



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

Partie V - Annexes des rapports
thématiques

Table des matières

Annexe D	Composition des groupes de travail.....	3
Annexe E	Annexes du Groupe Risques Naturels et Assurance.....	15
Annexe F	Annexes du Groupe Biodiversité.....	17
Annexe G	Annexes du Groupe Territoires	57
Annexe H	Annexes du Groupe Agriculture	82
Annexe I	Annexes du Groupe Forêt	97
Annexe J	Annexes du Groupe Santé.....	110
Annexe K	Annexes du Groupe Energie	119
Annexe L	Annexes du groupe Infrastructures de transport et cadre bâti	143

Annexe D Composition des groupes de travail

D.1 Groupe Eau

Les personnes suivantes ont participé aux travaux du groupe Eau

MAAP	Maryline LOQUET
MAAP	Jean-Luc REDAUD
MEEDDM	Daniel BERTHAULT
MEEDDM	Michel LE QUENTREC
MEEDDM	Véronique PERRIER
ONEMA	Sarah HERNANDEZ
ONEMA	Nirmala SEON-MASSIN

D.2 Groupe Risques Naturels et Assurance

Groupe de travail retrait-gonflement des sols argileux (animation : BRGM)

- BRGM
- Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)
- Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS)
- Météo-France
- Ministère du développement durable :
 - Bureau des risques naturels terrestres (BRNT) du Service des risques naturels et hydrauliques (SRNH) de la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) ;
 - Bureau de l'évaluation des politiques des risques, de l'eau et des déchets (ERNR2) de la sous-direction de l'économie, des ressources et des risques du service économie du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD) ;
 - Service de l'Observation et des statistiques du CGDD.
- Mission Risques Naturels (MRN)

Groupe de travail inondations (animation : Bureau des risques météorologiques)

- CEMAGREF
- CEPRI
- CETMEF
- CNRS (UMR SISYPHE)
- Ministère du développement durable :
 - Bureau de l'évaluation des politiques des risques, de l'eau et des déchets (ERNR2) de la sous-direction de l'économie, des ressources et des risques du service économie du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD) ;
 - Service de l'Observation et des statistiques du CGDD, SOES) ;
 - Bureau des risques météorologiques (BRM) du Service des risques naturels et hydrauliques (SRNH) de la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) ;
 - SCHAPI du SRNH.
- Météo-France
- MRN

Groupe de travail Risques Côtiers (animation : BRGM)

- BRGM
- CETE Méditerranée
- CETMEF
- Direction Régionale de l'Environnement du Languedoc-Roussillon
- Direction Régionale de l'Équipement du Languedoc-Roussillon
- Météo-France
- Ministère du développement durable :
 - Bureau des risques météorologiques (BRM) du Service des risques naturels et hydrauliques (SRNH) de la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) ;
 - Bureau de l'évaluation des politiques des risques, de l'eau et des déchets (ERNR2) de la sous-direction de l'économie, des ressources et des risques du service économie du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD) ;
 - Service de l'Observation et des statistiques du CGDD
- Mission risques naturels

Groupe de travail aléas gravitaires (animation : INERIS)

- BRGM
- CEMAGREF
- CETE Lyon
- INERIS
- Ministère du développement durable : Bureau des risques naturels terrestres (BRNT) du Service des risques naturels et hydrauliques (SRNH) de la Direction générale de la prévention des risques (DGPR)
- ONF/RTM

D.3 Groupe Biodiversité

Les membres du groupe biodiversité sont, par ordre alphabétique d'organismes puis de noms :

CEMAGREF	Christophe Bouget	Entomologiste
CNRS	Isabelle Chuine	CEFE, Département Fonctionnement des Ecosystèmes, Biodiversité, Flux et Changements Globaux (BioFlux), évolution de la flore sous l'effet du changement climatique
CNRS	Emmanuel Gritti	Equipe BioFlux
CNRS	Wilfried Thuiller	Laboratoire d'écologie alpine (LECA), CNRS, Université J. Fourier Grenoble
Fondation de recherche pour la biodiversité	Pierre Zagatti	Chargé de mission à la FRB (INRA)
IFREMER	Philippe Gouletquer	Responsable scientifique Biodiversité marine, Direction de la prospective et stratégie scientifique
IFREMER	Philippe Gros	Responsable ressources halieutiques, Direction de la prospective et stratégie scientifique
INRA	Vincent Badeau	UMR 1137 INRA-UHP Ecologie & Ecophysiologie Forestières, Equipe Phytoécologie
INRA	Bernard Chevassus-au-Louis	Inspecteur général de l'agriculture (Vice-président du groupe)
INRA	Jean-Luc Dupouey	UMR 1137 INRA-UHP Ecologie & Ecophysiologie Forestières, Equipe Phytoécologie
LPO	Philippe-Jacques Dubois	Rédacteur d'un ouvrage sur CC et biodiversité, rapport ministériel sur avifaune indicatrice du CC
LPO	Michel Métais	Directeur général LPO
MAAP	Maryline Loquet	Chargée de mission, bureau de la stratégie environnementale et du changement climatique, DGPAAT (pilote du groupe agriculture-forêt)
MEEDDM	Pierre Meignien	Chargé de mission biodiversité, CGDD
MEEDDM	Cécile Blanc	Chargée de mission affaires communautaires et biodiversité, DEB
MEEDDM	Jacques Courdille	Chargé de mission agriculture – biodiversité (membre du Groupe agriculture), DEB
MEEDDM	Daniel Berthault	Chargé de mission eau (pilote du Groupe eau), DEB
MEEDDM	Luc Mauchamp	Chargé de mission forêt (membre du Groupe forêt), DEB
MEEDDM	Vanessa Nuzzo	Chargée de mission Études et expertises (Rapporteur), DEB
MEEDDM	Marie-Christine Salmona	Chargée de mission aménagement et territoires (membre du Groupe territoire), DEB

MEEDDM	Emmanuel Thiry	Chargé de mission zones humides, DEB
MEEDDM	Laëtitia Tuffery	Stagiaire, économiste de l'environnement, Université Paris-Sorbonne
MEEDDM	Michel Galliot	ONERC (membre du Groupe plénier), DGEC
MEEDDM	Bertrand Reysset	ONERC (membre du Groupe énergie), DGEC
MNHN	Denis Couvet	Directeur CRBPO
MNHN	Cécile Edelist	CRBPO
MNHN	Jacques Trouvilliez	Directeur du Service du Patrimoine Naturel
ONEMA	Nirmala Séon-Massin	Chargée de mission Changement climatique et biodiversité
Université Perpignan	Bernard Salvat	Professeur émérite Ecole Pratique des Hautes Etudes (EPHE), UMR 5244 EPHE-CNRS-UPVD, Centre de Biologie et d'Ecologie Tropicale et Méditerranéenne, IFRECOR, ICRI

Le groupe a bénéficié des contributions de Lisa Russo et Caroline Berthon (SOGREAH), Géraldine Lasalle (CEMAGREF), Jean-François Soussana (INRA), Jade Isidore (CELRL) et de plusieurs personnes du MNHN. Elles en sont toutes remerciées.

D.4 Groupe Territoires

La présidence du groupe Territoires était assurée par la DIACT (Pierre-François CLERC, Hélène JACQUET-MONSARRAT). L'ADEME (Agnès BREITENSTEIN, Thomas BLAIS) a tenu le rôle de rapporteur.

Les membres du groupe sont présentés dans le tableau suivant.

ADEME	Jean-Pierre TABET
ADEME	Agnès BREITENSTEIN
ADEME	Thomas BLAIS
CGEDD	Bernard BRILLET
CNRM	Philippe BOUGEAULT
Conseil régional Nord Pas-de-Calais	Emmanuel CAU
CSTB	Jean-Luc SALAGNAC
DIACT	Hélène JACQUET-MONSARRAT
DIACT	Jean- Pierre CHOMIENNE
DIACT	Pierre-François CLERC
ECOFYS	Isabelle MICHEL
MAAP	Olivier BOUYER
MAAP	Sophie LEBONVALLET
MAAP	Maryline LOQUET
MAAP	Jean-François LERAT
MEEDDM	Marie-Christine SALMONA
MEEDDM	Lionel MOULIN
MEEDDM	Pascal DOUARD
MEEDDM	Véronique PERRIER
MEEDDM	Jean-Paul BLAIS
MEEDDM	Marianne JULLIARD
MEEDDM	Marc GILLET
MEEDDM	Sylvie DE-SMEDT
MEEDDM	Thierry HUBERT
MEEDDM	Elvyne FEVRIER
Ministère de la Santé	Monique DELAVIERE
Ministère des Finances	Jackie BENESSE
Ministère des Finances	Jean-François CROLA
Ministère des Finances	Noël LESCOUARNEC
SOGREAH ¹	Ghislaine GUIRAN
SOGREAH	Lisa RUSSO

¹ L'unité SOGREAH – Climat Energie est issue de la reprise des activités de la société Ecofys France par SOGREAH en juillet 2009.

D.5 Groupe Agriculture

Le rapport du groupe Agriculture a été réalisé par le bureau d'études ECOFYS-SOGREAH (Lisa RUSSO, Pauline BRUNNENGREBER), pour le compte de la DGPAAT du Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Pêche (Maryline LOQUET, Alexandre MEYBECK). Au cours des travaux, les experts suivants ont été consultés :

Arvalis - Institut du Végétal	Xavier CASSEDANNE
Arvalis - Institut du Végétal	Philippe GATE
Arvalis- Institut du Végétal	Jean-Paul RENOUX
CIREAD	Patrice DUMAS
INRA Avignon	Nadine BRISSON
INRA Avignon	Inaki GARCIA DE CORTAZAR-ATAURI
INRA Avignon	Françoise RUGET
INRA Avignon	Bernard SEGUIN
INRA Colmar	Eric DUCHENE
INRA Montpellier	François LELIEVRE
INRA Montpellier	Jean-Michel LEGAVE

Le rapport a été présenté lors d'une réunion du « Agriculture face au changement climatique à l'horizon 2020-2030 ; adaptation » du Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Pêche et ont bénéficié des remarques et commentaires des personnes suivantes :

APCA	J. GALIENNE
CETIOM	E. PILORGE
Crédit Agricole	B. LEPOIVRE
FFSA	Y. ANDRE
FNSEA	C. CHAMOIX
INAO	C. RICHER
INRA	S. LEBONVALLET
INRA Colmar	E. DUCHENE
Institut de l'élevage	J.-C. MOREAU
MAAP/DGPAAT	S. JEGO
MAAP/DGPAAT	E. KOZAL
MAAP/DGPAAT	M.-L. MADIGNER
MAAP/DGPAAT	D. RAT
MAAP/DRAAF	J.-F. QUERE
MAAP/DDEA 84	O. MORZELLE
MEEDDM/DGEC/ONERC	B. REYSSET

D.6 Groupe Forêt

Les personnes ayant contribué à la réflexion « Forêts » sont les suivantes :

CGAAER	Dominique DANGUY DES DESERTS
CIRED	Patrice DUMAS
Féd. Forestiers Privés de France	Eric TOPPAN
FNB	Pierre VERNERET
GIP ECOFOR	Jean-Luc PEYRON
IFN	Marie LECOCQ
INRA	Denis LOUSTEAU
MAAP	Pierre BOUILLON
MAAP	Maryline LOQUET
MEEDDM	Luc MAUCHAMP
MEEDDM	Bertrand REYSSET
ONF	Jean-François DHOTE
ONF	Marianne RUBIO
SOGREAH	Lisa RUSSO

Autres contributeurs :

CGAAER	Yves POSS
CNPPF	Philippe RIOU-NIVERT
FCBA	Alain THIVOLLE-CAZAT
MAAP	Christian CHARTRY
MAAP	Patrick DEBLONDE
SF CDC	Max PENNEROUX

D.7 Groupe Santé

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

Monique Delavrière, 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
Delavrière 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							

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, MEEDDM/DGEC

D.8 Groupe Energie

Les membres du groupe Energie sont présentés dans le tableau suivant.

ADEME	Luc VUCHOT
Autorité Sûreté Nucléaire	Frédéric MENAGE
Caisse des Dépôts	Morgan HERVE-MIGNUCCI
EDF	Marta NOGAJ
EDF	Jean-Yves CANEILL
GDF SUEZ	Aurore LAMBERT
GDF SUEZ	Paul PONCET
GDF SUEZ	Ronan-Guillem MATEUDI
IFP	Guy MAISONNIER
MAP	Claude ROY
MEEDDM	Richard LAVERGNE
MEEDDM	Daniel DELALANDE
MEEDDM	Bertrand REYSSET
MEEDDM	Sylvie SCHERRER
MEEDDM	Marie-Cécile DEGRYSE
MEEDDM	Nicolas BARBER
Observ'ER	Yves-Bruno CIVEL
RTE	Jean-Marc ROUDERGUES

D.9 Groupe Tourisme

Le rapport du groupe Tourisme a été réalisé par le Ministère de l'Economie, de l'Industrie et de l'Emploi (Jackie BENESSE, Jean-François CROLA et Noël LE SCOUARNEC), en collaboration avec le cabinet TEC et CREDOC (Enquête de perception des touristes face au changement climatique) et SOGREAH / CIRED (évaluation quantifiée des impacts du changement climatique sur le tourisme estival).

D.10 Groupe Infrastructures de transport et cadre bâti

Les personnes suivantes ont participé aux travaux du groupe.

CSTB	Jean-Luc SALAGNAC
MEEDDM/DGEC/SCEE/SD5A	Bertrand REYSSET
MEEDDM/DRI/SR/SR1	Lionel MOULIN
MEEDDM/DGITM/SAGS	Laurent TAPADINHAS
MEEDDM/DGITM/SAGS/EP	Jean-Bernard KOVARICK
MEEDDM/DGITM/SAGS/EP	Béatrice ADOLEHOUME
MEEDDM/DGITM/SAGS/EP	André LEUXE
MEEDDM/DGITM/DIT/GRN	Pascal LECHANTEUR
MEEDDM/DGITM/DIT/GRN	Jean LEVEQUE
MEEDDM/DGITM/DIT/GRN	Bernard LUCAS
MEEDDM/DGITM/DIT/GRN	Guy POIRIER
MEEDDM/DGITM/DIT/GRN	Alain COSTILLE
MEEDDM/DGITM/DIT/GRN	Didier BOUNY
MEEDDM/SETRA/CSTR	Pascal CHAMBON
MEEDDM/SETRA/CSTR/TCE	Thomas CAILLOT
MEEDDM/ SETRA/CSTR/ENV	Pierre SKRIABINE
MEEDDM/SETRA/CSTR/ENV	Yves DANTEC
MEEDDM/SETRA/CTOA	Thierry KRETZ
MEEDDM/SETRA/CTOA/DM	Gilles LACOSTE
MEEDDM/CETE Ouest/DIE	Guy DESIRE
MEEDDM/CETMEF/DELCE	Céline PERHERIN
MEEDDM/CETMEF/DELCE	Amélie ROCHE

Annexe E Annexes du Groupe Risques Naturels et Assurance

E.1 Risque RGA – scénarios d'adaptation des fondations

Différentes solutions techniques d'adaptation des modes de fondation des habitations individuelles sont comparées et leurs coûts et conditions de mise en œuvre évalués. Elles consistent à concevoir des fondations superficielles différemment, réaliser un sous-sol complet ou utiliser des fondations profondes protégées. Ces propositions n'en sont pas au même stade de maturité.

Tableau 1 – Tableau comparatif des trois propositions d'amélioration visant les fondations

Solutions	Avantages	Inconvénients	Coût par m ² (€/m ²)	Coût relatif (k€)	% du bien Min	% du bien Max
Radier en demi-gaufre	<ul style="list-style-type: none"> • Limiter la déformation localisée de l'habitation ; • Quantité de béton inférieure à un radier classique « plan » de même efficacité ; • Existence de noyaux préfabriqués ou de coffrages biodégradables. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en œuvre peu courante en France. • Quantité d'acier importante ; • Utilisation d'un béton non « standard » ; • N'empêche pas l'habitation de subir un mouvement d'ensemble ; • Chainage complet renforcé de la structure • Garantie constructeur ? 	250	25 k€ -10 k€ ~15 k€	6%	13%
Sous-sol complet	<ul style="list-style-type: none"> • Extraire sur une épaisseur plurimétrique le matériau argileux à l'origine des désordres ; • Transférer les fondations de l'habitation vers une zone moins impactée par les phénomènes de retrait-gonflement ; • Disposer d'un volume utile supplémentaire. 	<ul style="list-style-type: none"> • Solution non recommandée dans les zones soumises à des mouvements de terrain de type affaissement minier ; • Nécessite de réaliser une fondation liaisonnée sous le sous-sol (ou un système poutre-voile). 	150	15 k€	6%	13%
Fondation profonde	<ul style="list-style-type: none"> • Transmission très réduite de la déformation du sol vers la maison ; • Impact limité d'un approfondissement de l'effet de la sécheresse. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite des moyens de mise en œuvre plus conséquents ; • Etude de sol jusqu'à une profondeur plus importante ; • Prévoir un réseau de longrines dimensionnées en fonction de l'espacement des pieux. 	250	25 k€	10%	22%

(-10 k€ = cout de la fondation classique déjà intégré dans le prix du bien)

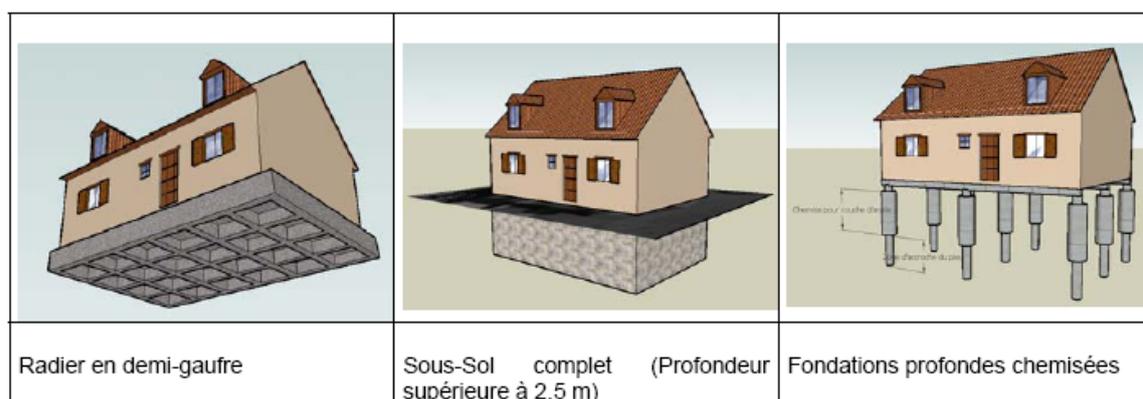


Figure 1 – Trois propositions techniques relatives aux fondations de l'habitation (INERIS)

E.2 Présentation de l'étude FFSA et GEMA

La Fédération française des sociétés d'assurance (FFSA) et le Groupement des entreprises mutuelles d'assurance (GEMA) réalisé en 2009 une étude relative à « l'impact du changement climatique et de l'aménagement du territoire sur la survenance d'événements naturels en France ».

- **Les coûts sur la période de référence**

34 milliards d'euros, c'est le coût des événements naturels indemnisés par les assureurs français de 1988 à 2007.

L'étude distingue deux types d'événements : les « événements locaux », fréquents, localisés, et d'une intensité relative, représentent 60% des indemnités versées par les assureurs au titre des aléas naturels. Les « événements extrêmes », particulièrement dévastateurs, se caractérisent par une très forte intensité et une faible fréquence. Ils représentent 40% des indemnités versées par les assureurs, répartis de la manière suivante : 60% pour les tempêtes, 25% pour la sécheresse, 20% pour les inondations.

- **Quelles projections à l'horizon 2030 ?**

Compte tenu de l'évolution prévisible de la physionomie socioéconomique de la France – accroissement de la population globale, enrichissement des ménages et entreprises, flux migratoires internes montrant des tendances à s'implanter plus particulièrement dans certaines régions davantage exposées aux aléas naturels comme l'Ouest ou le Sud-ouest - l'étude conclut à un surcoût de 16 milliards d'euros, dont 14 milliards dus à l'augmentation de la masse assurable et 2 milliards correspondant à l'effet « sur croissance » des zones vulnérables.

Aux effets socioéconomiques s'ajoutent ceux d'une aggravation potentielle des événements naturels liés au changement climatique. Selon les conclusions de l'étude, il faut s'attendre à une augmentation de la fréquence des événements locaux, dont le surcoût est estimé à 1 milliard d'euros. En ce qui concerne, les événements extrêmes, les hypothèses retenues pour le modèle de l'étude vont d'une absence d'effet dû au changement climatique à un doublement de leur fréquence, cohérent avec les tendances du dernier rapport du GIEC. 13 milliards d'euros seraient donc liés à une fréquence accrue de ces événements extrêmes. Au total, l'indemnisation des dommages matériels liée aux événements naturels pourrait doubler, à l'horizon 2030 et atteindre 60 milliards d'euros.

Cette hausse sera certes répartie sur une population et un nombre d'entreprises plus importants, mais elle aura tout de même un effet significatif sur le budget des ménages et les comptes des entreprises. Sur les 30 milliards d'euros supplémentaires estimés, 16 milliards auraient un impact direct sur le prix relatif de l'assurance contre les aléas naturels. Ainsi la part de la couverture contre les événements naturels dans le budget des ménages et des entreprises passera à près de 25% (contre 16% initialement).

Annexe F Annexes du Groupe Biodiversité

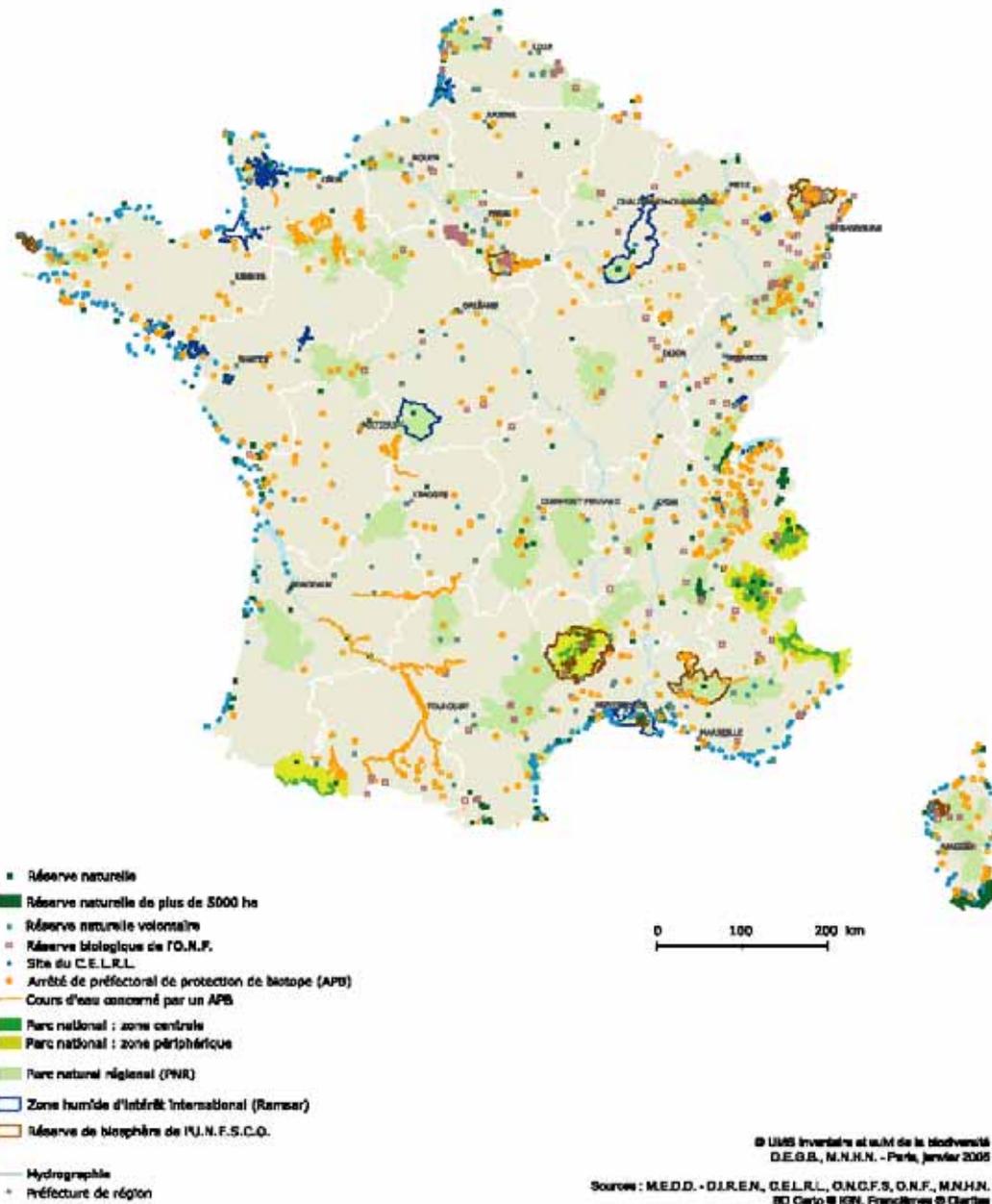
F.1 Cartes : zones biogéographiques et espaces naturels protégés en France métropolitaine, zone économique exclusive marine française

Domaines biogéographiques en France métropolitaine

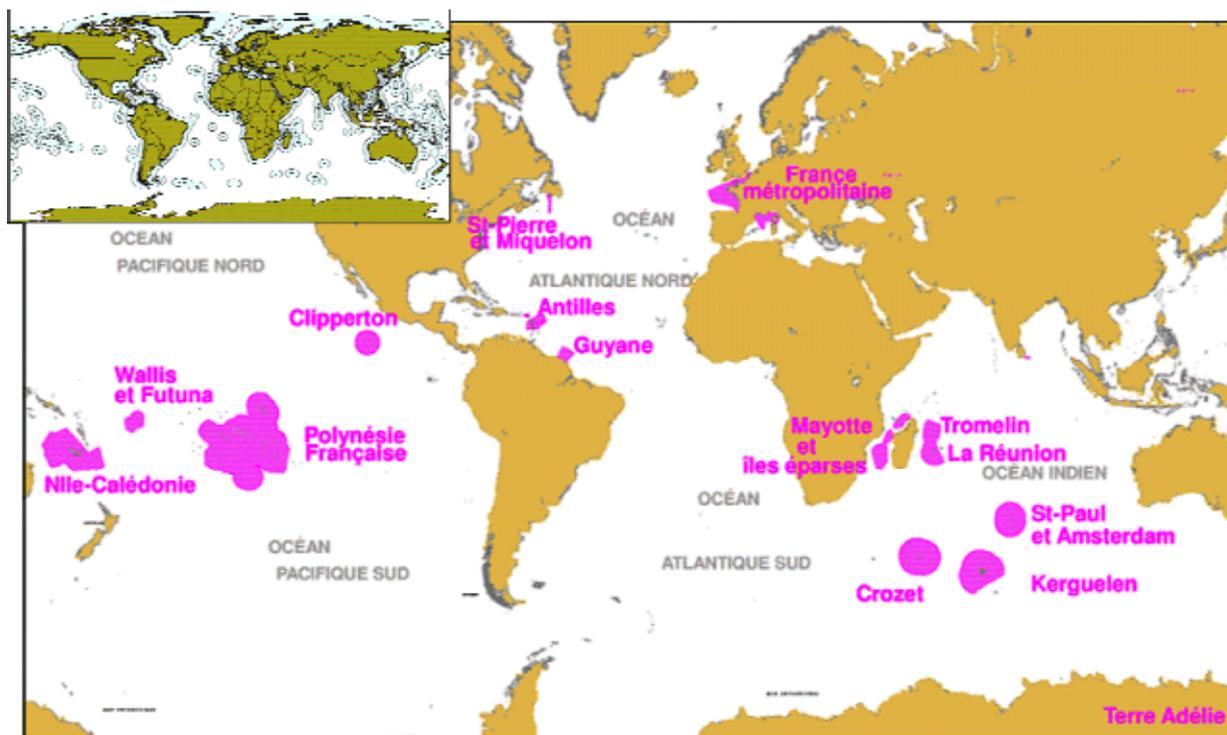


Carte 1 - Domaines biogéographiques en France métropolitaine

Espaces naturels protégés



Carte 2 - Espaces naturels protégés de France métropolitaine (MEDD, DIREN, CELRL, ONCFS, ONF, MNHN, 2005)



Carte 3 - Zone économique exclusive (ZEE) française (SHOM)

Cartouche en haut à gauche (FAO) : ensemble mondial des ZEE.

Grâce à l'Outre-mer, la France exerce sa responsabilité sur une ZEE² de 11 millions de km² (en Atlantique, dans l'Océan Indien, dans le Pacifique sud et en Antarctique, cf. Carte 3). Près de la moitié de cette superficie revient à la Polynésie française, contre seulement 3% à la France métropolitaine (350 000 km², Corse comprise).

² La Convention sur le Droit de la Mer fixe à 12 milles marins la largeur de la mer territoriale, espace de souveraineté, et à 200 milles celle de la Zone Économique Exclusive (ZEE), dans laquelle l'exploitation des ressources naturelles de la colonne d'eau, des fonds et du sous-sol est soumise aux droits souverains de l'État côtier. Au delà, le droit est défini par exclusion : est de la « haute mer » ce qui ne relève ni de la mer territoriale, ni de la ZEE – c'est le domaine où la règle est celle de la loi du pavillon. Le fond et le sous-sol de la haute mer sont patrimoine commun de l'humanité (les concessions d'exploitation sont octroyées par l'Autorité internationale des fonds marins).

F.2 Impacts du changement climatique sur la biodiversité : outils de la connaissance

Connaître les impacts du changement climatique (et plus largement, du changement global) sur la biodiversité, suppose un recueil de nombreuses données, leur mise en forme, l'extraction et la valorisation de ces données pour répondre à des questions précises. Cette annexe vise à illustrer à travers des exemples les différents outils utilisés pour améliorer cette connaissance³. Elle s'attache aussi à fournir des éléments d'analyse sur les incertitudes liées à ces outils, en particulier concernant la modélisation.

F.2.1 Observations et suivis de terrain

Les observations permettent de tirer des enseignements sur la réponse des espèces et des écosystèmes aux changements globaux. Elles permettent par exemple de focaliser sur les groupes d'espèces les plus menacés, les plus concernés par tel ou tel impact. Les techniques d'étude varient depuis la collecte d'informations éparses à l'analyse fine des données de stations biologiques recueillies sur le long terme, en passant par des séries d'observations basées sur des protocoles standards. Les longues séries temporelles sont toutefois rares.

Les observations alimentent les approches purement corrélatives et les approches fonctionnelles. Dans le cas des approches corrélatives, il est toujours délicat de certifier une relation causale entre le modèle d'étude (ex. changement d'aire de répartition) et le paramètre d'intérêt (ex. augmentation de température). Toutefois, les observations peuvent révéler des relations trophiques complexes difficilement modélisables. Dans le cas où une relation robuste est montrée entre, par exemple, un changement d'aire de répartition et un facteur climatique, cette relation peut être utilisée pour inférer ce qui pourrait se passer dans le futur et proposer des grandes tendances d'évolution pour une période proche. Ces tendances sont parfois utilisées pour décrire l'évolution d'autres espèces proches sur le plan génétique ou fonctionnel.

Dans le cas des approches fonctionnelles, des seuils de résistance peuvent être dérivés des observations de terrain. Par exemple, les observations de dépérissement et de mortalité peuvent être analysées en regard d'intensité des stress hydriques de façon à déterminer des « seuils écophysologiques ».

D'une façon générale, les analyses *in situ* ne permettent pas toujours de s'affranchir de la multitude de facteurs influençant un site d'étude, ou de l'aire de répartition d'une espèce. On peut citer les perturbations naturelles (chablis, avalanche) ou intentionnelles (incendie, destruction) ainsi que les modifications de l'usage des terres qui influent souvent de manière directe et immédiate sur une espèce ou un écosystème.

³ A savoir les observations et suivis de terrain, la mobilisation d'observatoires et de systèmes d'information, le renseignement d'indicateurs, les expérimentations de terrain et la modélisation.

Encadré 1 - Méthodes de suivi des effets du changement climatique sur différents milieux

Les récifs coralliens sont suivis qualitativement et quantitativement dans certaines localités où ne s'exerce aucune influence anthropique (ex. pentes externes des atolls de Polynésie française). Un suivi depuis deux décennies documente les effets induits (fréquence et intensité) par le changement climatique.

Le réseau Gloria vise à suivre les effets du changement climatique en haute montagne (ex. Alpes, Andes), se départissant ainsi au mieux des effets anthropiques.

Le milieu marin côtier et hauturier dispose de plusieurs dispositifs de suivi pilotés par les stations marines (souvent pour les milieux côtiers), des réseaux de surveillance nationaux, et au travers du recensement des produits de l'exploitation de l'océan (statistiques des pêches, système d'information halieutique notamment). Ainsi, le dispositif « *Continuous plankton recorder* » renseigne-t-il depuis plus de 75 ans sur la répartition, l'abondance et la structure des communautés planctoniques. Néanmoins, le 4^{ème} rapport du GIEC fait état du faible nombre de séries disponibles en biologie marine comparé à la quantité d'information disponible en biologie terrestre. Cette situation résulte des difficultés techniques propres à l'acquisition des données en écologie marine, ainsi qu'à leur coût (réalisation de campagnes scientifiques à bord de navires océanographiques équipés d'engins et d'une instrumentation spécialisés, étendue du domaine d'investigation).

Les forêts font l'objet de dispositifs assez complets, bien qu'encore trop peu articulés, depuis les sites instrumentalisés de F-ORE-T, l'Observatoire de Recherche en Environnement (ORE) sur le Fonctionnement des Écosystèmes Forestiers géré par le GIP ECOFOR, aux inventaires périodiques réalisés par l'Inventaire forestier national (IFN), en passant par les placettes du réseau RENECOFOR de l'Office national des forêts (ONF), ou encore les observations du département de la santé des forêts (DSF) du Ministère en charge de l'agriculture. Ce dispositif produit régulièrement des synthèses de l'évolution de la biodiversité forestière et des peuplements, de manière intégrée dans un suivi continu des forêts au niveau européen.

F.2.2 Systèmes d'information et observatoires

En raison de leur maillage territorial et de leur durabilité, les observatoires et les systèmes d'information permettent également la mise en évidence de tendances temporelles ou de divergences spatiales.

On peut citer, au plan national, les suivis de l'avifaune (programme STOC Suivi temporel des oiseaux communs), les suivis phénologiques de la flore et la faune, les suivis de l'entomofaune (Observatoire des Papillons de jardin). Ils permettent via des analyses statistiques d'isoler l'effet du changement climatique avec un intervalle de confiance satisfaisant. Ce type de suivis mérite d'être développé aux côtés (i) des stations biologiques plus à même de réaliser des relevés précis de nombreux paramètres sur de longs pas de temps, et (ii) d'observatoires non participatifs étendus à une échelle plus fine et sur d'autres groupes taxinomiques que les dispositifs mentionnés ci-dessus. Au plan régional, d'autres suivis de ce type sont effectués sur diverses catégories d'organismes vivants par des laboratoires de recherche et des associations. Ces suivis sont permis tant par des actions de science participative que par la mobilisation de réseaux d'experts chevronnés.

De plus, on relève l'intérêt de fonder la connaissance des effets du changement climatique sur les observatoires dédiés à leur suivi et évaluation (ex. ONERC, observatoire des saisons, Cf. Encadré 4 et Encadré 5), et sur des observatoires non dédiés couvrant un large champ de données et d'utilisations (ex. SINP, Vigie Nature, Cf. Encadré 2 et Encadré 3).

Encadré 2 : Le Système d'information sur la nature et les paysages

Le SINP est une démarche destinée à coordonner les producteurs de données dans les domaines de la nature et des paysages. Son organisation repose d'une part sur un comité national regroupant des représentants des producteurs nationaux (scientifiques, collectivités territoriales, ONG, Etat) définissant les grandes orientations et, d'autre part, sur des comités régionaux organisés par les directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) en association avec les régions afin de définir les orientations régionales. Au plan scientifique, une « coordination scientifique » rassemble les responsables scientifiques en deux collèges : le collège nature animé par le Muséum national d'histoire naturelle (MNHN) et le collège paysage animé par le laboratoire Dynamiques sociales et recomposition des espaces (LADYSS) du CNRS. Une organisation particulière du volet mer du SINP permet de prendre en compte les spécificités de ce sujet en s'appuyant particulièrement sur l'Agence des aires marines protégées et l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer).

Le SINP s'appuie sur un catalogue des données, des référentiels scientifiques et géographiques communs, des méthodes de production et de contrôle validées scientifiquement ainsi que des conditions d'utilisation homogénéisées et conformes à la réglementation. Cette organisation permet d'apporter un appui aux producteurs de données, notamment dans la fourniture de référentiels géographiques communs et l'élaboration d'outils informatiques mutualisés de collecte et d'analyse des données.

Un portail d'information pour les acteurs du SINP a été mis en place à l'adresse <http://www.naturefrance.fr/>.

Encadré 3 : Vigie nature

Vigie nature est un réseau intégré d'observatoires, l'objectif étant de suivre un nombre significatif de groupes d'espèces communes. Actuellement, quatre observatoires sont opérationnels : Oiseaux Communs (1000 sites, depuis 1989), chauve-souris (30 départements, depuis 2006), papillons de jours (plus de 100 sites, depuis 2006), papillons des jardins (plus de 5000 jardins, depuis 2006), ou OPJ. D'autres sont à l'étude, notamment sur les plantes, amphibiens, escargots, orthoptères et coléoptères.

L'expérience de l'OPJ a été particulièrement fructueuse en termes de participation. Les nombreuses données apportent des informations précises sur l'ensemble du territoire national. Les régions les plus industrielles semblent les plus pauvres en diversité, de même que, de manière plus étonnante, le Languedoc.

Encadré 4 : L'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique en France métropolitaine et dans les départements et territoires d'outre mer

L'une des missions de l'ONERC est de collecter et diffuser les informations, études et recherches sur les risques liés au réchauffement climatique et aux phénomènes climatiques extrêmes.

L'observatoire recense les activités existant dans les différents organismes opérationnels et de recherche. Il peut proposer des évolutions de ces activités pour mieux répondre aux besoins de connaissance des impacts du réchauffement climatique en France, en vue d'une meilleure information des décideurs à tous les niveaux. L'observatoire fonctionne en liaison avec les organismes où se trouvent les compétences scientifiques (CNRS, Météo France, IRD...) au moyen d'un réseau de concentration et de diffusion des informations, couvrant la Métropole et l'Outre-mer. L'ONERC organise la collecte des informations et les rassemble dans sa banque de données.

Pour plus d'informations : <http://www.ecologie.gouv.fr/-ONERC-.html>

Encadré 5 : L'Observatoire des saisons

Dans le contexte actuel de changement climatique, la phénologie revêt une importance croissante dans de nombreux domaines de recherche fondamentale et appliquée. C'est dans ce cadre qu'a vu le jour l'Observatoire des saisons, réseau amateur d'observations des rythmes saisonniers à l'échelle nationale qui favorise :

- une participation citoyenne à la recherche grâce à trois sites Internet mis à la disposition des citoyens. Chacun de ces sites met à disposition du public des protocoles très simples pour effectuer des observations sur le cycle de vie de plantes et d'animaux rencontrés fréquemment sur le territoire. Ces observations alimentent au fur et à mesure une vaste base de données.
- une sensibilisation du public à l'environnement et au changement climatique, à travers l'observation par le participant de son environnement local et des organismes qui y vivent. L'ODJ permet, même pour un public citoyen, de prendre conscience du monde vivant qui l'entoure et des modifications qu'entraîne le changement climatique sur celui-ci.

Pour plus d'informations : www.obs-saisons.fr

F.2.3 Indicateurs d'impacts du changement climatique sur la biodiversité

Au niveau européen, le processus « Streamlining European 2010 Biodiversity Indicators » (SEBI 2010) a permis de mettre au point un jeu d'indicateurs simple et facile d'utilisation (EEA, 2009), parmi lequel a été défini un indicateur d'impact du changement climatique sur les populations d'oiseaux (Figure 2). Dans une évaluation portant sur 122 espèces d'oiseaux européens largement distribués, 92 ont été observés comme étant négativement affectés par le changement climatique (réchauffement), contre 30 positivement.

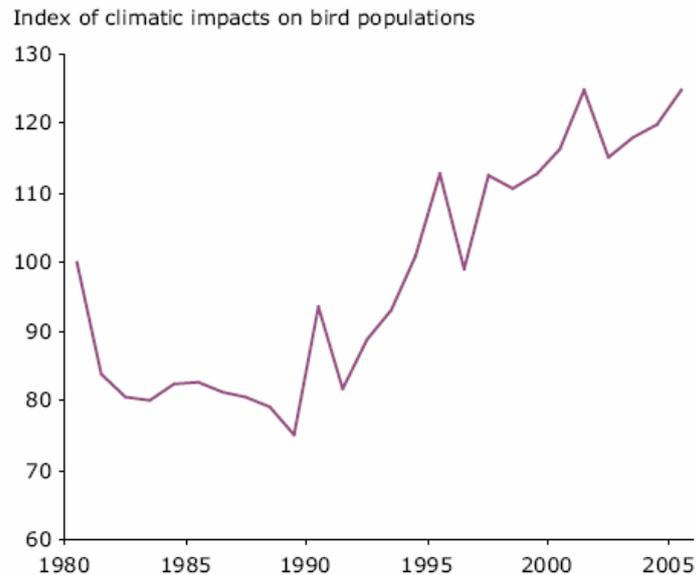


Figure 2 - Indicateur d'impact climatique pour les oiseaux européens (Gregory et al., 2009)

L'indicateur montre que l'impact du changement climatique sur des populations d'oiseaux largement distribuées a augmenté fortement durant les vingt dernières années.

Au niveau français, un indicateur a été mis au point par les ornithologues du Muséum National d'Histoire Naturelle, à partir des données collectées par le programme de suivi temporel des oiseaux communs (STOC) qui donne également une bonne idée de l'impact du changement climatique sur 15 espèces (dont 14 passereaux) aux affinités septentrionales (Jiguet *et al.*, 2006 ; 2007)⁴. Cet indicateur reflète l'évolution par espèce des effectifs d'oiseaux communs nicheurs.

Une analyse des taux de croissance de 71 espèces sur 17 ans en France a confirmé que les espèces spécialistes sont en déclin, et a montré un lien entre le déclin et une mesure de la niche climatique que ces espèces occupent en Europe. En effet, les espèces qui nichent à des températures maximales moins élevées sont plus en déclin. Pour simplifier, les espèces septentrionales sont plus en déclin que les autres en France. Cette analyse s'est basée sur l'estimation du maximum thermique des espèces en Europe, à partir des données de température moyenne des mois de mars à août sur toutes les cases de l'atlas européen des oiseaux nicheurs où une espèce niche en Europe. En considérant les 5% des cases aux températures moyennes les plus élevées, on obtient le maximum thermique d'une espèce en Europe, à savoir les températures maximales sous lesquelles une espèce niche en Europe.

