemble du territoire national.

Environ 17 000km de routes nationales ont été transférés aux départements. Les premiers transferts ont été effectifs au 1er janvier 2006 et se sont étalés jusqu'en 2008. L'IGN réalise une mise à jour en continu de la BD pour certaines données, dont les infrastructures, avec un décalage maximum d'une année. Cependant, certaines routes nationales transférées ne sont pas encore numérotées sur les documents officiels les plus récents : il y a donc probablement un décalage dans la répartition des classements de voies entre routes nationales et routes départementales, même si la version de la BD utilisée date de 2008.

La BD Topo Pays® ne distingue pas les autoroutes concédées et non concédées. Le linéaire concerné des autoroutes non concédées est probablement faible dans les zones considérées.

Les objets sont structurés en thèmes. Pour le réseau routier, la base de données comprend le réseau de voies de communication dans son intégralité (revêtu ou non), le réseau « adressé » c'est-à-dire une sélection des tronçons possédant un nom de rue, une sélection de chemins et sentiers, et une description du réseau revêtu selon son importance (hiérarchisation du réseau). Ce thème comprend également les toponymes se rapportant au réseau routier. La BD identifie par tronçon de route les voies de communication destinées aux automobiles. Est représentée de manière linéaire uniquement la chaussée, délimitée par les bas-côtés et les trottoirs.

Le Tableau 75 donne les linéaires d'infrastructures situées dans chacune des trois zones basses. Ils sont cumulés à l'échelle nationale suivant la nature du réseau concerné : autoroutes, routes nationales (RN), routes départementales, autres (routes communales). Ils sont rapportés au patrimoine total, ce qui permet de situer les enjeux relatifs à chaque catégorie de route. Les pourcentages relatifs au patrimoine proviennent du SICRE (base de données gérée par le SETRA) et des Compte des Transports de la Nation.

Les zones basses couvrent des territoires de plus en plus larges. Les ouvrages situés dans la colonne « Niveaux marins centennaux – 1m » sont tous inclus dans la colonne « Niveaux marins centennaux ». Les ouvrages situés dans la colonne « Niveaux marins centennaux +1m » sont tous inclus dans la colonne « Niveaux marins centennaux +1m ».

Tableau 75 - Linéaire des infrastructures routières et ferroviaires situées dans chacune des trois zones basses (en km)

	Niveaux marins centennaux -1m	Niveaux marins centennaux	Niveaux marins centennaux +1m
Autoroutes	160	301	355
% du linéaire national	1,3%	2,5%	2,9%
Routes Nationales	79	148	198
% du linéaire national	0,7%	1,3%	1,7%
Départementales	2074	3314	4338
% du linéaire national	0,5%	0,9%	1,1%
Autres	7032	11559	15522
% du linéaire national	1,12%	1,84%	2,47%
Voies ferrées	812	1482	1967
% du linéaire national	2,6%	4,8%	6,3%

Cette approche met en évidence une vulnérabilité potentielle plus forte, en pourcentage du réseau, des autoroutes et des voiries communales.

Les disparités suivant les régions étudiées sont mises en évidence dans la Figure 16, provenant à la fois de zones basses plus ou moins étendues et d'une densité d'infrastructures plus ou moins élevée.