Si l'on considère ensuite les 15 espèces qui présentent le maximum thermique le plus faible, qui nichent en France et qui sont suivies par le STOC, on peut construire un indicateur qui synthétisera le devenir de ces espèces sensibles au réchauffement climatique. Cet indicateur est présenté sur la Figure 3, et atteste une diminution très importante de ces espèces, de l'ordre de 40%, ce qui est bien au-delà de ce que l'on constate pour les espèces spécialistes (que l'on retrouve en grande partie dans ce groupe d'espèces septentrionales).

⁴ Les 15 espèces « septentrionales » prises en compte sont les suivantes : pipit farlouse, pouillot fitis, mésange boréale, bouvreuil pivoine, roitelet huppé, accenteur mouchet, pouillot siffleur, mésange huppée, tarier des prés, bruant jaune, fauvette des jardins, pipit des arbres, corbeau freux, mésange nonnette et pigeon colombin.

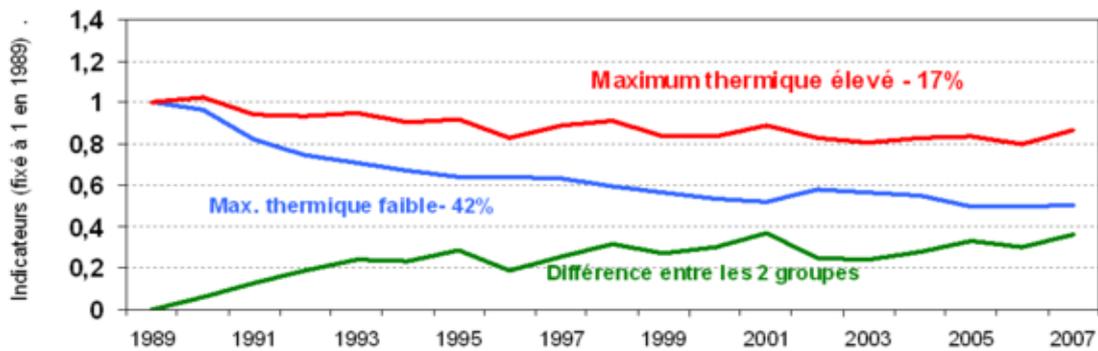


Figure 3 - Indicateur d'impact du changement climatique sur les oiseaux communs nicheurs sur la France métropolitaine et sur la période 1989-2007 (CRBPO-MNHN)

Dans le domaine marin, l'analyse des séries temporelles du Continuous plankton recorder (CPR) (Figure 4) a mis en évidence des changements significatifs dans l'abondance, la répartition, la structure des communautés et la dynamique des populations du plancton, principalement dus à l'augmentation de la température de surface et aux variations de l'hydrodynamisme. L'analyse taxinomique du plancton échantillonné par le CPR a aussi révélé des changements de nature phénologique, à savoir des désynchronisations entre cycles de développement dus à des décalages temporels qui diffèrent selon les taxons. L'amplitude et la vitesse des déplacements de l'aire de répartition des populations zooplanctoniques en réponse au changement climatique sont parmi les plus grandes conséquences observées chez les animaux, qu'ils soient marins ou terrestres.

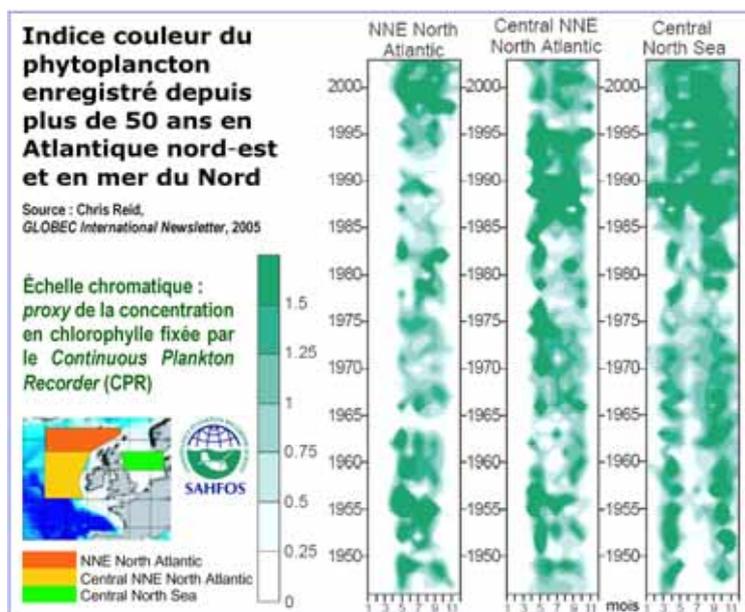


Figure 4 - Évolution mensuelle pluridécennale de l'indice couleur du CPR (proxy de la biomasse phytoplanctonique) (Reid et al., 1998, mis à jour)

En mer du Nord (cartouche, à droite), la concentration en chlorophylle augmente à partir du milieu des années 1980, et la période de production primaire s'étend (les booms de printemps et de fin d'été fusionnent). C'est l'une des manifestations locales d'un changement de régime climatique déterminé par une modification à grande échelle des forçages hydro-météorologiques (température, intensité et direction des vents, circulation des masses d'eau).

F.2.4 Expérimentations de terrain

Les expérimentations de terrain permettent de recréer, en conditions contrôlées, une partie des changements globaux attendus dans les prochaines années sur un écosystème ou une communauté d'espèces et d'en mesurer sa réponse ou résilience. On peut citer les expérimentations en milieu naturel où par exemple des écosystèmes naturels sont soumis à un réchauffement par système FATI (*Free Air Temperature Increase*) à l'aide de lampes infrarouge pour simuler des scénarios de changement de température sur la végétation, ou bien encore à une augmentation de la concentration en CO₂ par système FACE (*Free-Air CO₂ Enrichment*) pour mesurer son effet sur la croissance des cultures ou des forêts⁵. De manière plus intégrée, les Ecotrons⁶ permettent de recréer des écosystèmes naturels dans un environnement totalement contrôlé. Les quantités de nutriments, d'eau, de concentrations de gaz atmosphériques sont contrôlées et permettent de mesurer les effets interactifs entre ces différents composants sur la maintenance de la dynamique d'un écosystème.

Le degré de complexité et la difficulté de multiplier ces sites ultra-équipés en font des systèmes de référence impossibles à généraliser à l'ensemble de la biodiversité. À l'opposé des observations, le fait de contrôler toutes les arrivées sur le système permettent uniquement de mesurer les réponses du système aux variables d'intérêts mais ne permettent pas de savoir si *in situ* les réponses seront les mêmes. Les expérimentations sont souvent des systèmes très simplifiés qui n'existent pas forcément à l'état naturel en tant que tel, mais sont des représentations succinctes de systèmes de référence.

Les expérimentations sont toutefois indispensables pour valider des hypothèses sur le fonctionnement des espèces et écosystèmes et sont des sources d'information importantes pour paramétrer et éprouver les outils de modélisation.

⁵ www.carboeurope.org

⁶ <http://ecotron.fr/>

F.2.5 Modélisations

La modélisation consiste à créer une représentation simplifiée d'un système. Virtuellement, il existe donc autant de modèles que de questions. Pour étudier les effets possibles des changements globaux sur la biodiversité, trois types de modèles peuvent être discernés selon leur conceptualisation⁷ :

- a. modèles de niche ou d'habitat ;
- b. modèles de dynamique de la végétation ;
- c. modèles individus-centré.

a. Modèles de niche ou d'habitat

Ce premier type de modèle, de loin le plus utilisé dans le contexte du changement global, travaille à l'échelle de l'espèce ou du groupe d'espèces. Il relie de manière statistique la distribution actuelle d'une espèce donnée à des variables de milieu (climat, sol, végétation, utilisation des terres, etc.) permettant de déduire la niche écologique* de l'espèce, c'est-à-dire les conditions de milieu permettant à l'espèce de maintenir une population. La représentation géographique de cette niche peut ensuite être projetée dans le futur en fonction des différents scénarios de changements globaux envisagés et des espèces étudiées. Le choix des descripteurs du milieu est donc un aspect crucial dans la conception des modèles de niche, ainsi que le modèle statistique employé et de ses hypothèses de base.

L'intérêt premier de cette approche est le fait de pouvoir travailler sur un nombre illimité d'espèces animales ou végétales, si leur distribution est connue (ex. Biomod, Stash).

Le principal problème concerne leur concept corrélatif qui suggère que les espèces ne s'adapteront pas au changement et que leurs distributions actuelles reflètent parfaitement leurs exigences. Toutes les variables environnementales potentiellement explicatives n'ont pas forcément un lien de cause à effet avec la présence de l'espèce étudiée. La sélection des variables dans les modèles est donc une étape clé. Le second problème est que ces modèles sont calibrés à partir d'un jeu de données environnementales « actuel ». Si le changement climatique transforme les relations existant entre ces paramètres, les modèles de niches calibrés sur des périodes historiques ne sont plus valides pour le futur. On sait par exemple que, outre ses effets sur le climat, le CO₂ agit de façon directe sur la photosynthèse et la transpiration. Il est possible qu'au cours du siècle à venir cet effet « anti-transpirant » améliore le bilan hydrique des peuplements forestiers dans un contexte général de dégradation de ce bilan (augmentation des températures et diminution des précipitations). De telles rétroactions ne peuvent pas être prises en compte dans les modèles de niche.

D'autres modèles à base plus mécaniste existent. Par certains aspects, ils peuvent être également qualifiés de « modèles de niche » mais ils sont, en théorie, plus robustes que les modèles de niche purement statistiques. Ils permettent de modéliser la niche d'une espèce grâce à la connaissance fondamentale de quelques processus qui lui permettent de survivre et de se reproduire (ex. Phenofit, Biosim), ou d'estimer une croissance, une productivité, une mortalité (ex. Castanea) dans un milieu donné. Pour reprendre l'exemple ci-dessus, ces modèles peuvent intégrer les effets directs du CO₂ puisqu'ils intègrent les fonctions mathématiques décrivant la photosynthèse. Ces modèles peuvent donc être utilisés en dehors de leur période temporelle de calibrage et se révèlent d'une utilité croissante. Malheureusement, ces modèles requièrent un niveau de connaissance très important sur la biologie des espèces. Ils sont peu applicables à un grand nombre d'espèces et ne prennent en compte qu'un nombre limité de processus physiologiques.

⁷ À l'heure actuelle, tous ces modèles ou types de modèles, sont complémentaires. La confrontation de leurs résultats permettra de définir les zones de consensus et donc de limiter les incertitudes liées à leur conceptualisation.

b. Modèles de dynamique de la végétation

Les modèles globaux de dynamiques de végétation (ex. LPJ-GUESS, Caraib, Orchidée) travaillent à l'échelle de groupes d'espèces (« Types fonctionnels de plantes » ou TPF) et des écosystèmes.

Initialement développés pour estimer les échanges de matière (eaux, carbone...) et d'énergie entre la végétation et l'atmosphère, ils sont capables de simuler la quantité et le type de biomasse végétale présente dans un écosystème en fonction des conditions climatiques, de l'âge de la formation et des perturbations éventuelles engendrées par l'homme (gestion forestière, incendies) au travers de descriptions explicites des différents processus écophysologiques (photosynthèse, respiration, transpiration, allocation...) qui régissent les écosystèmes végétaux. Ces modèles sont partie intégrante des modèles de la dynamique climatique afin de rendre compte des effets rétroactifs que peut avoir la végétation sur le système climatique. Ils sont d'un intérêt fondamental pour l'étude des effets des changements globaux sur la productivité, le maintien et la dynamique des écosystèmes mais d'un intérêt moindre pour simuler la réponse de la biodiversité aux changements globaux, et ne fonctionnent que sur la végétation.

c. Modèles individus-centré

Il existe une multitude de modèles individus-centrés (ex. Zelig, TreeMig) qui travaillent à l'échelle de la parcelle ou du paysage. Initialement développés pour simuler la dynamique d'une espèce ou d'un écosystème particulier dans une zone bien définie et bien étudiée, ils ont l'intérêt d'être très précis et particulièrement robustes. Ce sont les outils de choix pour simuler la dynamique populationnelle d'espèces rares et protégées. Ils sont beaucoup plus limités pour la généralisation et la modélisation d'un grand nombre d'espèces compte tenu de la quantité d'information qu'ils nécessitent.

Encadré 6 - Quelques incertitudes liées à ces modèles

Pour les modèles de niche statistique, la première source d'incertitude provient des données utilisées pour la calibration : les données de présences/absence des espèces tout d'abord ; les données climatiques actuelles et les autres facteurs abiotiques ; les facteurs biotiques.

Il est également nécessaire d'insister sur l'absence totale d'informations concernant les facteurs biotiques : interactions entre les espèces ; avec la flore microbienne des sols ; avec les organismes pathogènes ; avec les usages anciens des terroirs ; avec les polluants atmosphériques, etc. Ces facteurs ne peuvent actuellement pas être pris en compte dans les modèles de tout type. D'une façon générale, il est très difficile de séparer les seuls effets liés au climat de l'ensemble des effets liés aux changements globaux.

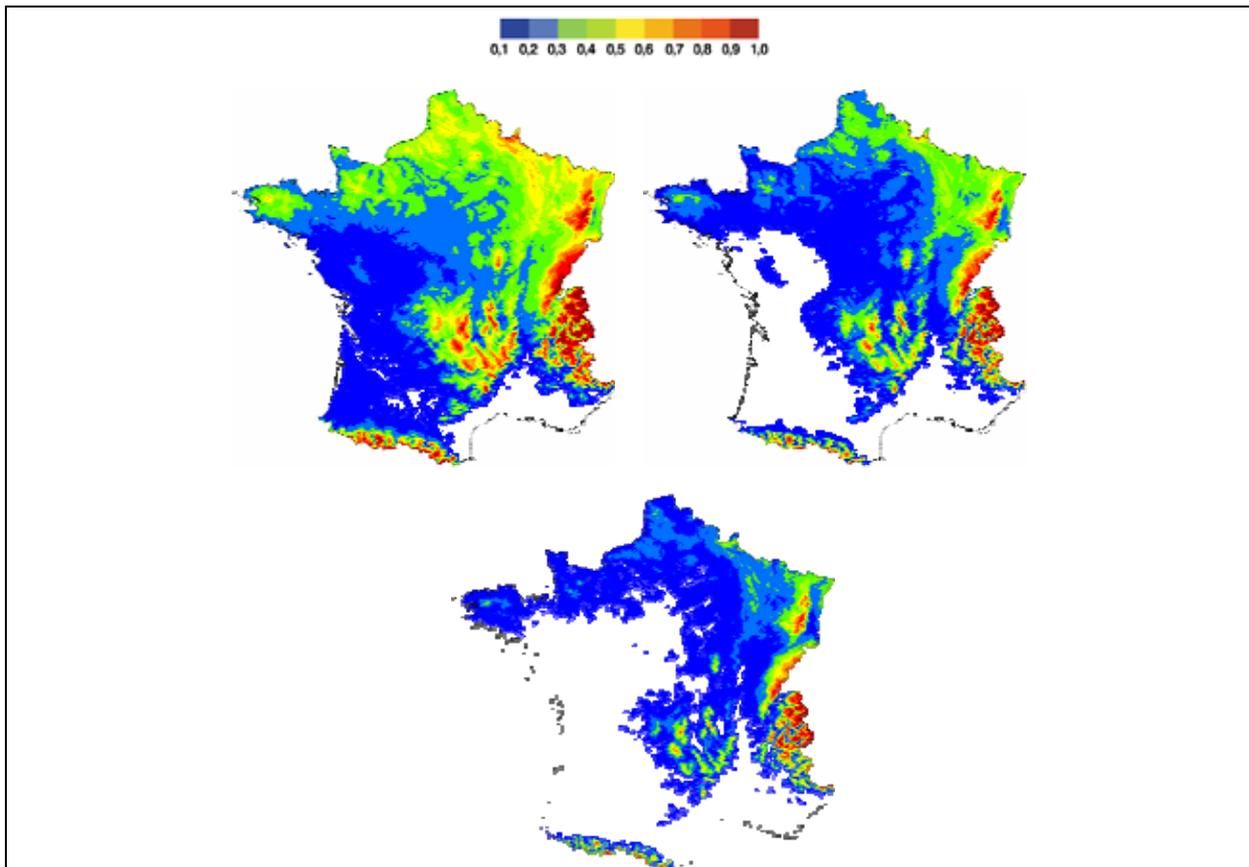
Une autre incertitude, concernant tous les modèles listés précédemment, repose sur la notion de dispersion. Aucun d'entre eux ne prend en compte explicitement les capacités de dispersion des espèces, due principalement à la difficulté de modéliser correctement le processus de dispersion. La plupart des modèles existants donne une vue soit optimiste (dispersion illimitée) soit pessimiste (pas de dispersion). Les modèles mécanistes sont *a priori*, et d'un point de vue conceptuel, plus robustes que les modèles de niche purement statistiques. Cependant, ils requièrent une connaissance approfondie des processus physiologiques et écophysiologiques propres à chaque espèce. Des avancées notables ont été réalisées depuis plusieurs années mais ces connaissances fondamentales ont été obtenues sur un nombre limité de grandes espèces ligneuses sociales intéressantes d'un point de vue économique (pin maritime, hêtre, chênes). De telles connaissances ne sont pas ou peu disponibles pour les essences dites secondaires, et encore moins pour toutes les espèces herbacées et muscinales composant la flore accompagnatrice et qui représentent, de loin, le plus gros réservoir de biodiversité végétale des forêts. Dans le domaine forestier, les incertitudes sur le fonctionnement des espèces s'ajoutent donc aux incertitudes sur le climat futur.

À ceci s'ajoutent les incertitudes liées aux modèles climatiques, aux scénarios d'émission, aux méthodes de désagrégation des projections climatiques.

Enfin, la plupart des modèles existants peuvent reproduire le « comportement » d'une espèce dans un climat « moyen ». Les changements graduels sont donc modélisables. Cependant, des changements brutaux sont à craindre, du type tempête, inondation, sécheresse extrême, mais ne peuvent pas, ou encore très difficilement, être modélisés. Pour les essences forestières en particulier, de nombreuses études ont montré que des stress subis une année donnée peuvent avoir des conséquences sur la physiologie des arbres (croissance, état sanitaire, etc.) pendant plusieurs années, voire plusieurs décennies. La persistance de ces « arrières effets » est très variable selon les espèces et les processus physiologiques conduisant à la mortalité sont encore mal connus.

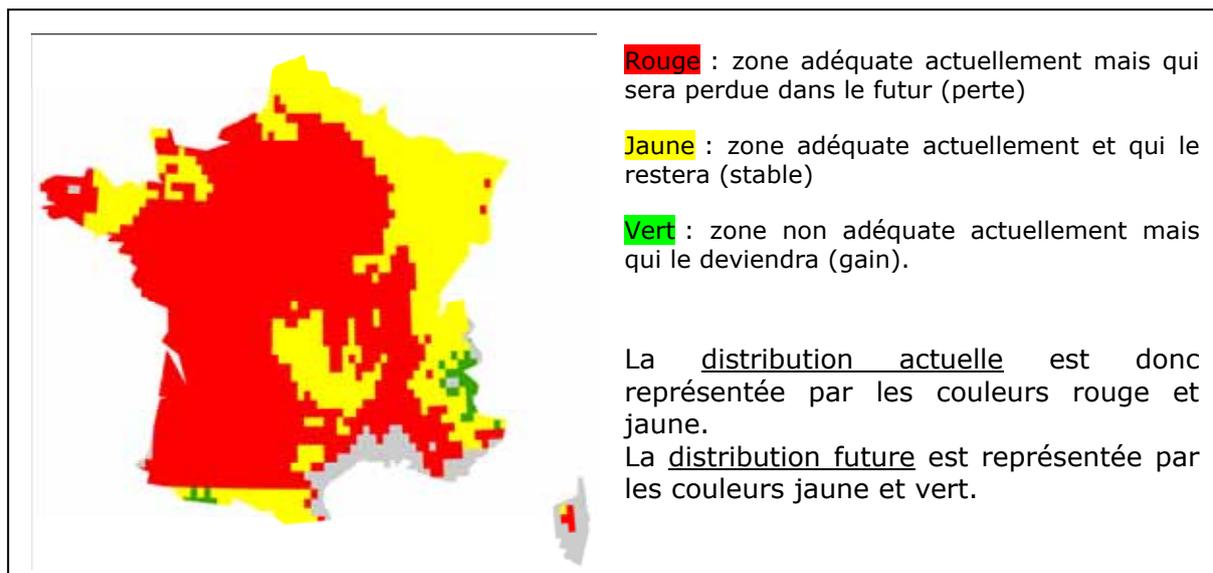
F.3 Future aire de répartition du hêtre : comparaison entre modèles

Cette annexe montre, à partir du cas du hêtre (*Fagus sylvatica*), la convergence des résultats obtenus malgré l'utilisation de modèles différents (présentés précédemment). Effectivement, ces résultats mettent en avant de fortes dissimilarités entre les prévisions à l'échelle locale et régionale en fonction du type de modèle de végétation utilisé. Mais ces résultats convergent tous vers une forte décroissance des performances des écosystèmes forestiers de type hêtraie sur la quasi totalité du territoire français.



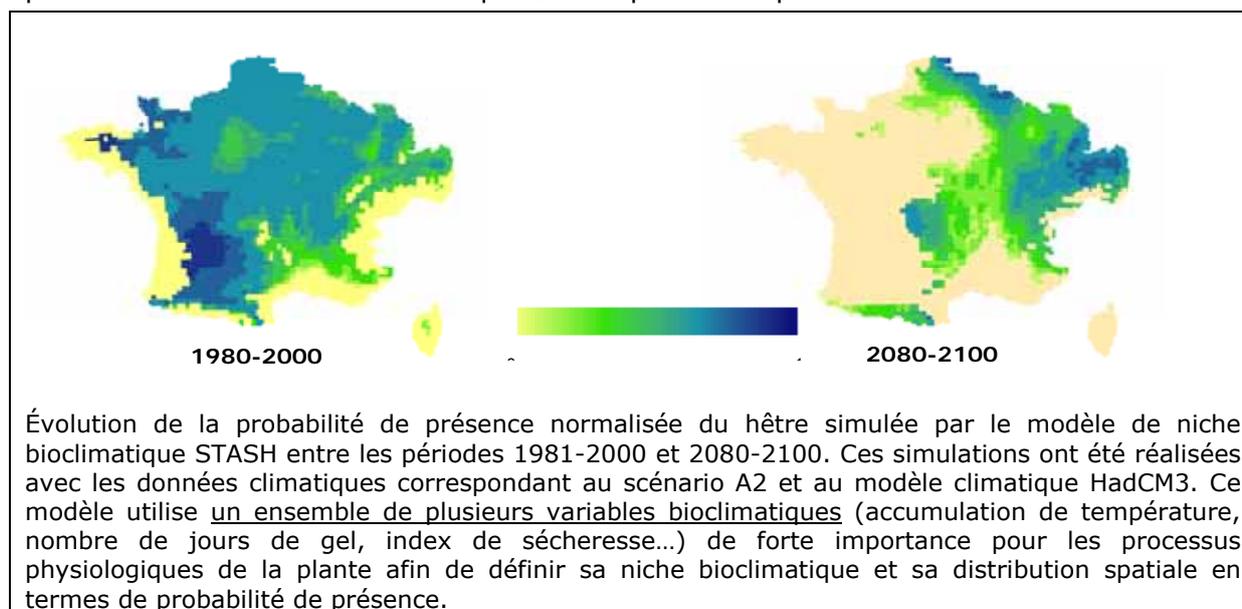
Carte 4 - Probabilité de présence du hêtre : simulation pour A2 de l'aire de répartition actuelle et extrapolations centrées sur les années 2050 et 2100 (projet CARBOFOR) (Badeau et al., 2009)

La niche climatique actuelle du hêtre est essentiellement déterminée par le bilan hydrique des mois de juin et juillet. Pour la période actuelle, le modèle simule une forte présence de l'espèce dans les zones de montagne, la moitié nord de la France (couleur verte à rouge) (voir Carte 4). L'espèce est moins présente dans le quart nord-ouest et totalement absente de la zone méditerranéenne. La niche climatique du hêtre pourrait régresser très fortement à partir de la région sud-ouest.



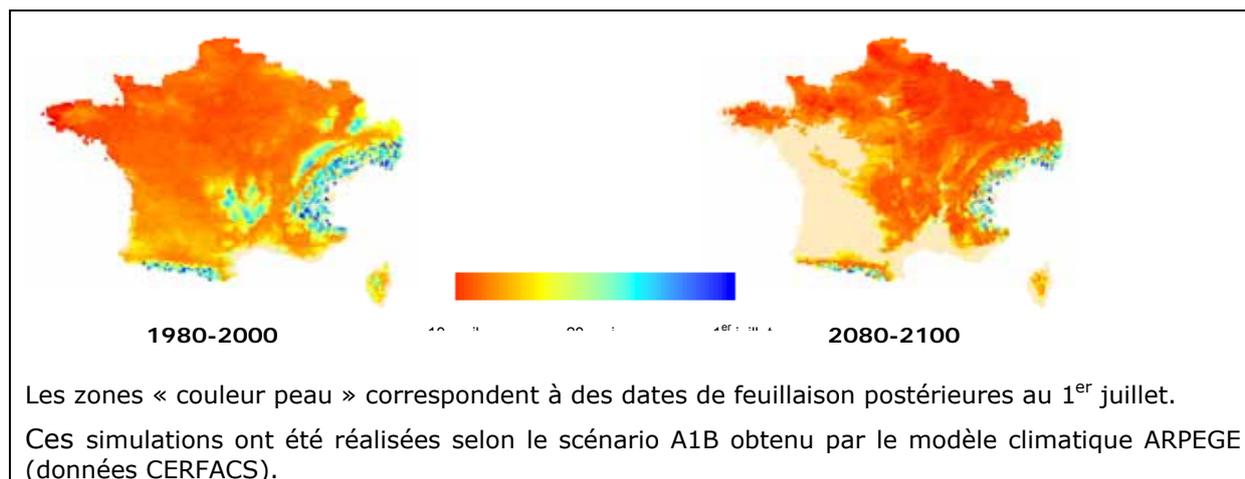
Carte 6 - Hêtre : Projection A2 pour 2080 par le modèle Biomod (Thuiller, 2009)

La Carte 7 présente l'évolution de la probabilité de présence normalisée du hêtre simulée par le modèle de niche bioclimatique STASH pour deux périodes.



Carte 7 - Simulation de la probabilité de présence normalisée du hêtre pour les périodes 1980-2000 et 2080-2100 (scénario A2, HadCM3) par le modèle STASH (Gritti, 2009)

La Carte 8 présente l'évolution de la date d'apparition des feuilles du hêtre prédite par le modèle Phenofit entre les périodes 1981-2000 et 2080-2100.

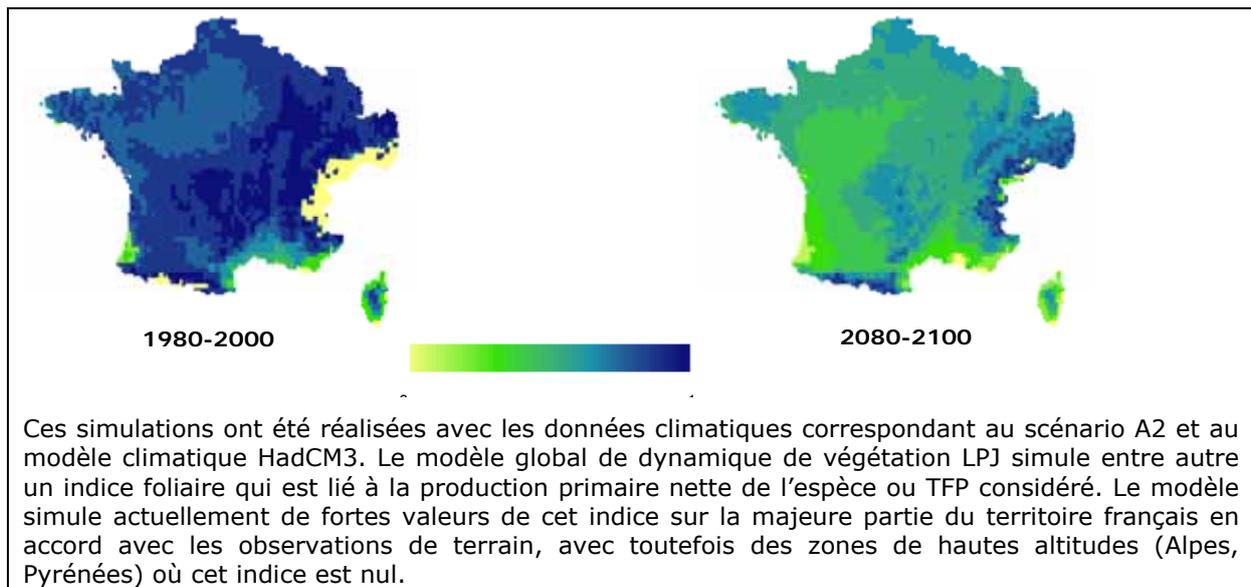


Carte 8 - Simulation de la date de feuillaison du hêtre pour les périodes 1980-2000 et 2080-2100 (scénario A1B, ARPEGE) par le modèle Phenofit (Gritti, Chuine, 2009)

Cette Carte 8 montre que dans certaines régions (sud, sud-ouest) le niveau de réchauffement atteint en 2100 dans le sud et le sud-ouest retarde fortement voire compromet la levée de dormance et par conséquent la feuillaison. Cette dernière deviendra très tardive voire trop tardive pour permettre à l'espèce de se maintenir (reproduction et croissance compromise)⁸.

La Carte 9 présente l'évolution de l'indice foliaire normalisé du type fonctionnel de plantes (TFP) « Arbres décidus tempérés », auquel appartient le hêtre (au même titre que les feuillus tempérés, la végétation ligneuse méditerranéenne...), prédite par le modèle LPJ entre deux périodes.

⁸ Ceci peut sembler paradoxal étant donné que les tendances actuelles montrent une précocité de ce type d'événements à cause du changement climatique. Ce résultat montre l'importance de travailler avec des modèles basés sur des processus et non des approches corrélatives. En effet, la date de feuillaison dépend de deux processus qui se succèdent au cours de l'année, à savoir la levée de dormance du bourgeon – nécessitant une exposition plus ou moins longue à des températures froides – et la croissance cellulaire – nécessitant quant à elle des températures plus élevées. Le changement climatique a donc un impact inverse sur ces deux phases et seuls des modèles tenant compte de cette complexité biologique peuvent fournir des projections fiables. 32



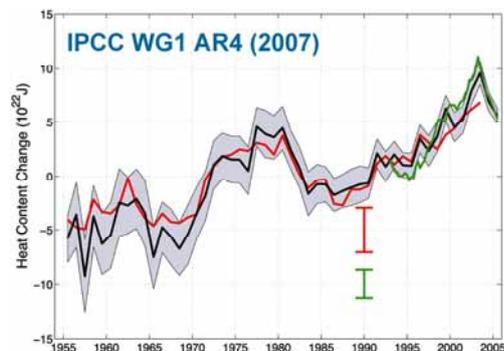
Carte 9 - Simulation de l'indice foliaire normalisé du groupe fonctionnel « Arbres décidus tempérés » tel le hêtre, pour les périodes 1980-2000 et 2080-2100 (scénario A2, HadCM3) par le modèle LPJ (Gritti, 2009)

Le modèle LPJ ne prévoit pas à l'avenir de disparition totale des arbres tempérés décidus à l'horizon 2100 en France (Carte 9), mais néanmoins une forte décroissance de l'indice foliaire normalisé et de la productivité sur la quasi-totalité du territoire, notamment dans le sud-ouest, avec cependant une croissance aux plus hautes altitudes.

F.4 Exemples d'impacts directs sur les écosystèmes marins

F.4.1 Cadre physique

L'analyse des mesures réalisées depuis le milieu du XX^{ème} siècle atteste l'augmentation du contenu thermique de l'océan mondial. La tendance est révélée tant à l'échelle globale qu'à l'échelle des bassins océaniques (Figure 5).



Pendant la période 1961-2003, la quantité de chaleur de la couche 0-3000 m de l'océan a augmenté de $1,42 \pm 2,4 \times 10^{22}$ Joules, soit un accroissement moyen de température de $0,037^\circ\text{C}$ de l'ensemble de l'Océan (volume total).

Le Pacifique s'est réchauffé en même temps que l'Atlantique, l'océan Indien à partir des années 1960.

Figure 5 : Réchauffement de l'océan mondial, 1955-2005 (couche 0-700 m) (GIEC, 2007)

En Atlantique nord-est, les eaux superficielles se sont réchauffées d'environ 1°C depuis la décennie 1970, avec des différences spatiales de l'accroissement des températures de surface (de 1 à 2°C en mer du Nord, de $0,4$ à $0,8^\circ\text{C}$ au large du plateau continental européen, cf. Figure 6).

Accroissements de température calculés entre les valeurs moyennes des périodes 2003-2007 d'une part, et 1978-1982 d'autre part. À cette échelle est observé un signal qui résulte à la fois du réchauffement global et des variations climatiques régionales, l'amplitude des secondes l'emportant encore sur celle du premier à la fin du XX^{ème} siècle.

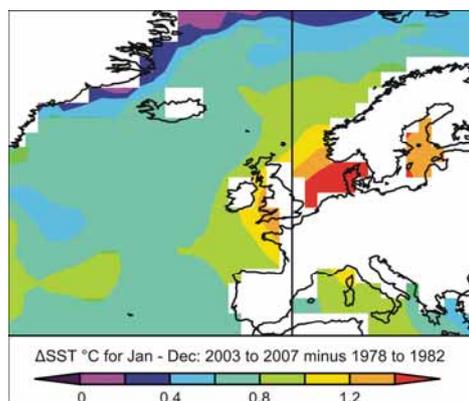


Figure 6 - Augmentation de la température de surface de l'Atlantique nord-est (Tasker M.L., 2008)

F.4.2 Impacts directs du changement climatique sur le milieu marin

a) la physiologie des organismes

Progresser dans la prévision des impacts du changement climatique sur la biodiversité marine requiert la prise en compte simultanée des principaux facteurs à l'œuvre dans le monde réel, en particulier la co-occurrence du réchauffement et de l'acidification progressifs de l'océan. La sensibilité au climat des ectothermes marins (invertébrés et poissons) intègre les effets conjugués de l'accroissement de température, de l'excès de CO_2 et du déficit en oxygène, qui concourent à altérer leurs performances physiologiques (Figure 7).

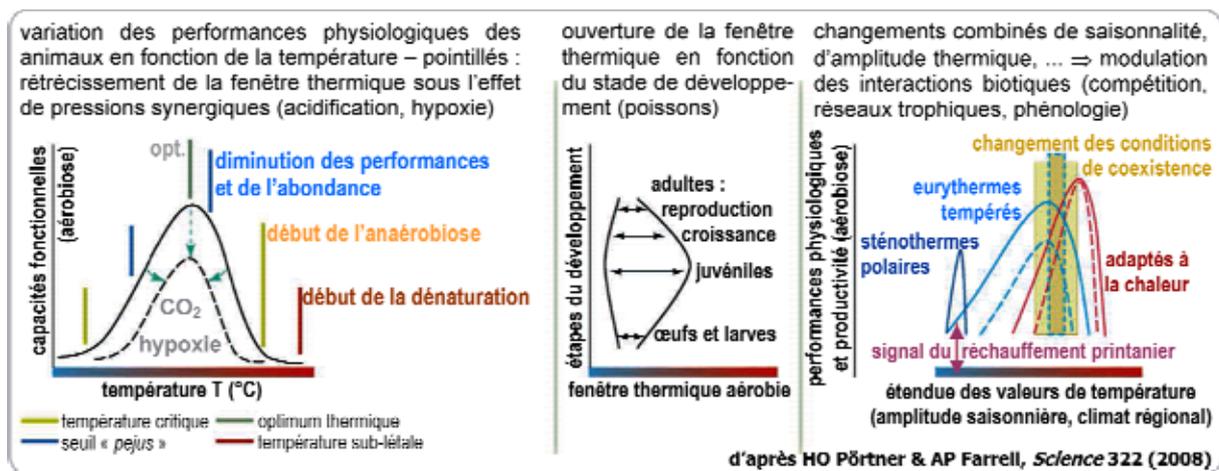


Figure 7 - Synergie (température \times (CO₂) \times (O₂)) ; effets sur les capacités fonctionnelles des ectothermes marins (Pörtner H.-O., Farrell A. P., 2008)

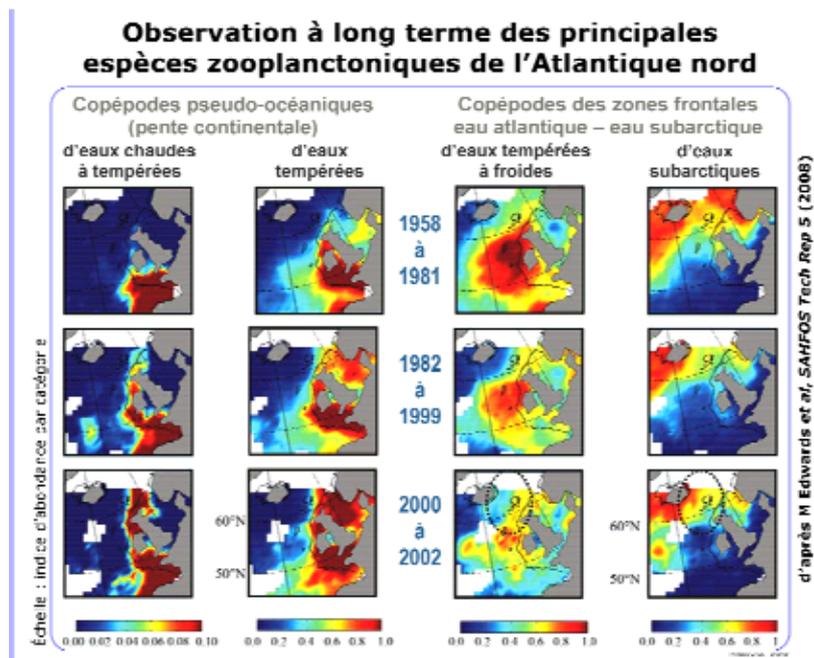
À gauche, fenêtre de tolérance thermique des ectothermes aquatiques, centrée sur l'optimum des performances fonctionnelles en conditions aérobies (les animaux vivent dans un intervalle de température limité par un ensemble de seuils de viabilité de processus moléculaires, cellulaires et systémiques). Le changement climatique conduit au franchissement de différents seuils, et entraîne une dégradation des performances de croissance, de reproduction, etc. Au delà de la température critique commence la survie en anaérobiose, temporairement utilisée par les invertébrés des habitats intertidaux soumis à des conditions très variables. En pointillés : les effets conjugués de l'augmentation de p(CO₂) et de l'hypoxie diminuent les performances et rétrécissent la largeur de la fenêtre.

Au centre : variation de l'ouverture de la fenêtre au cours du développement individuel.

À droite : exemple théorique d'organismes de thermotolérances différentes, et dont les aires de répartition se chevauchent. Le réchauffement désynchronise les processus saisonniers (phénologie). En rétrécissant les fenêtres de thermotolérance (pointillés), l'acidification et l'hypoxie accentuent le changement des conditions de coexistence au sein de l'écosystème.

b) la distribution géographique d'espèces

- *Le zooplancton* : l'amplitude et la vitesse des déplacements de l'aire de répartition des populations zooplanctoniques en réponse au changement climatique sont parmi les plus grandes conséquences observées chez les animaux, qu'ils soient marins ou terrestres. Les données (Figure 8). En Atlantique nord-est, les Copépodes affines d'eaux chaudes ont progressé en 50 ans de plus de 1100km vers le nord, tandis que l'aire de répartition des Copépodes arctiques s'est contractée. Ces décalages sont considérés comme une conséquence du réchauffement régional (de l'ordre de 1°C), mais ils pourraient aussi être en partie expliqués par le renforcement de la circulation sud-nord des masses d'eau le long de l'accor* du plateau continental ouest-européen.



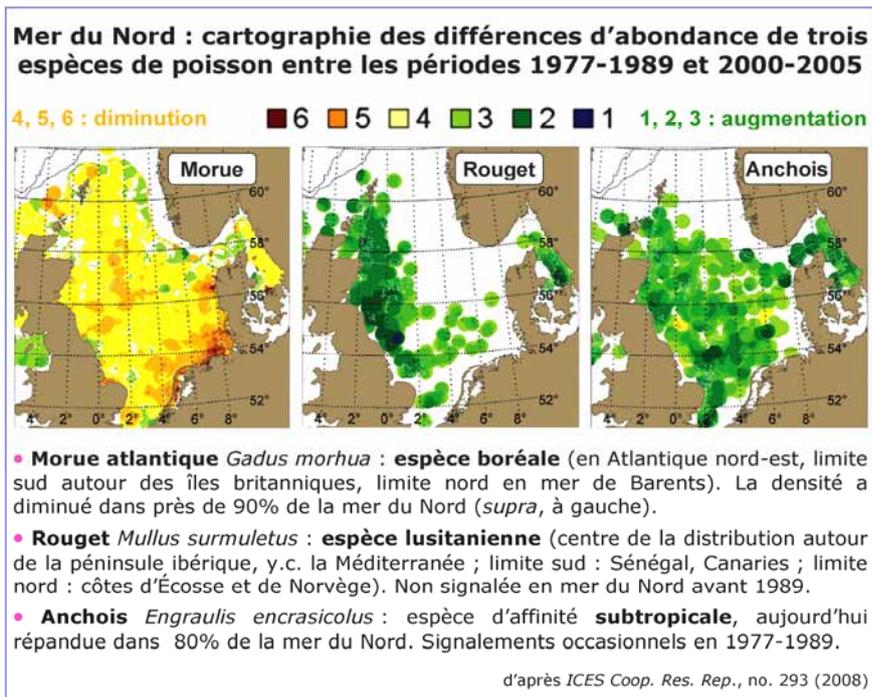
Déplacement de plus de 10° vers le nord en 30 ans chez certaines espèces (ca. 260 km/décennie). L'aire de répartition s'accroît en direction du nord (espèces pseudo-océaniques d'eaux tempérées à chaudes), ou se rétrécit (espèces d'eaux tempérées à froides, dont l'abondance diminue). La limite sud de l'aire de répartition des espèces subarctiques progresse vers le nord. L'accroissement du plateau continental (sonde des 200 m) est figurée par une ligne noire.