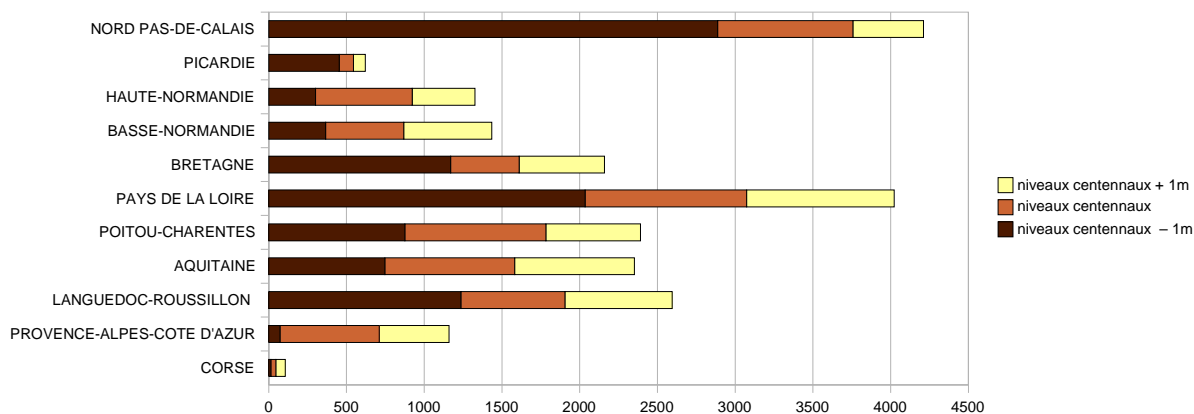


Figure 16. Linéaire des infrastructures de transport situées dans les zones basses suivant les régions

L'Annexe L.7 détaille les linéaires par département.

Appréciation des coûts de submersion pour les routes nationales et les autoroutes

Il s'agit d'un chiffrage résultant d'une valeur moyenne patrimoniale qui ne tient pas compte d'une éventuelle disparité régionale des coûts.

Le chiffrage sur la ligne « autoroutes » est donné à titre indicatif car une partie du réseau est concédé et ne concerne donc pas directement l'échelon étatique national

Tableau 76- Linéaires et coûts de submersion des infrastructures routières situées dans chaque tranche

en km en M€ 2008	sous Niveaux marins centennaux - 1m	entre Niveaux centennaux - 1 m marins et Niveaux marins centennaux	entre Niveaux centennaux marins et Niveaux marins centennaux + 1m
Routes nationales dans la tranche concernée (km)	79	69	50
Autoroutes dans tranche concernée (km)	160	141	54
Si submersion permanente : perte du patrimoine Valeur monétaire unitaire moyenne M€ (2008) : 10 Millions d'euros / km			
Routes nationales	790 M€	690 M€	500 M€
Autoroutes (concédées et non concédées)	1 600 M€	1 410 M€	540 M€
Si submersion temporaire : réparation du patrimoine Valeur monétaire unitaire moyenne M€ (2008): 0,25 à 0,50 Millions d'euros / km et / submersion			
Routes nationales	4,75 à 9,5 M€	17,25 à 34,5 M€	12,5 à 25 M€
Autoroutes (concédées et non concédées)	40 à 80 M€	35,25 à 70,5 M€	13,5 à 27 M€

On ne peut pas se dispenser de poser des hypothèses fortes si l'on veut aller jusqu'à un chiffrage de synthèse. Il semble raisonnable de considérer que plus la cote de l'infrastructure est basse, plus l'existence d'un ouvrage de protection actuel est probable, et inversement, plus la cote est élevée, moins la présence d'un ouvrage de protection actuel est probable. Ainsi :

- Il y a une certaine présomption que les infrastructures établies sous le niveau centennal actuel - 1m soient protégées mais leur cote de protection (plus ou moins élevée que la cote centennale actuelle ?) n'est pas connue. Ces ouvrages seront donc vraisemblablement soumis au risque de submersion temporaire ou permanente en fonction de leur cote de protection ;
- La tranche comprise entre le niveau centennal -1m et le niveau centennal est de même exposée à une submersion définitive ou intermittente, selon la cote de protection effective, non connue ;
- Il y a une présomption que les infrastructures établies au-dessus du niveau centennal actuel soient peu ou pas protégées. Ce sont les infrastructures de la 3^è tranche du Tableau 76. Elles pourraient représenter une forte vulnérabilité à la submersion permanente ;
- La tranche située au-dessus des niveaux marins centennaux +1m (non évaluée) présente un risque de submersion temporaire, même s'il est plus faible. En revanche les infrastructures y étant vraisemblablement assez nombreuses, le coût cumulé sur l'ensemble du patrimoine peut y devenir non négligeable (non chiffré ici).

Il convient de rappeler que la majorité des ouvrages maritimes ne sont pas dimensionnés pour résister à une montée des eaux de + 1m (sauf ouvrages spécialement dimensionnés pour protéger des installations sensibles contre des niveaux d'eau très élevés). La présence ou non d'ouvrages ne modifie pas la vulnérabilité des infrastructures situées en arrière puisque ces ouvrages n'assureront plus leur protection s'ils ne sont pas redimensionnés.

Ainsi, si l'on prend l'hypothèse que les ouvrages actuels ne sont pas modifiés, on doit considérer à ce stade que les zones actuellement protégées pourraient être exposées à un risque de submersion permanente. Les zones les plus basses seront toujours les plus vulnérables. Les zones qui ne sont pas actuellement protégées pourraient être exposées soit à une submersion permanente ou temporaire.

En raison des fortes incertitudes méthodologiques et compte tenu des éléments développés précédemment, il apparaît raisonnable de considérer que toutes les zones situées sous le niveau centennal + 1m pourraient être exposées à un risque de submersion permanente et que la remontée d'ensemble du niveau de la mer d'1 mètre représenterait alors un coût patrimonial, pour les routes nationales métropolitaines (hors autoroutes, hors autres voiries), pouvant aller jusqu'à 2000M€.

VI.5.2.3 Etude de cas – Erosion et submersion permanente dans le Languedoc-Roussillon

L'estimation réalisée dans cette partie se base sur les travaux du groupe Risques naturels et assurance. Ce dernier a considéré que les zones situées en-deçà de la cote 1 m NGF seront submergées de manière permanente en 2100.

Les zones concernées ont été croisées avec les données relatives aux infrastructures routières (avec distinction entre départementales, communales et réseau routier national) et ferroviaires disponibles dans la BD Topo Pays® pour les départements concernés.

Tableau 77 - Infrastructures concernées par l'aléa de submersion permanente en Languedoc-

	Pyr.Orientales	Gard	Hérault	Aude	Total
Routes concernées (en km)	534	255	918	268	1975
<i>dont départementales</i>	78	169	200	28	475
<i>communales</i>	456	86	718	240	1500
<i>RRN</i>	0	0	0	0	0
Routes totales	7404	12741	15025	11245	46415
<i>% du linéaire concerné</i>	7%	2%	6%	2%	4%
Voies ferrées concernées (en km)	19,6	9,75	71	32	132,35
<i>voie principale</i>	16,2	6,1	39,4	16,5	78,2
<i>voie de service</i>	3,4	3,6	31,6	15,5	54,1
Voies ferrées totales	341	485	412	307	1545
<i>% du linéaire concerné</i>	6%	2%	17%	10%	9%

Roussillon

Selon cette approche et en gardant à l'esprit toutes les réserves qui s'imposent, il apparaît que :

- la proportion des infrastructures routières soumises au risque de submersion permanent représente 4% du total. L'ordre de grandeur est cohérent avec celui tiré de l'étude nationale du CETMEF ;

- le réseau routier principalement impacté est le réseau communal.

Les deux méthodologies du groupe Risques naturel et de ce groupe en termes « d'infrastructures potentiellement exposées aux risques de submersion marines » sont donc bien cohérentes.

VI.6 Analyse et discussion

VI.6.1 La canicule

Selon les observations des désordres physiques qui ont pu être réalisées en 2003, les experts des techniques routières et d'ouvrages d'art (du SETRA et du LCPC) indiquent que les impacts de la canicule sur la structure des chaussées seraient assez faibles et ne concerneraient essentiellement que la couche de roulement superficielle. Toutefois les effets liés à la sécheresse des sols seraient susceptibles d'avoir dans l'avenir des conséquences importantes sur la tenue des ouvrages d'art.