Figure 8 - Déplacement latitudinal des Copépodes en Atlantique nord-est (Beaugrand et al., 2002, mis à jour).

- *Le benthos* : les frontières biogéographiques des autres organismes marins se déplacent elles aussi, par ex. chez les deux tiers des espèces de la macrofaune benthique de mer du Nord. Outre l'effet direct de la température, le benthos* des mers épicontinentales* subit les modifications de l'hydrodynamisme (transport des stades larvaires planctoniques, modification des sédiments superficiels), de l'influence du régime des précipitations sur le volume et la qualité de l'eau des apports fluviaux (salinité, turbidité, nutriments). L'analyse des données met en évidence le fort impact sur le benthos des événements climatiques extrêmes (spécialement les hivers « anormalement froids »).

- *Les poissons* : on a remarqué depuis plusieurs décennies l'effet des fluctuations climatiques sur les populations de poissons (par ex. la progression de la morue atlantique le long des côtes groenlandaises au cours des années 1920). Plus récemment a été mise en évidence en mer du Nord une modification (en latitude et/ou profondeur, entre 1977 et 2001) de l'aire de répartition de plusieurs espèces de poissons – aussi bien exploitées que non exploitées. Globalement, ces réponses au réchauffement tendent à être plus marquées chez les espèces à plus fort taux de renouvellement (espèces de petite taille et à maturation précoce).

Le CIEM (Conseil international pour l'exploration de la mer) a publié en 2008 une synthèse des effets du changement climatique sur la distribution et l'abondance des espèces marines en Atlantique nord-est. Cette synthèse inclut une méta-analyse des données disponibles pour les poissons de l'ensemble de la zone maritime OSPAR (délimitée par les méridiens 51°E, 44°W, et par le parallèle 36°N), réalisée suivant la démarche exposée par Rosenzweig *et al.* (2008). La répartition géographique de 46 espèces parmi 67 a été modifiée comme attendu, contrairement aux prévisions pour 10 espèces, et 11 espèces n'ont montré aucun changement (pour l'abondance, les résultats sont respectivement 32, 13 et 19 espèces sur un total de 64). Trois exemples extraits de cette étude apparaissent à la Figure 9.



La figure illustre la diminution d'abondance (coloration jaune-orangé à rouge) dans la partie méridionale de l'aire de répartition de la morue, et l'accroissement (coloration vert à bleu foncé) dans la partie septentrionale de l'aire de répartition du rouget et de l'anchois. Les cartes montrent les différences locales entre densités observées en 2000-2005 d'une part, et les densités correspondantes de la période de référence 1977-1989.

Figure 9 - Variation d'abondance de trois espèces de poissons en mer du Nord (ICES, 2008)

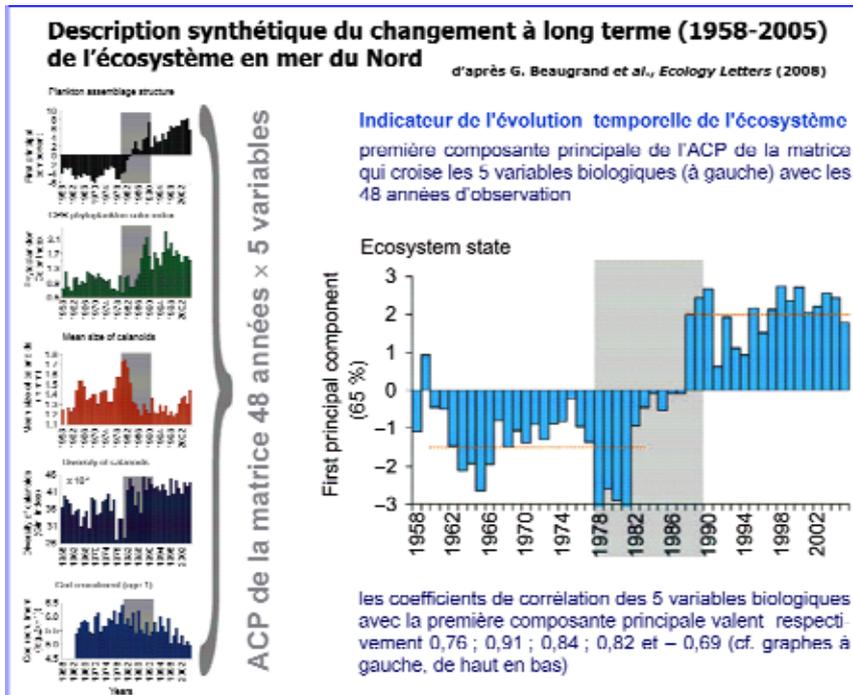
Globalement, la méta-analyse étendue à 288 taxons (zooplancton, benthos, poissons, oiseaux de mer) de la zone maritime OSPAR établit que chez 223 d'entre eux (77%), les changements (de distribution spatiale, d'abondance et de phénologie) confortent l'hypothèse d'un effet du changement climatique. Rappelons que les façades métropolitaines françaises – sauf la façade méditerranéenne – sont incluses dans la Convention OSPAR.

c) la structure des communautés

En domaine marin, on connaît plusieurs exemples de changement de régime (*regime shift*). Il s'agit d'un changement d'état abrupt de l'écosystème (la soudaineté étant relative au temps caractéristique de renouvellement des prédateurs supérieurs), dont le déterminisme est le plus souvent climatique, associé à d'autres causes anthropiques. En mer du Nord, un tel basculement s'est produit au cours des années 1982-88 (Figure 10) suite à une modification des forçages météo-océaniques (en 40 ans, de 1958 à 1997, la vitesse moyenne annuelle du vent a augmenté de 10%, et, au cours de la décennie 1988-1997, les vents de sud deviennent moins intenses et sont remplacés par des vents d'ouest à sud-ouest), ainsi qu'à un accroissement du flux advectif* d'eau océanique (chaude) entrant en mer du Nord.

D'autres changements de régime de plus ou moins grande emprise spatio-temporelle ont été identifiés dans plusieurs écosystèmes marins. À l'échelle d'un bassin océanique et sur un période de plusieurs décennies, on peut citer l'exemple des anomalies de la variabilité de descripteurs biologiques observés dans le Pacifique nord (biomasse du zooplancton, captures de saumons sur la côte ouest des USA), qui mettent en évidence un basculement à la fin des années 1970, en cohérence avec le changement des forçages météo-océaniques révélés par l'indice PDO (*Pacific decadal oscillation*, oscillation couplée océan-atmosphère). À moindre échelle, citons le changement de régime de l'écosystème récifal de la Jamaïque au début des années 1980. En 1 à 2 ans, un pathogène a provoqué la quasi-disparition des oursins diadème (chute d'abondance de 99%). Délivrées de la pression du broutage, les algues brunes ont proliféré jusqu'à envahir les coraux pendant une vingtaine d'années. La résilience de l'écosystème avait été préalablement affaiblie

par des modifications des pratiques agricoles sur les bassins versants (avec rejets de fertilisants), et par la diminution d'abondance des poissons herbivores due à la pêche.



À gauche, de haut en bas : indice planctonique, indice couleur du CPR (proxy de la concentration en chlorophylle a), taille moyenne des Copépodes calanoïdes femelles, diversité des Copépodes calanoïdes (indice de Gini), recrutement de la morue *Gadus morhua*, (logarithme décimal du nombre de morues âgées de 1 an). Quatre premiers descripteurs : données du CPR, 1958-2005. 5^{ème} descripteur : données CIEM, 1963-2005.

À droite : indice synthétique du changement d'état de l'écosystème (première composante principale de l'analyse de la matrice années x variables biologiques).

Figure 10 - Changement de régime de l'écosystème (mer du Nord, années 1980) (Beaugrand et al., 2008)

d) la phénologie

L'analyse taxinomique du plancton de mer du Nord a révélé des changements de nature phénologique, en comparant, pour les années 1958 et 2002, les mois du maximum d'abondance de 66 taxons. Il n'apparaît pas de « patron commun », mais des désynchronisations entre cycles de développement dus à des décalages temporels qui diffèrent selon les taxons. En 2002 par exemple, le « pic » des larves d'Échinodermes apparaît près de 50 jours plus tôt, tendance générale chez les organismes méroplanctoniques*. De même, le pic des Dinoflagellés est en avance de 24 à 27 jours selon les genres. C'est chez les Diatomées que la variabilité des changements est la plus forte, les booms étant plus précoces, plus tardifs ou sans changement selon les espèces.

F.5 Présentation de différentes méthodes de monétarisation

Elles sont ici présentées selon une typologie classique.

F.5.1 Les méthodes basées sur les coûts

a) Méthode des coûts de remplacement

Cette méthode consiste à évaluer le coût induit par le remplacement d'un actif environnemental détruit. Des variantes peuvent s'intéresser au coût de restauration ou de relocalisation.

Il s'agit ici d'estimer les dépenses nécessaires pour restaurer la biodiversité, (notamment les services écosystémiques), détruite qualitativement et quantitativement.

Remarque : il faut noter ici que l'on cherche aujourd'hui en Europe d'abord à restaurer, puis à remplacer, et enfin à compenser.

b) Méthode des coûts évités

Il s'agit ici d'évaluer les coûts que l'on devrait supporter en l'absence du bien environnemental étudié. En effet les services rendus par ce bien pourraient être artificiellement remplacés mais moyennant un certain coût. Ex : les Catskill Mountains sont des collines proches de New York où la ville se fournit en eau. La qualité de l'eau s'étant détériorée, la ville a alors estimé le prix de la construction d'une station de purification à huit milliards de dollars. Il a finalement été choisi de restaurer les milieux naturels pour une somme dix fois moindre, ce qui a permis de rétablir la qualité de l'eau.

c) La méthode des coûts de la maladie

La dégradation d'un bien environnemental peut conduire à une morbidité et une mortalité accrue ainsi qu'à une augmentation des dépenses de santé. Le chiffrage de ces coûts, notamment par la définition de relations dose-réponse, permet d'estimer un coût de la dégradation du bien étudié. Cette méthode est peu utilisée dans le cas de la biodiversité ; son utilisation est en revanche plus courante pour donner une valeur à la qualité de l'air.

F.5.2 Les méthodes basées sur les préférences individuelles

a) Les préférences révélées

- ***La méthode des dépenses de protection***

La valeur d'un bien environnemental peut être déduite des dépenses que les agents engagent pour prévenir, neutraliser ou atténuer les conséquences de la dégradation de ce bien. Ex : la valeur d'une eau de qualité peut être évaluée par les dépenses engagées par les consommateurs pour purifier leur eau (pastilles, filtres...).

- ***Méthode du changement de productivité***

Lorsqu'un bien environnemental est dégradé, sa fonction de production peut être atteinte. La perte de valeur du bien peut alors être mesurée à l'aune du changement de productivité induit par sa dégradation. La variation de valeur de récifs coralliens due à différents facteurs a ainsi pu être déterminée à partir de la baisse de l'intensité de pêche.

- ***Méthode des coûts de déplacement***

Une manière simple d'attribuer une valeur à un bien environnemental consiste ici à évaluer les coûts de transports engagés pour profiter de ce bien, ainsi que le coût du temps correspondant nécessaire pour y accéder. Une étude a ainsi permis de valoriser les forêts du Costa-Rica en étudiant le déplacement de touristes américains vers cet Etat.

- ***Méthode des prix hédoniques***

Cette méthode repose sur le fait que la valeur de certains biens, en particulier immobiliers, reflète en partie la qualité de son environnement. En comparant le prix de biens semblables en tout point, excepté en ce qui concerne leur environnement, on peut extraire la composante de prix du bien due à l'environnement et ainsi proposer une valeur de cet environnement. Cette méthode est fréquemment employée pour évaluer la perte de valeur de bien immobilier en lien avec les nuisances environnantes, ou a contrario le gain de valeur que représente un environnement mieux sécurisé, ou plus agréable.

b) Les préférences déclarées

- ***Méthode d'évaluation contingente***

Comme son nom l'indique, il s'agit ici d'évaluer la valeur d'un bien environnemental par le biais d'un marché contingent, c'est à dire qu'après leur avoir décrit les caractéristiques du bien à évaluer, on interroge les agents sur la somme qu'ils seraient prêts à payer pour le préserver ou a contrario, celle qu'ils seraient prêts à recevoir pour compenser une dégradation de celui-ci. Avec cette méthode, plusieurs études ont évalué le consentement à payer des riverains pour préserver des zones humides à plusieurs centaines d'euros par hectare.

- ***Méthode d'expérience de choix***

D'après la théorie de Lancaster, l'utilité d'un bien est égale à la somme des utilités procurées par ses différents attributs. Dans le cadre d'enquêtes, on fait donc choisir à des agents différentes alternatives possibles avec à chaque fois des combinaisons des divers attributs associés à des niveaux différents. Dans chaque ensemble de choix, deux alternatives sont proposées plus la situation de référence, le statu quo. L'analyse statistique permet ensuite d'attribuer une valeur à chaque niveau d'attribut du bien envisagé, et donc, en sommant, du bien dans sa globalité. Ex : l'évaluation de certaines zones humides a été conduite selon cette méthode.

F.6 Démarche du Centre d'Analyse Stratégique pour l'évaluation économique de la biodiversité et des services écosystémiques

Pour conduire son évaluation de la valeur économique de la biodiversité, le rapport du Centre d'Analyse Stratégique a pris les options suivantes, résumées par la Figure 17 de la Partie 2 et la Figure 11 du présent rapport.

1. La première option a été de privilégier la compilation d'estimations aussi fiables que possible **de la totalité des pertes pouvant résulter de la destruction d'un écosystème** et devant être supportées (ou compensées) par la société. Il conviendra donc d'évaluer de même, dans un aménagement éventuel, la valeur écologique du nouvel écosystème mis en place pour faire un bilan de l'ampleur des pertes réelles.

2. En considérant les données disponibles, mais également l'absence d'objectifs opérationnels⁹ et de variables de contrôle¹⁰ pouvant fonder une approche coût/efficacité, **le CAS a décidé de construire ses valeurs de référence sur une analyse coût/avantage**. Il s'est néanmoins interrogé sur l'efficacité éventuelle de ce référentiel, c'est-à-dire sur sa capacité d'incitation à reconsidérer des changements d'usage du territoire, en particulier la destruction des zones à couvert végétal permanent (forêts, prairies).

3. Compte tenu de la complexité de la notion de biodiversité, il a été proposé de **distinguer deux composantes** :

- **l'une, qualifiée de « remarquable »**, correspondant à des entités (des gènes, des espèces, des habitats, des paysages) que la société a identifiées comme ayant une valeur intrinsèque et fondée principalement sur d'autres valeurs qu'économiques ;
- **l'autre, qualifiée de « générale »** (ou « ordinaire »), n'ayant pas de valeur intrinsèque identifiée comme telle mais qui, par l'abondance et les multiples interactions entre ses entités, contribuent fortement au fonctionnement des écosystèmes et à la production des services dont bénéficient nos sociétés.

On soulignera que **la caractérisation des entités « remarquables » n'est pas purement biologique** : elle combine en effet des critères écologiques (la rareté), sociologiques (le caractère « patrimonial »), économiques (la prédominance des valeurs de non-usage sur les valeurs d'usage) et, éventuellement, juridiques (inscription sur une liste officielle de protection).

4. Quatrième option, liée à la précédente, le rapport du CAS propose, même s'il a fait l'analyse des évaluations économiques possibles de la **biodiversité remarquable, de n'utiliser ces évaluations que de manière subsidiaire dans les débats autour de la préservation de ces entités**. Autrement dit, le rapport considère qu'il n'est aujourd'hui ni crédible – en termes de fiabilité et de pertinence des estimations –, ni opportun – en termes d'insertion dans des débats mobilisant de nombreuses valeurs –, de proposer des valeurs de référence pour la biodiversité remarquable.

⁹ L'objectif « d'arrêter la perte de biodiversité d'ici à 2010 » a été considéré comme insuffisamment précis pour pouvoir être utilisé.

¹⁰ C'est-à-dire des variables agissant sur l'érosion de la biodiversité, à l'image des émissions de CO₂ pour le climat.

5. En ce qui concerne la **biodiversité générale**, le rapport propose de **ne pas chercher à l'évaluer directement mais de le faire à partir des services des écosystèmes dont profite la société**. L'hypothèse sous-jacente, argumentée dans le rapport, est celle d'une relation de proportionnalité entre les fluctuations de la biodiversité et l'ampleur de ces services. Cette option s'appuie en particulier sur le fait que, contrairement à la biodiversité remarquable, cette biodiversité générale est aujourd'hui perçue de manière imprécise par les citoyens et que ce déficit de perception limite la pertinence des méthodes d'estimation directe fondées sur la déclaration de préférences.

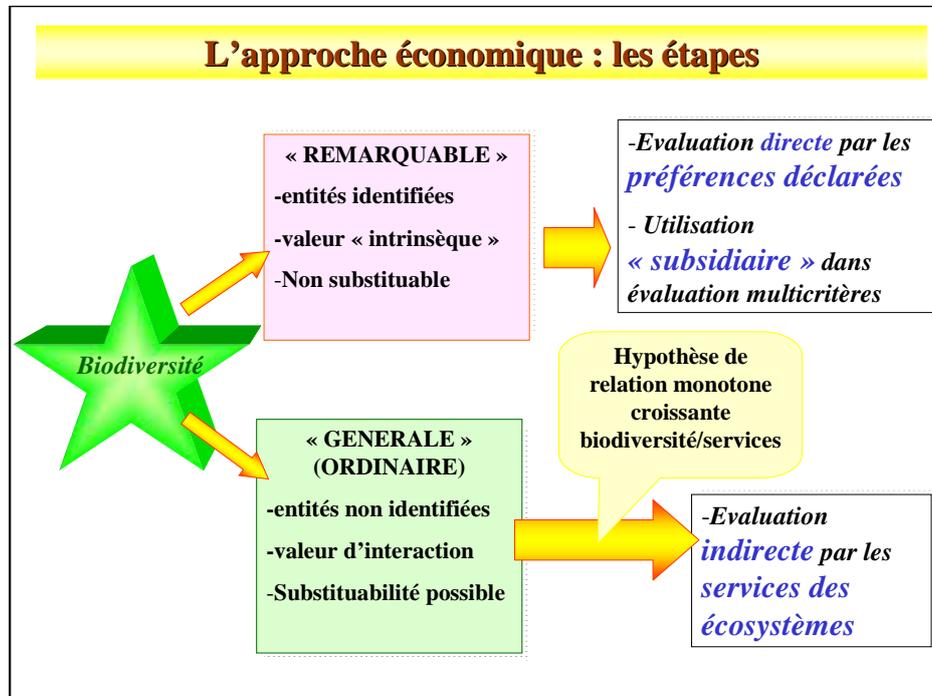


Figure 11 - La démarche d'analyse économique de la biodiversité retenue par le CAS (CAS, 2009)

6. Pour évaluer ces services, le rapport s'est appuyé sur la classification proposée par le Millenium Ecosystem Assessment (évaluation des écosystèmes pour le millénaire). Cette classification distingue quatre ensembles, les « services d'auto-entretien », non directement utilisés par l'homme mais qui conditionnent le bon fonctionnement des écosystèmes (recyclage des nutriments, production primaire), les « services d'approvisionnement » (ou « de prélèvement »), qui conduisent à des biens appropriables (aliments, matériaux et fibres, eau douce, bioénergies), les « services de régulation » c'est-à-dire la capacité à moduler dans un sens favorable à l'homme des phénomènes comme le climat, l'occurrence et l'ampleur des maladies ou différents aspects du cycle de l'eau (crues, étiages, qualité physico-chimique) et, enfin, des « services culturels », à savoir l'utilisation des écosystèmes à des fins récréatives, esthétiques et spirituelles.

7. Le rapport a proposé, notamment pour éviter les doubles comptes éventuels, de ne pas évaluer les services d'auto-entretien, en considérant qu'ils conditionnent de fait la permanence des trois autres ensembles de services : ils seront donc, comme la biodiversité, évalués à travers les services qu'ils génèrent et entretiennent.

8. En lien avec le premier point, le rapport a décidé de prendre en compte non seulement des services « dynamiques », c'est-à-dire en termes de flux (fixation du carbone, production d'eau, fréquentation touristique, etc.) mais aussi des services « statiques » (stabilité des sols, conservation d'un stock de carbone). Il a considéré en effet que la valeur de la perte potentielle de ces services en cas de destruction de

l'écosystème (augmentation de l'érosion, libération plus ou moins rapide de CO₂) devait être retranchée du bilan socio-économique d'une opération qui entraînerait cette destruction, ce qui revient à porter cette perte évitée au crédit de ces écosystèmes.

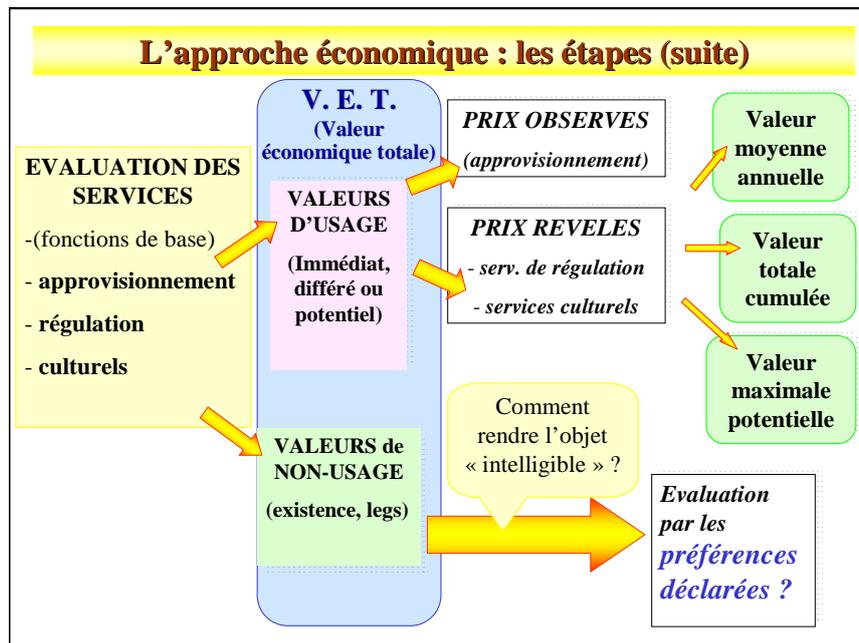


Figure 12 - L'approche par les services écosystémiques

9. Parmi les différentes composantes de la notion de valeur économique totale, **le rapport a privilégié les valeurs d'usage** (au sens large, c'est-à-dire en intégrant les usages potentiels à plus ou moins long terme). Il a considéré en effet que, comme pour la biodiversité remarquable, la robustesse des méthodes d'estimation des valeurs de non-usage était plus faible et leur légitimité davantage contestée. Corrélativement, **le rapport a privilégié pour l'estimation de ces valeurs d'usage des méthodes considérées comme robustes** (prix révélés, dépenses effectivement engagées, coûts de restauration ou de remplacement).

10. Compte tenu des problèmes complexes de transfert de valeurs, **le rapport s'est limité aux services pour lesquels on disposait de références françaises (ou issues de pays écologiquement et socioéconomiquement voisins)** et qui, en outre, fournissaient un référentiel relativement homogène (ou dont l'hétérogénéité pouvait être aisément expliquée). Il en résulte que **certains services** (par exemple les effets sur la santé ou la protection contre les catastrophes naturelles), **pour lesquels les références étaient limitées, incohérentes ou très exotiques, n'ont pas été évalués, même s'il est légitime de supposer que leur valeur pourrait être élevée – voire très élevée.**

11. Pour prendre en compte le long terme, le rapport a reconnu **qu'il n'était pas opportun d'utiliser un taux d'actualisation différent de celui utilisé pour d'autres aspects du calcul socioéconomique** (4% aujourd'hui). En revanche, il propose de retenir jusqu'en 2050 une **augmentation moyenne des prix relatifs** des services écosystémiques d'environ 1% (voire plus dans les situations de pertes irremplaçables) par rapport aux biens manufacturés. Ceci conduit à multiplier par 40 la valeur du service annuel pour obtenir une **valeur totale cumulée actualisée.**

12. Pour affiner à court terme ce travail, le rapport recommande en particulier :

- de **spatialiser les valeurs moyennes** à une échelle au moins départementale,

pour tenir compte des spécificités tant écologiques que socioéconomiques ;

- de **définir** pour ces données spatialisées non seulement la valeur actuelle mais ce qu'il a appelé la « **valeur maximale plausible** » à **moyen terme** (30-50 ans), en intégrant en particulier les variations prévisibles du taux d'usage des différents services écosystémiques.

En conclusion, il ne faut pas cacher les nombreuses « restrictions » opérées par ce rapport pour passer du concept de biodiversité à la monétarisation de ses services, restrictions que présente la Figure 11 de la partie 2 et que l'on peut résumer de la manière suivante : la démarche du CAS ne propose pas des valeurs de référence pour l'ensemble de la biodiversité mais pour **les seules valeurs d'usage de services écosystémiques liés à la biodiversité générale et aujourd'hui monétarisables d'une manière qui semble robuste.**

F.7 Triptyque atténuation, adaptation et biodiversité : trois formats d'analyse des interactions

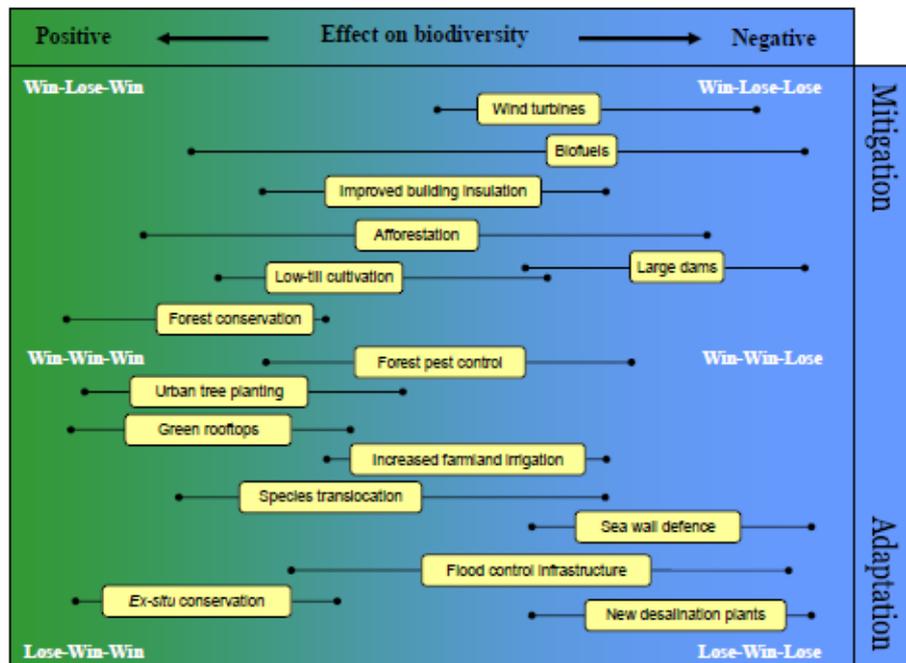


Figure 13 - Relations connues et potentielles entre mesures d'atténuation, d'adaptation et leurs impacts sur la biodiversité (MACIS, 2008)

La position des carrés sur l'axe « Biodiversité » est basée sur une revue de la littérature.

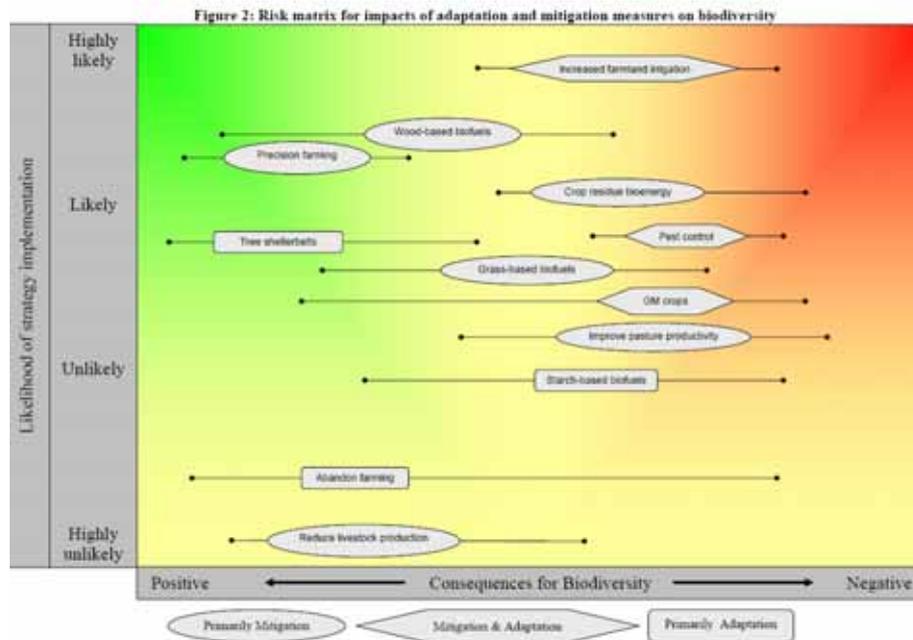


Figure 14 - Matrice de risque pour les impacts sur la biodiversité des mesures d'adaptation et d'atténuation (MACIS, 2008)

Livestock & Poultry Mitigation or Adaptation Strategy			Habitats affected								Taxa affected							
	Impact under worst practice	Impact under best practice	Marine	Coastal	Inland surface waters	Mires, bogs and fens	Grasslands and tall forb habitats	Heathland, scrub and tundra	Woodland and other wooded areas	Unvegetated or sparsely vegetated habitats	Agricultural, horticultural and domestic habitats	Mammals	Birds	Amphibians/ Reptiles	Fish	Invertebrates	Plants	Soil biota
Livestock breeding	↔	↔																

Figure 15 - Impacts des mesures d'adaptation sur la biodiversité (habitats, taxons) (MACIS, 2008)

Degrés d'impact :

- ↑ Très bénéfique pour la biodiversité
- ↗ Modérément bénéfique pour la biodiversité
- ↔ Pas d'effet connu sur la biodiversité
- ↘ Modérément défavorable à la biodiversité
- ↓ Très défavorable à la biodiversité
- ? Impact incertain en raison du manque de données

F.8 Traitement international, communautaire et national du thème Changement climatique & biodiversité

Au niveau international, différentes enceintes traitent des questions croisées de changement climatique et de biodiversité :

- La **Convention cadre des nations Unies sur le changement climatique** reconnaît dans ses objectifs l'importance de permettre aux écosystèmes de s'adapter naturellement au changement climatique, mais aborde la biodiversité et les écosystèmes uniquement en tant que puits de carbone (déforestation évitée, changement d'affectation des sols).
- Plusieurs décisions ont été adoptées ces dernières années dans le cadre de la **Convention sur la diversité biologique (CDB)**, portant notamment sur l'intégration de la biodiversité dans les politiques de réponse au changement climatique, l'intégration du changement climatique dans les programmes de travail de la Convention, l'exploitation des synergies au niveau international et national, la fertilisation des océans et les tourbières. Des tentatives de rapprochement voient le jour entre ces deux conventions internationales, notamment à travers le groupe de liaison mixte des Conventions de Rio créé en 2001, forum informel qui vise à l'échange d'informations, l'exploration des synergies et une meilleure coordination. En 2008, un groupe d'experts a de plus été établi dans le cadre de la CDB afin de fournir des informations relatives aux interactions biodiversité-changement climatique à la Convention Climat.
- La **Convention de Berne** a également établi un groupe d'experts permanent pour étudier les impacts du changement climatique sur la biodiversité et les mesures à prendre pour faciliter son adaptation. Son travail a notamment débouché sur l'adoption en 2008 d'une recommandation sur la vulnérabilité des espèces et milieux au changement climatique et les stratégies d'adaptation, qui reste cependant peu contraignante.
- De nombreuses **autres conventions liées à la biodiversité** abordent la question du changement climatique sur les aspects qui les concernent : la Convention Ramsar sur les zones humides, la Convention sur les espèces migratrices (CMS) et ses accords et mémorandum tels que l'AEWA...
- Le **G8** a défendu en 2008 la promotion d'une approche favorisant les co-bénéfices entre réduction des gaz à effet de serre et conservation et utilisation durable de la biodiversité. Le G8 Environnement élargi de 2009 a adopté la "*Carta di Siracusa*" sur la Biodiversité, dont une partie est dédiée au changement climatique.
- Dans le cadre de la **Convention alpine**, le Plan d'action changement climatique dans les Alpes a été adopté en mars 2009 et prévoit des mesures d'adaptation aux effets du changement climatique et d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre. Une partie est consacrée à la biodiversité, notamment à la mise en place de continuités écologiques.

Au niveau communautaire :

- Le **Plan d'action Biodiversité** aborde la problématique biodiversité-changement climatique sous différents angles mais reste très général.
- Le **Livre blanc sur l'adaptation au changement climatique** mentionne notamment « qu'utiliser la capacité de la nature d'absorber ou de contrôler les incidences dans les zones urbaines et rurales peut être une méthode d'adaptation plus efficace que de se concentrer uniquement sur les infrastructures physiques »,

et l'importance pour l'adaptation d'une « infrastructure verte », réseau interconnecté d'espaces naturels. Une partie consacrée au renforcement de la résilience de la biodiversité, des écosystèmes et des ressources en eau prône une approche intégrée entre politiques de protection de la biodiversité et de lutte contre le changement climatique. Cependant, la seule proposition concrète concerne la rédaction d'ici 2010 de lignes directrices sur la prise en considération des impacts du changement climatique sur la gestion des sites Natura 2000.

- Un **groupe d'experts** a été créé fin 2008 dans le but de rédiger une note stratégique d'ici fin 2009, dont l'objectif est de lier les politiques de biodiversité et de changement climatique afin d'atteindre nos objectifs de conservation dans un contexte climatique changeant et de promouvoir les co-bénéfices.
- Plusieurs **études** ont également été lancées : MACIS (Minimisation of and Adaptation to Climate Change Impacts on Biodiversity) ; ALARM (Assessing Large Scale Environmental Risks on Biodiversity) ; étude « Biodiversité et changement climatique en relation au réseau Natura 2000 ».

Finalement, au niveau national :

- La **Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique** (novembre 2006) présente la préservation du patrimoine naturel comme une des quatre grandes finalités de l'adaptation et traite de la biodiversité par une approche transversale.
- La **Stratégie nationale pour la biodiversité** vise, entre autres, à l'amélioration de la trame écologique dont un des buts est de permettre le déplacement des aires de répartition des espèces sauvages et des habitats naturels dans le contexte du changement climatique. De plus, différents plans d'action sectoriels de la stratégie intègrent des actions liées au changement climatique.

Ce panorama montre bien la forte émergence du sujet dans les discussions internationales, communautaires et nationales. On note cependant des angles d'approche différents selon l'enceinte concernée. Les différents aspects de la problématique peuvent ainsi être classés en trois catégories :

1. Adaptation de la biodiversité face aux impacts du changement climatique (approche sectorielle) ;
2. Préservation de la biodiversité des impacts négatifs potentiels des mesures d'adaptation prises dans d'autres secteurs, ainsi que des mesures d'atténuation du changement climatique ;
3. Rôle de la biodiversité dans la lutte contre le changement climatique (atténuation et adaptation) et exploitations des co-bénéfices.

Cependant, si l'on note une reconnaissance indéniable de l'importance de protéger la biodiversité dans le cadre du changement climatique et de la nécessité d'une approche intégrée, les propositions opérationnelles permettant une réelle prise en compte restent encore limitées et le dialogue entre les différentes enceintes sectorielles difficile.

F.9 Recensement des mesures d'adaptation au changement climatique favorables à la biodiversité

Ce tableau est construit sur la base de l'étude synthétique menée par Heller et Zavaleta (2009), complétée par des contributions des membres du groupe Biodiversité.

Il représente un premier recensement qui, faute de temps, n'a pu être finement discuté au sein du groupe d'experts. Les mesures listées ci-dessous doivent donc être vues comme des éléments indicatifs, nécessitant une analyse plus approfondie.

Tableau 2 – Premier recensement de mesures d'adaptation favorables à la biodiversité (adapté de Heller et Zavaleta, 2009)

Catégories de mesures	Stratégies/Mesures	Commentaires
Catégorie 1 : Adaptation des activités et stratégies de conservation existantes	Renforcer les efforts de réduction des pressions sur la biodiversité autres que le changement climatique (espèces envahissantes, fragmentation, pollution, surexploitation) afin d'augmenter la résilience des écosystèmes	<p><i>Dilemme forestier 1 : exploitation supplémentaire pour l'atténuation du CC versus préserver les écosystèmes pour la biodiversité (et le stockage du carbone).</i></p> <p><i>Dilemme forestier 2 : récolter plus tôt les bois pour conserver un usage économique (atténuation du CC par substitution aux matériaux énergivores), malgré le CC versus allongement des cycles pour renforcer l'intégrité des écosystèmes (adaptation).</i></p> <p><i>Une gestion (enfin ?) efficace de l'équilibre sylvo-cynégétique est indispensable.</i></p>
	Promouvoir la gestion adaptative : assurer une surveillance continue, les options de gestion conservant les potentialités de choix futur et la révision des actions d'adaptation lorsque les nouvelles informations ou recherches sont disponibles	<p><i>Souligner la nécessité :</i></p> <p><i>1- des actions sans regret</i></p> <p><i>2- d'éviter les impasses et mesures irréversibles</i></p> <p><i>3- de conduire l'adaptation des us de la société en fonction de l'évolution des capacités des écosystèmes à produire les services environnementaux (ex : tourisme d'hiver et enneigement, consommation de bois et production des forêts, tourisme vert et fragilité croissante des écosystèmes...)</i></p>
	Conserver et augmenter la variation locale dans les sites et habitats ; maintenir la diversité dans les paysages	<i>Conforter l'éventail de types de sols et de variations topographiques du microclimat couverts par un habitat donné</i>

	S'assurer que les politiques de prévention et de lutte contre les espèces envahissantes soient adaptées dans un contexte de climat changeant	<p>1- <i>urgence de redéfinir les concepts d'espèces exogènes, envahissantes, envahissantes</i></p> <p>2- <i>faut-il encore parler de lutte dans le nouveau contexte changeant ou plutôt de maîtrise ?</i></p> <p>3- <i>Mieux évaluer le rôle des continuités écologiques dans la diffusion de ces espèces indésirables (le rôle anthropique semble beaucoup plus déterminant) pour arbitrer entre continuité facilitant les migrations (trame verte et bleue) et les obstacles aux envahissantes (discontinuités)</i></p> <p>4. <i>Maîtriser les vecteurs et points d'introduction en milieu marin (ex. eaux et sédiments de ballasts) ; veiller à l'intégration du CC dans le cadre des négociations internationales comme pour l'application des textes réglementaires issus de l'OMI.</i></p>
	Améliorer les techniques de restauration, procéder davantage à la restauration d'écosystèmes (zones humides, rivières...)	<i>Apprendre à utiliser les événements naturels pour accélérer et orienter les migrations et substitutions d'espèces ou d'écosystèmes (après incendie, inondation, avalanche...)</i>
	Promouvoir les Réseaux Mixtes Technologiques (RMT)	<i>Exemples de thèmes : stations forestières, variabilité génétique des arbres forestiers, modélisation et sylviculture.</i>
Espaces protégés	Garantir le maintien de l'intégrité des limites actuelles des espaces protégés existants	<i>Un travail juridique est nécessaire pour assurer la légitimité de ce maintien : faire évoluer d'une logique de biodiversité remarquable ciblée à celui d'espaces de nature exceptionnellement préservée, susceptible par conséquent d'accueillir la biodiversité remarquable la plus fragile ?</i>
	Accroître la surface en espaces protégés	<p><i>Augmenter la taille des espaces protégés versus créer de nombreux petits espaces protégés (engagements Grenelle 2% du territoire métropolitain en protection forte, création de 3 Parcs nationaux, 20000 ha zones humides...)</i></p> <p><i>Compléter le programme de Réserves biologiques forestières intégrales permettant de suivre les impacts du changement climatique en forêt hors gestion sur ces territoires.</i></p> <p><i>Engagement international de 10% des espaces marins sous aire marine protégée (AMP), 5 grands parcs marins, et engagements Grenelle de la Mer.</i></p>
	Définir les espaces à protéger en priorité	<p><i>Zones de forte hétérogénéité/endémisme (actuelles ou futures) ; écosystèmes/biomes prioritaires (montagnes, forêts primaires, zones humides, espaces verts urbains...)</i></p> <p><i>Engagement Grenelle : stratégie aires protégées</i></p> <p><i>Localisation et critères de désignation : cœur d'aire versus marges, population relictuelle versus zones sources, écotypes versus population à large base génétique... (Cf Stratégie Aires Protégées)</i></p> <p><i>Désignation d'espaces d'accueil futur des migrations de la biodiversité ?</i></p> <p><i>Question majeure du littoral : quelle stratégie en réponse à la montée des eaux (métropole et OM) ?</i></p>

	Définir les meilleurs critères de localisation des nouveaux espaces protégés dans un contexte de CC et définir le statut d'espace protégé le mieux adapté	<p><i>Aux limites septentrionales des aires de répartition des espèces ; au centre des aires de répartition des espèces/espaces à protéger ; de manière à ce que le noyau comprenne les principales transitions végétatives ; espaces protégés orientés longitudinalement</i></p> <p><i>Nécessité de développer la dimension génétique (infra-spécifique) de la Stratégie de création des aires protégées (SAP)</i></p> <p><i>Intégrer ces éléments dans l'élaboration de la Stratégie nationale de création des Aires Marines protégées (A-AMP)</i></p>
	Protéger un éventail complet de variations bioclimatiques	<p><i>Question des nouvelles combinaisons (par ex climat méditerranéen x sols non façonnés par l'histoire de cette zone) ?</i></p> <p><i>Question des nouveaux habitats méditerranéens ?</i></p> <p><i>Evolution des listes d'habitats ?</i></p>
	Créer et gérer des zones tampons autour des espaces protégés	
	Intégrer le changement climatique dans les documents de planification et de gestion des espaces protégés	<i>Dont prise en compte dans les mesures de gestion de l'accueil des nouvelles espèces qui arrivent dans l'espace protégé</i>
Connectivité	Accroître la connectivité par la mise en place de réseaux écologiques (Trame verte et bleue) afin de faciliter la mobilité des espèces et des habitats	<p><i>Engagement Grenelle Cf. espèces envahissantes...</i></p> <p><i>Remarque : la TVB intègre peu le CC ; c'est un outil essentiellement statique</i></p>
	Définir les meilleurs dispositifs à mettre en place pour assurer la connectivité et étudier leur efficacité	<p><i>Désignation de corridors, création de « stepping stones », levée des barrières à la dispersion, reforestation, localisation des aires protégées proches les unes des autres</i></p> <p><i>Mieux prendre en compte les discontinuités écologiques (ex : calcaire / acide, passage de cols d'altitude, versants...) dans la définition des continuités</i></p> <p><i>Inter-connectivité des réseaux d'aires marines protégées (Convention sur la diversité biologique)</i></p> <p><i>Engagement Grenelle de la Mer sur la création d'une Trame bleu marine.</i></p> <p><i>Tester en vraie grandeur la place de la forêt dans la Trame verte aux fins de connectivité générale et de vieillissement localisé.</i></p>
Espèces	S'assurer que chaque espèce (ou sous-espèce ou écotype) soit présente dans plus d'un espace protégé, en lien avec les pays voisins	<i>Pour le grand tétaras, par ex : sous-espèce pyrénéenne différente de sous-espèce vosgienne...</i>