Cependant, il convient de rester prudent dans les conclusions, car on ne saurait généraliser les effets d'un seul épisode de canicule – celui de l'été 2003 – à l'ensemble de la problématique d'augmentation d'occurrence et d'intensité des canicules. Il n'a pas été regardé les effets de seuil de températures extrêmes qui pourraient avoir des conséquences sur la structure des chaussées lorsqu'une forte température est combinée à des sollicitations supplémentaires liées à l'intensité d'un trafic lourd. Les effets répétitifs de canicules ou la succession de périodes de températures excessives n'ont pas été étudiés dans leur impact sur la chaussée et les ouvrages d'art. Ces effets – non connus à ce jour – de fatigue, de seuil, de durée des, de combinaison, seraient susceptibles d'augmenter de façon considérable (effets non linéaires) les désordres par rapport à ce qui a été observé en 2003.

Une estimation du coût patrimonial linéaire moyen (10M€ par kilomètre) des chaussées et du coût de remise en état (250 000€/km en fonction des IQRN) est fournie. Le coût patrimonial moyen est le coût de reconstruction à neuf ; mais il existe de fortes fluctuations de coûts selon les zones géographiques plus ou moins exposées aux climats chauds et aux trafics intenses.

En tout état de cause, la faiblesse des désordres observés à l'occasion de l'épisode unique de 2003 et les incertitudes sur leurs causes ne conduisent pas à ce jour à une remise en cause les spécifications qui sont préconisées actuellement par le réseau technique pour la construction et l'entretien des chaussées. Cela conforte l'idée que les spécifications actuelles confèreraient au réseau RRN une assez bonne adaptabilité au changement climatique, sous réserve des effets précédemment mentionnés.

Sous les limites et avertissements rappelés en préambule, l'évaluation des coûts des canicules basée sur un pourcentage tiré du cas britannique conduit à la fourchette allant jusqu'à -70M€ par année de canicule et un surcoût maximal culé à l'horizon 2100 compris entre 1,7 et 3,5G€ (hypothèses du groupe sur la répétition des épisodes caniculaires).

A titre de précaution pour prendre en compte les futurs effets de la sécheresse des sols sur les ouvrages d'art, il n'est pas impossible que cette valeur globale puisse être multipliée par deux ou trois.

Il importe de mettre en place des observatoires régionaux des impacts du changement climatique sur les routes et les autres infrastructures en relevant sur le moyen et long terme les désordres observés et les surcoûts engendrés. Ceci permettrait de résoudre la difficulté qui provient des écarts temporels entre les préoccupations actuelles d'entretien

courant des routes dont l'horizon est de 5 ans tout au plus et la préoccupation de développement durable lié au changement climatique.

Cette évaluation, fondée sur les infrastructures et non sur leur usage, ne tient pas compte des incidences des canicules sur les mobilités, ni sur la demande, les véhicules, les interactions avec la santé, non plus que des enjeux des conditions de déplacement etc. Des travaux sur les interactions sectorielles compléteraient utilement cette première analyse des impacts des canicules sur le patrimoine routier.

VI.6.2 Les submersions

L'approche topographique, pilotée par le CETMEF, est celle qui permet de donner une appréciation prudente et en fourchette du coût des submersions marines. Cette étude identifie en France métropolitaine les zones basses potentiellement impactées par des submersions marines (zones situées sous les niveaux marins extrêmes centennaux +/- 1 m) et permet de simuler, avec des hypothèses simplificatrices, l'effet du changement climatique sur la vulnérabilité à des événements extrêmes.

Sous les nombreuses réserves exposées dans le corps du rapport, il apparaît raisonnable de considérer que la remontée d'ensemble du niveau de la mer d'1 mètre représenterait un coût patrimonial, pour les routes nationales métropolitaines (hors autoroutes, hors autres voiries), hors pertes d'usage, pouvant aller jusqu'à 2 000M€.

Cette approche met en évidence une vulnérabilité potentielle plus forte des voiries départementales et communales, ainsi que des autoroutes, en pourcentage du réseau potentiellement impacté.

Les problèmes de correspondance entre les cotes de submersion centennale et les cotes du trait de côte +1m, constituent des difficultés fortes du chiffrage, qui ont nécessité des approximations plus ou moins arbitraires pour pouvoir exploiter les données actuellement disponibles.

L'autre difficulté tient à ce que les cotes de protection ne sont pas identifiées. Il y aura lieu d'engager des études locales qui seront à même de procéder à un chiffrage rigoureux en tenant compte des cotes de protection des infrastructures, au lieu (comme cela est le cas du présent document) de leur seule cote d'implantation.

Ces études locales pourront également aborder au cas par cas les stratégies d'adaptation, allant du renforcement localisé au déplacement complet de l'infrastructure de transport vers un site éloigné moins exposé.

VI.7 Eclairage complémentaire : l'impact du changement climatique sur le cadre bâti

VI.7.1 Cadre bâti et aléas d'origine climatique

A dire d'expert, les principaux aléas touchant le secteur bâti et pouvant déboucher sur de l'adaptation seraient :

- les épisodes d'inondation (crues lentes, rapides, ruissellement urbain) ;
- les effets du vent ;
- les effets du retrait/gonflement des argiles ;
- les phénomènes de chaleur urbaine et les moyens de remédiation.

Le cadre bâti partagé avec les infrastructures de transport la particularité d'être directement soumis aux aléas climatiques. Une des fonctions attendues des bâtiments est de ce fait d'assurer la protection des personnes et des biens contre ces mêmes aléas.

Les constructeurs ont de tout temps su adapter les bâtiments aux particularités climatiques locales dans le cadre des contraintes technico-économiques du moment. Une relative stabilité climatique régionale a permis de développer un cadre bâti marquant les territoires. Les évolutions techniques et économiques au cours du XX^{ème} siècle ont apporté des modifications tendant à atténuer ces différences.

Les enjeux représentés par le cadre bâti sont à la hauteur de l'importance du parc. Le Tableau 78 présente des données relatives au parc de logement, constitué pour l'essentiel des résidences principales (84% en 2008). La croissance du parc a été de 1,6% de 2007 à 2008.

Tableau 78 - Répartition des logements selon leur catégorie et le type de logement (INSEE, 2009)

	1983	1988	1993	1998	2003	2008
	en milliers					
Résidences principales	20 132	21 466	22 723	24 052	25 623	27 607
Individuel	11 040	12 047	12 782	13 525	14 481	15 640
Collectif	9 091	9 419	9 941	10 527	11 142	11 967
Logements vacants	1 882	1 925	1 976	2 042	2 009	1 969
Individuel	978	1 008	980	928	935	963
Collectif	904	918	996	1 113	1 074	1 005
Résidences secondaires	2 373	2 712	2 867	2 913	3 022	3 198
Individuel	1 565	1 709	1 759	1 775	1 865	1 994
Collectif	808	1 003	1 108	1 138	1 158	1 204
Ensemble	24 386	26 103	27 566	29 006	30 654	32 774
Individuel	13 584	14 763	15 522	16 229	17 281	18 598
Collectif	10 803	11 340	12 044	12 778	13 373	14 176
Champ : France métropolitaine et Dom.						

Les mises en chantiers des bâtiments non-résidentiels ont représenté environ 35 millions de m² par an entre 1990 et 2005 (Figure 17). Au sein de ce parc, la surface de bâtiments chauffés est estimée à 875 millions de m² en 2005 (source ADEME).