	Intégrer les paramètres liés au CC dans la gestion des espèces menacées	<i>Intégration du CC dans les plans d'action/restauration d'espèces ; gérer les populations de manière à réduire les fluctuations temporelles de leur taille</i> <i>Evaluer l'impact du CC sur la vulnérabilité : plutôt atténuation (espèces euméditerranéennes) ou plutôt renforcement de la menace (espèces sub-boréales) ?</i>
	Protéger les espèces menacées <i>ex situ</i> (élevage en captivité, banques de graines, cryoconservation...)	
	Translocation d'espèces menacées du fait du changement climatique	
	Développer une collaboration spécifique avec les pays susceptibles d'accueillir la biodiversité disparaissant de France	
Catégorie 2 : Intégration de nouveaux principes dans les politiques de conservation	Tester les nouvelles approches par des projets pilote	
	Expérimenter sur les refuges ; protéger les refuges actuels et futurs selon les prédictions	
	Protéger des groupes fonctionnels, espèces clés et métapopulations	
	Préserver la diversité génétique dans les populations	<i>Elargir la diversité génétique et spécifique dans la restauration et la foresterie</i> <i>Revisiter les pratiques actuelles d'introductions massives dans le milieu naturel de génotypes mal-identifiés et non indigènes : pêche de loisirs, gibier, plants et graines forestières, lutte biologique, revégétalisation, prairie artificielle... pour supprimer une perturbation génétique supplémentaire.</i>
	Concevoir les espaces protégés pour des changements complexes dans le temps : fluctuation et pas seulement changements tendanciels unidirectionnels ; <i>chocs et extrêmes et pas seulement tendance de fond.</i>	
Etablir une flexibilité d'usage autour des espaces protégés permettant une évolution au fur et à mesure des changements	<i>Etablir une flexibilité d'usage des zones aux alentours des espaces protégés ; ajuster les limites des parcs pour englober les mouvements anticipés d'habitats critiques</i>	
Maintenir les dynamiques positives de perturbation des écosystèmes (incendies, pâturage...) ; gérer les effets du CC sur ces perturbations		
Manipuler les microclimats en modifiant la végétation	<i>Changement de la hauteur de la végétation ou de la structure de la canopée en milieu boisé, gestion des niveaux d'eau en zones humides</i>	
Anticiper les surprises et effets de palier tels que des extinctions ou invasions majeures		
Développer des plans de crise en amont et les mettre en œuvre lors des événements critiques	<i>Aléa météorologique majeur, incendie, crise sanitaire, invasion d'espèce, dépérissement massif...</i>	
Rétablir des espèces dans des aires où elles ont disparu pour des raisons non liées au CC (pollution, destruction de l'habitat, etc.) une fois la cause d'extinction éradiquée		

Catégorie 3 : Amélioration des connaissances	Identifier les besoins et augmenter les investissements dans la recherche liée au changement climatique	<i>Créer des bases de données environnementales (espèces, habitats, écosystèmes, milieux, sols, etc.) interconnectées et accessibles gratuitement au plus grand nombre (et en particulier à la recherche) sur Internet.</i> <i>Rendre gratuites et facilement accessibles TOUTES les données météorologiques et climatiques de la France à la communauté scientifique.</i> <i>Augmenter les moyens humains des laboratoires de recherche pour la prospective.</i>
	Réfléchir à une stratégie de collecte de données permettant une exploitation des résultats plus pertinente aux niveaux national et international	<i>Réfléchir aux stratégies régionales pour les DOM COM.</i> <i>S'impliquer plus activement dans les réflexions stratégiques au niveau UE</i>
	Améliorer l'interface entre la recherche et la gestion, développer la recherche-action	<i>Créer des postes dédiés dans les établissements de recherche</i> <i>Exemple de thème : forêt, biodiversité et changement climatique</i>
	Intensifier les collaborations interdisciplinaires (écologie/génétique/agronomie/géologie/géographie/sciences humaines) et intersectorielles (agriculture / forêt, forêt / eau, urbanisme...)	
Etudes	Etudier les réponses des espèces et populations au changement climatique (génétique, physiologique, comportementale, démographique...) et évaluer la vulnérabilité de la biodiversité et des écosystèmes associés. Développer les approches écosystémiques (interactions).	<i>Lancer des études sur le long terme ; pas uniquement sur la ligne de front ; étudier les séries chronologiques sur les dynamiques des espèces ; étudier les métapopulations.</i> <i>Identifier des indicateurs chimiques traceurs du climat de croissance des espèces (ex : isotopes dans le bois, composition des feuillages) permettant d'isoler les effets du changement climatique des autres facteurs.</i>
	Documenter la répartition actuelle et historique des espèces	<i>Etablir des cartes précises de répartition actuelle des espèces et les rendre accessibles gratuitement au plus grand nombre sur Internet.</i> <i>Etudier la dispersion des espèces selon l'utilisation des sols, les flux de gènes, les taux de migration, les flux historiques.</i> <i>Campagnes de prospection ; valorisation par utilisation des SIG.</i>
	Prédire l'évolution de la répartition géographique des habitats et des espèces	<i>Utiliser de modèles d'habitat et des modèles d'aire de répartition d'espèces avec différents scénarios climatiques?</i>
	Développer des connaissances sur les nouveaux habitats/espèces qui vont arriver naturellement en France du fait du CC	
	Mieux caractériser les micro-régulations climatiques, responsables des micro-habitats	<i>Caractérisation du « climat forestier », impact de s embâcles sur les caractéristiques des eaux, rôle fin des boisements hors forêt sur les sols, l'air, les vents, effet tampon climatique des zones humides, des forêts</i>

	Etudier les potentialités d'adaptation génétique des espèces au CC	<i>Documenter la variabilité génétique des caractères-clés d'adaptation au climat. Développer des modèles d'évolution génétique de ces caractères dans les populations. Documenter les adaptations génétiques en cours liées au CC.</i>
	Etudier et surveiller les écotones, les zones refuges et les gradients	
	Etudier les processus de changement à des échelles spatiales et temporelles multiples ; lancer des études intégrant des causes de changement multiples	
	Renforcer les connaissances et observations de la biodiversité en zone urbaine : potentiel, promotion, comportement, développement...	<i>Les zones urbaines sont des amplificateurs de CC (cf. Paris) : température (gel), précipitations, vents, stress hydrique ; ils constituent à ce titre des observatoires privilégiés du comportement de la biodiversité face à des conditions amenées à se généraliser dans le futur climatique</i>
Modélisation	Bien définir les limites des modèles afin de clarifier leur rôle dans la prise de décision	
	Résoudre les problèmes de compatibilité d'échelle pour permettre un recoupement entre modèles, aires de gestion et observations empiriques	
	Développer des modèles prédictifs du devenir des espèces, habitats et écosystèmes plus complets, plus performants et plus réalistes	<i>Augmenter l'effort de recherche en modélisation de la biodiversité (à toutes les échelles : populations / espèces / habitats / écosystèmes).</i>
	Développer des modèles adaptés aux terres d'outre-mer	<i>Très peu de modèles climatiques satisfaisants pour l'outre-mer, renforçant la difficulté à intégrer ces terres dans une dynamique politique globale</i>
	Valider les résultats des modèles avec des données de terrain	
	Prédire les effets du CC sur les écosystèmes, les communautés et les populations, en adoptant une perspective régionale/continentale	
	Développer des outils de simulation de gestion de crise pour aider à la décision et tester des scénarii de réponse à la crise	
Suivi /observation	Maintenir, améliorer ou mettre en place des programmes et outils de suivi de la biodiversité, valablement interrogeables sur la question du changement climatique et de ses impacts	<i>Développement de systèmes performants de suivi continu de la biodiversité, cohérent nationalement et avec le niveau international. Développement de grilles pertinentes de lecture des résultats avec le prisme du changement climatique. Rendre ces données publiques et accessibles sur Internet</i>
	Identifier des indicateurs pour surveiller les impacts du CC sur la biodiversité, évaluer la vulnérabilité et l'efficacité des mesures d'adaptation	<i>Identification d'espèces sentinelles</i>

	Utiliser les espaces protégés comme socles d'observation et territoires de référence pour étudier les effets du CC	
	Observer et mesurer l'impact du changement climatique et des mesures d'adaptation sur le stock et le stockage de carbone et de méthane par les écosystèmes, dans la perspective des stratégies d'atténuation du CC	<i>Certaines mesures d'adaptation sont susceptibles d'aggraver le CC si elles contribuent au relargage de stocks importants de carbone ou de méthane.</i>
Catégorie 4 : Gouvernance	Améliorer la coordination entre les différentes institutions, agences et organisations	<i>Proche collaboration au niveau national entre les personnes s'occupant de CC et celles s'occupant de biodiversité pour exploiter au maximum les synergies (engagement CDB) Proche collaboration entre les instances pilotant l'adaptation de l'économie des écosystèmes productifs avec celles en charge de la biodiversité : agriculture, foresterie, pêche... Trouver les mesures gagnant-gagnant (engagement Grenelle pour la forêt).</i>
	Initier le dialogue parmi les différentes parties prenantes, les impliquer en amont des décisions	<i>Promotion de la gouvernance à cinq dans les instances (engagements du Grenelle de l'environnement et du Grenelle de la mer)</i>
	Assurer la bonne circulation des informations concernant les connaissances et mesures d'adaptation (expériences, réussites, obstacles...) aux décideurs et parties prenantes	<i>Constitution d'une base de données des bonnes pratiques, constitution d'une plateforme permettant un échange d'informations, formations et matériels de base aux agents concernés par les interactions biodiversité-changement climatique.</i>
	Faire en sorte que les personnes ayant le pouvoir de décision s'approprient le sujet	
	Mettre en place des mécanismes permettant une gouvernance adaptative	<i>Expertiser le droit national pour lever les blocages à ce type de gestion. Etudier et formaliser les conditions de gouvernance et de participation démocratique garantissant une bonne conduite de la gestion adaptative.</i>
	Concevoir des plans d'actions dotés d'une échéance et à effets mesurables	
	Etablir des collaborations inter-nations	<i>Notamment avec pays limitrophes pour ce qui concerne les espèces qui disparaissent naturellement d'un territoire pour migrer chez le voisin. Notamment pour le milieu marin, dont certaines politiques relèvent exclusivement du droit communautaire (ex. PCP).</i>
	Ne pas se limiter à un seul type d'intervention, cumuler des approches différentes	<i>L'optimisation du tout étant différente de la somme de l'optimisation des constituants, systématiser les analyses holistiques des problèmes et des enjeux</i>
Catégorie 5 : Approche holistique / Vision globale intégrant les autres	Intégrer les questions de biodiversité dans les différentes politiques sectorielles concernant le changement climatique et réciproquement	
	Adopter une perspective régionale/continentale et de long terme dans la planification et la gestion	<i>Procéder à des évaluations d'impact au niveau régional ou du bassin hydrographique</i>

politiques sectorielles	Assurer une gestion de la matrice (zone hors espace protégé) permettant d'augmenter la résilience de la biodiversité face au CC	<i>Mesures agro-environnementales, réduction de la fragmentation... Etablir un découpage stratégique de l'utilisation des sols permettant de minimiser les impacts du CC Trame verte et bleue (engagement Grenelle)</i>
	Eviter les impacts négatifs sur la biodiversité des mesures d'adaptation/atténuation prises par les autres secteurs et exploiter au maximum les co-bénéfices	<i>Cf. supra : production forestière, optimisation carbone... Voir notamment l'impact de l'hydroélectricité sur la biodiversité aquatique (label EVE du WWF ?)</i>
	Assurer une compatibilité entre les stratégies d'adaptation et d'atténuation du changement climatique	
	Gérer les conflits homme - faune/flore sauvage au fur et à mesure du changement	
	Allouer suffisamment d'espace pour permettre le développement naturel des rivières et côtes ; gérer spécifiquement la question du déplacement du trait de côte (métropole, outre-mer)	<i>La reconnexion du lit majeur et des plaines alluviales permet à la fois la protection de la biodiversité et la protection des populations contre les crues.</i>
Implication de la société civile	Promouvoir des politiques de conservation qui impliquent les usagers locaux	
	Sensibiliser le public sur les interactions biodiversité-changement climatique	<i>Développer les Actions Sciences Citoyennes et Biodiversité. Créer des programmes d'éducation, qui sensibilisent aux problèmes engendrés par le CC ; utiliser les réseaux sociaux. Investir massivement dans les programmes de formation initiale et continue.</i>
	Prise en compte des aspects sociaux afin de maximiser l'acceptation et l'efficacité de nos politiques de conservation	<i>Quantifier le rapport susceptibilité environnementale / capacité adaptative de la société afin de d'évaluer les chances de réussite des interventions de conservation ; adopter des mesures adaptées culturellement.</i>
	Promouvoir par l'exemplarité les solutions vertueuses, systématiquement et massivement mises en œuvre sur les espaces gérés par l'Etat : biodiversité urbaine, forêts publiques, espaces dédiés au transport ferroviaire, littoral, aires protégées, cours d'eau publics, domaine maritime...	<i>Développer le volet « Biodiversité et changement climatique » de la stratégie « Etat exemplaire » et en identifier formellement le pilotage de sa mise en application.</i>

Annexe G Annexes du Groupe Territoires

G.1 Liste des auditions

Thèmes	Porteurs	Documents liés
Volet adaptation de l'agenda 21 du Grand Lyon : Audition de Sylvain GODINOT de l'ALE de Lyon	Sylvain GODINOT	Transparents de présentation de Sylvain Godinot L'adaptation au changement climatique au Grand Lyon : <u>« légitimation croisée de politiques sectorielles et de stratégies globales au service d'une vision du futur de l'agglomération »</u> - Pierre Crépeaux, Damien Saulnier, Frédéric Ségur
Etude IFEN	Valery MORARD	Cahier des charges Proposition Ecofys/Sogreah
Etude menée sur les activités dans le massif alpin	Jean-Pierre CHOMIENNE	Transparents Rapport final : « <i>changement climatique dans le massif alpin français : état des lieux et propositions</i> »
Migrations et impacts sur la localisation et la structure des populations	Odile BOVAR	Transparents : <u>« Les flux migratoires et leurs conséquences sur la localisation et la structure des populations »</u> - Odile BOVAR, Observatoire des territoires (DIACT)
Monographies de Lucien SFEZ « attitudes face à l'adaptation au changement climatique »	Lucien SFEZ	Monographies (Champagne, Communes de montagne, Camargue) Présentation « <i>accompagner ou refuser l'adaptation au changement climatique</i> » - Jean-Pierre TABET (2009)
Etudes sur les impacts des politiques de lutte contre le CC et de gestion prévisionnelle des emplois et des compétences	SYNDEX	Etude européenne « <i>impacts sur l'emploi du changement climatique et des mesures de lutte contre le changement climatique dans l'UE à 25 à l'horizon 2030</i> » Présentation Pierre-François CLERC
	FONDATERRA	« <i>Du diagnostic territorial intégré à l'ingénierie pédagogique d'un pôle de formation</i> » (contribution écrite)
Gouvernance de l'adaptation	Pierre RADANNE	Transcription d'intervention « La perception des enjeux et l'évolution des comportements face au changement climatique » (Juin 2007)

Etudes citées :

Emploi en Europe :

<http://ec.europa.eu/social/keyDocuments.jsp?type=0&policyArea=0&subCategory=0&country=0&year=0&advSearchKey=2030&mode=advancedSubmit&langId=en>

Impact du changement climatique en Languedoc-Roussillon :

<http://www.languedoc-roussillon.pref.gouv.fr/publications/informations/index.shtm>

G.2 Contributions des groupes thématiques du Groupe Interministériel transmises au groupe Territoires

Groupe Thématique	Pilote du groupe	Intitulé abrégé	Date de(s) contribution(s) au sous-groupe Territoires
Risques Naturels et Assurances	Sylvie de Smedt	Risques	21/04
Infrastructures de Transports, Urbanisme et cadre bâti	Lionel Moulin / Jean-Luc Salagnac	Urbain	05/05 (cadre bâti) - - (infrastructures)
Agriculture et Forêts	Maryline Loquet / Pierre Bouillon	Agriculture et Forêt	21/04
Santé	Monique Delavière	Santé	- -
Tourisme	Jean-François Crola, Jackie Benesse, Noël LeScouarnec	Tourisme	- -
Biodiversité	Vanessa Nuzzo	Biodiversité	03/04
Energie	Daniel Delalande	Energie	02/04
Eau	Daniel Berthault	Eau	21/04

G.2.1 Contributions du groupe Risques naturels et assurances

- **Quels sont les impacts que vous avez identifiés à ce stade de vos travaux ?**
- Retrait-gonflement des sols argileux : le sous-groupe concerné a travaillé sur l'impact sur le nombre de sinistres et sur le coût des dommages indemnisés d'une augmentation de la fréquence des épisodes de canicule de type 2003 à différentes échelles temporelles (2030-2050-2100) et spatiales (nationale et départementale), avec ou sans évolution de l'urbanisation (les dommages concernent principalement les pavillons individuels construits sur terrains argileux).
- Érosion et submersion marine : le sous-groupe concerné a évalué les impacts sur les établissements publics et privés, sur les personnes et les logements d'une augmentation du niveau de la mer de 1 mètre et d'une érosion des zones situées à moins de 500 mètres des côtes érodables en 2100, sans modification du régime des tempêtes, uniquement sur la région Languedoc-Roussillon ; il a procédé à une évaluation des coûts induits et à une discussion de mesures d'adaptation.
- Inondations : le sous-groupe concerné a travaillé à partir d'hypothèses, proposées à dire d'experts et au vu de la connaissance actuelle des impacts attendus du changement climatique sur les crues, sur des bassins versants choisis à titre d'illustration (Seine, Meuse, Loire moyenne, Rhône, Orb). Il a au préalable évalué le nombre d'établissements publics et privés, de personnes et de logements situés actuellement en zone inondable ; un travail avant tout méthodologique ; la prise en compte des précipitations extrêmes et du ruissellement urbain n'a été que très partielle et de nombreux questionnements demeurent sur la modélisation de crues « généralisées », sur les incertitudes majeures. A ce stade, les résultats confirment la nécessité d'appliquer la politique de prévention actuelle (gestion intégrée à l'échelle des bassins versants), elle doit toutefois être revisitée pour mesurer son caractère adaptable.
- Aléas gravitaires (avalanches de neige, crues et laves torrentielles, glissements de terrains type sols, éboulements rocheux, effondrements de cavités souterraines) : le sous-groupe a souligné les connaissances de niveaux variables selon les aléas, la très grande incertitude des impacts du changement climatique sur les aléas considérés (compte tenu notamment de leur fort caractère discontinu à la fois dans l'espace et dans le temps) et le contexte climatique *a priori* défavorable.
- **Avez-vous déjà identifié les impacts selon une échelle territoriale spécifique ou certains éléments déterminants justifient une analyse plus fine des impacts à l'échelle d'un territoire ?**
- Inondations : travail à l'échelle de bassin versant (bassin de risque hydrologique), échelle pertinente pour une gestion intégrée ;
- Côtier : travail à l'échelle régionale (Languedoc-Roussillon, zone basse donc *a priori* parmi les plus exposées) ;
- Retrait-gonflement des sols argileux : travail aux échelles nationale et départementale ;
- Aléas gravitaires : non fait, mais préconisé.
- **Avez-vous identifié une typologie d'acteurs correspondant à la mise en œuvre des mesures d'adaptation, voire à une articulation des échelles de compétence ?**

Partiellement. Dans le cadre de la mise en œuvre de la politique actuelle de prévention des risques naturels, les acteurs sont connus et les échelles de compétence s'articulent (plus ou moins bien) ; l'adaptation au changement climatique correspond « à l'ordre 0 » et au moins pour partie à la poursuite/adaptation/discussion de cette politique et pourra donc s'appuyer sur la typologie d'acteurs connus et sur l'articulation existante.

- **Avez-vous pu aborder, et si oui de quelle manière, la prise en compte de la capacité d'adaptation des territoires et sa concrétisation en potentiels d'action ?**

Non

- **Avez-vous identifié des outils spécifiques :**
 - **d'analyse des impacts**
 - **et/ou d'accompagnement des mesures susceptibles d'être applicables au niveau des territoires,**
 - **et/ou pour lesquels une déclinaison territoriale serait nécessaire ?**

Non, rien de plus ni de spécifique par rapport à ce qui est utilisé et mis en œuvre actuellement dans le cadre de la politique actuelle de prévention des risques naturels, qui devra cependant être revisitée et questionnée dans la suite du travail.

G.2.2 Contribution du groupe Eau

- **Quels sont les impacts que vous avez identifiés à ce stade de vos travaux ?**

Peu d'études ont déjà été réalisées (Rhône, Seine, Garonne).

L'idée qu'il pleuvrait plus en hiver et moins en été et que les excédents hivernaux compenseraient les déficits estivaux ne semble plus être d'actualité vu les projections faites par J. Boe.

Les impacts principaux sont :

- l'augmentation des besoins en eau dans un contexte de diminution des écoulements et donc de la ressource disponible ;
- une dégradation de la qualité des eaux en absence de modifications en matière de pollutions ponctuelles ou diffuses ;
- un accroissement de la vulnérabilité des territoires déjà stressés (zone littorale arc atlantique et méditerranéen, sud ouest).

À l'échéance 2050, avec un scénario A1B, le déficit sur la partie ouest de la métropole pourrait être de l'ordre de 2 milliards de m³, hors usage énergétique.

- **Avez-vous déjà identifié les impacts selon une échelle territoriale spécifique ou certains éléments déterminants justifient une analyse plus fine des impacts à l'échelle d'un territoire ?**

Un certain nombre d'impacts sont typiques de certains territoires. Les estuaires avec la remontée des eaux saumâtres, la remontée du biseau salé en zone littorale...

- **Avez-vous identifié une typologie d'acteurs correspondant à la mise en œuvre des mesures d'adaptation, voire à une articulation des échelles de compétence ?**

Les échelles d'intervention : européen, national, bassin hydrographique, local.

L'essentiel de la réglementation en matière environnementale est d'initiative communautaire. Par exemple, la DG Environnement est intéressée par les problèmes de pénuries d'eau, de sécheresse, de changement climatique : état des lieux et communication en 2007, suivi de la mise en œuvre en 2008. (http://ec.europa.eu/environment/water/quantity/scarcity_en.htm). En matière quantitative, la commission s'intéresse notamment aux ressources alternatives, à l'eau dans l'habitat, aux instruments financiers mobilisables, etc.

L'Etat est en charge de l'établissement des règlements et des normes.

Au niveau national, la mise en œuvre de la directive cadre sur l'eau (DCE) s'appuie sur l'organisation en bassins hydrographiques (préfets coordonnateurs de bassin, DIREN/DREAL en charge de la délégation de bassin, agence de l'eau).



Carte issue du site internet du CNRS (http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/france/02_instances_carte.htm)

Cette organisation en bassin se décline plus localement au sein des comités locaux de l'eau (CLE) qui regroupe les représentants locaux des usagers.

- **Avez-vous pu aborder, et si oui de quelle manière, la prise en compte de la capacité d'adaptation des territoires et sa concrétisation en potentiels d'action ?**

En application de la directive-cadre européenne sur l'eau (DCE), une démarche spécifique de consultation du public est prévue dans le cadre de l'élaboration des plans de gestion de chaque district hydrographique. En 2008, une consultation a été organisée sur les projets de SDAGE et de programmes de mesures pour la période 2010-2015.

La consultation a atteint une ampleur exceptionnelle : près de 28 millions de questionnaires papier ont été diffusés en métropole. Au niveau national, près de 360 000 questionnaires ont été retournés soit 1,3% du total émis, taux tout à fait satisfaisant pour ce type de démarche.

Globalement, l'objectif fixé (en termes de date et/ou de proportion d'atteinte du bon état des eaux) est peu remis en cause. Sur le bassin Loire-Bretagne, 60% des personnes jugent qu'il faut aller plus loin pour obtenir de meilleurs résultats dès 2015.

De nombreuses actions générant des coûts supplémentaires sont soutenues, parfois à la quasi-unanimité, mais la réticence est simultanément très forte face à la perspective d'une hausse de la facture d'eau des ménages. Cela est à rapprocher de l'attachement très large à l'application du principe pollueur-payeur et au rééquilibrage des contributions entre groupes d'usagers que cela pourrait entraîner.

La disposition à agir est très forte : l'évolution des comportements individuels (économies d'eau, tri des déchets, etc.) est ainsi largement validée voire déjà effective (plus délicate cependant lorsqu'elle génère des dépenses supplémentaires). Toutefois, le public souhaite que les autres groupes d'acteurs s'impliquent également et prennent eux aussi leurs responsabilités. Cela vise principalement les agriculteurs et les industriels.

- **Avez-vous identifié des outils spécifiques :**
 - **d'analyse des impacts ;**
 - **et/ou d'accompagnement des mesures susceptibles d'être applicables au niveau des territoires ;**
 - **et/ou pour lesquels une déclinaison territoriale serait nécessaire ?**

Dans le cadre de la mise en œuvre de la directive cadre sur l'eau, un processus de rapportage est prévu, il s'intéresse notamment aux pressions. Une plateforme européenne de données sur l'eau WISE a été mise en œuvre par l'UE. Un système d'information des données sur l'eau organise ces données (maîtrise d'ouvrage ONEMA).

Les Schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux, outils de planification dans le cadre de la DCE prévoit un programme de mesure territorialisé.

G.2.3 Contribution du groupe Agriculture et Forêt

- **Quels sont les impacts que vous avez identifiés à ce stade de vos travaux ?**

Les impacts attendus sur l'agriculture sont :

- sur les grandes cultures : effets contrastés, mais globalement modérés sur le rendement (+ ou -10 à 20% de différence) dans l'hypothèse d'une augmentation de 2 à 3°C, mais raccourcissement du cycle et donc durée moins longue du fonctionnement photosynthétique.
- sur la prairie :
 - bilan positif pour la production de biomasse avec +20% dans le cas du Massif Central dans l'hypothèse d'une augmentation de 2 à 3°C (hors événement extrême : la canicule de 2003 ayant conduit à une baisse de 30% de la production fourragère nationale).
 - Perte de biodiversité (50% espèces végétales menacées en 2080 d'après les critères de la liste rouge de l'UICN).
 - Modification de la valeur nutritive des graminées fourragères.
- sur les arbres fruitiers : problème des hivers doux (levée de dormance) et avancée de la phénologie (floraison) avec risque de gel et de mauvaise fécondation.
- sur la vigne : risque de gel au moment de la floraison et augmentation du degré alcoolique liée à des conditions plus chaudes pendant la maturation du raisin, rendement pénalisé par la sécheresse, modification potentielle de qualité à la vendange en raison d'un déséquilibre alcool/acides
 - au-delà de 4°C, les rendements seraient affectés dans tous les cas ;
 - modification des relations plantes/parasites, des équilibres entre espèces ;
 - déplacement géographique des cultures vers le Nord à anticiper, mais non directement envisageable pour les productions liées au terroir (AOC) et à réfléchir selon les cultures et les territoires ;
 - émergence et changement de cartographie des maladies virales, bactériennes, parasitaires.

Les impacts attendus sur la forêt (selon le rapport de Roman-Amat) sont :

- Évolution des aires bioclimatiques potentielles des espèces ;
 - Impacts sur la phénologie et la reproduction des arbres ;
 - Impacts sur la croissance des arbres ;
 - Augmentation des risques sanitaires ;
 - Augmentation des risques physiques ;
 - Incendie
 - Augmentation de l'érosion dans les zones montagnarde et méditerranéenne
- **Avez-vous déjà identifié les impacts selon une échelle territoriale**

spécifique où certains éléments déterminants justifient une analyse plus fine des impacts à l'échelle d'un territoire ?

L'adaptation est un sujet à « territorialiser » avec des solutions à mettre en place en fonction des contextes locaux. Ce point est particulièrement vrai pour les secteurs agricole et forestier, où les caractéristiques pédoclimatiques, sociales, culturelles, etc. sont propres à chaque terroir.

Pour l'agriculture, l'étude menée avec ECOFYS/SOGREAH a permis de répondre à la question à travers les 3 couples régions/filières ci-dessous listés :

- Grandes cultures et incidence sur la répartition des productions (avec la thématique « sécheresse-irrigation » en toile de fond) ;
- Viticulture et élévation des températures (La grande Bourgogne/le Languedoc-Roussillon) ;
- Prairies et sécheresse pour aborder les activités d'élevage (le Sud du Massif central).

Pour la forêt, dans son rapport, Roman-Amat propose un zonage de la France concernant la période 2008-2030, qui pourrait servir de base à cette adaptation de l'action publique.



Zone géographique actuelle	Substitution d'espèces	Croissance et vitalité	Incendies	Érosion
Atlantique Nord	--	--	-	-
Atlantique Sud	--	--	--	-
Nord et Est	-	-	-	-
Montagnard (basse et moyenne altitude)	---	---	--	---
Montagnard (haute altitude)	--	-	-	--
Méditerranée	---	--	---	---

Tableau 5: Impact estimé du changement climatique sur les écosystèmes forestiers selon la zone telle que définie à l'illustration 8 : - faible ou nul; -- moyen; --- majeur.

- **Avez-vous identifié une typologie d'acteurs correspondant à la mise en œuvre des mesures d'adaptation, voire à une articulation des échelles de compétence ?**

Pour les secteurs agricole et forestier, les mesures d'adaptation seront mises en œuvre via le dispositif de développement agricole existant aux échelles nationale, régionale, départementale et locale (services déconcentrés, organisations professionnelles agricoles-OPA, instituts techniques, lycées agricoles...).

Les secteurs agricole et forestier disposent de nombreux conseillers, véritables vecteurs sur le terrain (Chambres, Coopérative, CER, contrôle laitier, ...), qui seront en mesure d'accompagner localement l'adaptation.

On peut noter par ailleurs que les lycées agricoles sensibilisent déjà les futurs exploitants agricoles et conseillers.

- **Avez-vous pu aborder, et si oui de quelle manière, la prise en compte de la capacité d'adaptation des territoires et sa concrétisation en potentiels d'action ?**

Pour les secteurs agricole et forestier, le changement climatique n'est pas un sujet marginal, mais représente un thème central. Les exploitants sont déjà fortement

concernés et pour eux, l'adaptation conditionne le devenir de leur outil de travail, mais pas seulement.

Avant d'aborder la prise en compte de la capacité d'adaptation des territoires et sa concrétisation en potentiels d'action, il serait bon de rappeler les étapes préalables et incontournables :

- Prise en compte de conscience du changement climatique ;
- Meilleure connaissance des impacts locaux ;
- Proposition de mesures d'adaptation ;
- Acceptabilité de celles-ci par les acteurs.

Concernant la capacité d'adaptation des territoires et sa concrétisation en potentiels d'action, on peut seulement présager qu'elles devraient être fortement liées à l'organisation locale.

Un exemple : Pour la viticulture, M. Duchêne (INRA) a évoqué l'impact du facteur « terroir » sur le potentiel d'adaptation. Si les techniques existent, la principale limite reste souvent la crainte des viticulteurs d'admettre la nécessité de modifier les pratiques et de montrer que « ça va mal chez nous » et ainsi de dévaloriser le terroir (au-delà des questions de cahier des charges des AOC, etc.).

Le groupe tâchera de mettre en avant les différences régionales (par exemple, impact positif sur la viticulture Bourgogne / négatif sur d'autres sites). De même, sur la prairie, M. Lelièvre (INRA) fait état d'effets différenciés selon la latitude (au sud du Massif Central, l'effet sécheresse pourrait l'emporter sur l'effet CO₂).

- **Avez-vous identifié des outils spécifiques :**
 - **d'analyse des impacts** : Non, pas encore
 - **et/ou d'accompagnement des mesures susceptibles d'être applicables au niveau des territoires** : Non, pas encore
 - **et/ou pour lesquels une déclinaison territoriale serait nécessaire ?**

Non, pas encore

G.2.4 Contribution du groupe Biodiversité

- **Quels sont les impacts que vous avez identifiés à ce stade de vos travaux ?**

Impacts du changement climatique sur la biodiversité terrestre, aquatique et marine, ayant des conséquences en termes de services rendus par les écosystèmes.

- Impacts directs du changement climatique : effets sur les variables d'état de la biodiversité (présence et abondance des espèces, diversité génétique - variétés cultivées-, présence et abondance des habitats), sous l'angle d'une réponse directe des espèces aux modifications des principaux paramètres physiques du climat (T, P), ou paramètres chimiques directement associés (pH milieux aquatiques...). Peut conduire à : migration/dispersion d'espèces vers nord et altitude, extinctions locales, modifications phénologiques...
- Impacts indirects du changement climatique via la modulation d'autres facteurs de pression ayant des effets néfastes sur la biodiversité (pollution, surexploitation des ressources naturelles renouvelables, fragmentation des milieux...) et sans doute plus importants que les effets directs.
- Enfin, prise en compte des effets indirects issus des stratégies d'adaptation des différents secteurs de l'activité humaine et qui affectent la biodiversité. D'où la justification et le besoin d'une analyse transversale, intersectorielle.
- **Avez-vous identifié les impacts selon une échelle territoriale spécifique ou certains éléments déterminants justifient une analyse plus fine des impacts à l'échelle d'un territoire ?**
- Métropole et outre-mer.
- Parfois contexte transfrontalier.
- Multi-échelles : national, régional, local.
- Régions biogéographiques : méditerranéen, continental, alpin, atlantique. Biomes. Grands types d'écosystèmes (typologie du MEA France : littoral, forestier mature, forestier pionnier, agricole, montagneux, urbain, eaux continentales, marin).
- Hydroécorégions pour aspect aquatique. Mais aussi au niveau aire protégée (au sens large), ou habitats, ou ensemble d'habitats (cas d'espèces non inféodées, ou migratrices), ou un site particulier...
- **Avez-vous identifié une typologie d'acteurs correspondant à la mise en œuvre des mesures d'adaptation, voire à une articulation des échelles de compétence ?**

Le groupe Biodiversité ne s'est pas encore penché sur une typologie d'acteurs. Néanmoins, les mesures d'adaptation identifiées étant classées en 5 grandes catégories, on peut inclure : l'administration centrale et ses services déconcentrés (différents ministères concernés), les collectivités territoriales, les gestionnaires d'espèces et d'espaces, les instituts de recherche, les établissements publics à caractère scientifique et technique, les associations et ONG environnementales, les entreprises privées, bureaux d'études, les fédérations professionnelles et syndicales, organismes internationaux, Commission européenne et pays membres, autres pays... Cela couvre finalement un champ extrêmement vaste !

- Catégories de mesures d'adaptation planifiée : 1/ adaptation des activités et des stratégies de conservation et de gestion existantes, 2/ intégration de nouveaux principes dans les politiques de conservation et de gestion, 3/ amélioration des connaissances (études, modélisations, suivi de terrain), 4/ gouvernance, 5/ vision globale intégrant les autres politiques sectorielles.

- **Avez-vous pu aborder, et si oui de quelle manière, la prise en compte de la capacité d'adaptation des territoires et sa concrétisation en potentiels d'action ?**

Pas encore pleinement abordé, mais discussion trame verte et bleue ; politiques d'usages (forêts, agriculture, eau) pour conserver la résilience des milieux et des écosystèmes aux différentes échelles du territoire. A venir, politiques d'aménagement et d'urbanisme.

- **Avez-vous identifié des outils spécifiques :**

a/ d'analyse des impacts

Recherche (fondamentale, appliquée, interdisciplinaire), suivi et observation, expérimentation de terrain, modélisations...

b/ et/ou d'accompagnement des mesures susceptibles d'être applicables au niveau des territoires,

Pas encore vu. Au moins actions de communication, sensibilisation, formation de l'ensemble des acteurs concernés. Gouvernance. Outils d'urbanisme. Conditionnalité.

c/ et/ou pour lesquels une déclinaison territoriale serait nécessaire ?

Pas encore vu précisément. Mais tout ce qui concerne les espaces protégés, la connectivité écologique, etc.

G.2.5 Contribution du groupe Infrastructures de transport et cadre bâti

Note : Cette contribution porte essentiellement sur le « cadre bâti » et, plus marginalement, sur l'« urbanisme » et les « infrastructures ».

- **Quels sont les impacts que vous avez identifiés à ce stade de vos travaux ?**

Les aléas pris en compte sont ceux connus actuellement : inondation, retrait/gonflement des argiles, vent, canicule. On pourra se reporter au tableau de synthèse du paragraphe 5.1.2 du rapport intermédiaire du Groupe interministériel pour une présentation des impacts associés.

- **Avez-vous déjà identifié les impacts selon une échelle territoriale spécifique ou certains éléments déterminants justifient une analyse plus fine des impacts à l'échelle d'un territoire ?**

A l'exception du vent (un évènement comme la tornade de Haumont l'été dernier est difficilement prévisible et ses effets sont quasiment « imparables »), les zones d'aléas sont territorialisées de manière relativement précise même si des progrès restent à faire pour qualifier et quantifier les impacts.

Aléa	Territoire	Améliorer l'évaluation des impacts
Inondation	Bassins versants Zones côtières	Connaissances techniques relatives à la vulnérabilité des ouvrages
retrait/gonflement des argiles	Cartographie BRGM www.argiles.fr	Sondage au niveau de la parcelle
Canicule	Grandes agglomérations	Connaissances techniques relatives à la vulnérabilité des tissus urbains

- **Avez-vous identifié une typologie d'acteurs correspondant à la mise en œuvre des mesures d'adaptation, voire à une articulation des échelles de compétence ?**

La mise en œuvre de mesures d'adaptation techniques à l'échelle des bâtiments **relève des professionnels du bâtiment**. Un champ d'actions est à explorer pour ce qui concerne les interactions entre mesures d'adaptation et mesures d'atténuation.

Pour ce qui est de la **canicule**, l'adaptation relève *a priori* plus de mesures **d'organisation** (telles que prévues par le plan canicule) que de mesures techniques. Les acteurs concernés **sont alors les services de santé, de secours, la sécurité civile**.

Une meilleure **articulation entre sécurité civile et professionnels du bâtiment pourrait être riche d'enseignements** pour ce qui est des inondations : conception des ouvrages de manière à améliorer la sécurité, vulnérabilité observée des ouvrages, ...

- **Avez-vous pu aborder, et si oui de quelle manière, la prise en compte de la capacité d'adaptation des territoires et sa concrétisation en potentiels d'action ?**

La question est surtout pertinente pour les inondations du fait de l'interaction forte entre impacts sur le cadre bâti (et les infrastructures) et fonctionnement du territoire. Des tentatives de coordination des mesures de prévention/adaptation au niveau de territoires ont été faites (Béziers, Neuville/Saône, ...).

- **Avez-vous identifié des outils spécifiques :**
 - **d'analyse des impacts**
 - **et/ou d'accompagnement des mesures susceptibles d'être applicables au niveau des territoires**
 - **et/ou pour lesquels une déclinaison territoriale serait nécessaire ?**

Chaque évènement climatique intense causant des dégâts importants révèle la vulnérabilité du cadre bâti dans les territoires concernés. Les PPR permettent de cadrer les mesures de prévention en laissant parfois des imprécisions qui atténuent le caractère opérationnel de mesures (par exemple, utilisation de matériaux « peu sensibles » à l'eau dans le cas des inondations).

A l'occasion de ces évènements, les défauts de conception, de réalisation et d'entretien des bâtiments apparaissent comme les principales causes des désordres. Ces constats pourraient plaider pour des actions portant sur la « qualité » des bâtiments (au regard de la diminution de la vulnérabilité aux aléas considérés) au niveau des territoires concernés.

G.2.6 Contribution du groupe Energie

- **Quels sont les impacts que vous avez identifiés à ce stade de vos travaux ?**
 - Baisse de la consommation d'énergie pour le chauffage, hausse de la consommation électrique/carburant pour la climatisation ;
 - Contraintes accentuées pour le refroidissement des centrales nucléaires et baisse de la productivité des barrages hydroélectriques (rareté de la ressource) ;
 - Pas d'impact clair identifié sur le secteur des énergies renouvelables (hors biomasse, traitée par un autre groupe) ;
 - Surcoût de production à prévoir pour la production énergétique en zone chaude ou menacée par la remontée du niveau de la mer : typologie des coûts selon 3 scénarios (pas d'adaptation, adaptation *in situ* ou déplacement).
- **Avez-vous déjà identifié les impacts selon une échelle territoriale spécifique ou certains éléments déterminants justifient une analyse plus fine des impacts à l'échelle d'un territoire ?**
 - Pour la consommation d'énergie chauffage/climatisation, les régions du Nord pourraient connaître un bilan positif (gain en chauffage supérieur au besoin en climatisation, non documenté), et l'inverse pour les régions du Sud (gain chauffage < besoin clim, documenté à Agen) ;
 - La consommation de carburant va augmenter pour des besoins de climatisation des véhicules particuliers, plus particulièrement dans les régions chaudes en été (lien possible avec les zones touristiques) ;
 - Probabilité que des tours de refroidissement soient nécessaires sur les centrales en bord de rivière (lien avec la dimension paysage) ;
 - Pas de prospective sur des zones d'investissements localisées dans l'éolien ou le solaire ;
 - La construction de digues de protection contre la montée du niveau de la mer pour les unités de production énergétique ou de stockage peut avoir des répercussions au niveau local (paysage, etc.)
- **Avez-vous identifié une typologie d'acteurs correspondant à la mise en œuvre des mesures d'adaptation, voire à une articulation des échelles de compétence ?**

Non identifiée à ce stade

- **Avez-vous pu aborder, et si oui de quelle manière, la prise en compte de la capacité d'adaptation des territoires et sa concrétisation en potentiels d'action ?**

Pas d'avancée à ce stade

- **Avez-vous identifié des outils spécifiques :**
 - d'analyse des impacts
 - et/ou d'accompagnement des mesures susceptibles d'être applicables au niveau des territoires,
 - et/ou pour lesquels une déclinaison territoriale serait nécessaire ?

Les bilans Offre Demande d'Energie sont des outils disponibles chez les opérateurs du secteur énergétique et peuvent être transposés à l'échelon territorial.

Le Groupe Energie a proposé en ce sens un bilan différencié pour une ville du Sud (Agen) et pour une ville du Nord (Lille). Cet outil permet de caractériser l'impact énergétique local du changement climatique.