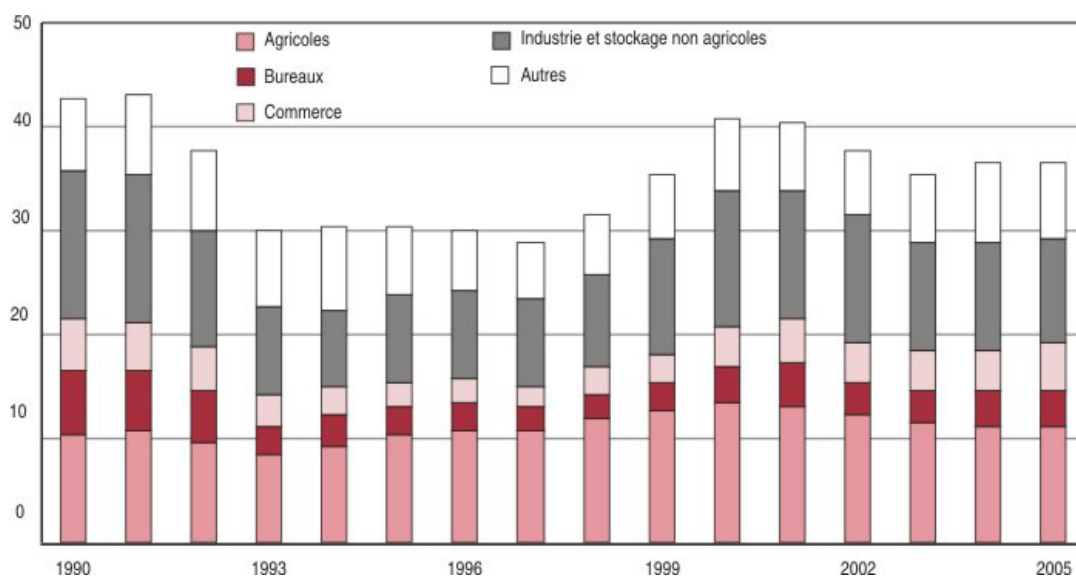


Figure 17 - Mises en chantier de bâtiments non résidentiels (unité : millions de m²) (INSEE, 2006)

VI.7.2 Adaptation à une nouvelle donne climatique

La protection contre les effets des températures basses ou élevées nécessite la mise en œuvre de dispositifs de chauffage ou de climatisation qui sont générateurs de gaz à effet de serre (GES) dans la mesure où le fonctionnement de ces dispositifs consomme, au moins en partie, directement ou indirectement des ressources fossiles.

Les bâtiments sont donc inéluctablement soumis à une nouvelle donne climatique qu'ils contribuent à façonner. Les politiques d'atténuation des émissions des GES déjà mises en œuvre sont indispensables. Elles concernent une part importante des émissions totales mais ne sauraient enrayer à elles seules les modifications en cours si bien qu'une réflexion sur l'adaptation des bâtiments à une nouvelle donne climatique est incontournable (Figure 18).

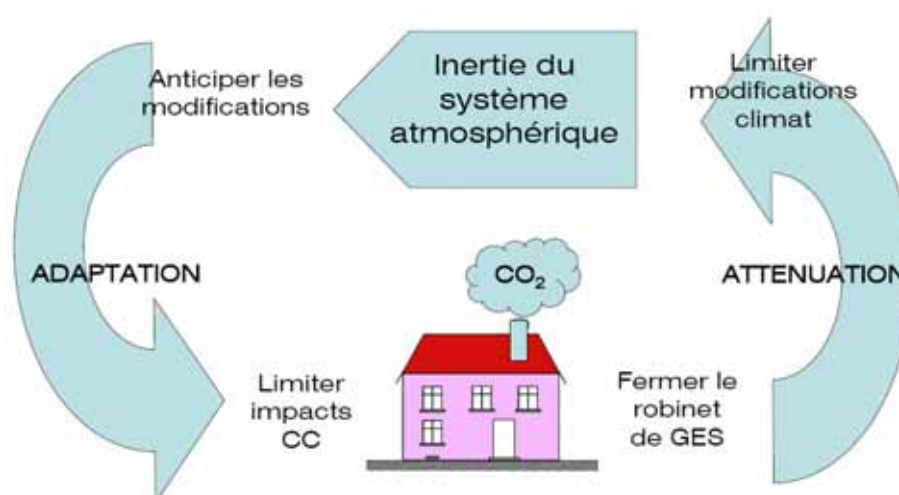


Figure 18 - le bâtiment entre atténuation et adaptation (source CSTB)

La difficulté de l'exercice consistant à anticiper les impacts est importante et, pour aller au-delà des réflexions qualitatives consignées dans le rapport intermédiaire du groupe

interministériel publié en 2008, la question de l'adaptation du cadre bâti a continué d'être examinée dans des contextes ciblés où le cadre bâti est le support d'activités ou bien en liaison avec des questions traitées dans plusieurs des sous-groupes thématiques. C'est ainsi que l'adaptation du cadre bâti a notamment été examinée au sein des sous-groupes :