Quatrième Rencontre Régionale
« Energie Climat » des collectivités de Rhône Alpes
ADEME Villeurbanne 2 juin 2009 ¹

Gilles Debizet²
Maître de Conférences à l'Université Joseph Fourier
Chercheur au laboratoire PACTE-Territoires

Bonjour

PCL (Plan Climat Local), PECT (Plan Energie Climat Territorial), PCET (Plan Climat Energie Territorial). Il y a matière à s'égarer dans cette multiplicité d'acronymes. Je vais essayer d'utiliser toujours le même terme : PCT. Pour autant, je ne suis pas partisan d'une standardisation sémantique précoce. Si cette diversité est une condition d'appropriation de la démarche « Plan Climat » par les collectivités, il faut la préserver.

Quand j'ai commencé à préparer cet atelier avec Patricia Dubois, nous avons identifié plusieurs questions clés : comment articuler des politiques (ou des actions) entre l'intercommunalité (ou le PNR) porteuse du PCT et les communes ? Comment introduire et suivre les objectifs climat dans les actions sectorielles de la collectivité porteuse du PCT ? Quelle organisation mettre en place entre les services et avec les élus ? Comment concilier la temporalité longue des actions avec la montée en puissance rapide des PCT ?

Les présentations de l'ALE du Grand Lyon et de Grenoble Alpes Métropole que vous verrez dans cet atelier décrivent précisément des démarches et des outils développés à Grenoble et à Lyon et apportent des réponses à ces questions. Ces deux démarches sont très différentes :

- A Lyon : l'intercommunalité a établi un programme type d'actions : les communes s'engagent sur un niveau pour chaque action.
- A Grenoble : des partenaires (institutionnels et entreprises) s'engagent dans la démarche plan climat mais ils définissent eux-mêmes les actions qu'ils mettront en œuvre.

En exagérant, Lyon se caractérise par une démarche de management environnemental intégré et Grenoble par une démarche de mobilisation d'acteurs pionniers et d'organisation du co-apprentissage. Ces deux présentations ont matière à alimenter le débat sur la méthode d'implication des communes dans le PCT de l'intercommunalité. Ceci dit, ces deux agglomérations étant les plus grandes de Rhône-Alpes, la transférabilité de leurs méthodes à des collectivités porteuses de Plan Climat bien plus modestes est loin d'être évidente.

Je vais donc privilégier des apports fondamentaux qui sont autant de clés de lecture des expériences de PCT que d'éléments de méthodes en phase amont d'élaboration d'un PCT.

Tout d'abord le caractère bottom up ou top down des objectifs d'atténuation ou d'adaptation. Ensuite, une typologie des acteurs à impliquer. Enfin, les sphères d'actions et les leviers des collectivités locales.

Premièrement, bottom up et top down, adaptation versus atténuation. L'atténuation du réchauffement climatique passe essentiellement par la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). Le caractère planétaire de ce phénomène physique a conduit à ce que les

¹ Intervention introductive de l'atelier « Comment mobiliser les communes dans un PCET ? »

² Gilles.debizet@ujf-grenoble.fr <http://www.pacte.cnrs.fr/spip.php?article407>

objectifs d'atténuation se discutent au niveau mondial. Après Rio et Kyoto, c'est ensuite au sein de l'Union européenne que des quotas ont été définis par pays. Les PCT peuvent être considérés comme un outil local déclinant les objectifs planétaires. L'atténuation, en particulier la fixation des objectifs chiffrés, relève clairement d'une démarche top down.

A contrario, l'adaptation au réchauffement climatique est intrinsèquement une démarche issue de la base. De tout temps et en tout lieu les collectifs humains, se sont adaptés aux changements environnementaux, ceux qui n'ont pu le faire ont disparu comme le montre le livre de Jared Diamond « Effondrement ». Minimiser les risques et saisir les opportunités supposent des approches multicritères et des actions diversifiées sur les milieux (eau, air, sol ...), sur les modalités de peuplement (urbanisme, architecture ...) et bien sûr vis-à-vis des activités économiques.

L'on peut formuler 4 hypothèses complémentaires :

- A Les acteurs émetteurs de GES doivent être stimulés pour qu'ils réduisent leurs émissions de CO²
- B1 Une fois « conscients des risques », les acteurs agissent spontanément pour s'adapter,
- B2 Les actions d'adaptation optimales pour un acteur ne le sont pas forcément pour son territoire environnant,
- C Certaines actions d'adaptation peuvent engendrer une augmentation des émissions de GES et inversement.

A l'aune des ces hypothèses, l'on subodore que les politiques d'adaptation varieront selon les territoires, les branches d'activités et les thématiques sectorielles. Puisque les consensus se construisent différemment selon le volet (atténuation ou adaptation), l'on peut imaginer une gouvernance du PCT différenciée selon le volet. Concentrons-nous maintenant sur le volet le plus facile à appréhender, c'est à dire l'atténuation.

Notre deuxième point concerne la typologie des acteurs à impliquer dans un PCT. Qui émet des GES sur les territoires ? Qui, en premier lieu, a le pouvoir de modifier les conditions matérielles de ceux qui émettent ? Qui peut inciter d'autres ?

En dehors des secteurs de l'élevage ou de la riziculture, les émetteurs de GES sont les consommateurs finaux d'énergie tels que les habitants, les occupants et les exploitants de bureau, d'usine, les automobilistes et les exploitants des transports motorisés, les gestionnaires des espaces publics. Ces consommations sont prédéterminées par les performances énergétiques des bâtiments et des équipements. Ainsi, consommateurs d'énergie et investisseurs ou maîtres d'ouvrage immobiliers sont les acteurs ultimes susceptibles de mettre en œuvre les orientations du PCT.

Ce sont eux qui constituent les cibles ultimes à mobiliser. Pour ce faire, le porteur pourra s'appuyer sur les vecteurs intermédiaires :

- Prescripteurs (que l'on peut aussi considérer comme de potentiels maillons ou bloquants à faire évoluer) : architectes, BE ingénieurs, cabinets d'urbanistes, entrepreneurs ...
- Régulateurs : les commune à travers PLU, les grandes collectivités via les subventions au logement, aux activités économiques ... à côté de l'Etat qui jouit des principales prérogatives en matière de réglementation et de fiscalité,
- Diffuseurs de connaissances : chambre des métiers, fédérations professionnelles, associations citoyennes jouent à ce titre un rôle essentiel d'identification, de légitimation et de transmission des connaissances.

Troisièmement, le système d'acteurs étant posé, abordons les modalités de l'action publique. On définit usuellement trois sphères d'actions lorsque se met en place de nouvelles politiques :

maîtrise, influence directe, influence indirecte. La sphère que la collectivité maîtrise concerne généralement ses propres parcs d'équipement (bâtiments, espaces publics, flotte de véhicule ...). Selon ses compétences, la collectivité a une **influence directe** sur certains acteurs : par exemple les maîtres d'ouvrage constructeurs via l'autorisation de construire, les bailleurs sociaux ou les industriels via des subventions au logement social et, respectivement, à l'économie. Enfin, elle a une **influence indirecte** en faisant évoluer la pensée, tant du point de vue de l'imaginaire (la ville *post-carbone*, l'*éco-quartier*, le *bâtiment à énergie positive*, la *solidarité planétaire*, l'*urgence climatique* ...), des savoirs et savoir-faire des acteurs (innovations technologiques, modalités de conception, partage des connaissances au sein d'un bassin d'emploi ...) ou bien encore de la mobilisation collective (pression des citoyens, des employés, des partenaires économiques ...). Les périmètres de ces trois sphères d'influence diffèrent selon les secteurs de l'action publique et les champs de compétences des collectivités. Les collectivités disposent de leviers :

- la réglementation : le PLU communal, le règlement intercommunal d'assainissement ...
- l'incitation économique : la subvention financière, l'apport plus ou moins gratuit de ressources telles que le foncier, la facilité de connexion aux réseaux de mobilité, l'ingénierie, l'usage de l'espace public en phase chantier ...
- le porter à connaissance dans une optique de partage d'orientations, de transmission des connaissances et de « formation » à des savoir-faire professionnels à plusieurs échelles d'un établissement (ou une opération immobilière) jusqu'au bassin d'emploi,
- la pression sociétale : cf. influence indirecte.

Sur le territoire d'un PCT, les leviers sont répartis entre les différentes collectivités selon leurs compétences institutionnelles.

Le thème de cet atelier « comment mobiliser les communes dans les PCT ? » pourrait ainsi se décliner en trois questions fortement imbriquées ?

- En quoi les communes peuvent se substituer efficacement à l'intercommunalité (ou au PNR) porteur du PCT ?
- Quels critères prendre en compte pour définir les actions prioritaires du PCT : le potentiel de réduction des GES selon la technologie disponible, le potentiel d'adhésion des acteurs ultimes ou la capacité de la collectivité à les inciter ou les contraindre ?
- Quels acteurs cibler prioritairement ?

Les présentations de Hélène Poimbeuf, responsable du service Environnement de Grenoble Alpes Métropole et de Sylvain Godinot, chargé de Mission Plan Climat à l'Agence Locale de l'Energie du Grand Lyon apportent des éléments de réponses à ces questions. Des questions de clarifications peuvent être posées tout au long de ces présentations avant que nous nous interroguions ensemble sur la transférabilité de ces démarches à des collectivités de moindre ampleur.

G.4 Cahier des charges – Etude sur la vulnérabilité des zones urbaines au changement climatique (ADEME)

CONTEXTE

Le Groupe interministériel « Impacts du changement climatique, adaptation et coûts associés » a été constitué en mars 2007, concrétisant l'engagement défini dans le cadre du Plan Climat National. Son objectif global est « d'évaluer les impacts du changement climatique et les coûts associés, en amont de l'élaboration d'un Plan National d'Adaptation ».

La démarche d'ensemble vise, par des approches sectorielles, à identifier de manière non exhaustive des coûts liés aux impacts du changement climatique afin d'aboutir à un instrument d'aide à la décision publique cohérent. Le groupe plénier se divise en plusieurs groupes sectoriels (énergie, infrastructures, tourisme, ressource en eau, agriculture et forêts, risques et santé) et transversaux (territoires, biodiversité).

Le travail s'organise en 2 phases :

- Une première phase menée entre 2007 et 2008 visait un recensement et une exploitation des travaux existants en matière d'impacts, de sensibilité des secteurs, de mesures d'adaptation et de coûts ; la définition des orientations méthodologiques ; les interfaces entre les différents groupes thématiques et la définition des champs de travaux thématiques. Elle s'est concrétisée par un premier rapport intitulé « Impacts du changement climatique, adaptation et coûts associés en France » a été produit en juin 2008.
- Ce travail a permis de lancer une seconde phase de réflexion autour de la question de l'adaptation dans laquelle le groupe « Territoires » pourra apporter des éclaircissements importants sur les enjeux territoriaux de la question et évoquer les premières pistes de gestion de l'adaptation en fonction de différentes échelles de gouvernance.

Le groupe « Territoires » s'est investi dans la démarche globale, avec une vision transversale induisant un rythme de réflexion différent de celui des autres sous-groupes ayant adopté une approche sectorielle. En effet, il était essentiel que les animateurs des groupes sectoriels participent, avec une capacité à transmettre l'état de leurs travaux, aux réunions du groupe. C'est pourquoi les travaux se sont orientés dans un premier temps sur des auditions d'experts ayant déjà produit une réflexion sur le sujet.

Les orientations du groupe territoires se fixent *a priori* sur les champs suivants :

1. Cibler les spécificités - en termes de vulnérabilité face au changement climatique - relatives aux territoires littoraux (effets du CC sur la ligne de côte), aux zones urbaines et aux massifs de montagne (focus sur les Alpes)
2. **Accompagner les acteurs** pendant la période de transition vers une politique d'adaptation
3. Produire les outils permettant d'identifier les potentiels d'adaptation des différents types de territoires.

C'est dans le cadre de ces objectifs que le Groupe interministériel se propose d'accompagner une étude autour de la question spécifique des zones urbaines. Les enjeux de cette étude sont importants :

- D'une part, cette étude présente un aspect pionnier dans la mesure où l'analyse de l'adaptation en zone urbaine souffre d'un manque important de références.
- D'autre part, ce type de territoire concentre 80% de la population, justifiant ainsi la portée très importante de cette étude.

A. Construire un indicateur de mesure de la vulnérabilité d'une zone urbaine et le tester sur un échantillon d'agglomérations :

Dans un premier temps, le prestataire aura pour objectif d'identifier **les facteurs de vulnérabilité d'une zone urbaine aux impacts du changement climatique** et de produire un **indicateur de mesure de cette vulnérabilité**. La réalisation de cet objectif passe, *a minima* par les étapes suivantes :

- L'identification des principaux impacts sur les zones urbaines
- La hiérarchisation de ces impacts en fonction d'une typologie des zones urbaines françaises basée sur la zone géographique, le type de milieu (littoral, montagne, plaine, etc.) ou encore les activités économiques principales.
- Une phase de test de ce(s) indicateur(s) auprès d'un échantillon de zones urbaines pilotes identifiées parmi les 39 agglomérations de plus de 100 000 habitants répertoriées sur le territoire national.

Proposition de méthode :

- Impacts identifiés par les groupes sectoriels et contributions de ces groupes à l'analyse territoriale de ces impacts.
- Ressources bibliographiques du CIRED et autres apports documentaires
- Questionnaire/Entretiens avec les animateurs des sous-groupes sectoriels et transversaux
- Questionnaire/Entretiens avec des experts locaux dans des zones urbaines pilotes
- Liste d'impacts hiérarchisés en fonction d'une typologie de zones urbaines. Cette typologie est explicitée en faisant intervenir la notion de facteur de vulnérabilité.
- Méthodologie de mesure de la vulnérabilité / construction de l'indicateur.
- Synthèse des contributions des animateurs des groupes sectoriels et des experts locaux.
- Mise en œuvre de la méthodologie sur l'échantillon d'agglomérations de plus 100 000 habitants identifié par le comité de pilotage.

Livrables :

B. Identifier, sur la base d'un échantillon de zones urbaines, les freins à la transition vers une politique d'adaptation :

Dans un second temps, le prestataire devra produire une **liste hiérarchisée de recommandations concernant la prise en compte de l'adaptation dans les politiques en milieu urbain**.

Ce travail doit permettre de répondre aux questionnements suivants :

- Comment les décideurs des grandes agglomérations appréhendent l'adaptation au changement climatique sur leur territoire ?
- Quelle est la capacité d'action sur les principaux facteurs de vulnérabilité identifiés ?
- Quels sont les manques en matière de réglementation pour mettre en œuvre une politique d'adaptation en zone urbaine ?

Proposition de méthode :

- Questionnaire/entretiens auprès des décideurs locaux et experts locaux des zones pilotes.
- Analyse croisée des réglementations nationales et locales afin d'identifier les « vides » réglementaires.

Livrables :

- Liste des freins à la transition vers une politique d'adaptation.
- Recommandations concernant les mesures réglementaires à mettre en œuvre pour palier ces freins.

Remarque : *In fine*, le travail fourni doit s'insérer dans les objectifs du Groupe interministériel « territoires et adaptation » à savoir produire un premier cadre d'analyse « ou boîte à outils » à destination des acteurs territoriaux pour l'appréhension des impacts climatiques sur leur territoire, de leur potentiel d'adaptation et des dispositifs de gouvernance appropriés.

ELEMENTS DE PERIMETRE

Les recommandations de l'étude doivent porter principalement sur la réponse des acteurs locaux aux besoins d'adaptation d'une zone urbaine. Néanmoins, en partant d'une analyse minimale des orientations nationales et des entretiens réalisés à ce niveau, le prestataire pourra adresser des recommandations aux décideurs nationaux.

Même si l'analyse des impacts du changement climatique porte sur un horizon temporel éloigné, les recommandations de l'étude doivent porter sur la **gestion de la transition vers une politique d'adaptation**. En cela, c'est le temps de la décision qui doit être ciblé principalement dans les recommandations de l'étude.

Enfin, le prestataire devra distinguer dans son analyse ce qui relève de l'adaptation spontanée mise en œuvre par les acteurs économiques en réaction aux impacts de ce qui relève de l'adaptation volontaire décidée politiquement.

Annexes du Groupe Agriculture

H.1 Evaluation quantifiée des impacts du changement climatique : une revue de la littérature

L'évaluation de l'impact du changement climatique sur l'agriculture fait l'objet d'une littérature abondante.

Deux grandes catégories d'approches sont généralement utilisées : la première se base sur des analyses statistiques des relations observées entre production agricole et variables climatiques (Mendelsohn *et al.*, 1994) ; la seconde se fonde sur le couplage de modèles agronomiques et modèles économiques pour évaluer l'impact du changement climatique sur le rendement agricole dans un premier temps et ses répercussions en termes de PIB, de prix agricoles ou de marge brute dans un second temps.

Si les modalités de prise en compte des bénéfices de l'adaptation diffèrent selon les méthodes et les publications, les coûts des mesures d'adaptation sont généralement négligés ou intégrés au chiffrage global et ce, quelle que soit l'approche utilisée (OCDE, 2008).

Enfin, très peu d'études portent à ce jour sur les effets des bioagresseurs, ni sur l'impact des extrêmes climatiques.

Ce chapitre fait le point sur les deux principales approches mentionnées ci-dessus, présente leurs principaux avantages et limites respectifs, ainsi qu'une sélection de résultats issus de la littérature.

H.1.1 Analyses économétriques

Présentation de la méthode

Les analyses économétriques (*Top-down*) consistent à évaluer les impacts du changement climatique sur le secteur agricole en se basant sur les relations empiriques observées - à différentes latitudes ou périodes - entre un indicateur économique de productivité agricole (généralement rente ou valeur des terres) et différents paramètres exogènes, dont les variables climatiques (Bosello *et al.*, 2005). La relation fonctionnelle entre climat et productivité ainsi obtenue est extrapolée sous climat modifié, pour estimer l'impact du changement climatique sur l'agriculture. C'est généralement par une comparaison géographique (*spatial analogues*) de la production agricole que les impacts du changement climatique sur l'agriculture sont examinés (Deschênes *et al.*, 2006).

Les analyses économétriques reposent sur l'hypothèse économique largement utilisée dans les analyses classiques, de concurrence dite « pure et parfaite ». C'est sous cette hypothèse uniquement que l'on peut considérer que l'indice économique (rente, valeur des terres ou profit) représente parfaitement la productivité. Ces analyses supposent également un choix optimal des agriculteurs : les différents niveaux de valeur des terres observés sous un climat donné reflètent un état de stationnarité, dans lequel les agriculteurs sont parfaitement ajustés au climat et autres paramètres environnementaux. La valeur des terres qu'ils cultivent correspond ainsi au meilleur rendement atteignable sous ces conditions exogènes imposées. Les études basées sur cette méthode supposent ainsi une adaptation parfaite des agriculteurs au climat présent et futur. Les réponses adaptatives des cultures et des acteurs (substitution d'inputs, introduction de nouvelles cultures...) sont implicitement comprises dans le modèle (Mendelsohn *et al.*, 1994).

Avantages et limites

L'analyse économétrique ne repose pas sur une connaissance agronomique des régions ou des cultures étudiées et ne prend pas en compte la dynamique complexe des plantes. Si elle présente l'avantage d'une relative simplicité d'application (bien qu'un nombre important de données soit nécessaire), la validité des résultats apportés par ce type de méthode dépend largement de la fiabilité des données collectées, d'une part, et de la capacité de l'analyse statistique d'isoler les effets confondants, d'autre part (Bosello *et al.*, 2005).

La littérature met en avant des biais possibles, liés à l'impossibilité de prendre en compte l'ensemble des facteurs explicatifs de la productivité agricole (Deschênes *et al.*, 2006). Il a par ailleurs été démontré que cette méthode est faussée si les cultures sont irriguées et que les contraintes sur les ressources en eau ne sont pas explicitement prises en compte (Fleischer *et al.*, 2007). La considération d'un nombre limité de paramètres climatiques pour représenter le changement climatique constitue enfin une limite importante de ce type d'approches (Bosello *et al.*, 2005) : l'analyse économétrique ne permet pas une prise en compte de l'effet fertilisant du CO₂, ce qui conduirait à une surestimation (sous-estimation) des impacts négatifs (positifs) du changement climatique sur l'agriculture (Mendelsohn *et al.*, 1994).

Applications

L'analyse dite « ricardienne », est l'une des applications de ce type de méthodes. La rente agricole observée en différentes localisations est mise en relation avec un ensemble de facteurs explicatifs tels que la qualité des sols (sensibilité aux inondations, érosion, pente, composition, irrigation, perméabilité...), diverses variables de contrôle (zones urbaines/côtières, densité de population...) et paramètres climatiques (températures moyennes et précipitations moyennes en général).

Si ce type d'évaluations fait l'objet d'une littérature importante (Mendelsohn *et al.*, 1994 et 1999 ; Fleischer *et al.*, 2002 et 2008 ; Kurukulasuriya, 2007), on ne recense que très peu d'applications à l'échelle d'un pays européen. En effet, une telle analyse suppose de disposer de données sur des régions homogènes mais suffisamment vastes pour contenir plusieurs types de climat. C'est pourquoi la plupart des études sont réalisées sur les Etats-Unis, le Canada, l'Inde et le Brésil ou encore sur des grandes régions du monde.

Une application aux Etats-Unis de la méthode ricardienne par Mendelsohn *et al.* (1994) fait état, sous un scénario de doublement de la concentration en CO₂, d'une réduction de la valeur des terres agricoles de l'ordre de -4 à -6% à l'échelle nationale, avec d'importantes disparités régionales : le Sud des Etats-Unis enregistrerait des pertes de rendement significatives, tandis qu'au Nord, les effets sur la valeur des terres seraient positifs. Mendelsohn *et al.* (2000) utilisent également un modèle ricardien pour évaluer l'impact du changement climatique sur l'agriculture mondiale. Pour une augmentation des températures de 2°C et à partir d'une extrapolation de la relation climat-revenus agricoles observée sur les Etats-Unis, l'étude fait état, pour l'Europe de l'Ouest, d'un gain annuel de 17 milliards de dollars pour le secteur agricole. Fleisher *et al.* (2007) proposent une évaluation de l'impact du changement climatique sur les revenus nets annuels des fermes israéliennes en utilisant la méthode ricardienne. Deux analyses sont réalisées : la première, ne prenant pas en compte la contrainte sur la ressource en eau, montre des résultats positifs pour les revenus agricoles, aux horizons 2020, 2060 et 2100. La seconde analyse, rendant compte de la contrainte sur l'eau, présente des résultats plus mitigés : si les revenus augmentent significativement en 2020 (+16%), ils diminuent en 2100 (de -60% à -390% selon les scénarios).

Plusieurs études proposent une évaluation de l'impact du changement climatique sur l'agriculture fondée sur une analyse statistique, à partir du découpage des régions du monde en Zones Agroécologique (AEZ) tel que réalisé par la FAO (Fisher *et al.*, 2002 ; Kurukulasuriya *et al.*, 2008). Chaque AEZ est déterminée par un ensemble de caractéristiques environnementales et climatiques et un certain potentiel de production

agricole. Un modèle économétrique expliquant la distribution actuelle des AEZ en fonction de paramètres climatiques peut ensuite être estimé, afin de définir l'évolution de la distribution des AEZ – et du potentiel de production correspondant, selon différents scénarios de changement climatique. Une application de la méthode sur plusieurs régions du monde est réalisée par Fischer *et al.* (2002) : ce papier propose une estimation de l'impact du changement climatique sur l'agriculture mondiale, à partir d'un couplage de la méthode des AEZ et d'un modèle d'équilibre général (BLS), tenant compte des marchés mondiaux et d'un ensemble d'interactions économiques. Ce modèle prévoit une augmentation des rendements en Europe du Nord (16% par rapport à un scénario sans changement climatique) et dans toutes les autres régions de hautes latitudes et une baisse des rendements dans les zones tropicales ou équatoriales (par exemple -15 à -45% pour le blé dans les pays en développement). Pour l'Europe de l'Ouest, le modèle prévoit une baisse d'entre 0 et -6% de la productivité agricole céréalière à l'horizon 2080.

Deschênes *et al.* (2006) proposent d'évaluer l'impact du changement climatique par une analyse statistique, en extrapolant cette fois la relation entre les variations interannuelles de profit des agriculteurs et les variations climatiques en un lieu donné. Sur la région des Etats-Unis, les estimations indiquent une hausse du profit annuel des agriculteurs de l'ordre de 3,4% à l'échelle nationale, à l'horizon 2080. Ce résultat masque néanmoins des disparités régionales significatives : en Californie, les pertes pourraient atteindre jusqu'à 50% du profit actuel. Ce papier utilise la dépendance de la production à des variations climatiques de court terme pour estimer les réponses à des changements de long terme, ne tenant donc pas compte de toutes les palettes d'adaptation possibles pour les agriculteurs.

Tableau 3– Quelques résultats représentatifs

Etude	Région	Scénario Climatique	Horizons	Résultats	Commentaires
Mendelsohn <i>et al.</i> , 1994 (Ric)	Etats-Unis	2xCO ₂		-4 à -6% du revenu	Adaptation parfaite
Mendelsohn <i>et al.</i> , 2000 (Ric)	Europe l'Ouest	de+2°C	2100	+17 mds\$ de profits	Adaptation parfaite
Fischer <i>et al.</i> , 2002 (AEZ)	Europe l'Ouest	deSRES A1, A2, B1, B2	2020, 2080	2050, -6 à -18% du agricole	PIB Adaptation parfaite Utilisation du modèle d'équilibre BLS pour boucler les échanges mondiaux
Deschênes <i>et al.</i> , 2006	Etats-Unis		2080	+3,4% de profit 50% en Californie)	(-Ne prend pas en compte l'ensemble des palettes d'adaptation possibles
Fleisher <i>et al.</i> , 2007 (Ric)	Israël	3 scénarios (AOGCM)	2020, 2100	2060, +16% de profit en 2020 ; baisse de 60% à 390% en 2100 selon le scénario	enPrise en compte de la contrainte sur l'eau

H.1.2 Les modèles couplés agronomiques et économiques

Présentation de la méthode

Les évaluations réalisées par modèles « couplés » agronomiques et économiques correspondent à des évaluations dites « *bottom-up* ». L'évaluation des impacts économiques comporte deux étapes :

- Etape 1 - Estimation de l'évolution des rendements agricoles : à l'aide de modèles agronomiques de croissance des plantes, modélisant les relations complexes entre plante et différents paramètres d'entrée (paramètres climatiques – températures, précipitations, ensoleillement..., environnementaux – qualité des sols..., socioéconomiques – pratiques culturelles...) ;
- Etape 2 - Evaluation de l'impact économique, par l'intégration des variations de rendement dans un modèle économique : modèle d'équilibre partiel ou d'équilibre général (Porter *et al.*, 2005) ou modèle économétrique (Antle *et al.*, 2004).

La prise en compte de l'adaptation – et notamment les mesures d'adaptation retenues – résulte ici, contrairement aux analyses économétriques, du choix du modélisateur : la modification des pratiques culturales en réponse au changement climatique est intégrée comme paramètre d'entrée dans le modèle de croissance.

Si un nombre relativement élevé d'études à l'échelle internationale ont évalué les évolutions du rendement agricole à partir de modèles de croissance de plantes (étape 1), un nombre plus limité d'études sont allées jusqu'à la traduction de ces impacts en termes économiques (étape 2).

Avantages et limites

Plus précises que les analyses économétriques, les études fondées sur des modèles de croissance végétale sont également plus complexes et reposent sur un dispositif d'évaluation beaucoup plus lourd. Leur principal avantage est qu'elles permettent de prendre en compte les relations complexes entre la plante et différentes variables.

Les limites principales de ces études sont inhérentes à tout exercice de modélisation : ils représentent une vision relativement simplifiée de la réalité, bien que les recherches en cours permettent d'intégrer à l'analyse un nombre croissant de paramètres.

Par ailleurs, ces modèles ne captent pas à ce jour l'impact du changement climatique sur les bioagresseurs et ses répercussions sur les rendements agricoles.

Applications

L'utilisation de modèles couplés fait l'objet d'une vaste littérature, les résultats pouvant varier significativement selon les spécifications du modèle et notamment la prise en compte – ou non - de l'effet fertilisant du CO₂ (Parry *et al.*, 2005 ; Gallo, 2007).

Tan *et al.* (2003) proposent une méthode basée sur le modèle EPIC (un modèle de plantes à pas de temps journalier) et un SIG pour estimer l'impact du changement climatique sur le riz, le blé, le maïs et le soja à horizon 2050. En supposant un ajustement spontané des acteurs (dates de semis) en réponse au changement climatique, le modèle aboutit à une baisse de rendement de l'ordre de 13% en Europe (-23% sans adaptation). Le modèle est néanmoins susceptible de surestimer les impacts négatifs, l'effet fertilisant du CO₂ n'étant pas pris en compte. L'importance de l'effet CO₂ est mise en avant par Parry *et al.* (2005). Ils évaluent l'impact du changement climatique sur le secteur agricole et la nutrition, à partir de modèles de culture ISBNAT, pour les cultures de blé, riz, maïs et soja dans 18 pays. Le modèle de cultures est couplé au modèle d'équilibre général BLS, qui traduit les variations de rendements en termes

d'évolution des prix mondiaux des biens agricoles. En fonction du scénario climatique utilisé, on observe des pertes variant entre -20 et -90 millions de tonnes par an de production globale de céréales en 2080 - dans les pays en développement principalement - (jusqu'à -400 millions de tonnes sans l'effet CO₂) ; et une augmentation des prix mondiaux des céréales entre 3 à 20% due au changement climatique (jusqu'à +140% si l'effet CO₂ n'est pas considéré). Globalement, l'impact du scénario socio-économique utilisé est plus important que l'effet du changement climatique.

A l'échelle européenne, le projet PESETA, dont les résultats ont alimenté le Livre Vert sur l'adaptation publié en 2007 par la Commission Européenne, fournit des résultats intéressants concernant l'impact du changement climatique sur l'agriculture. A partir du modèle DSSAT, l'étude fait état d'un impact contrasté selon les régions d'Europe, tel que l'indique le Figure 16 - . A l'horizon 2080 et selon le scénario A2, les rendements varient en Europe entre -15% et +30%. Dans le sud et l'ouest de l'Europe, les baisses de rendements pourraient atteindre plus de 10% par rapport à la situation de référence ; tandis que dans certaines régions de l'est et dans les pays du Nord de l'Europe, le changement climatique aurait des effets bénéfiques sur les rendements agricoles.

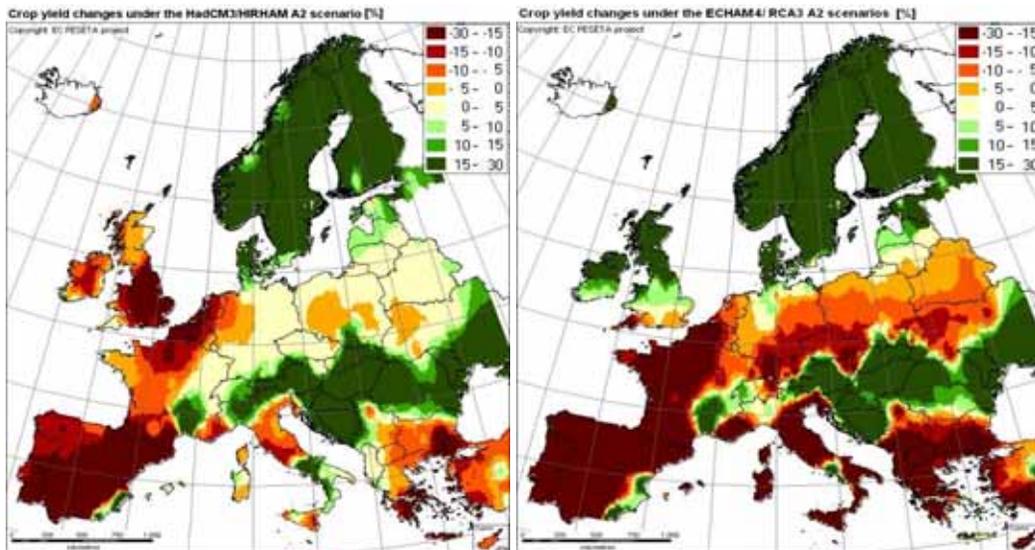


Figure 16 - Impact du changement climatique sur l'agriculture en Europe pour le scénario A2, selon deux modèles climatiques – Programme PESETA

Une évaluation des impacts du changement climatique sur le secteur agricole français est proposée par Galko (2007). L'évolution de la marge brute des agriculteurs est estimée pour deux années représentatives d'un changement climatique moyen et d'une année sèche, selon le scénario B2 du GIEC (modèle Arpège-Climat), pour les cultures de blé-tendre et de maïs. L'évolution du rendement estimée à l'aide du modèle STICS développé par l'INRA est traduite en variation de la marge brute des exploitants agricoles via le modèle économique AROPAj, sous une hypothèse d'économie constante. Pour l'année « moyenne », 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) ; négatif si cet effet est exclu (-2%). Pour l'année « sèche », le modèle aboutit à une réduction de la marge brute des agriculteurs de -5%, lorsque l'effet fertilisant du CO₂ est exclu et de -1% en tenant compte de l'effet CO₂.

Tableau 4 - Quelques résultats représentatifs

Etude	Région	Cultures	Modèle	Scénario climatique	Horizon	Résultats
JRC - Peseta 2007	Europe		DSSAT	A2	2080	-15 à +30% de variation de rendement selon la zone
Galko, 2007	France	Blé tendre Maïs	STICS couplé AROPAj	-B2, Arpège-Climat	Modèle2099	- 1% de variation de la marge brute agricole en 2099 (année sèche)
Parry <i>et al.</i> , 2005	Monde	Riz, maïs, soja	CERES	7 scénarios SRES	2060	+5 à +15% de production céréalière dans les pays développés avec adaptation spontanée
Tan <i>et al.</i> , 2003	Europe	Riz, maïs, soja	blé,EPIC	IPCC1, CGCM1	2050	-23% de variation de rendements sans adaptation -13% avec adaptation

H.2 Exemples de programmes de recherche

H.2.1 Etudes sur les besoins en eau des cultures

Arvalis – Institut du Végétal mène actuellement une étude destinée aux décideurs pour mettre en place les SDAGE. L'objet est de décomposer les zones de culture de maïs par petits bassins, afin d'obtenir, pour chacun d'entre eux, un chiffre donnant le seuil (en termes de climat, sol, risque statistique, ...) à partir duquel le producteur devient incapable d'avoir une culture rentable (Communication J.-P. Renoux).

Le dispositif OSIRIS, élaboré par Météo-France, l'INRA et le Service central des enquêtes et études statistiques (SCEES) du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, estime les besoins en eau du maïs. OSIRIS fournit un indicateur annuel des variations des besoins physiologiques du maïs grain en eau, qui prend en compte les précipitations, les températures et les principales caractéristiques des sols. Ces besoins sont estimés uniquement durant la période d'irrigation du maïs. L'indicateur est déterminé par comparaison à un besoin théorique de référence calculé sur la période de onze années s'étalant de 1993 à 2003. Il est établi sur les 198 petites régions agricoles dont le maïs irrigué représentait au moins 3% de la superficie agricole en 2000 (Source : Agreste primeur Numéro 194 - mars 2007).

Le travail de l'UMR G-EAU « Gestion de l'Eau, Acteurs et Usages » du Cemagref, dans le cadre des actions 4 et 5 de sa Convention 2007 avec le MAP et l'EAHER (« Impact de la hausse des prix sur la rentabilité de l'irrigation » et « Tarification et demande en eau au sein des ASA ») vient compléter ces travaux sur l'opportunité de l'irrigation dans le futur.

L'atelier de réflexion prospective ANR « ADAGE » ou ADaptation au changement climatique de l'AGriculture et des Écosystèmes anthropisés est coordonné par l'INRA. Sa problématique centrale : quelles recherches pour adapter au changement climatique l'agriculture et les écosystèmes gérés par l'homme : forêts, prairies, milieux aquatiques ? L'atelier a été lancé le 10 février 2009 pour une durée d'un an. Il devra aboutir à des propositions concrètes à destination de l'ANR et des ministères concernant une stratégie nationale de recherche. L'atelier ADAGE est fort de la contribution de 150 experts issus de 43 institutions différentes¹¹.

H.2.2 Etude sur l'évolution des parasites

Une thèse a démarré en janvier à l'unité Agroclim de l'INRA d'Avignon sur le sujet de l'évolution des parasites intitulée « Typologie fonctionnelle des maladies et ravageurs des principales cultures et modélisation des effets du changement climatique sur leur évolution à l'échelle du territoire français ». Cette thèse réalisée par Julie Caubel, ingénieur agronome, est financée par une bourse CIFRE obtenue par l'ACTA. Elle repose sur une approche intégrative des effets du changement climatique sur l'évolution des organismes pathogènes, sur la dynamique du système sol-plante, et sur la modification des pratiques. L'introduction de l'influence de la plante sur le développement du pathogène, en complément de sa réponse microclimatique sera au cœur du travail. Plusieurs collaborations viendront appuyer ce projet, au sein de l'INRA (Rennes, Toulouse, Grignon,...), de l'IRD (CBGP, Montpellier) et d'Agriculture and Agri-Food Canada (Unité « Bioclimatologie et Modélisation »)¹².

¹¹Source : http://www.clermont.inra.fr/clermont_eng/toute_l_actu/atelier_de_reflexion_prospective_anr_adage

¹² Source : Lettre d'information d'Agroclim N°7, Avril 2009

H.2.3 Recherches sur les cultures pérennes

Les observations sur l'évolution des dates de floraison des arbres fruitiers ont amené à lancer des programmes de recherche dans le domaine viticole (Seguin et Gaudillère, 2007). Les travaux de recherche sur la vigne se focalisent eux aussi sur la prise en compte de la phénologie et de la date de vendange. L'article de Schultz (2000), bien connu des milieux viticoles français, a commencé à poser la question des impacts du changement climatique sur la production viticole, et depuis les travaux se succèdent en France.

L'*indice de Huglin* qui prévoit la date des vendanges est l'un des plus utilisés en France. Il s'exprime en degrés par an et comptabilise les températures moyennes journalières supérieures à 10°C¹³. Dépendant de la latitude, il caractérise assez bien le climat général d'une région ou le potentiel d'adaptation d'une espèce. Selon certains chercheurs pourtant, les limites de l'indice de Huglin résident dans le fait que l'on ne peut pas l'utiliser pour les épisodes exceptionnels (cf. 2003), ni pour un climat chaud (comme le Sud de la France). Il peut toutefois être utilisé dans le Nord (Communication B. Seguin). D'autres indices plus précis existent, qui prennent en compte des facteurs annexes comme les pics de température, l'humidité, etc. (Lannuzel, 2005).

La relation quadratique entre température moyenne de croissance de la vigne et qualité du vin produit¹⁴ a également suscité des études en France : l'indice de Jones (2003) permet de construire des groupes de maturité des cépages. Ainsi, le climat actuel à Bordeaux est qualifié d'intermédiaire avec une moyenne de température actuelle (avril à octobre) de 16,5°C. Avec une élévation de température comprise entre 2 et 3°C d'ici la fin du siècle, on resterait dans la gamme des exigences thermiques des principaux cépages rouges (Gaudillère, 2007).

Des simulations de l'évolution de la phénologie de la Syrah dans la région de Montpellier effectuées à partir de modèles simples de développement fondés sur du temps thermique¹⁵ pour les cépages utilisés actuellement prévoient une modification importante de la phénologie (Lebon, 2004). Une élévation de 4°C de la température dans la région de Montpellier ramènerait la date moyenne de la véraison de la Syrah dans la première décennie de juillet. La température de référence est calculée sur la période 1973-1992 pour la station de Mauguio (34) selon des données Météo-France.

Le travail de thèse d'Inaki Garcia de Cortazar-Atauri (2006) est le premier à 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, en mettant en relation l'ensemble des réactions biophysiques des éléments du système sol-climat-cépages-techniques culturales et la modification des facteurs du climat, ainsi que l'élévation du CO₂. Ce travail est le premier en France à proposer un indice à vocation d'information qualitative : *l'indice IQclimat*. Cet indice permet de synthétiser l'information de deux variables climatiques mesurées pour la période véraison – récolte : la température minimale de culture et le nombre de jours où la température maximale dépasse 37°C (arrêt du stockage de carbone dans les baies). L'indice est normalisé par rapport aux valeurs de ces deux variables mesurées dans chacun des vignobles pour l'année 2005 (année d'une bonne qualité de production).

Des unités de recherche régionales se sont spécialisées dans la recherche prospective sur les effets du changement climatique sur la viticulture et/ou dans la recherche de moyens

¹³ L'indice de Huglin pour le sud de la France a accusé une augmentation de plus de 15% entre 1970 et 2003. A titre d'exemple, la ville de Dijon voit son climat passer de frais à tempéré, Avignon de tempéré à tempéré-chaud (Lannuzel, 2005).

¹⁴ Mise en évidence par une équipe américaine et modélisée par le classement reconnu internationalement Sotheby's

¹⁵ Cumul au pas de temps journalier des températures supérieures à 10°C = $\sum ((T_{max} + T_{min}) / 2) - 10$

d'adaptation : l'unité d'économie et de gestion de l'université de Bourgogne, en partenariat avec le CNRS, mène ainsi des travaux d'économétrie axés sur l'évaluation des effets du changement climatique sur la viti-viniculture.

L'UMR Vigne et Vins d'Alsace de l'INRA (UMR 1131), créée à Colmar en 2001 en partenariat avec l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, travaille sur la filière vitivinicole. En 2004, elle a pris le nom de « Santé de la Vigne et Qualité du Vin » (SVQV). Les travaux portent sur la génétique de la vigne, les pathogènes viraux et fongiques et les levures fermentaires, en relation avec la qualité des vins.

Le projet TERVICLIM ou Terroirs viticoles et changement climatique, piloté par une équipe du CNRS de Rennes, a pour objet d'observer et de modéliser l'évolution du climat à l'échelle des terroirs viticoles, en s'appuyant, d'une part, sur les études terroirs déjà réalisés et, d'autre part, sur des mesures météorologiques fines complétées par des observations des stades phénologiques de la vigne et des analyses de la qualité des baies. En France, trois régions viticoles sont concernées par le projet : le Val de Loire, la Bourgogne et la Champagne.

D'autres travaux de recherche sont en cours, notamment à l'INRA, sur les questions centrales de dates des vendanges, de phénologie et de degrés alcooliques, comme par exemple en Bourgogne sur un cofinancement Région et BIVB¹⁶ ou encore en Côtes-du-Rhône par un projet CASDAR.

Le programme de recherche multipartenaires PHENOCLIM coordonné par l'INRA ainsi que le projet ARVICLIM étudient également les impacts du changement climatique sur la vigne.

H.2.4 Prairies

L'outil SIMULAIT des Réseaux d'Élevage est utilisé pour le conseil et la prospective : Le système fourrager français a été modélisé (cas-types) pour calculer de manière interactive l'incidence de changements de rations, de dates de périodes d'affouragement, de niveaux de rendements ou de pressions de pâturage sur les équilibres entre cultures fourragères et entre fourrages stockés et pâturés.

Le modèle de simulation STICS prairies développé par l'INRA, le plus utilisé en France, calcule jour par jour la croissance de l'herbe à partir de sept variables météorologiques journalières. Il est utilisé dans diverses applications, notamment pour le suivi en temps réel de la situation fourragères nationale.

Par ailleurs, le système ISOP, indicateur de rendement des prairies issu d'une collaboration entre Météo-France, l'INRA et le SCEES, fournit des estimations de rendement des prairies temporaires et permanentes productives (quantités de matière sèche cumulée par hectare au pas de temps journalier) à l'échelle de la région fourragère (pour ce faire, la France est découpée en 208 régions fourragères). A une date donnée, ISOP est égal au rapport entre le rendement cumulé à cette date depuis le début de l'année et le rendement cumulé moyen à la même date calculé sur la période de référence 1982-2006. Les résultats de simulation sont extraits chaque mois¹⁷.

Le projet IMAGINE sur la biodiversité et changement climatique, financé par l'Institut français de la biodiversité (IFB) et coordonné par l'INRA (Jean-François Soussana) avec les contributions d'équipes du CNRS, utilise le modèle de simulation d'écosystème prairial

¹⁶ Impact du changement climatique (1950-2100) sur les potentialités viticoles du pinot noir et du chardonnay en Bourgogne. Apport d'un modèle numérique régional pour la désagrégation du signal climatique de large échelle. »

¹⁷ Source : <http://www.web-agri.fr/conduite-elevage/culture-fourrage/article-rendement-des-prairies-isop-meteo-inra-1088-51196.html>

PASIM (à horizon 2070-2100). Ce projet permet de tester expérimentalement les modifications de la biodiversité de la végétation prairiale en réponse à un scénario moyen de changement climatique (+3°C, sécheresse estivale accrue, augmentation de 200ppm du CO₂ atmosphérique).

Le projet CLIMFOUREL, démarré début 2008, vise à analyser les conséquences des changements observés sur la bande de transition climat tempéré / climat méditerranéen où l'élevage a souffert à trois reprises anormalement rapprochées (2003, 2005 et 2006) de graves déficits fourragers résultant de sécheresses sévères déclarées « calamités agricoles » (Sud de Rhône-Alpes, Nord du Languedoc-Roussillon et Est de Midi-Pyrénées) pour proposer des adaptations structurelles. Le projet est cofinancé par quatre organismes (INRA, CEMAGREF, Supagro et CIRAD) et trois Régions (Rhône-Alpes, Languedoc-Roussillon, Midi-Pyrénées). Météo-France et Agroclim-INRA contribuent en fournissant les séries de données climatiques. L'objectif fixé à cette contribution est d'analyser les variations climatiques du passé récent et du futur proche (de 1980 à 2040) dans les régions aux franges du climat méditerranéen, afin de préciser les tendances évolutives. Cinq stations climatiques ont pu être étudiées en 2008 ; cinq autres le sont en 2009.

L'étude en cours « Prospective sur l'adaptation des systèmes fourragers au changement climatique », sur financement ACTA associant l'Institut de l'Élevage, Arvalis – Institut du Végétal, l'INRA et Météo France, a pour objectif d'évaluer l'incidence du changement climatique sur les systèmes d'élevage et de culture. Elle s'appuie notamment sur des simulations avec le logiciel STICS, paramétré pour les prairies et la luzerne. Le paramètre observé est l'augmentation du taux de CO₂ et son impact sur l'efficacité de la photosynthèse. Les résultats finalisés sont attendus au deuxième semestre 2009. Les conséquences directes du changement climatique sur les cultures fourragères sont décrites à l'aide de STICS sur les systèmes d'élevage caractéristiques de trois zones (Lorraine, Bretagne et Sud de l'Aquitaine). Les experts du dispositif « réseaux d'élevage » contribueront à esquisser des propositions permettant de revenir à des équilibres satisfaisants et sécurisés¹⁸.

¹⁸ Pour plus d'information : www.inst.-elevage.asso.fr/evol-climat.

H.3 Les modèles de concentration en CO₂ ISAM et Bern-CC

Deux modèles de cycle du carbone – les modèles ISAM et Bern-CC – sont utilisés pour paramétrer les modèles de circulation générale qui permettent de déterminer les évolutions climatiques selon les différents scénarios économiques.

Ces deux modèles diffèrent quant aux modalités de définition de la réponse en termes de concentration en CO₂ des différents niveaux d'émissions.

La figure suivante présente les niveaux de concentration correspondant à chaque scénario SRES. Les lignes pleines correspondent aux résultats obtenus par le modèle Bern-CC, les lignes en pointillés ceux obtenus par le modèle ISAM.

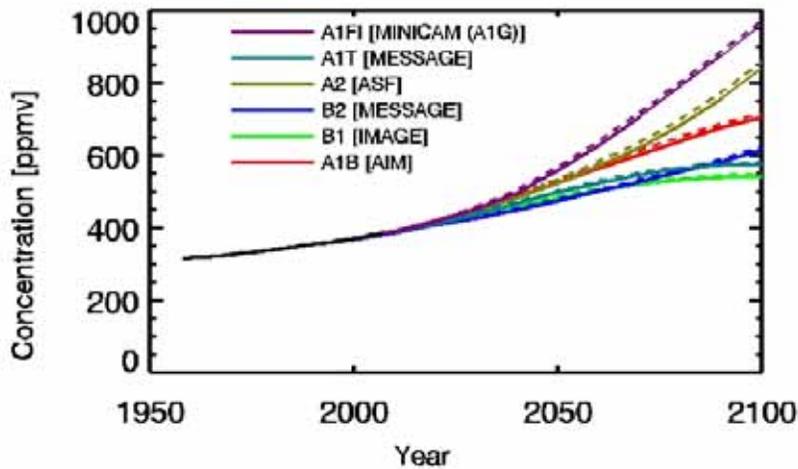


Figure 17 - Niveaux de concentration en CO₂ obtenus par les modèles ISAM et Bern-CC (Troisième rapport du GIEC, 2001)

Notons que la plage d'incertitude sur les niveaux de concentration dans chaque modèle est plus importante que la différence entre les modèles.

H.4 Point sur les modèles climatiques évoqués dans le rapport du Groupe

Un modèle climatique est défini par le GIEC (2001) comme une « représentation numérique du système climatique, fondée sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques de ses composantes, leurs interactions et les processus de rétroaction et qui tient compte de la totalité ou d'une partie de ses propriétés connues ». Les modèles climatiques représentent ainsi les principaux éléments du système climatique (océans, atmosphère, terres émergées, cryosphère et biosphère) et les processus qui se manifestent dans ces éléments et entre eux.

Il existe un grand nombre de modèles climatiques (le GIEC dans son dernier rapport se base sur 23 d'entre eux) ; qui diffèrent notamment quant à leur niveau de complexité (modèles simples / modèles couplés) et quant à leur prise en compte plus ou moins importante des composantes évoquées plus haut.

Cinq modèles climatiques, dits modèles de circulation générale (MCG) sont évoqués dans le rapport du groupe Agriculture : GISS (développé par le Goddard Institute for Space Studies), le modèle HadCM3 (développé par le Hadley Center for Climate prediction and Research), UKMO (United-Kingdom Met Office) et GFDL (développé par le Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) et enfin le modèle Arpège-Climat, développé par le CNRM (Météo-France).

H.5 Grille d'entretien Experts

Les impacts

Point sur les principaux impacts du changement climatique observés

Point sur la situation en France :

.....
.....

Point sur la situation dans la région étudiée

.....
.....

Quelles sont les espèces le plus touchées (et donc les plus observées) – « hot spots » ?

.....
.....

Point sur les principaux impacts futurs du changement climatique

Point sur la situation en France / Effets de seuil détectés ?

.....
.....

Point sur la situation dans la région étudiée

.....
.....

Quelles espèces seraient les plus touchées – « hot spots » ?

.....
.....

Quels sont les autres points de vigilance particuliers ?

.....
.....

Travaux existants

Avez-vous connaissance de travaux permettant de quantifier les impacts du changement

climatique et leurs coûts ?

.....
.....

Travaux existants / en cours en France :

<i>Etude</i>	<i>Région</i>	<i>Variétés</i>	<i>Modèle</i>	<i>Horizon</i>	<i>Résultat ou horizon auquel les résultats seront disponibles</i>	<i>Contact</i>
...

Travaux existants / en cours dans la région étudiée

<i>Etude</i>	<i>Région</i>	<i>Variétés</i>	<i>Modèle</i>	<i>Horizon</i>	<i>Résultat ou horizon auquel les résultats seront disponibles</i>	<i>Contact</i>
...

Mesures d'adaptation

Quelles actions d'adaptation sont déjà entreprises? (Distinction spontanée/planifiée), A-t-on des éléments sur le coût de ces mesures pour les agriculteurs

.....
.....

Avez-vous connaissance de travaux de recherche en cours en vue de développer de nouveaux moyens d'adaptation ?

.....
.....

Existe-t-il des éléments chiffrés permettant d'évaluer le coût des différentes actions d'adaptation mentionnées ci-dessus ?

.....
.....

Besoins de recherche

Quels sont les besoins de recherche / les manques de connaissances / besoins de suivi et d'observation?

.....
.....

Qui pourrait les mener / les initier ?

.....
.....

A quel horizon ?

.....
.....

Annexe I Annexes du Groupe Forêt

I.1 Impacts du changement climatique sur les forêts

Tableau 5 – Impacts du changement climatique sur les forêts (Riou-Nivert, 2006)

Causes	Effets	Conséquences				
		Gain productivité	Stress	Sensibilité ravageurs	Difficulté régénération	Mortalité
Taux de CO ₂	Photosynthèse	+				
Température d'automne, d'hiver et de printemps	Photosynthèse hivernale (résineux)	+				
	Saison de végétation	+				
	Activité des mycorhizes	+				
	Gelées (automne et printemps) ?		-		-	
	Gel hivernal ?				-	-
	Dessiccation hivernale (résineux)			-	-	-
	Progression de certains ravageurs			-	-	-
Température estivale et sécheresse	Respiration		-			
	Transpiration et stress hydrique		-	-	-	-
	Dégâts dus à la chaleur		-	-	-	-
	Incendies		-	-		-
Tempêtes	Chablis		-	-		-
+ Effets positifs - Effets négatifs						

I.2 Exemples de coûts générés par les perturbations associées au changement climatique

Tableau 6 – Exemples de coûts générés par les perturbations associées au changement climatique

Perturbations	Sources	Observations	Coût (à titre indicatif)
Sécheresses	Birot et Peyron, pour la sécheresse 2003	Plus forte mortalité des bois	500 M€
		Réduction de la croissance des arbres restants	200 à 300M€
		Moindre production de truffes	14 M€
		Moindre séquestration du carbone	400 M€
Incendies	DGFAR et ONF cités par G. Buisson (2007) On constate qu'une année caractérisée par une sécheresse remarquable s'accompagne d'une augmentation des surfaces incendiées d'environ 17 000ha tandis qu'une sécheresse notable (type 2003) l'écart à la moyenne est d'environ 40 000ha.	Coût de repeuplement, travaux de sécurité, réhabilitation ouvrages de Défense de la Forêt contre les Incendies, coût émissions de carbone	8 550€/ha
	Cour des comptes (2007)	Dépenses de l'Etat consacrées annuellement au risque feu de forêt	130 M€
Nuisibles (exemple : chenille processionnaire du pin)	MAP (2005)	Défoliation, affaiblissement des arbres, perte de croissance	
	FDGDON44	Lutte contre la chenille processionnaire du pin	105€ pour 15 arbres 70-100€/ha

I.3 Les modèles économique d'évaluation d'impact du changement climatique sur les biens et services marchands (Mazas, 2007)

I.3.1 Modèles d'optimisation sectorielle

Ces modèles intègrent principalement l'offre dans un ou plusieurs secteurs prédéterminés, typiquement l'agriculture ou la forêt, ainsi que les filières de transformation. Ils peuvent ajuster cette offre à une fonction de demande ou bien se contenter de minimiser les coûts de production.

L'hypothèse des anticipations rationnelles des agents ainsi que le mode d'actualisation choisis sont donc de première importance pour ce type de modèle. Malheureusement ces points retiennent peu l'attention de leurs auteurs.

FASOM (Forestry and Agricultural Sector Optimization Model)

FASOM est un modèle dynamique des secteurs agricoles et forestiers aux Etats-Unis. Il a été développé pour évaluer l'impact de politique de séquestration de carbone dans les forêts sur les marchés et le surplus des différents acteurs. L'intérêt de FASOM réside dans la réelle prise en compte de la concurrence entre agriculture et forêt pour l'usage des terres qui est arbitrée par les revenus anticipés de la terre (ou profitabilité marginale) pour chacune des activités. L'objectif du modèle est de maximiser la somme des surplus actualisés des producteurs et des consommateurs. Le modèle détermine simultanément les équilibres des marchés agricoles et forestiers pour toutes les périodes, avec l'hypothèse des anticipations rationnelles.

FASOM s'appuie sur les bases de données de qualité existant aux Etats-Unis, mais la nécessité de disposer de nombreuses données pour le paramétrer limitent son extension.

Les limites :

- Seules les forêts gérées sont considérées ;
- La croissance des arbres n'est pas modélisée.

Le modèle peut tourner sur une période de 100 ans, mais la politique de séquestration n'est évaluée que sur les 50 premières années.

Global Timber Market Model

Global Timber Market Model est un modèle dynamique d'optimisation des marchés du bois dans le monde. Il s'agit d'un modèle en équilibre partiel qui cherche à maximiser le surplus des acteurs avec l'hypothèse des anticipations rationnelles. Son horizon est infini (150 ans). Ce modèle a été construit pour évaluer les effets de marché lors de politiques de séquestration de carbone dans les forêts. Il a aussi été utilisé pour évaluer l'ampleur et le moment optimaux de la séquestration forestière.

EFI-GTM (European Forest Institute – Global Trade Model)

EFI-GTM est un modèle d'équilibre partiel qui intègre toute la filière forestière : la forêt, les industries de transformation, la demande de produits finaux issus de la forêt et le marché international de ces produits, en tenant compte des coûts de transport. Le modèle considère 61 régions dans le monde, mais se focalise plus particulièrement sur l'Europe. Il s'agit d'un modèle statique à plusieurs périodes, qui optimise la somme des surplus des producteurs et consommateurs.

I.3.2 Modèles d'équilibre général incluant des modules agricoles et/ou forestiers

Ces modèles présentent l'avantage de considérer les effets d'équilibre général, c'est-à-dire les conséquences sur les secteurs autres que l'agriculture ou la forêt des politiques menées dans ces domaines et également les rétroactions de ces autres secteurs sur l'agriculture et la forêt. Cependant, ces modèles sont rarement suffisamment désagrégés sur les secteurs qui nous intéressent.

GTAP (Global Trade Analysis Project)

Le projet GTAP vise à analyser les échanges au niveau mondial dans tous les secteurs. Dans ce but sont développées des bases de données de coûts (matrices I-O), mais aussi un modèle d'équilibre général calculable. Il s'agit d'un modèle multi-régional statique, qui considère des marchés de facteurs compétitifs, où le travail, le capital et la terre sont mobiles entre les secteurs mais pas entre les régions. GTAP ne peut cependant fournir une allocation des terres correcte car le facteur terre de GTAP n'est utilisé que pour l'agriculture. Les autres usages, comme la forêt gérée ainsi que tous les espaces naturels, ne font pas appel au facteur terre. Aucune mobilité n'est donc possible entre forêt et agriculture.

I.4 Quelques exemples de prédiction de l'effet du changement climatique sur la foresterie

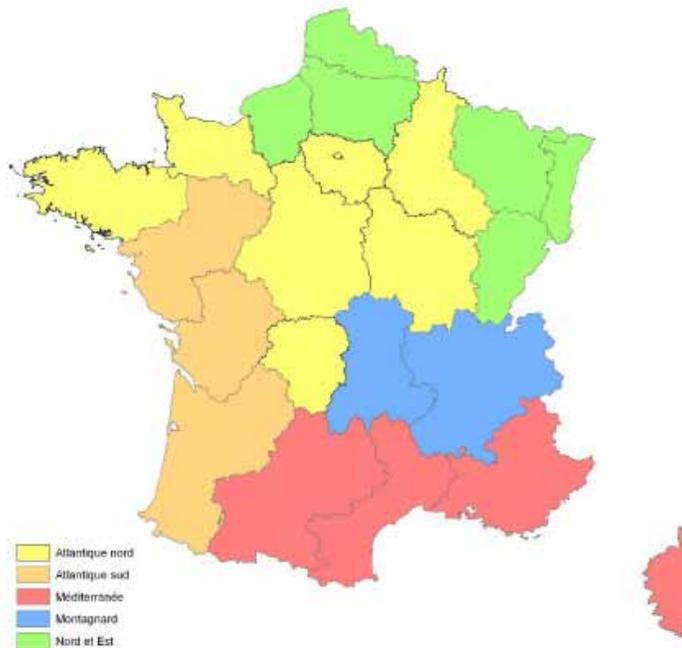
Tableau 7 – Effets du changement climatique sur la foresterie (Kirilenko, Sedjo, 2007)

Zone étudiée	Impact sur la production	Impact économique
Global Perez-Garcia <i>et al.</i> (2002)	Augmentation de la récolte dans l'ouest américain, (2-11%), la Nouvelle Zélande (10-12%), l'Amérique du Sud (10-13%) et baisse de la récolte au Canada.	La demande est satisfaite, les prix baissent avec une hausse du bien-être pour les producteurs et les consommateurs.
Europe Schroeter (2004)	Hausse de l'accroissement forestier (particulièrement en Europe du Nord) et chocs, sauf pour le scénario A1f ; 60-80% du changement du stock forestier est dû à la gestion forestière, le climat représente 10-30%, le solde étant lié à une modification de l'utilisation des terres.	Dans les scénarios A1f et A2, la demande en bois excède le potentiel de récolte, en particulier dans la deuxième moitié du XXI ^{ème} siècle ; dans les scénarios B1 et B2 la demande future en bois est satisfaite.
Etats-Unis Alig <i>et al.</i> (2002)	Augmentation des volumes de bois de 12% (moyen terme) à 24% (long terme) et légère hausse de la récolte ; changement majeur de la composition des essences et hausse des zones touchées par les incendies de 25-50% ; globalement, un changement important des altitudes, déclin des forêts du Nord et forte expansion des forêts du Sud.	Baisse du prix des bois, baisse du bien-être des producteurs comparativement au scénario « pas de changement du climat » ; gain pour les consommateurs et pertes pour les propriétaires forestiers.
Etats-Unis Sohngen, Mendelshon (1998)	Selon les modèles utilisés, la productivité prévue baisse ou augmente ; importante modification de la distribution des essences.	Faible, mais généralement positif, impact sur le bien être économique général pour tous les scénarios considérés dans le modèle, avec une baisse de productivité introduit dans le modèle économique.

I.5 Synthèse B. Roman-Amat

Bertrand Roman-Amat, Directeur délégué de l'École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF) s'est vu confié en février 2007 par les ministres de l'Écologie et de l'Agriculture la mission de réaliser un bilan des connaissances et un état des lieux de la gestion des forêts françaises face au changement climatique qui les affecte de façons multiples (biodiversité, croissance, santé, régénération) et accroît les risques naturels (érosion des sols, incendies, tempêtes), surtout dans les régions méridionales et en montagne.

Selon B. Roman-Amat, puisque le changement climatique ne devrait pas avoir les mêmes conséquences pour l'ensemble du territoire français, la politique de préparation des forêts ne devrait pas être uniforme. A titre indicatif, une proposition de zonage est proposée à horizon 2008-2030 :



Carte 10 - Proposition de découpage de la France en zones homogènes face au changement climatique (B. Roman-Amat, 2007)

Ce zonage devra être remis en question à la périodicité de 5 à 10 ans en fonction de l'évolution de la situation.

Le tableau suivant explicite les principaux effets du changement climatique pendant la période 2008-2030.

Tableau 8 - Impact estimé du changement climatique sur les écosystèmes forestiers selon la zone (B. Roman-Amat, 2007)

Zone géographique actuelle	Substitution d'espèces	Croissance et vitalité	Incendies	Érosion
Atlantique Nord	--	--	-	-
Atlantique Sud	--	--	--	-
Nord et Est	-	-	-	-
Montagnard (basse et moyenne altitude)	---	---	--	---
Montagnard (haute altitude)	--	-	-	--
Méditerranée	---	--	---	---

faible ou nul ; -- moyen ; --- majeur

Le rapport issu de cette mission, formule 32 propositions articulées autour de 5 chantiers prioritaires. Dans le domaine des risques, le rapport insiste sur le renforcement des moyens de surveillance. Afin de mieux gérer le risque d'érosion, il propose de tester des méthodes de prévention par génie biologique et, dans les zones relevant de la restauration des terrains de montagne (RTM), d'identifier au sein des forêts domaniales et communales des zones prioritaires d'intervention pour programmer le renouvellement des peuplements forestiers. Bernard Roman-Amat insiste sur la nécessité de l'extension géographique de la politique de prévention des incendies. Dans les forêts dites de production, l'auteur du rapport propose d'encourager le développement d'une sylviculture dynamique et de peuplements mélangés, notamment en incitant financièrement au remplacement des peuplements vulnérables. Dans le domaine de la recherche-expérimentation-développement, le rapport insiste sur la nécessité de renforcer le soutien apporté par l'Agence nationale pour la recherche (ANR) aux recherches sur le changement climatique et la forêt, notamment par l'intermédiaire du GIP Ecofor (groupement d'intérêt public sur la recherche sur les écosystèmes forestiers). Il encourage aussi la création de réseaux mixtes technologiques sur l'adaptation des forêts à leur environnement (stations forestières) et sur la diversité génétique des arbres et de confier à l'ONF une « recherche-action » en forêt publique. Enfin, le rapport propose des mesures en matière de gouvernance publique, en insistant sur la nécessité de mieux coordonner l'action des Ministères de l'Ecologie et de l'Agriculture sur le sujet.

Depuis ce rapport, le RTM a vu le jour, ainsi que la mission interministérielle tout comme ARP ADAGE¹⁹ qui doit faire le point à l'Agence Nationale de la Recherche.

¹⁹ Atelier Réflexion Prospective qui est piloté par l'INRA.

http://www.inra.fr/la_sciences_et_vous/dossiers_scientifiques/changement_climatique/l_inra_coordonne_l_atelier_de_reflexion_prospective_anr_adage

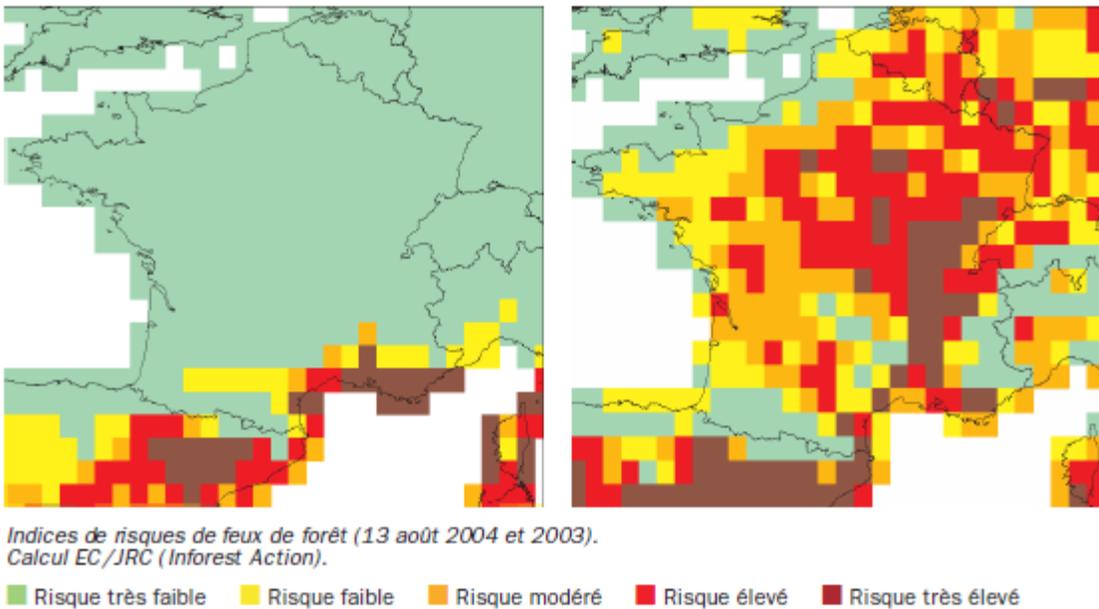
I.6 Méthodes de calculs des volumes

Les principales hypothèses sont les suivantes :

- BO (bois d'œuvre) : valeur estimée pour 2008 (projection depuis 1991, les années 2000 et 2001 avec les tempêtes ayant été enlevées), maintenue constante.
- BI (bois d'industrie) : valeur 2008 (projection depuis 1991), maintenue constante.
- BE (bois énergie) pour les projets CRE : pas de données disponibles pour CRE1. seuls les projets CRE2 sont estimés (estimations à partir de Thillay du Boullay, 2008), on estime que les gisements issus de forêt sont de l'ordre de 1,1 millions de m³. On considère que les bois issus de TCR ne pourront être fournis dans les premières années de fonctionnement des unités de cogénération et que le gisement alternatif sera la forêt : $\frac{3}{4}$ de 2012 à 2015 et $\frac{1}{4}$ ensuite (jusqu'à 2020). Pour les autres valorisations (dont les chaufferies collectives et industrielles), on pose l'hypothèse qu'elles constituent 80% du bois énergie commercialisé des EAB (donnée estimée pour 2008). On pose que la mise en service à plein potentiel de ces unités est 2012.
- BB (bois bûche) : trois années sont disponibles par l'enquête CEREN : 1996, 2001 et 2006. A partir de 2007 on pose que la consommation est stabilisée sur le niveau 2006 (rendement des matériels de chauffage, etc.).

I.7 Le coût des feux de forêts

Comme nous pouvons le voir sur les cartes ci-dessous, tandis qu'au cours d'une année dite « normale », le risque d'incendie concerne principalement la zone méditerranéenne, au cours des années de sécheresses extrêmes (ou de canicules) telle qu'en 2003, le risque de feux de forêts s'étend à l'ensemble du territoire national.



Carte 11 - Risques incendies (ONERC, 2007)

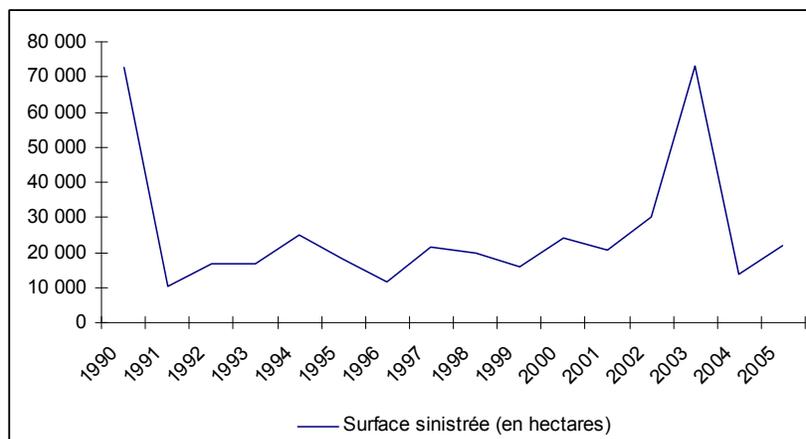


Figure 18 - Feux de forêts (1990-2005) (SSP ; direction de la Sécurité civile)

Une difficulté de l'estimation du coût vient du grand nombre d'acteurs impliqués dans la prévention et la lutte contre les feux de forêts. Les méthodologies sont également différentes. Cela conduit à des ordres de grandeur des coûts très variables. A titre, d'exemple, quelques évaluations sur le coût des incendies de 2003 sont présentées :

- J.L. Peyron a estimé le coût de la lutte contre les incendies à 4 fois le coût normal. Le coût additionnel est donc de trois fois le coût normal (estimé à 70M€ par an pour la part Etat) et est estimé à **210M€ pour la seule part Etat**.

- Une estimation réalisée pour le Ministère de l'Intérieur indique que le coût des feux de forêt a été de 179M€, contre 83M€ en année normale (ONERC, 2007). Le coût additionnel est donc estimé à **96M€ pour la seule part provenant du Ministère de l'Intérieur**.
- La DGFAR et l'ONF ont réalisé une estimation des pertes par hectare incendié en 2003 dans le cadre d'une demande d'aide du fonds de solidarité de l'Union Européenne. Cette estimation évalue le coût moyen à l'hectare incendié à 8 550 euros. Ce coût intègre les travaux de sécurité, les coûts de repeuplement, ceux de réhabilitation des ouvrages de Défense de la Forêt contre les Incendies (DFCI), ainsi que le coût des émissions de carbone. Actuellement, il est estimé qu'en moyenne lors d'une sécheresse dite « *remarquable* », 17 000 hectares supplémentaires sont incendiés. Le coût moyen d'une sécheresse remarquable peut ainsi être estimé à 145 millions d'euros (17 000 * 8 550). En 2003, les surfaces incendiées ayant été exceptionnellement importantes (60 000 hectares), l'écart à la **moyenne** des années qui ne sont pas marquées par une sécheresse dite « *notable* » atteint ainsi plus de 40 000 hectares, ce qui correspond à un coût de près de **370M€** (Buisson, 2007).

I.8 - Synthèse du rapport d'étape de la mission interministérielle sur le risque incendies de forêt en lien avec le changement climatique

RAPPORT D'ETAPE DE LA MISSION INTERMINISTERIELLE CGAAER-CGEDD-IGA (MAI 2009)

SUR L'EXTENSION FUTURE DES ZONES A RISQUE ELEVE D'INCENDIES DE FORET EN LIEN AVEC LE
CHANGEMENT CLIMATIQUE

PAR C. CHATRY, B. CREUCHET, JJ. LAFITTE, D. LAURENS, JY. LE GALLOU ET M. LE QUENTREC

AVEC LA PARTICIPATION DE J. GRELU

La condition nécessaire pour qu'un feu de forêt (forêts et formations arbustives) démarre et se propage est la faible teneur en eau des végétaux qui la compose. Cette teneur en eau résulte d'un bilan entre les apports et les pertes d'eau. Les apports se font par les pluies et la condensation nocturne, fonction de l'humidité de l'air et de l'écart entre les températures nocturnes et diurnes. Les pertes sont dues à l'évaporation au sol et à l'évapotranspiration des végétaux sous l'effet de la température, du vent, de l'humidité de l'air, du rayonnement solaire et du stade de développement des végétaux. La puissance calorifique d'un incendie dépend des essences qui constituent le peuplement de la forêt.

Pour évaluer l'évolution du risque d'incendie de forêt avec le changement climatique, il est donc indispensable de connaître ce que deviendront chacun des paramètres précités à l'échelle des massifs forestiers.

Les modèles de climat ne rendent pas totalement compte de l'augmentation de la température moyenne constatée en France depuis le milieu des années 1980. En revanche il est possible de tirer profit de cette hausse moyenne pour calculer de manière recevable les effets qu'elle a induit sur les bilans en eau et les indices qui en dérivent.

Aujourd'hui, 89 départements sont recensés provisoirement par la mission comme comportant des risques incendies de forêts, dont 14 avec un risque fort sur l'ensemble de leur territoire, 8 avec un risque fort sur une partie de leur territoire, 6 avec un risque moyen sur l'ensemble, 61 avec un risque faible dont 4 comportant un niveau moyen de risque sur une partie seulement de leur territoire.

A partir de ce constat, la mission interministérielle en charge d'étudier l'extension future des zones à risque élevé d'incendies de forêts en lien avec le changement climatique, se fixe comme objectif, dans son rapport définitif, de proposer une estimation de cette extension vers le Nord (et en altitude pour les zones de montagne) aux échéances 2010-2030-2050 en lien avec le changement climatique tel qu'il est aujourd'hui anticipé.

Deux approches sont d'ores et déjà explorées pour parvenir à estimer cette extension des zones sensibles :

a) la caractérisation de la sensibilité des peuplements forestiers de demain (dont pour la France métropolitaine la grande majorité existe déjà aujourd'hui) à l'incendie (dans les conditions de 2030 ou 2050) qui peut s'appuyer, à partir des types de peuplements recensés dans l'Inventaire forestier national :

- sur les connaissances apportées par les feux non méditerranéens connus ;
- sur la géologie (nature des affleurements) qui détermine avec la pédologie, les conditions d'alimentation en eau ;

- sur l'anticipation de zones probables de dépérissements forestiers.

Les conditions de démarrage des feux, désignées par l' « inflammabilité » dépendent de l'abondance de végétaux finement divisés (aiguilles, herbe, brindilles). Il est permis de penser que l'abondance des matériaux de ce type ne diminuera pas dans le futur pour les forêts les plus sensibles.

b) l'évolution de l'IFM (Indice Forêt Météo qui donne une estimation du risque d'occurrence d'un feu de forêt calculé par Météo France et qui ne dépend que de paramètres météo et de la durée du jour, ce qui permet des comparaisons entre des territoires aux climats très différents indépendamment des espèces présentes). L'IFM permettant de quantifier quotidiennement la propension au démarrage et à la propagation du feu dans la végétation, l'étude de son évolution dans les décennies passées puis, en intégrant le changement climatique proche, sa simulation (extrapolation ou calcul à partir des modèles climatiques) pour les décennies à venir peut contribuer à la cartographie des zones d'extension possible du risque feux de forêts.

Le changement climatique attendu s'accompagnera d'une aggravation de l'aléa dans les territoires actuellement exposés et où des dispositifs de défense des forêts contre les incendies (DFCI) sont en place ainsi que d'interactions plus fréquentes entre protection en milieu urbain et incendies de forêt.

Il laisse aussi présager une propagation territoriale (vers le Nord, en altitude) de l'aléa « incendie de forêts ».

Quelles conséquences cela aura-t-il sur les politiques publiques et les moyens financiers affectés à la prévention et la lutte contre les incendies de forêt ?

A partir du recensement des outils de prévention, de prévision, de détection et de lutte des axes de travail et des points de vigilance ont été mis en évidence par les membres de la mission :

a) le rôle déterminant de la prévision (météo notamment) dans les dispositifs zonaux de lutte contre les incendies de forêt

b) l'apport décisif des technologies nouvelles de traitement de l'information pour améliorer la détection, la surveillance et le contrôle (réseaux de vidéo-détection, drones, images vidéo, satellitaires et aériennes, systèmes d'information géographique) en matière de risques d'incendie.

c) les préconisations techniques de prévention qui pourraient être formulées immédiatement pour l'urbanisation à développer aujourd'hui et susceptible d'être exposée à l'incendie de forêt de demain pour :

- la compacité de l'urbanisation ;
- les caractéristiques de la voirie générale desservant l'urbanisation proche de la forêt ;
- la gestion de l'interface entre l'urbanisation et la forêt ;
- la construction des réseaux (eau, électricité...) ;
- les constructions d'habitation et leurs appendices extérieurs (stockage...).
- la trame verte.

Ce type de préconisation concerne d'une manière générale les investissements engagés aujourd'hui pour une durée de service de plusieurs décennies tels que la trame verte ou les schémas de desserte forestière

La question se posera de la **voie réglementaire à privilégier pour assurer l'intégration de la prévention de ce risque, selon les cas accru ou émergent, dans l'encadrement et l'adaptation de l'urbanisme et de la construction. Une part de progrès ne pourra sans doute être obtenue que par la sensibilisation, voire la formation des citoyens concernés et cela de manière régulière et répétée.**

d) l'importance de la gestion sylvicole pratiquée dans les 50 ans à venir (l'incidence des politiques visant à augmenter la mobilisation de biomasse, réduisant ainsi la concurrence pour l'eau et le volume combustible en cas d'incendie, le traitement des peuplements déperissants, la gestion ou la non-gestion des forêts de montagne ...).

e) la recherche d'optimisation des moyens

Dans la perspective d'une extension des zones touchées par le risque d'incendies, il sera nécessaire de définir, s'agissant de moyens existants ou supplémentaires, les moyens (nature, déploiement) présentant le meilleur rapport coût/efficacité (exemples : le choix du guet armé ou le positionnement de la flotte d'avions et hélicoptères bombardiers d'eau). La mission s'efforcera d'éclairer cet aspect dans son rapport final.

f) le nécessaire réexamen des financements (nature, montant, contributeurs) consacrés entre les stades de la prévention locale à la stratégie de lutte et à leur répartition entre les acteurs (Union Européenne, Etat, collectivités, assureurs, privés) ainsi qu'une esquisse de montée en puissance compatible avec l'évolution du risque.

En particulier le rapport final examinera la plus ou moins grande pertinence de transposer tout ou partie des pratiques actuelles de la zone Sud-Est et du Massif Aquitain (moyens humains et matériels) dans les futures zones à risques et pour cela s'interrogera sur l'utilité relative de ces dépenses notamment :

- pour les équipements DFCI au regard de leur utilité réelle ; et surtout de la capacité des maîtres d'ouvrage à les entretenir ;
- pour les activités de surveillance et de guet terrestres au regard d'autres méthodes utilisées actuellement ou envisageables dans le futur - guet aérien, vidéo protection, drones.

S'agissant de la mesure de la « performance », il paraît très difficile de rapporter les actions conduites aux résultats (départs de feux, surfaces brûlées) ; en revanche, il devrait être plus facile de comparer pour la détection et l'extinction des feux naissants par le dispositif pré-positionné, le coût des différentes formes de veille (terrestre, aérienne ; humaine, automatisée).

La mission s'intéressera aussi au rapport coût/efficacité des équipements DFCI en plein cœur de massif et des mesures de débroussaillage en interface forêts/habitation.

L'utilisation renforcée sur une partie plus importante du territoire de la boîte à outils « prévention et lutte », la nécessité d'intégrer le plus rapidement possible les nouvelles technologies dans le développement de nouveaux outils de surveillance et détection, sont des orientations qui s'imposent à notre pays dès aujourd'hui, et qui justifient le travail confié à la mission interministérielle pour évaluer au mieux les coûts et économies induits par ces nouveaux moyens à déployer demain.

Annexe J Annexes du Groupe Santé

J.1 Principes et finalités des méthodes d'évaluation économique : présentation schématique²⁰

L'estimation de la valeur économique des effets des dégradations de l'environnement sur la santé doit être considérée en fonction des finalités de l'évaluation réalisée.

Les méthodes d'évaluation économique ont été développées et utilisées depuis les années 1960 dans une perspective d'aide à la décision des responsables de l'élaboration des politiques publiques (elles ont notamment été utilisées en France dans le cadre de la « Rationalisation des Choix Budgétaires » dans le courant des années 70). Elles visent à comparer différentes alternatives d'action en fonction de la valeur des ressources consommées et des effets produits dans chaque cas. Le « cas de référence » est celui de la situation où aucune action spécifique nouvelle n'est entreprise, par exemple pour modifier les risques liés à la dégradation de l'environnement. Typiquement, l'évaluation vise à apprécier l'intérêt de différentes modalités d'intervention par rapport à ce « cas de référence ».

L'évaluation des conséquences « secondaires » à une activité donnée qui ne seraient pas prises en compte, dans une économie de marché non régulée, dans les coûts de production associés à cette activité (externalités) a trouvé de plus une application exemplaire, dans le domaine de l'environnement dans la formulation du principe « pollueur-payeur ».

Les principes qui fondent les deux principales approches utilisées peuvent être résumés de façon très schématique.

Les méthodes d'évaluation **coûts-bénéfices** restent les méthodes de référence pour l'évaluation des politiques publiques, notamment dans le domaine de l'environnement, dans la mesure où elles permettent de comparer des interventions produisant différents types d'effets, et de produire une estimation de l'importance du résultat obtenu.

Ces méthodes reposent sur l'estimation, en unités monétaires, de la valeur de l'ensemble des ressources consommées et des effets produits, pour l'ensemble de la société et pour les différents groupes qui la composent. L'estimation de la valeur des effets produits repose, en principe, sur le « consentement à payer » (Willingness to pay ou WTP), c'est-à-dire sur l'estimation du montant que les personnes composant la population concernée seraient prêts à payer pour obtenir (ou pour éviter) cet effet. La différence entre la valeur des ressources supplémentaires consommées et celle des effets obtenus représente le « bénéfice » (ou la « perte ») net(te) associé(e) à l'alternative considérée.

²⁰ Voir notamment :

- Pearce D, G Atkinson et S Mourato: *Analyse coûts-bénéfices et environnement - Développements récents*. OCDE, 2006
- United States Environmental Protection Agency: *Guidelines for Preparing Economic Analyses*. US EPA, 2000
- Department of Health and Ageing and enHealth Council: *Guidelines for Economic Evaluation of Environmental Health Planning and Assessment*. Commonwealth of Australia, 2003. http://enhealth.nphp.gov.au/council/pubs/pdf/eee_guides1.pdf
- Hutton G: *Considerations in evaluating the cost-effectiveness of environmental health interventions*. OMS, Genève: 2000
- World Health Organization : *Making Choices In Health: WHO Guide To Cost-Effectiveness Analysis* (T. Tan-Torres Edejer T, R Baltussen, T Adam, R. Hutubessy, A Acharya, DB Evans et CJL Murray, eds). OMS, Genève: 2003
- HM Treasury : *The Green Book - Appraisal and Evaluation in Central Government*. 2003. <http://greenbook.treasury.gov.uk/>

Les méthodes d'évaluation **coûts-efficacité** permettent de comparer l'efficacité d'interventions visant un même type de résultat. Elles se traduisent par l'estimation d'un rapport entre la valeur des ressources consommées et une mesure d'un effet donné.

Dans le domaine de la santé, la méthode de référence appartient en fait à une famille proche, celle des évaluations « coûts-utilité ». Elle est utilisée pour comparer différents traitements ou interventions visant à l'amélioration de la santé, en évitant les difficultés liées à l'attribution d'une valeur monétaire à l'estimation de la valeur de la vie ou de sa qualité : les effets d'amélioration de la santé associés à chaque alternative sont mesurés par l'estimation « d'années de vie ajustées sur la qualité » (QALYs), permettant de ramener à une même unité les effets touchant à la durée de vie et ceux correspondant au retentissement des maladies et de leurs séquelles sur la qualité de vie.