- Energie : actions visant à réduire la consommation énergétique en chauffage et climatisation notamment à l'échelle des bâtiments (conception, isolation thermique, équipements plus performants, évolution comportementales des occupants). Ce groupe a pointé la difficulté de considérer l'isolation thermique, parangon des mesures d'atténuation, comme une mesure d'adaptation ;
- Santé : adaptation des bâtiments pour limiter la vulnérabilité des occupants aux effets d'une période de canicule ou bien consécutivement à une inondation (développement de moisissures, rétention de matières organiques) ;
- Risques naturels et Assurances : adaptation au risque de retrait/gonflement, anticipation des impacts des inondations et du vent ;
- Territoires : mise en perspective de la prise en compte des impacts sur les bâtiments suivant les territoires.

Le lecteur est invité à se reporter aux chapitres correspondant pour prendre connaissance des travaux de ces sous-groupes et en particulier des évaluations économiques des impacts et des mesures d'adaptation lorsque l'exercice a pu être mené à terme.

VI.7.3 Cadre bâti : un système

Les différents regards portés sur la question de l'adaptation du cadre bâti aux impacts d'une nouvelle donne climatique viennent nourrir une réflexion dont il est essentiel de ne pas oublier la dimension systémique.

Un bâtiment pris isolément et *a fortiori* un tissu urbain, est et restera un système complexe destiné à assurer de manière pérenne de multiples fonctions (fournir des espaces adaptés aux activités visées, créer des conditions de confort en relation avec ces activités, être vecteur d'une image, ...). Les choix des constructeurs répondant économiquement à ces exigences parfois contradictoires, aboutissent à un équilibre entre des solutions constructives.

Compte tenu de l'intime imbrication des solutions créant cet équilibre, une action sur un paramètre associé à une fonction particulière aura toujours des conséquences, plus ou moins marquées, sur les autres fonctions.

Pour reprendre un exemple courant, la mesure d'adaptation spontanée qui consiste, en période de canicule, à installer un climatiseur sans autre mesure d'accompagnement aura des incidences immédiates sur les émissions de GES mais peut également générer des bruits gênants.

Autre exemple, l'ajout d'isolation sur les parois d'un bâtiment existant contribuera à limiter l'incursion en température en période de canicule mais ne saurait à elle seule être considérée comme une mesure d'adaptation. L'orientation du bâtiment, la surface des ouvertures, les protections solaires sont parmi les caractéristiques à prendre en compte pour définir une mesure d'adaptation.

VI.8 Besoins spécifiques et pistes identifiées pour poursuivre l'analyse

Les travaux réalisés ont permis de dégager un certain nombre de besoins de données, de suivis ou de recherches complémentaires pour poursuivre l'analyse.

VI.8.1 Aspect canicules pour les infrastructures

L'exercice réalisé ici se concentre sur un événement spécifique, la canicule de 2003, et propose une extrapolation des coûts alors observés pour estimer le coût des impacts du changement climatique.

Afin d'en valider ou d'en infirmer les conclusions, il conviendra de mettre en place des **dispositifs d'observation** adéquats ou de procéder à des tests afin de vérifier les comportements des routes et ouvrages d'art (OA) en cas **d'épisodes répétés de canicule** : identification d'effets de fatigue, d'effets de seuils (niveau des températures, occurrences annuelles, etc.) pour identifier des facteurs d'amplification des désordres observés (niveau de trafic lourd, durée des épisodes de chaleur, combinaison avec d'autres phénomènes climatiques extrêmes, etc.) .