Pour l'application de ce type d'approche à l'évaluation d'interventions visant à réduire les risques liés à l'environnement, les coûts directement liés à la prise en charge des malades seraient additionnés au coût des interventions sur l'environnement, la somme étant ensuite rapportée à l'estimation du nombre de « QALYs » résultant de l'intervention considérée. Parmi les coûts indirects, ceux qui correspondent au « temps perdu » par le patient sont en principe intégrés dans l'estimation des QALYs.

Une métrique analogue aux QALYs a été développée pour la Banque Mondiale, puis utilisée par l'OMS pour estimer la « charge de morbidité » (global burden of disease) attribuable à chaque maladie. Les « années de vie ajustées sur l'incapacité » (AVAI ou DALYs) représentent la somme des années de vie perdues en raison d'un décès prématuré (survenant à un âge inférieur à l'espérance de vie) et des années de vie vécues avec une qualité de vie altérée, pondérées par un coefficient reflétant l'importance de cette altération. Les DALYs, mesure « négative » sont en principe complémentaires de la qualité de vie « positive » mesurée par les QALYs²¹.

²¹ Pour une comparaison des estimations produites par chaque méthode et une discussion des divergences observées, voir en particulier : Sassi F: Calculating QALYs, comparing QALY and DALY calculations. *Health Policy Plan*. 2006; 21: 403-408.

Pour une discussion des possibilités d'attribuer une valeur monétaire (« valeur d'une vie statistique ») à des effets mesurés en QALYs, voir notamment : Hirth RA, ME Chernew, E Miller, M Fendrick et WG Weissert : Willingness to Pay for a Quality-adjusted Life Year : in Search of a Standard. *Med Decis Making* 2000; 20: 332-342

J.2 Haut Conseil de la Santé publique – Avis relatif aux risques pour la santé liés aux effets du changement climatique

Avis produit par la Commission spécialisée Maladies transmissibles, le 26 juin 2009

Le Haut Conseil de la santé publique a étudié le rapport de M. Delavière et J.-F. Guégan « Les effets qualitatifs du changement climatique sur la santé en France » pour définir les conséquences sanitaires prioritaires à l'échéance de 2025 et formuler des recommandations en termes d'actions de prévention et d'amélioration des connaissances.

Constat

Le changement climatique se manifeste d'une part par une modification de la distribution des paramètres climatiques à tendance séculaire (changement climatique stricto sensu) et d'autre part par une modification de la fréquence et de l'intensité des événements météorologiques extrêmes²².

Le changement climatique est une partie d'un tout composé de multiples changements environnementaux et socio-économiques. De même les conséquences sanitaires éventuelles du changement climatique sont multi-causales et ne peuvent être convenablement interprétées qu'en les replaçant dans leur contexte (démographique, social, économique, etc.). Les capacités d'adaptation biologique de l'homme aux changements de l'environnement sont faibles au regard de ses capacités d'adaptation culturelle et technologique. A contrario, l'adaptabilité biologique des organismes simples, aux cycles de reproduction plus rapides, est beaucoup plus importante.

L'allongement de l'espérance de vie est une caractéristique humaine génératrice d'une augmentation du nombre d'individus les plus vulnérables, notamment face aux risques climatiques. Face au réchauffement planétaire, la France métropolitaine doit s'attendre à une exacerbation de certains risques sanitaires existants, ainsi qu'à une modification des zones géographiques concernées (du Sud vers le Nord, des plaines vers les hauteurs...). La France d'outre-mer, essentiellement tropicale, peut s'attendre à une augmentation des risques infectieux, une augmentation possible des événements météorologiques extrêmes et des phénomènes migratoires à partir de pays riverains plus pauvres. Cet afflux de population pourra être responsable d'une augmentation de la précarité et de ses conséquences sanitaires. Si la France métropolitaine n'est pas le pays le plus exposé, de par sa situation géographique, son implication dans une veille internationale participerait à une stratégie d'anticipation.

La crise économique mondiale actuelle pourrait interférer avec les prévisions concernant l'évolution des émissions de gaz à effets de serre. Ses éventuelles conséquences sur le climat ne seraient alors notables que si une récession généralisée affectait pendant de nombreuses années l'économie mondiale.

L'étude des impacts du changement climatique est un phénomène récent. Les conséquences sanitaires ne font l'objet que de prédictions scientifiques basées sur des programmes d'études et de recherches s'efforçant d'envisager tout l'éventail des futurs possibles et de grandes incertitudes persistent. L'étude de l'impact sanitaire des phénomènes météorologiques extrêmes permettrait peut-être d'appréhender plus rapidement les conséquences sanitaires du changement climatique stricto sensu. En effet l'étude des conséquences à long terme du seul changement climatique stricto sensu sur la santé exige, pour être analysées rigoureusement, de posséder des longues séries

²² Ouragan, tornade, canicule, inondation, vague de froid, ou leurs conséquences massives comme les blooms, et les pullulations vectorielles.

chronologiques (ainsi l'influence du phénomène El Niño Southern Oscillation sur les épidémies d'origine hydrique et vectorielle demande de posséder plusieurs dizaines d'années de données mensuelles de cas). Dans ces interactions environnementale, sociale et économique, la réflexion sur la prise en compte des effets du changement climatique sur la santé des Français constitue une urgence de politique de santé publique nécessitant l'augmentation de nos capacités de surveillance, de recherche et de prise en charge.

Le rapport sur « Les effets qualitatifs du changement climatique sur la santé en France » recense, sans prétendre à l'exhaustivité, plusieurs dizaines de maladies et familles de maladies dont l'épidémiologie, l'expression clinique ou la prise en charge pourraient être modifiées en France par le changement climatique (cf. liste proposée en annexe).

- **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**
 - a. Mettre en place ou renforcer la surveillance des facteurs sanitaires et environnementaux pouvant être modifiés par le changement climatique :
 - i. surveillance des populations vectorielles et d'hôtes réservoirs ;
 - ii. surveillance de la qualité de l'air et des eaux continentales, côtières et estuariennes, et des sols ;
 - iii. o surveillance des rayonnements naturels ;
 - iv. o surveillance des résistances et des adaptations des agents pathogènes ;
 - v. o surveillance des pneumallergènes.
 - b. 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.
 - c. Evaluer les plans existants.

- d. 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.
- e. Intégrer les risques sanitaires d'origine climatique aux formations initiale et continue des professions de santé.
- f. 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.

- **Pour le moyen terme**

- a. Surveiller l'impact sanitaire des modifications de la diversité biologique (flore et faune).
- b. Mettre en œuvre une observation des événements de mutation des agents infectieux et de leurs hôtes, notamment en lien avec les rayonnements naturels.

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**

- a. 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 :
 - i. La santé publique et l'impact économique surtout en temps de crise ;
 - ii. La clinique et en particulier la physiopathologie et le traitement du choc thermique dû au coup de chaleur ;
 - iii. La physiologie de la thermolyse, en particulier chez le sujet âgé ;
 - iv. La biologie moléculaire et la génétique, intégrant le génome mitochondrial.
- b. Conduire des recherches sur la perception des conséquences sanitaires du changement climatique dans la population et les comportements subséquents.
- c. 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**

- a. 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**

- a. 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).

Bibliographie

Anonyme. Health Effects of Climate Change in the UK 2008. An update of the Department of Health report 2001/2002. Health Protection Agency, UK, 2008, 114 p.

Castello A. *et al.* Managing the health effects of climate change. *Lancet* 2009;373:1693-1733.

Commission Européenne. Adapting to climate change in Europe – options for EU action, 2007.

Delavière M. et Guégan J.-F. Les effets qualitatifs du changement climatique sur la santé en France. Ministère de la Santé, de la jeunesse, des sports et de la vie associative. Avril 2008, 42 p.

Frumkin H. *et al.* Climate Change : The Public Health Response. *Am J Public Health* 2008;98:435-445. Guérin E *et al.*, *Science* 2009; 324, 1034. DOI: 10.1126/science.1172914.

Laaidi M., Laaidi K., Besancenot J.P. Temperature-related mortality in France, a comparison between regions with different climates in the perspective of global warming. *Int. J. Biometeorol* 2006; 51(2) : 145-153.

Lafferty K.D. The ecology of climate change and infectious diseases. *Ecology* 2009; 90: 888-900.

Lebeau A. L'enfermement planétaire. Paris : Gallimard, 2008, 304 p.

McMichael AJ, Woodruff RE, Hales S. Climate change and human health: present and future risks. *Lancet* 2006 Mar 11;367(9513):859-69.

Menne B., Ebi K.L. Climate change and adaptation strategies for human health. Darmstadt : Springer, 2006 : 449 p.

Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique. Changements climatiques et risqué sanitaires en France. Rapport au Premier ministre et au Parlement. Paris : La Documentation Française, 2007, 208 p.

Rogers DJ, Randolph SE. Climate change and vector-borne diseases. *Adv Parasitol* 2006;62:345-81.

Swynghedauw B. Conséquences médicales du réchauffement climatique. *Presse Med.* 2009; 38: 551-561.

Woolhouse M.E.J. and Gowtage-Sequeria S. Host range and emerging and reemerging pathogens. *Emerging Infectious Diseases* 2005; 11: 1842-1847.

Zell R. Global climate change and the emergence/re-emergence of infectious diseases. *Int J Med Microbiol* 2004 Apr;293 ; Suppl 37:16-26.

Annexe

Liste non exhaustive des maladies, phénomènes morbides, polluants, vecteurs, hôtes réservoirs et autres agents pathogènes dont l'épidémiologie, l'expression (virulence, gravité) ou la prise en charge, peuvent être modifiées en France par le changement climatique (à partir de : Rapport du groupe interministériel sur « Les

- **Maladies infectieuses, agents transmissibles et hôtes**
- Fièvre à virus West Nile
- Chikungunya
- Dengue
- Autres arboviroses
- Hantavirose
- Leishmanioses
- Paludisme
- Fièvre boutonneuse
- Borréliose de Lyme
- Leptospirose
- Mélioïdose
- Autres maladies transmises par un vecteur ou un hôte réservoir
- Campylobacteriose
- Salmonellose
- Vibrioses
- Giardiase
- Amibes libres
- Autres causes de diarrhées et gastro-entérites
- Légionellose
- Champignons et moisissures : certains produisent des maladies infectieuses, d'autres des maladies immunoallergiques, ou encore des mycotoxines causes d'effets pathogènes variés : *Alternaria*, *Aspergillus*, *Blastomyces*, *Cladosporium*, *Coccidioides*, *Cryptococcus*, *Cryptosporidium*, *Epicoccum*, *Histoplasma*, *Penicillium*, *Stachybotrys*...
- Cyanobactéries
- Phytoplancton producteur de toxines : *Alexandrium*, *Dinophysis*, *Pseudonitschia*, *Ostreopsis ovata*
- Microorganismes des systèmes aquatiques et telluriques dont hépatites à transmission hydrique
- Insectes et autres arthropodes vecteurs
- Résistances des microorganismes et vecteurs
- Réservoirs : Chauve-souris, rongeurs, cervidés, suidés, autres mammifères...

- **Accidents et traumatismes**
- Noyades
- Blessures
- Coup de chaleur
- Hyperthermies
- Déshydratation
- Hyponatrémie
- Accidents cardiovasculaires
- Dénutrition
- Séquelles et handicaps post-traumatiques
- **Maladies de l'immunité**
- Pollinose
- Asthme
- Conjonctivites
- Eczéma
- Rhinites
- Urticaire
- Pneumopathies d'hypersensibilité
- Autres allergies et maladies auto-immunes
- **Effets des rayonnements naturels**
- Cataracte
- Dégénérescence maculaire
- Photodermatoses
- Cancers cutanés
- **Souffrance psychique**
- Anxiété
- Dépression
- **Autres morbidités non transmissibles**
- Maladies cardiovasculaires
- Broncho-pneumopathie chronique obstructive et insuffisances respiratoires
- Insuffisance rénale
- Effets du vieillissement

- Perte d'autonomie
- Effets adverses des médicaments
- Pollution chimique des eaux et de l'air, du sol

Annexe K Annexes du Groupe Energie

K.1 Calculs de degrés-jour par le groupe GDF SUEZ à partir des hypothèses communes

Dans le cadre du modèle basé sur les degrés-jour, les évolutions du nombre de degrés-jour modélisées sont les suivantes :

Tableau 9 – Evolution modélisée du nombre de degrés-jours

	Cumul de DJ Annuel	
	Scénario A2	Scénario B2
DJ observés sur les données Météo France ²³	1915	
DJ observés GrDF 2008	1966	
DJ de référence France GDF SUEZ 1974-2003 avec correction réchauffement climatique	1903	
1980-1999	2209	2209
2020-2039	2012	1942
<i>Baisse (%)</i>	<i>8,9%</i>	<i>12,1%</i>
2040-2059	1930	1974
<i>Baisse (%)</i>	<i>12,6%</i>	<i>10,6%</i>
2080-2099	1647	1770
<i>Baisse (%)</i>	<i>25,4%</i>	<i>19,9%</i>

²³ Données communiquées par l'ONERC issues du modèle Arpège-Climat

K.2 Contribution du SOeS

Impact du changement climatique sur la consommation de fioul domestique du résidentiel-tertiaire

LES RESULTATS

Par rapport à la période 1980-1999, et pour le scénario d'émission A2 du GIEC, le nombre de degrés-jour de chauffage, calculé sur l'hiver étendu suivant la méthode du SOeS, devrait baisser en moyenne de 6,9% sur la période 2020-2039, de 9,0% sur la période 2040-2059 et de 19,7% sur la période 2080-2099. Pour le scénario d'émission B2, la chronique des baisses sur les mêmes périodes est la suivante : -8,9%, -8,4% et -13,6%.

Ces évolutions climatiques devraient se traduire, toutes choses égales par ailleurs, par une baisse de la consommation annuelle de fioul domestique du secteur résidentiel-tertiaire par rapport à la période 1980-1999 qui pourrait s'établir, pour la période 2020-2039, dans une fourchette allant de -4,6% pour le scénario A2 à -5,6% pour le scénario B2. Pour la période 2040-2059, la baisse serait de -6,5% pour A2 et -6,1% pour B2 ; et pour la période 2080-2099, de -12,4% pour A2 et -7,2% pour B2.

LA METHODE UTILISEE :

Le calcul de l'impact du changement climatique sur la consommation de fioul a été fait de la façon suivante :

Etape N°1 : Calcul des températures moyennes, par mois, pour chaque période (1980-1999, 2020-2039, 2040-2059 et 2080-2099) et chaque scénario du GIEC retenu (A2 et B2).

Etape N°2 : Calcul des écarts de températures moyennes mensuelles entre chaque période de projection et la période de référence 1980-1999.

Etape N°3 : Traduction des évolutions de températures obtenues à l'étape N°2 en termes de baisses de degrés-jour, toujours en mensuel ; puis, agrégation au niveau annuel des baisses mensuelles du nombre de degrés-jour.

Etape N°4 : Calcul des projections annuelles moyennes sur les 3 périodes considérées de la consommation de fioul domestique du résidentiel-tertiaire. La série de fioul domestique dont le SOeS dispose concerne les ventes et non les consommations proprement dites, impossibles à suivre au mois le mois : il n'est donc pas pertinent, au niveau mensuel, de rapprocher ces ventes des conditions climatiques : mieux vaut donc raisonner en annuel, ce qui a pour effet de gommer - en partie - le décalage entre livraisons et consommation. En conséquence, ce sont les baisses annuelles de degrés-jour projetées sur les périodes 2020-2039, 2040-2059 et 2080-2099 qui ont été traduites en baisses annuelles moyennes de consommation de fioul du résidentiel tertiaire : ce calcul a été fait à partir de la formule de correction climatique du SOeS appliquée à la série annuelle de fioul domestique, qui permet de relier évolution des degrés-jour et évolution de consommation.

Méthode du SOeS de calcul des degrés-jour et de la correction climatique.

La correction climatique ne porte que sur la consommation de chauffage et non sur celle d'eau chaude sanitaire, ni de cuisson ou de climatisation. Le principe de calcul consiste à admettre que la consommation de chauffage est fonction du nombre de degrés-jour de l'année ou du mois.

Pour chaque type d'énergie consommée dans le résidentiel-tertiaire et pour le pétrole et le gaz naturel consommés dans l'industrie, on calcule une série corrigée des variations climatiques :

$$CC = CR / (1 + p * (r - 1))$$

où :

CC est la consommation corrigée d'une énergie donnée pour un secteur donné

CR est la consommation réelle correspondante

p est la part de la consommation sensible au climat (inférieure à 1)

r est l'indice de rigueur de l'année $r = DJU / DJUm$

où : DJU = somme des degrés-jour de la période de l'année qui va de janvier à mai et d'octobre à décembre (inclus), c'est-à-dire faisant partie d'une « saison de chauffe »

et DJUm est le DJU d'une année moyenne (2 061 pour la période trentenaire 1976-2005)

Le degré-jour retenu ici est l'écart moyen journalier entre la température observée et la température seuil de 17°.

Si T° est la température moyenne d'une journée (c'est-à-dire $(T_{min} + T_{max}) / 2$), on calcule :

$$\begin{aligned} \text{degré-jour} &= 17 - T^\circ \text{ si } T^\circ < 17^\circ\text{C} \\ &= 0 \quad \text{sinon} \end{aligned}$$

Les chiffres retenus pour l'ensemble de la métropole sont des moyennes des relevés effectués dans 22 stations météorologiques, soit une par région métropolitaine. Les résultats de chaque station sont pondérés par la population de la région au recensement de 1999.

K.3 Contribution de RTE

CONSOUMMATIONS D'ELECTRICITE SENSIBLES AUX TEMPERATURES

Les estimations de consommation d'électricité sensibles au climat (chauffage en hiver, climatisation en été) dans les divers scénarios de dérive climatique envisagés requièrent en préalable de préciser la relation demande / température (ou plutôt les relations : une en hiver, une en été). Ce calage est effectué à partir des données observées de 2008 à 2008 :

- les données de température sont extraites de l'historique des minima et maxima journaliers de 2000 à 2008 fournies par l'ONERC, qui ont été synthétisées sous forme d'une température moyenne journalière ;
- celles de consommation proviennent de RTE (disponibles sur son site internet).

On admettra que les chroniques climatiques issues d'ARPEGE pour les horizons futurs sont bien homogènes à celles des réalisations 2000 - 2008, ce qui constitue une condition nécessaire pour légitimer l'utilisation de la relation consommation / température mise en évidence sur cette période.

A. Demande et température observées

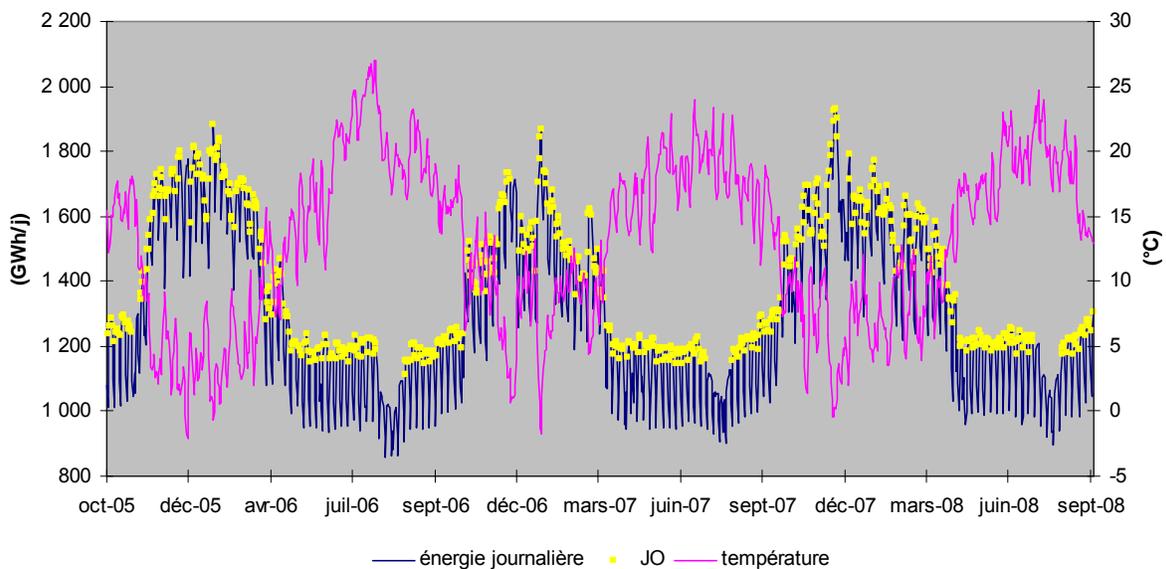


Figure 19 – Consommation journalière et températures

La Figure 19 présente ces deux séries de données sur la période du 1^{er} octobre 2005 au 30 septembre 2008 : consommations journalières (courbe bleue, échelle de gauche), et températures (moyenne des min et max journaliers – courbe fuchsia, échelle de droite)

La courbe des consommations journalières est marquée de profondes irrégularités, à périodicité hebdomadaire : la réduction d'activité dans les secteurs industriel et tertiaire induit une baisse de demande les samedis et dimanches (et aussi les jours fériés, hors périodicité) ; la relation demande / température doit donc être analysée séparément pour les jours ouvrables et les autres types de jours. Deux autres périodes de l'année sont également atypiques : la semaine entre Noël et le jour de l'an d'une part, et la période des vacances estivales, de mi juillet à fin août, d'autre part. Pour l'ensemble des autres

jours, qui ont été marqués d'un point jaune sur le graphique précédent, les niveaux de consommation non sensible au climat sont suffisamment homogènes pour qu'on puisse établir une corrélation entre demande et température observées.

Cette corrélation est présentée dans les graphes suivants, qui mettent en regard les consommations journalières des jours retenus (en ordonnée) et les températures (en abscisse) observées le même jour, pour chacune des trois années à cheval analysées :

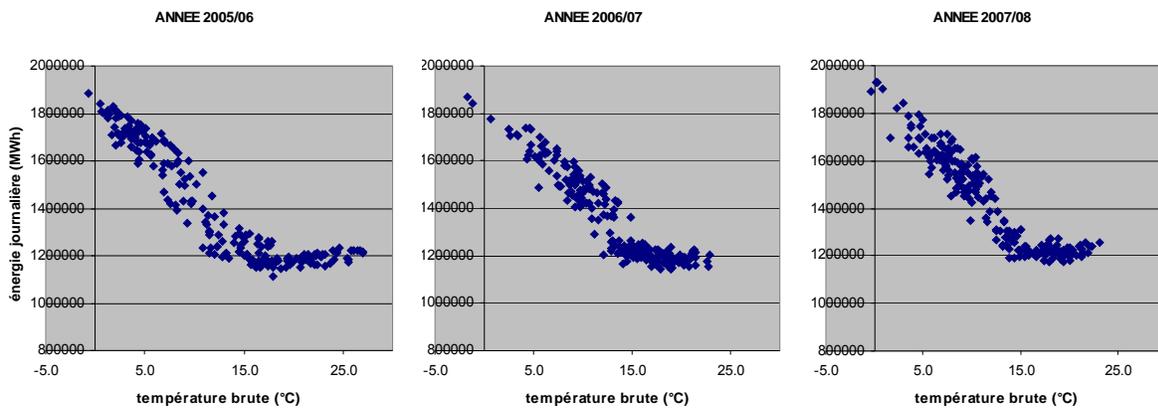


Figure 20 – Corrélation entre demande et températures observées

La consommation est la plus basse pour des températures comprises entre 15 et 18°C. Une relation linéaire entre demande et température se dessine nettement, lorsque cette dernière est inférieure à 15°C, traduisant un supplément de demande pour le chauffage. A l'autre extrémité, on discerne des consommations de plus en plus fortes lorsque les températures sont plus élevées.

B. Relation demande / température en hiver

La corrélation demande / température présentée ci-dessus est assez notablement bruitée, mais elle peut être sensiblement améliorée si, pour tenir compte des inerties (de natures technique et comportementale – qui font que la réponse de la demande de chauffage à une variation de température n'est pas instantanée), l'on fait intervenir non seulement la température du jour, mais également celle des jours précédents pour expliquer la consommation d'un jour donné (lissage des températures). Les coefficients de lissage sur les températures moyennes journalières ont été déterminés empiriquement de manière à minimiser la dispersion autour de la droite de tendance :

$$Tl_j = 0,55 * Tb_j + 0,20 * Tb_{j-1} + 0,12 * Tb_{j-2} + 0,05 * Tb_{j-3} + 0,08 * Tb_{j-4}$$

(où Tl représente la température lissée et Tb la température brute)

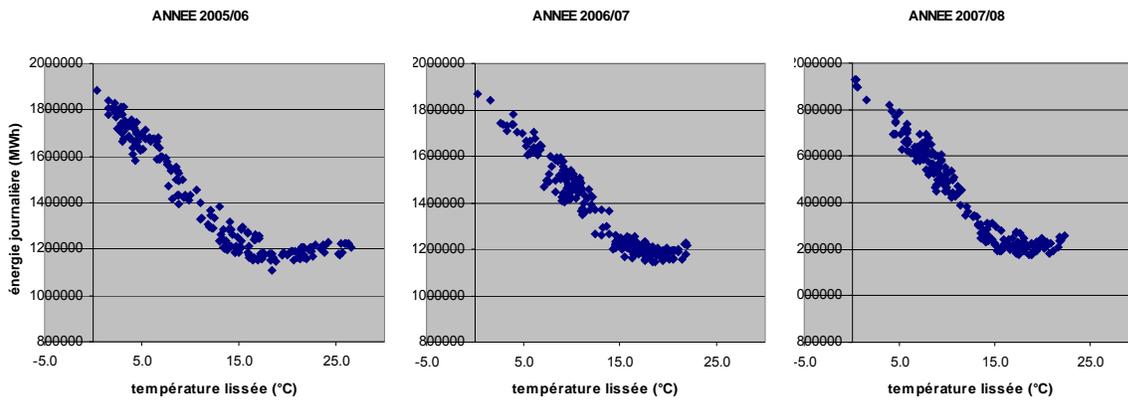


Figure 21- Corrélation entre demande et température lissée

La pente des droites de régression (gradient thermique) varie de 47 (hiver 2005/06) à 49 GWh/°C (hiver 2007/08) – soit environ 2 000 MW/°C en moyenne journalière.

Il subsiste naturellement des écarts entre valeurs théoriques résultant de la relation linéaire et valeurs observées des consommations journalières, explicables par plusieurs raisons :

- la température journalière est synthétisée dans une seule valeur (moyenne des min et max), qui ne traduit pas toutes les nuances des profils journaliers de température ;
- d'autres facteurs influençant la demande ne sont pas pris en compte dans cette analyse sommaire : l'éclairage, les effacements de consommation (EJP et autres), les variations de consommation de certains industriels (enrichissement de l'uranium, essentiellement) ; bien que leurs influences soient divergentes et aient globalement tendance à se neutraliser, elles sont certains jours à l'origine d'écarts non négligeables.

Mais la représentation proposée paraît statistiquement pertinente.

Cette relation peut aussi être améliorée au voisinage de la température seuil d'enclenchement du chauffage (14,8°C) : il existe à l'évidence des disparités de comportement entre consommateurs (certains éprouvent un besoin de chauffage où d'autres peuvent s'en passer), des disparités dans l'exposition des logements (à température relevée dans une station météo donnée, un logement plutôt exposé au nord, ou à une altitude plus élevée, peut avoir besoin de chauffage là où d'autres n'en ont pas besoin), et des disparités régionales (la température moyenne France peut être proche de la température seuil, avec une température plus élevée – sans chauffage – dans certaines régions, et plus basse dans d'autres). Il s'ensuit une progressivité des consommations de chauffage, démarrant à une température plus élevée que 14,8°C, et augmentant de plus en plus fortement au fur et à mesure que les températures diminuent. Cette progressivité peut être représentée par un raccordement parabolique, dont les paramètres peuvent être calculés de manière à minimiser l'écart quadratique entre observations et estimations théoriques : valeur et dérivée nulles à 18°C (extinction totale du chauffage) et raccordement avec la droite de tendance pour les températures basses à 11,5°C.

C. Relation demande / température en été

La sensibilité de la consommation d'électricité aux températures élevées s'exprime essentiellement de juin à septembre. Or dans cette période, la consommation d'électricité est sujette à des variations importantes liées aux congés d'été (quasiment tout le mois

de juillet et d'août sont concernés), ce qui rend extrêmement malaisé de rechercher une corrélation directe entre température et consommation totale d'électricité observées chaque jour.

Pour contourner cet écueil, il est proposé ci-après une méthode indirecte, fondée sur l'exploitation des modèles de correction climatique utilisés à RTE. Bien que les difficultés d'analyse liées à la période de congés demeurent, ces modèles sont suffisamment sophistiqués pour établir une relation raisonnablement robuste entre température et surconsommations engendrées par les températures très élevées. A partir des paramètres estimés par ces modèles, et pour un parc donné d'appareils dont le fonctionnement dépend de la température, il est possible de simuler, à pas horaire et sur tout un été, la puissance appelée par les usages sensibles aux températures élevées en fonction d'une chronique de températures donnée en entrée (chronique fournie au pas tri-horaire, c'est à dire 8 valeurs par jour, à intervalle de 3 heures - pour rester homogène avec les données de températures observées qui ont servi à calculer les paramètres de la relation puissance / température).

Ces simulations ont été réalisées pour les années 2000 à 2009, pour lesquelles on dispose des températures observées, pour un parc d'appareils identique. Les chroniques de puissances appelées par les usages sensibles au climat ainsi obtenues sont supposées être fiables. Et ce sont ces chroniques de consommation que l'on mettra en regard des températures mesurées par l'index fourni par l'ONERC pour établir la relation consommation d'électricité / température ONERC.

Il convient de préciser que les puissances (ou énergies journalières) calculées concernent l'ensemble des consommations sensibles au climat, émanant de divers usages (climatiseurs, mais aussi réfrigérateurs ou congélateurs, au moins), tant dans le secteur résidentiel que dans le tertiaire.

Le graphique suivant présente, sous forme chronologique, les énergies journalières consommées par les usages sensibles au climat (somme sur la journée des puissances horaires évaluées par le modèle de correction climatique de RTE), et les températures moyennes journalières (moyenne des min et max journaliers) fournies par l'ONERC, pour tous les jours de l'été 2003 :

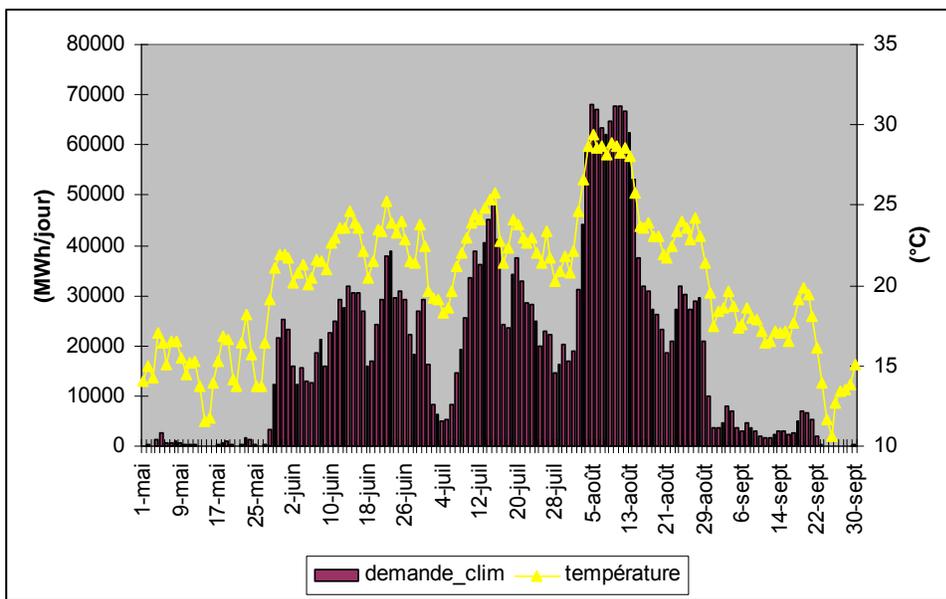


Figure 22 - Energies journalières consommées par les usages sensibles au climat et températures moyennes journalières, pour tous les jours de l'été 2003

On observe que les deux grandeurs évoluent en étroite sympathie. Cette impression visuelle peut être confirmée en adoptant une présentation en nuages de points :

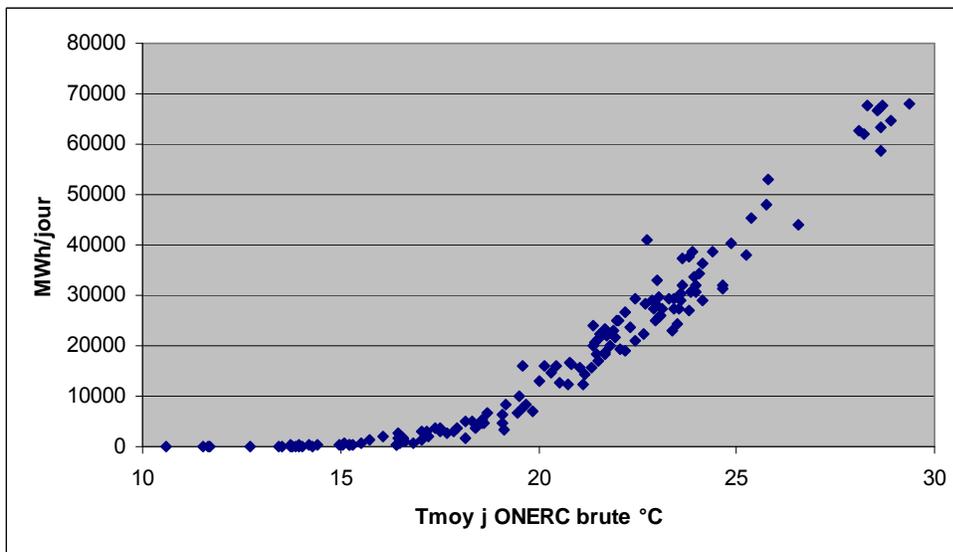


Figure 23 – Corrélation entre températures moyennes brutes et consommation d'énergie par les usages sensibles pour les jours de l'été 2003

Les surconsommations liées aux températures chaudes commencent à apparaître dès le seuil de 14 – 15°C. Une relation linéaire semble se dessiner pour les températures les plus élevées (au dessus de 21°C). Mais, pour les températures intermédiaires, il n'y a plus linéarité, et une modélisation par un raccordement parabolique semble mieux adaptée.

Comme pour le chauffage, la demande sensible aux températures élevées ne dépend pas uniquement de la température instantanée. Les inerties d'été sont moindres que celles d'hiver, mais un lissage des températures améliore la qualité des corrélations. Les

coefficients de lissage sur les températures moyennes journalières ont été déterminés empiriquement :

$$Tl_j = 0,57 * Tb_j + 0,40 * Tb_{j-1} + 0,03 * Tb_{j-2}$$

(où Tl représente la température lissée et Tb la température brute)

de manière à minimiser la somme des écarts quadratiques entre les valeurs de consommation journalière d'électricité (simulées par le modèle de correction climatique de RTE) d'une part, et des valeurs théoriques uniquement fonction des températures (linéaire pour les grandes valeurs de température, avec raccordement parabolique) d'autre part :

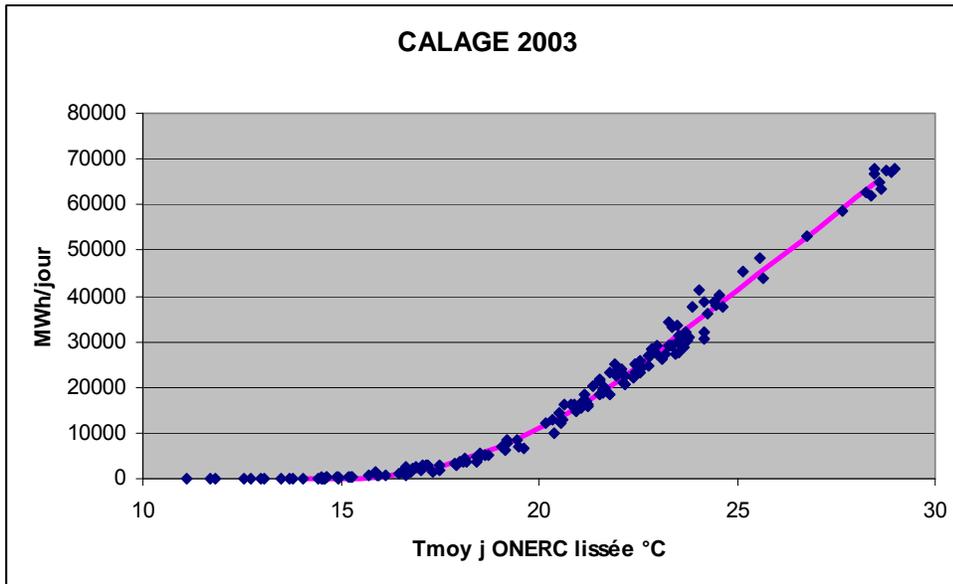


Figure 24 - Corrélation entre températures moyennes lissées et consommation d'énergie par les usages sensibles pour les jours de l'été 2003 (1)

La meilleure approximation (au sens de la minimisation des écarts quadratiques) de la relation consommation journalière / température lissée consiste à retenir (courbe fuchsia du graphique précédent) :

- une relation linéaire pour des températures supérieures à 22,7°C ;
- une valeur nulle pour des températures inférieures à 15,0°C ;
- et un raccordement parabolique avec valeur et dérivée nulle à 15,0°C et dérivée en 22,7°C égale à la pente de la droite.

La même relation (*i.e.* : même lissage, même pente de la droite et mêmes températures de rupture de linéarité) s'applique de manière satisfaisante aux températures des autres années ; en particulier pour les années 2005 et 2006 :

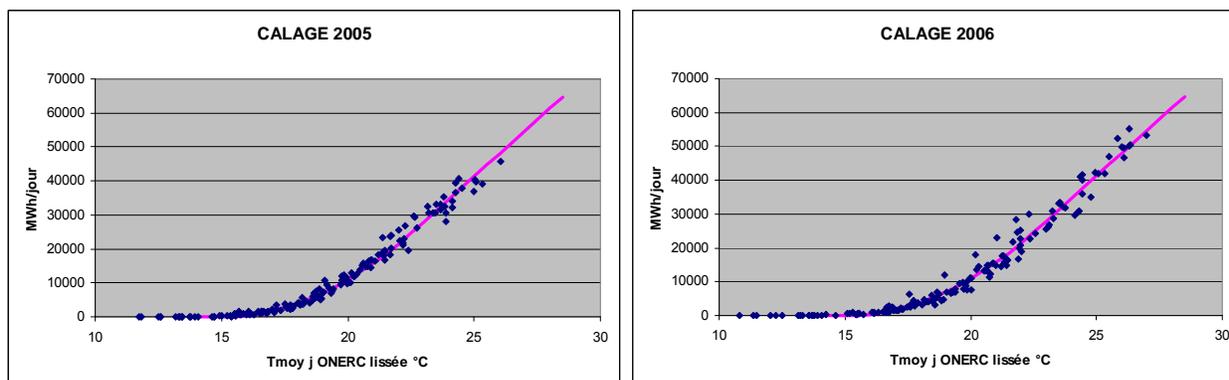


Figure 25 - Corrélation entre températures moyennes lissées et consommation d'énergie par les usages sensibles pour les jours des étés 2005 et 2006

Comme en hiver, il subsiste des écarts entre valeurs théoriques et valeurs 'observées' des consommations journalières, explicables par plusieurs raisons :

- les valeurs dites « observées » proviennent d'une estimation des modèles RTE, qui peut s'écarter des vraies réalisations (malheureusement inaccessibles en pratique) ;
- la température journalière est synthétisée dans une seule valeur (moyenne des min et max), qui ne traduit pas toutes les nuances du profil journalier de température.

D. La notion de degré-jour

Dans les illustrations graphiques présentées ci-dessus pour l'été, la pente de la droite au delà de 22,7°C est de 6 700MWh/j/°C. Elle correspond à un parc d'appareils consommateurs donné, proche de celui qui était installé en 2006. Mais la forme de la relation peut être considérée comme indépendante du parc, ou plus exactement, les puissances (et les énergies journalières) évoluent proportionnellement au parc installé. L'axe des ordonnées peut être gradué en degrés-jours, par un simple changement d'échelle ramenant la pente de la droite à 1 : 1°C de plus (au delà de 22,7°C) compte pour 1 degré-jour de consommation supplémentaire. Avec le parc de 2006, cela correspondait à 6 700MWh supplémentaires ; pour un parc de climatisation installé double, 1 degré-jour correspondrait à 13 400MWh. Entre 15,0 et 22,7°C, chaque variation de 1°C compte pour moins de 1 degré-jour (par exemple 0,25 degré-jour au voisinage de 18,85°C, milieu de l'intervalle où la relation est parabolique ; de sorte que l'écart de consommation journalière entre 18,35 et 19,35°C était voisin de 1 700MWh avec le parc de 2006, et serait de l'ordre de 3 350MWh avec un parc installé double).

Le même changement d'échelle peut être opéré pour la relation demande / température en hiver : quelle que soit l'année, on a toujours une variation de 1degré-jour pour toute variation de 1°C en deçà de 11,5°C ; avec le parc de chauffage de l'hiver 2005/06, 1 degré-jour correspondait à une consommation de 47GWh ; avec celui de l'hiver 2007/08, il correspond à une consommation de 49GWh.

E. Les consommations futures

L'application des relations explicitées précédemment aux chroniques de températures issues du modèle ARPEGE permet d'estimer les degrés-jour de chauffage / de climatisation aux différents horizons de temps et selon les différents scénarios de dérive climatique. Pour les estimations en énergie, dans l'hypothèse d'économie stationnaire (*i.e.* : avec le parc d'équipements de chauffage / de climatisation actuels), il suffit d'attribuer la valeur énergétique d'aujourd'hui aux degrés-jours :

Tableau 10 – Consommations annuelles (chauffage et climatisation) aux différents horizons de temps et scénarios étudiés

	Consommations annuelles (TWh)	
	Chauffage	Climatisation
Moyenne 1980-1999	70,0	0,9
2020-2039 A2	62,7	1,3
2040-2059 A2	59,9	1,9
2080-2099 A2	49,3	3,7
2020-2039 B2	60,2	1,4
2040-2059 B2	61,5	1,7
2080-2099 B2	54,0	2,6

On admettra que les chroniques climatiques issues d'ARPEGE sont bien homogènes à celles des réalisations 2000 – 2008, ce qui constitue une condition nécessaire pour légitimer l'utilisation de la relation consommation / température mise en évidence sur cette période.

K.4 Contribution de l'IFP

NOTE TECHNIQUE : Impact du changement climatique sur la consommation du secteur automobile (effet climatisation) - Résumé / Conclusion

Une étude de l'Ademe (1) a montré que l'utilisation de la climatisation entraîne une surconsommation de l'ordre de 1,7 (essence) à 1,9 (diesel) l/100 km en cycle mixte, soit une hausse de 23 à 27% de la consommation par rapport à un véhicule sans climatisation (Température externe 30°C, Temp de consigne 20°C). Pour une année, l'Ademe estime l'effet climatisation sur la consommation entre +2 et +5% suivant la région.