Il serait par ailleurs souhaitable de lancer des **travaux d'études et de recherche plus spécifiques sur les effets de la canicule sur les chaussées**. Ces travaux (qui pourraient être confiés au LCPC) concernent les sujets suivants :

- La stratégie de la politique d'entretien du réseau, afin de déterminer s'il est plus économique de procéder fréquemment à des renouvellements de couches de roulement en surface afin d'éviter une dégradation structurelle des chaussées, ou bien s'il serait préférable de durcir la norme technique afin d'offrir par exemple une chaussée de grave hydraulique plus résistante :
 - aux sollicitations diverses relatives aux effets de seuil d'élévation des températures et à la répétition des périodes de canicule,
 - aux efforts subis lorsque le niveau de température se combine à de fortes sollicitations en fonction de la structure du trafic en particulier dans sa composante de véhicules lourds, ce qui éviterait des séquences périodique d'entretien superficiel qui constituent en outre une pénalisation pour l'exploitation du réseau.
- La « fatigue climatique » de l'enrobé par sollicitations répétées d'amplitudes thermiques importantes est un sujet sur lequel aucune référence n'a été identifiée (question liée à la problématique du vieillissement des enrobés).

Enfin, il apparaît nécessaire d'étendre la réflexion pour prendre en compte de manière adéquate **le réseau départemental, et les voiries secondaires, ainsi que sur le champ de l'exploitation et du matériel roulant**, avec les opérateurs.

VI.8.2 Aspect submersions

Un certain nombre de besoins de recherche et de connaissances relatifs à l'aléa « submersion marine » est proposé dans le rapport Risques naturels.

Au vu des outils à disposition n'ont pas permis de prendre en compte les éventuels ouvrages ou barrières de protection. Seul un travail plus fin à un **niveau local** permettra de prendre en considération les cotes de protection des ouvrages au lieu des cotes d'implantation.

VI.8.3 Cadre bâti

Concernant le cadre bâti, les travaux menés au sein des groupes thématiques ont fait apparaître que des connaissances nouvelles doivent être acquises afin de mieux apprécier les impacts et d'être alors en mesure d'élaborer et d'évaluer économiquement des mesures d'adaptation.

Sur l'aléa canicule et ses dommages sur le bâti, il est acquis que les **caractéristiques radiatives** des surfaces des éléments du tissu urbain (enveloppes des bâtiments, voiries, espaces verts, étendues d'eau) jouent un rôle déterminant dans le bilan énergétique d'une zone urbaine. L'ampleur des impacts qui peuvent être attendus (notamment les températures en différents points des zones urbaines) d'une modification de ces caractéristiques radiatives est encore à valider.

Cette validation ne sera complète qu'accompagnée de conclusions quant à **l'acceptabilité sociale des mesures** (qui peuvent changer significativement la perception du cadre bâti) et de la définition des conditions pratiques de mise en œuvre et d'entretien/maintenance permettant de pérenniser les caractéristiques qu'il s'avérerait nécessaire de modifier durablement.

Pour ce qui est de l'aléa retrait/gonflement des sols argileux, il apparaît que la connaissance de **l'évolution de la teneur en eau des sols** suivant plusieurs scénarios climatiques est à acquérir. La perspective de périodes de canicule plus fréquentes rend nécessaire une meilleure connaissance de ces phénomènes. Le temps d'acquérir ces connaissances pourra être utilisé à mieux apprécier la robustesse des règles actuelles de dimensionnement des fondations et juger de l'opportunité de les réviser de manière à limiter la vulnérabilité des structures. Des travaux en cours (projet ARGIC) y contribuent déjà.

L'évolution de la fréquence et de l'intensité des inondations étant très incertaine, les réflexions sur la réduction de la vulnérabilité des bâtiments exposés se nourrit des travaux en cours sur **l'évaluation des mesures constructives** (y-compris les bâtiments amphibies) sans oublier le levier essentiel que représentent les **règles d'urbanisme**.

Pour ce qui est des effets du vent, à la fois les enseignements des modélisations climatiques et la capitalisation d'observations quant au comportement des structures lors d'évènements intenses, permettront d'apprécier l'éventualité de faire évoluer les règles actuelles de dimensionnement des ouvrages, ainsi que les pratiques constructives, leur contrôle et les conditions de maintenance.