L'analyse réalisée pour l'année 2006, année relativement chaude, donne des résultats assez cohérents avec ces valeurs. En moyenne pour la France, la climatisation a représenté cette année là, une surconsommation de l'ordre de 1,4% pour les véhicules essence et 1,9% pour les véhicules diesel.

En passant le taux d'équipement de 45% (2006) à 90% (hypothèse Ademe pour 2020), ces pourcentages passent à respectivement 2,9 et 3,9%. Pour ce même taux d'équipement et sur la base d'un écart de l'ordre de + 4°C en 2006 par rapport à la moyenne 1971/2000, on obtient une surconsommation du même ordre (2,5 et 3,4%).

En première approche on peut donc considérer qu'un été chaud conduit par rapport à la référence 1971/2000 à une surconsommation annuelle de carburants de l'ordre de 3% soit 0,2 à 0,3l/100 km, pour un parc équipé à hauteur de 90% (tendance lourde). L'impact du changement climatique peut donc être considéré comme relativement négligeable.

Il convient néanmoins, d'un point de vue efficacité énergétique et environnemental, de poursuivre les efforts visant à réduire ce niveau de consommation. Cet objectif s'inscrit dans le cadre de la politique européenne visant à réduire les émissions de CO₂ de ce secteur à l'horizon 2020 (2).

Détail des calculs pour 2006

1/ Méthodologie

La méthodologie retenue a pour objectif de donner un ordre de grandeur de la surconsommation liée à la climatisation des véhicules. Elle ne tient pas compte des effets positifs possibles d'une hausse des températures, liés par exemple à un meilleur rendement au démarrage en hiver...

Le calcul de la consommation additionnelle effectué pour 2006 liée à la climatisation repose sur :

- les données de l'ADEME sur la surconsommation d'un véhicule disposant de la climatisation et sur le parc de véhicule (1) ;
- les données trimestrielles de consommation publiées par l'observatoire de l'énergie (3) ;
- les estimations de température mensuelle de Météo-France en 2006 (4) ;

A partir de ces données, il est possible d'estimer la surconsommation en retenant les hypothèses suivantes :

- une distance parcourue équivalente par jour au cours d'un trimestre ;

- une surconsommation proportionnelle à l'écart de température avec comme référence les données ADEME établies pour 10°C (Tex : 30°C; T consigne, Tc : 20°C) ;
- un fonctionnement de la climatisation à partir d'une température de 17°C et non 20°C pour tenir compte d'un effet ensoleillement ;
- une estimation mensuelle de la température moyenne France, et du nombre de jours où la température dépasse 17°C.

Sur ces bases, la surconsommation liée à la climatisation au cours d'un trimestre est de :

- C = consommation moyenne du parc
- C_{ssclim} = consommation des véhicules sans clim
- D_{clim} = Parc clim * Delta10 * (Tex - Tc) * (Jc/90)

Avec :

- D_{clim} = surconsommation unitaire liée à la climatisation (l/100 km) ;
- Parc clim = pourcentage de véhicule équipé de la climatisation (45% en 2006) ;
- Delta10 = surconsommation de référence pour un écart de 10°C ;
- Tex = T moyenne au cours du trimestre ;
- Tc : température de consigne (17°C) ;
- Jc = nombre de jours où la température dépasse 17°C.

Volume trimestriel en litre tous véhicules :

$$V = C * \text{Distance} * \text{parc véhicules}$$

$$V = V_{ssclim} + V_{avecclim}$$

$$V_{ssclim} = C_{ssclim} * \text{Distance} * \text{parc véhicules ss clim}$$

$$V_{avecclim} = C_{avclim} * \text{Distance} * \text{parc véhicules avec clim}$$

en supprimant Distance on obtient donc:

$$C * \text{parc véhicules} = C_{ssclim} * \text{parc véhicules sans clim} + C_{avclim} * \text{parc véhicules avec clim}$$

soit en divisant par parc véhicules :

$$C = C_{ssclim} * (\% \text{ véhicules sans clim}) + C_{avclim} * (\% \text{ avec clim}) \quad (1)$$

$$C_{avclim} = C_{ssclim} + \text{Delta clim} \quad (2)$$

(la consommation des voitures avec climatisation est la somme de la consommation sans climatisation et d'un différentiel lié à la climatisation).

En remplaçant, on obtient

$$C = C_{ssclim} * (\% \text{ véhicules ss clim}) + (C_{ssclim} + \text{Delta clim}) * (\% \text{ avec clim})$$

soit

$$C = C_{ssclim} * (\% \text{ véhicules ss clim} + \% \text{ avec clim}) + (\text{Delta clim}) * (\% \text{ avec clim})$$

$$\% \text{ véhicules ss clim} + \% \text{ avec clim} = 1$$

donc

$$C = C_{ssclim} + (\text{Delta clim}) * (\% \text{ avec clim})$$

2/ Variables

Delta10 : Surconsommation liée à climatisation pour les véhicules essence et diesel

Les données de l'Ademe sont les suivantes :

Tableau 11 – Surconsommation liée à la climatisation (Ademe)

(l/100 km)	Cycle urbain	Cycle urbain extra-	Cycle mixte	Soit Delta10
Essence	3,1	0,9	1,7	1,7/10
Diesel	3,2	1,1	1,9	1,9/10
Moyenne	3,2	1,0	1,8	
	Tex	30°C		
	Tc	20°C		
+ %				
	<i>Cycle urbain</i>	<i>Cycle urbain extra-</i>	<i>Cycle mixte</i>	
Essence	31	16	23	
Diesel	35	20	27	

Tex (T moyenne au cours d'un trimestre) ;

A partir des données de Météo-France, nous avons retenu les données mensuelles et trimestrielles (calculées) suivantes :

Tableau 12 – Variables correspondantes

T>17°C	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
T	18	23	25	19	20
Durée Jours	10	20	30	20	30
Soit :					
	1er trim	2eme trim	3eme trim	4eme trim	
Tex		21,3	22		
Jc (jours)	0	30	80	0	

3/ Calcul de la surconsommation trimestrielle

Le tableau ci dessous donne la consommation avec et sans climatisation par trimestre pour 2006.

Tableau 13 – Consommation avec et sans climatisation par trimestre, 2006

	1er trim	2eme trim	3eme trim	4eme trim
Essence				
Sans clim	8,2	7,7	7,2	7,9
Clim	0	0,11	0,31	0
Impact %	0	1,4	4,3	0
Diesel				
Sans clim	6,7	6,5	6,2	6,6
Clim	0,00	0,12	0,35	0,00
Impact %	0,0	1,9	5,7	0,0

Les consommations sans climatisation sont déduites des données trimestrielles moyennes tous véhicules de l'Observatoire de l'énergie :

Tableau 14 – Consommations sans climatisation

L/100 km	2006				
	1er trim	2eme trim	3eme trim	4eme trim	Moyenn e
Essence	8,2	7,9	7,5	7,9	7,7
Diesel	6,7	6,6	6,5	6,6	6,6

4/ Impact annuel par véhicule

A partir des distances parcourues par trimestre on peut en déduire la consommation trimestrielle et annuelle par véhicule :

Tableau 15 – Consommations trimestrielle et annuelle par véhicule

Km	1er trim	2eme trim	3eme trim	4eme trim		
Essence	2100	2300	2500	2300		
Diesel	3500	3875	4250	3875		
Conso. L	1er trim	2eme trim	3eme trim	4eme trim	Année	+ %
Essence	172	178	180	181	710	
Clim	0	3	8	0	10	1,4
Diesel	235	251	261	256	1003	

Clim	0	5	15	0	20	1,9
------	---	---	----	---	----	-----

Références spécifiques

(1) La climatisation automobile – impact énergétique et environnemental – Ademe, 2003

http://www.ademe.fr/auto-diag/transports/rubrique/Publications/document/8pp_Clim_Auto_s.pdf

(2) CO2 from passenger cars - Commission

<http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=MEMO/08/799&format=HTML&aged=0&language=EN&guiLanguage=en>

(3) La consommation de carburants des voitures particulières en France 1988 / 2006 - Observatoire de l'énergie, 2007

http://www.industrie.gouv.fr/energie/statisti/pdf/consom_carbu_06.pdf

(4) Evolution de la température au cours de l'année 2006 - Météo France, 2008

<http://france.meteofrance.com/content/2008/4/3745-48.pdf>

K.5 Contribution de EDF

Comparaison des consommations énergétiques de bâtiments entre le climat actuel et le climat futur de Lille

Objectif

L'objectif est de comparer les consommations énergétiques de bâtiments (Bureau, Hôtel, Commerce, RPA, Ecole maternelle) avec une météo « actuelle » de Lille et une météo « future ».

Cette analyse fait suite à celle réalisée en 2006 pour les mêmes bâtiments avec les climats suivants :

- Agen actuel
- Agent futur
- Strasbourg actuel

Méthodologie

Les consommations sont estimées à partir d'une simulation dynamique au pas horaire réalisée avec le logiciel PAPTER. La première analyse de 2006 ayant été réalisée avec la version 4 de PAPTER, cette analyse du climat de Lille a également été effectuée avec cette version afin de pouvoir reprendre les modèles de bâtiments.

Climats retenus

Les climats retenus sont basés sur :

- climat actuel de Lille, le fichier météo « Lille (59) » 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.

Seul le paramètre température extérieure a été modifié car le fichier « ARPEGE » fourni ne contenait pas d'autre paramètre. PAPTER nécessite également les paramètres flux solaires direct et diffus mesurés sur un plan horizontal en W/m^2 et l'hygrométrie relative en %. L'analyse de 2006 avait montré que les flux solaires du climat futur ne sont pas estimés très différents du climat actuel. La reprise des flux du climat actuel ne devrait donc pas poser de problème. 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. A noter cependant que les hypothèses retenues pour les flux solaires et l'hygrométrie mériteraient d'être vérifiées et corrigées si nécessaire car les comparaisons des météos actuelles / futures faites pour Agen ne sont peut être pas transposables pour Lille.

Reproduction de la température extérieure du climat futur

L'objectif a été de reproduire un profil de température « futur » à partir du profil de température « actuel » de PAPTER et des valeurs « futures » de températures minimales T_{min_future} et maximales T_{max_future} quotidiennes estimées par ARPEGE. Les valeurs de températures minimales $T_{min_actuelle}$ et maximales $T_{max_actuelle}$ quotidiennes du

fichier « actuel » de PAPTER ont d'abord été déterminées. Puis chaque valeur de température future *Theure_future* pour chaque pas horaire a été déterminée à partir de la valeur de température actuelle *Theure_actuelle* selon la formule suivante :

$$Theure_future = Tmax_future - (Tmax_actuelle - Theure_actuelle) / (Tmax_actuelle - Tmin_actuelle) * (Tmax_future - Tmin_future)$$

Les valeurs de *Tmin_future*, *Tmax_future*, *Tmin_actuelle* et *Tmax_actuelle* retenues étaient celles de la journée de chaque *Theure_future* et *Theure_actuelle*.

La figure suivante présente l'évolution au pas horaire des températures actuelle et future pour le mois de janvier.

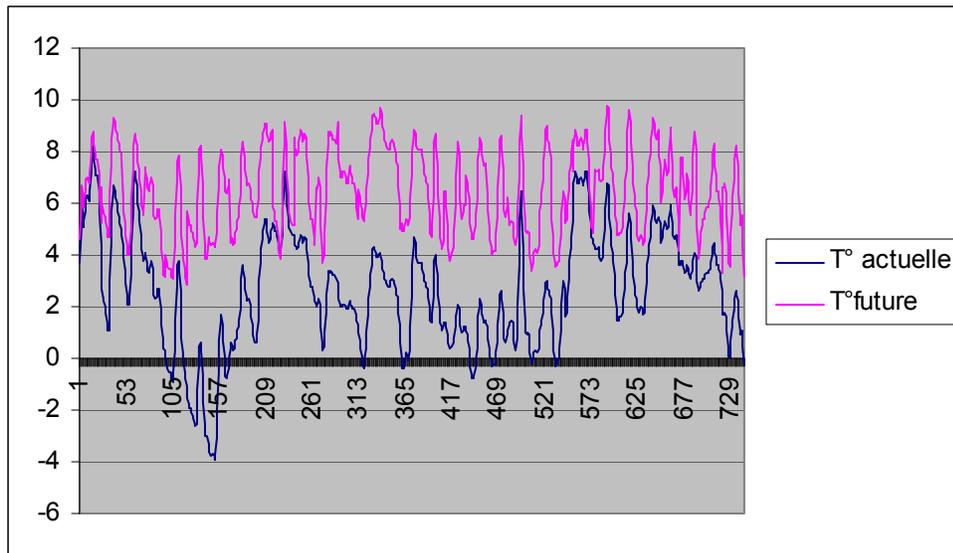


Figure 26 - Evolution des températures actuelle et future pour le mois de janvier

Les variations quotidiennes sont bien respectées. Cependant la variation mensuelle est beaucoup plus « lisse » pour la température future. Cela est du au profil annuel des températures minimales et maximales quotidiennes futures tel que le présente la figure suivante avec le même profil actuel. Le profil futur apparaît bien supérieur à l'actuel mais avec des variations moindres.

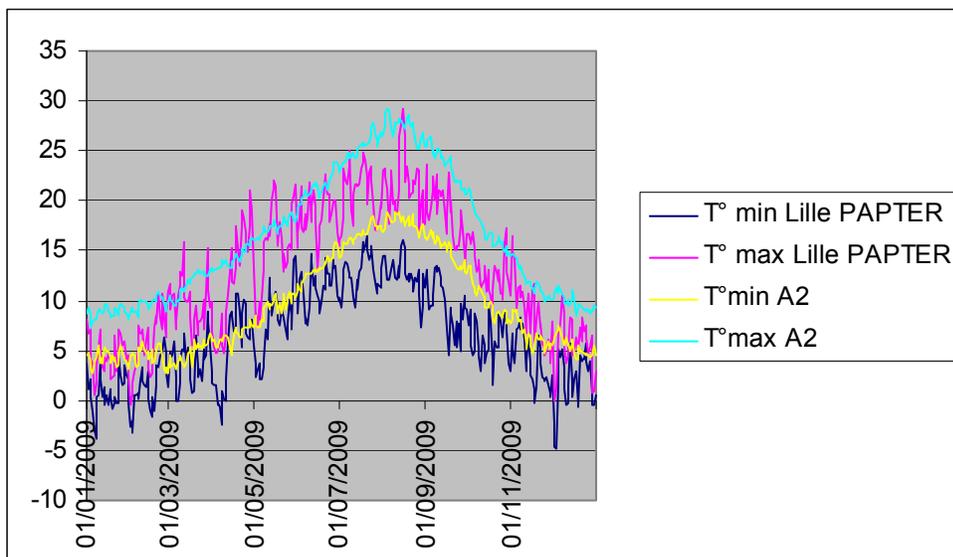


Figure 27 - Profils annuels, actuels et futurs, des températures minimales et maximales quotidiennes

Résultats

Les tableaux suivants présentent les résultats pour chaque bâtiment simulé. Les résultats issus de l'étude de 2006 avec les météo d'Agen et Strasbourg ont été laissés afin d'élargir la comparaison.

Tableau 16 – Consommations d'énergie pour chaque bâtiment simulé

Bureaux 4300 m ² ; 8 niveaux Chauffage électrique et clim par groupe froid	Ecarts Agen actuel / Strasbourg actuel	Strasbourg actuel	Agen actuel	Agen futur	Ecarts Agen futur/Agen actuel	Lille actuel	Lille futur	Ecarts Lille futur/Lille actuel
Chauffage	-66%	58 039	19 799	8 395	-58%	50 915	14 932	-71%
Rafraîchissement	45%	171 551	249 308	408 789	64%	136 333	269 949	98%
Ventilation	0%	6 847	6 847	6 847	0%	6 847	6 847	0%
Eclairage	0%	98 959	98 959	98 959	0%	98 959	98 959	0%
Divers électriques	0%	217 966	217 966	217 966	0%	217 966	217 966	0%
Total	7%	553 361	592 879	740 956	25%	511 021	608 653	19%

Hôtel 3* centre ville avec restaurant 3200 m ² ; 90 chambres Chauffage et clim par PAC	Ecarts Agen actuel / Strasbourg actuel	Strasbourg actuel	Agen actuel	Agen futur	Ecarts Agen futur/Agen actuel	Lille actuel	Lille futur	Ecarts Lille futur/Lille actuel
Chauffage	-34%	113 309	75 009	49 884	-33%	108 974	67 816	-38%
Rafraîchissement	94%	14 188	27 492	61 331	123%	7 053	29 795	322%
Ventilation	0%	23 412	23 412	23 412	0%	23 412	23 412	0%
Eclairage	0%	91 871	91 871	91 871	0%	91 871	91 871	0%
Divers électriques	0%	61 472	61 472	61 472	0%	61 472	61 472	0%
ECS	0%	151 724	151 724	151 724	0%	151 724	151 724	0%
Total	-5%	455 975	430 979	439 693	2%	444 505	426 089	-4%

Maternelle 1000 m ² ; 125 élèves avec cantine Chauffage par convecteurs	Ecarts Agen actuel / Strasbourg actuel	Strasbourg actuel	Agen actuel	Agen futur	Ecarts Agen futur/Agen actuel	Lille actuel	Lille futur	Ecarts Lille futur/Lille actuel
Chauffage	-32%	109 266	74 086	50 684	-32%	110 482	73 248	-34%
Ventilation	0%	4 024	4 024	4 024	0%	4 024	4 024	0%
Eclairage	0%	7 618	7 618	7 618	0%	7 618	7 618	0%
ECS	0%	10 617	10 617	10 617	0%	10 617	10 617	0%
Total	-27%	131 525	96 346	72 943	-24%	132 741	95 507	-28%

Commerce avec réserves 2000 m ² Chauffage et clim par roof-tops	Ecarts Agen actuel / Strasbourg actuel	Strasbourg actuel	Agen actuel	Agen futur	Ecarts Agen futur/Agen actuel	Lille actuel	Lille futur	Ecarts Lille futur/Lille actuel
Chauffage	-31%	92 579	64 213	37 682	-41%	89 209	51 334	-42%
Rafraîchissement	182%	5 246	14 810	41 562	181%	1 361	14 424	960%
Ventilation	-1%	47 356	46 998	46 968	0%	46 805	47 077	1%
Eclairage	0%	128 388	128 388	128 388	0%	128 388	128 388	0%
Divers électriques	0%	68 328	68 328	68 328	0%	68 328	68 328	0%
Total	-6%	341 897	322 738	322 928	0%	334 091	309 551	-7%

RPA 4300 m ² ; 82 chambres Chauffage par convecteurs	Ecarts Agen actuel / Strasbourg actuel	Strasbourg actuel	Agen actuel	Agen futur	Ecarts Agen futur/Agen actuel	Lille actuel	Lille futur	Ecarts Lille futur/Lille actuel
Chauffage	-30%	262 141	183 547	130 720	-29%	259 855	182 144	-30%
Ventilation	0%	14 323	14 323	14 323	0%	14 323	14 323	0%
Eclairage	0%	89 903	89 903	89 903	0%	89 903	89 903	0%
Divers électriques	0%	32 498	32 498	32 498	0%	32 498	32 498	0%
ECS	0%	117 376	117 376	117 376	0%	117 376	117 376	0%
Total	-15%	516 240	437 647	384 820	-12%	513 955	436 244	-15%

Les écarts relatifs observés entre météos futures et actuelles restent similaires pour Lille comme pour Agen avec cependant pour les bâtiments climatisés une augmentation plus importante pour Lille des consommations de climatisation principalement du au fait que ces besoins sont faibles voire quasi nuls (commerce) pour la météo actuelle de Lille.

Perspectives

Cette étude nécessiterait d'être approfondie en calant les autres paramètres du climat futur (Flux solaires et hygrométrie) comme cela avait été fait avec la météo d'Agen.

Par ailleurs, les perspectives issues de la 1^{ère} étude restent toujours d'actualité notamment pour mieux apprécier les effets du changement climatique sur la consommation des bâtiments :

- D'une part en faisant des hypothèses sur des améliorations des modes constructifs des bâtiments (isolation, architecture...), une augmentation des performances énergétiques de leurs équipements de chauffage et climatisation et des évolutions comportementales des occupants ;
- D'autre part en intégrant cette démarche sur le parc de bâtiments tout en tenant compte de ses futures évolutions (composition et répartition géographique...), pour avoir une image de ces effets à l'échelle du parc.

K.6 Présentation rapide du logiciel PAPTER

Programme d'Aide à un Projet TERTiaire

PAPTER permet d'évaluer rapidement et précisément les bilans et coûts énergétiques des solutions de chauffage, climatisation et production d'eau chaude sanitaire des bâtiments tertiaires en intégrant les autres usages tels que l'éclairage, la cuisson, etc..

A. Paramétrage de PAPTER

Equipé d'une interface graphique (Figure 28) ainsi que de bases de données :

- matériaux de construction ;
- parois ;
- bâtiments ;
- matériel de chauffage et climatisation ;
- scénarii d'utilisation du bâtiment (apports internes, consignes de température, débits de ventilation) ;
- météos (27 stations pouvant être complétées par l'utilisateur) ;
- tarifs,

PAPTER permet de décrire aisément les bâtiments et leurs solutions techniques.

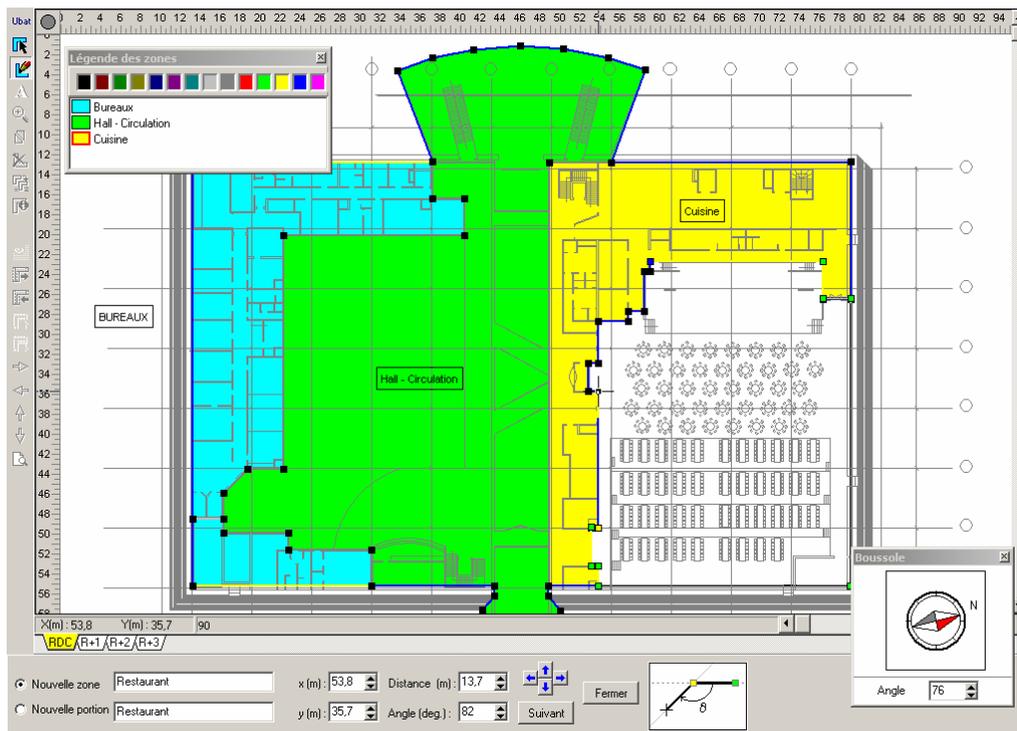


Figure 28 - Interface de saisie graphique de bâtiment de PAPTER

La saisie des données, souple et modulaire, peut être accélérée grâce au grand nombre de paramètres proposés par défaut.

Les installations de chauffage peuvent être :

- soit des systèmes de chauffage électrique direct ;
- soit des systèmes thermodynamiques réversibles ou non ;
- soit des chaudières à combustible (gaz, fioul ou GPL).

La ventilation peut être du type simple flux ou double flux par centrale de Traitement d'Air (CTA).

PAPTER peut dimensionner automatiquement tous ces équipements.

PAPTER possède également un modèle Eau Chaude Sanitaire électrique permettant de dimensionner les installations d'ECS et d'évaluer précisément leurs consommations.

PAPTER effectue un calcul dynamique et multi-zones (dix maximum) à partir des bilans thermiques (apports internes, consignes, renouvellement d'air...) à chaque pas de temps de simulation. La facture énergétique finale (consommations d'éclairage, de ventilateurs, de divers électriques...) peut également être calculée en tenant compte des différents postes tarifaires.

B. Résultats

Les résultats des consommations et coûts correspondants, par usage et par poste tarifaire, sont restitués sous forme de tableaux synthétiques. Il en est de même pour les puissances appelées et le contrat de souscription.

Un éditeur de graphiques permet une analyse plus fine des résultats. On peut afficher des courbes, des histogrammes ou des camemberts afin d'étudier l'évolution des températures ou des puissances appelées (Figure 29).

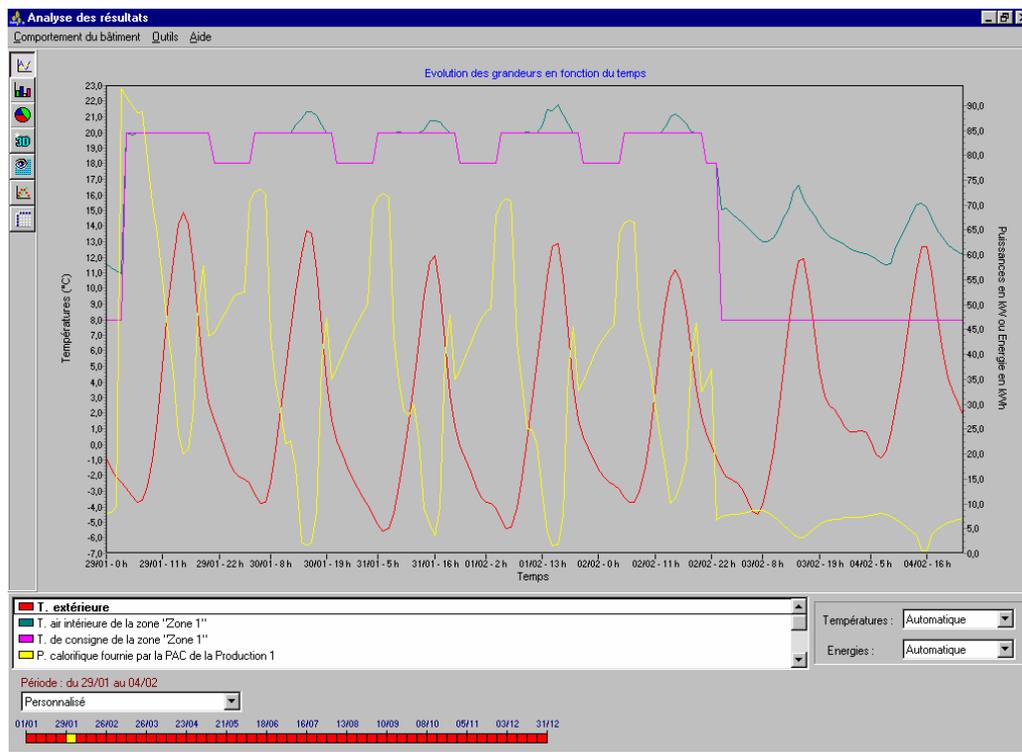


Figure 29 - Editeur de graphiques PAPTER

Un module de comparaison entre études permet de comparer rapidement les résultats de deux à cinq études différentes. Cette fonction est utile pour les études de sensibilité lorsque l'on fait varier un paramètre comme le type d'énergie, l'épaisseur d'isolant, le type d'appareil, la puissance installée, ou le type de gestion.

Tableau 17 - Altitude des plates-formes du parc nucléaire français

Site	Source froide	Info 1	PF IN	Unité	PF IN (NGFO)
Bugey	Fleuve	Rhône	197	m NGFO	197
Blayais	Estuaire	Gironde + Atlantique	4,5	m NGFO	4,5
Gravelines	Mer	Mer du Nord	8,5	m CM	5,16
Dampierre	Fleuve	Loire	125,6	m NGFO	125,6
Cruas	Fleuve	Rhône	80,5	m NGFO	80,5
Saint Laurent	Fleuve	Loire	83,8	m NGFO	83,8
Chinon	Fleuve	Loire	37,3	m NGFO	37,3
Paluel	Mer	Manche	25,3	m NGFN	24,69
Flamanville	Mer	Manche	12,4	m NGFN	11,79
Saint Alban	Fleuve	Rhône	147,2	m NGFO	147,2
Cattenom	Fleuve	Moselle	170,83	m NGFN	170,22
Golfech	Fleuve	Garonne	62,25	m NGFN	61,64
Nogent	Fleuve	Seine	68,2	m NGFN	67,59
Belleville	Fleuve	Loire	141,8	m NGFO	141,8
Penly	Mer	Manche	12	m NGFN	11,39
Chooz	Fleuve	Meuse	114,7	m NGFN	114,09
Civaux	Fleuve	Vienne	76,8	m NGFN	76,19
Fessenheim	Fleuve	Rhin	205,5	m NN	204,31
Tricastin	Fleuve	Rhône	52	m NGFO	52

$$Z_{CM} = Z_{NGFO} + 3,34 \text{ m} = Z_{NGFN} + 2,73 \text{ m}$$

CM : Carte Marine

NGFO : système de nivellement orthométrique

NGFN : IGN 69

$$Z_{NN} = Z_{NGFN} - 0,58 \text{ m}$$

NN : système de nivellement normal nul

Annexe L Annexes du groupe Infrastructures de transport et cadre bâti

L.1 Enquête de terrain d'octobre 2003

(Source : SETRA - direction d'étude « Techniques de Construction et d'Entretien » et synthèse SETRA – CSTR – ENV)

« Le bilan de la rapide enquête menée par le Sétra (Direction d'études « Techniques de Construction et d'Entretien ») auprès des correspondants « Echelon » du RST chargés de la veille technique, montre que les chaussées, dans leur ensemble, se sont plutôt bien comportées face à la canicule et que cela n'a pas engendré de désordres généralisés mettant en cause la pérennité des structures de chaussées.

« On a néanmoins relevé, comme le montre le tableau de synthèse ci-dessous un certain nombre de désordres ponctuels dans les zones les plus sensibles comme les approches de carrefours, les pentes et rampes où l'orniérage a été plus marqué que d'habitude ; les zones touchées sont celles habituellement touchées par l'orniérage, sans extension particulière.

« Les enduits et les enrobés coulés à froid ont ressué de façon plus marquée. Il n'a néanmoins pas été identifié si les sections en cause concernent des chantiers neufs ou réalisés l'année précédente à un période peu favorable, ce qui peut être une cause aggravante ou même principale par rapport 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 assurément lié aux fortes chaleurs.

« En tout état de cause, la faiblesse des désordres observés et les incertitudes sur leurs causes ne nous permettent absolument pas à ce jour de remettre en cause les spécifications qui sont préconisées par le réseau technique pour la construction et l'entretien des chaussées. Cela apporte plutôt une preuve de la qualité des spécifications actuelles.

« Le LCPC a lancé de son côté une enquête plus approfondie qui permettra notamment de discriminer, par rapport à la canicule, les autres causes possibles des désordres observés : période des travaux de réfection de chaussées, respect des spécifications. »

Réponses des services déconcentrés au 02/10/2003.

Organisme ayant répondu	Origine de l'information	Observations
CETE Méditerranée (JC.BRUN)	LR Nice (P.DEVAUX)	<p>Pas de désordres généralisés.</p> <p>Malgré tout, 2 points particuliers sur des chantiers effectués au tout début de l'été (fin avril et fin juin) :</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> RN202 : ECF bicouche (fibres+émulsion à base de BmP) sur un BBSG peu déformé qui ressue dans les traces de roues (trafic lourd moyen et trafic VL important en été). <input type="checkbox"/> Barrière de péage A8 : BBME 0/10 au bitume 20/30 (5cm) + BBTM en amont du péage et le même BBME en couche de roulement en aval du péage. Dans les 2 cas orniérage par fluage dès les premières chaleurs (trafic lourd très élevé et canalisé).
LR Aix en Provence (M.PEYRON)	DDE 11	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> RN9 : 2 zones (100 & 250m) où sont apparus un orniérage important. Il s'agit de profil en long en légère pente pour l'un et à plat pour l'autre (estimation des réparations 50keuros & 40keuros). <input type="checkbox"/> RN113 : idem. Localisation sur un PS de la SNCF (légère pente). Estimation réparation : 30keuros. <input type="checkbox"/> RN1313 (PS sur canal du Midi) : tassement considérable du sol sous les remblais. Les essais pratiqués permettent de confirmer le retrait important du sol dû à la sécheresse (coût des réparations = 18keuros)
	DDE 30	Pas de problèmes particuliers
	DDE 48	<p>Bon comportement des chaussées.</p> <p>Les zones sensibles au glissement ont peu évolué.</p>
	DDE 13	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Giratoire RN7/RD543 à Lignane : accentuation de l'orniérage (sens Cannat-Aix). <input type="checkbox"/> RN7/OA sur RN296 : affaissement du remblai contigu à l'ouvrage – défaut de dalle de transition. <input type="checkbox"/> RN7 (PR66+105) : aggravation d'une fissure existante dans le giratoire. <input type="checkbox"/> RN96/OA sur A51 : affaissement du remblai contigu à l'ouvrage dans le 2 sens de circulation – défaut de dalle de transition.
	DDE 04	Aucun problème signalé sur RN.
LR Bordeaux (B.LAJOINIE)		R.A.S. pour l'instant
LR Lille (A.COMBES)	Constataions personnelles	<p>Pas de problèmes autres que ceux habituellement constatés sur les couches de roulements en enrobés.</p> <p>Par contre, quelques constats de ressues importants sur certains ESU. Ceci n'est cependant absolument pas généralisé.</p>
LREP (JL.DELORME)	Constataions	Pas de remontées d'informations de DDE 77 (on peut en

	personnelles	<p>conclure que tout va bien ...).</p> <p><input type="checkbox"/> Apparition de bourrelets transversaux : ceci est remarqué lorsque l'on a des sous-couches à base de liant hydraulique.</p> <p><input type="checkbox"/> Apparitions de fissures très larges dues au retrait des sols dans des zones bien particulières (endroits où le sol est argileux). Dans certains cas ces fissures peuvent atteindre 5cm de large ; et cela entraîne un début d'affaissement.</p> <p>Rq (hors zone d'action) : sur RN104 extérieur, orniérage déjà existant mais qui a augmenté de façon spectaculaire.</p>
LR Nancy (C.DAVRAINVILLE)	DDE 57	<p><input type="checkbox"/> Des fissures ont été observées au droit des ponts.</p> <p><input type="checkbox"/> Apparitions de fissures longitudinales.</p> <p><input type="checkbox"/> Quelques bourrelets transversaux sont apparus, mais le phénomène avait déjà été remarqué avant les grandes chaleurs.</p> <p>Tout ceci reste malgré tout relativement ponctuel.</p> <p><input type="checkbox"/> Fluage et bourrelets sur les ECF du CAMIFEMO (mise en œuvre en Juin 2003).</p> <p><input type="checkbox"/> viaduc de hayange sur A30 : compression et relèvement inhabituel des joints.</p> <p><input type="checkbox"/> De manière générale : les RN sont concernées par des phénomènes de bourrelets et de fissuration longitudinale (origine => terrain argileux)</p>
	DDE 88	<input type="checkbox"/> Apparition de fissures longitudinales
	DDE 55	<p><input type="checkbox"/> Ressuage des enduits (même récents) surtout en rampe, dans les carrefours et les courbes.</p> <p><input type="checkbox"/> Orniérage localisé et bourrelets sur les enrobés.</p> <p><input type="checkbox"/> Fissuration, surtout sur terrain argileux et parfois au niveau des talus.</p> <p><input type="checkbox"/> Affaissement de chaussée dû au retrait de l'argile.</p>
	DDE 68	<p><input type="checkbox"/> RN63 (sur 6 ou 7 endroits) : phénomène de mouvement d'enrobés au voisinage de joints de fissuration, ce qui entraîne des bourrelets d'environ 10cm.</p> <p><input type="checkbox"/> RD25, RD70, RD58 : apparition ponctuelle de fissures.</p> <p><input type="checkbox"/> RN66 : ressuage et arrachement sur aire de repos.</p> <p><input type="checkbox"/> RN66 : accentuation de l'orniérage sur des giratoires et dans les courbes.</p> <p><input type="checkbox"/> RN466 : apparition de déformations et d'orniérage sur 2 zones de courbes.</p>
	DDE 08	<input type="checkbox"/> Giratoire de l'échangeur de l'A34 : légère accentuation de l'orniérage.
	DDE 10	<input type="checkbox"/> RN2077 et 2019 (agglo. de Troyes) : 3 zones de bourrelets ont été observées au niveau d'aires d'arrêt de bus.

	DDE 52	<input type="checkbox"/> Apparition brutale de fissures témoignant de mouvements structuraux, conséquence d'une teneur en eau des PST faible.
LR Rouen (D.CHEINISSE)	DDE 14, 27, 61	<input type="checkbox"/> problèmes de bourrelets transversaux sur chaussées de type semi-rigide. (le Calvados a traité un bourrelet de 15cm). Recensement précis en cours. <input type="checkbox"/> RN : pas de problèmes inhabituels, pour l'instant. <input type="checkbox"/> réseau autoroutier : la SAPN n'a pas remarqué, pour l'instant, de dégradations inhabituelles. <input type="checkbox"/> CG : pas de retour
CETE Ouest (G.LAURENT)		<input type="checkbox"/> ESU : RN152 ressuante sur 10km (réparation nécessaire = enrobé avant l'hiver). Néanmoins cette section avait été mise en œuvre à l'automne 2002 dans de mauvaises conditions. <input type="checkbox"/> Pas de phénomène d'orniérage important. A surveiller, car une densification de l'enrobé durant l'été 2003 pourrait accélérer le vieillissement.
LR Angers (SL.GIRARD)		Sur RN et RD, pas de dégradations particulières à leur connaissance.
LR Toulouse (JC.FABRE)		<input type="checkbox"/> RN visitées : pas de problèmes particuliers. <input type="checkbox"/> Réseau RD : Rien de catastrophique mis à part les points particuliers suivants. Ressuage sur ESU (zones traitées au PAT). Ressuage sur un chantier de renforcement => 7cm GE enduite 3 semaines après (pas assez de maturation compte tenu de l'épaisseur?). Sur des giratoires (fluage causé par la forte chaleur?). Des ECF ont perdu de leur macrotecture.
LR Blois (B.ROUSSEL)		Aucun désordre inhabituel d'orniérage ou de ressuage pour l'instant. Apparition ou accentuation de fissures longitudinales d'adaptation liées à la sécheresse sur les sol argileux (DDE 18, 28, 37, 41).
CETE Lyon (J.ARPINO)		<input type="checkbox"/> Autoroutes concédées à fort trafic : zones anormalement orniérées sur la voie lente (A6 au Nord de Macon sur 10km – A42 au Nord de Lyon sur 3 km). <input type="checkbox"/> Autoroutes non concédées : phénomène semblable, à trafic comparable. Mais globalement, il n'y a rien de catastrophique. <input type="checkbox"/> Réseau RN : quelques zones fortement orniérées mais sur des points particuliers (carrefour à feux, zone de décélération, et quelques zones de faible trafic en rase campagne). Apparition de glaçage sur un certain nombre de sections réalisées en ECF (peut-être ECF au bitume pur ; à vérifier).

		<p>Apparemment, pas de phénomènes importants de ressuage sur les ESU.</p> <p>En conclusion, pas de grosses catastrophes à ce jour.</p>
--	--	--

L.2 Eléments concernant la viabilité hivernale : quels gains potentiels ?

(Source : DGITM/DIT/DRN)

L.2.1 Problématique générale

La longueur du réseau routier national non concédé est aujourd'hui d'environ 12 000km.

La totalité du réseau fait l'objet d'un traitement « viabilité hivernale » (VH), mais, bien évidemment, le climat constitue un paramètre essentiel tant dans l'amplitude de la surveillance que dans l'intensité du traitement. En effet, la rigueur climatique du Jura n'est en rien comparable avec la clémence de la façade atlantique pendant la période hivernale.

Ainsi, de manière générale, les mesures de viabilité hivernale s'engagent traditionnellement à la mi-novembre pour se terminer le 15 mars, ce qui n'exclut pas des interventions en montagne dès la fin du mois d'octobre (et quelquefois avant) jusqu'à la fin du mois d'avril (et parfois après). Par exemple, pour assurer la viabilité du col du Puymorens, le traitement de la viabilité hivernale commence fin octobre pour se terminer début mai.

Pour ce qui concerne la répartition des dépenses, c'est un peu plus compliqué du fait que certaines dépenses sont annuelles, par exemple l'amortissement des matériels et engins spécifiques à la VH, tandis que d'autres sont périodiques et liées à la zone géographique (qui entraîne des astreintes) et d'autres enfin sont liées à l'intensité aléatoire des phénomènes climatiques. Dans ce dernier cas, le supplément de coûts se mesure en temps d'intervention en heures supplémentaires, en quantité de sel répandu ainsi qu'en carburant consommé.

L.2.2 Quelques éléments de coût

Le surcoût de la saison hivernale 2008-2009 qui a été une saison hivernale plus rude, en tous cas au-delà de la moyenne par rapport aux deux saisons précédentes qui étaient plutôt clémentes, peut être évalué à :

- 7M€ pour la seule viabilité hivernale ;
- 10M€ pour les dégâts directs causés aux chaussées.

Rapportés au linéaire global du réseau, ces surcoûts de VH représentent en moyenne environ 1 500€/km/an. Il est certain que ce surcoût s'inscrit dans une fourchette d'amplitude assez large (probablement de 1 à 10, mais il n'a pas été possible de reconstituer des bases de données localisées qui permettraient de vérifier cette hypothèse) si l'on considère les parties du réseau dites fortement exposées et celle faiblement exposées.

L.2.3 Eléments du rapport d'Audit du CGPC et CGEF (déc. 2006)

Le Rapport d'Audit²⁴ du CGPC et du CGEF de décembre 2006 examine les coûts d'exploitation et d'entretien (hors gros entretien) du réseau routier national concédé (ex SEMCA). Il fournit ainsi de ratios moyens par kilomètre exploité pondéré du réseau routier national concédé.

²⁴ Rapport de la Mission d'Audit et de Modernisation sur « la comparaison au niveau européen des coûts de construction, d'entretien et d'exploitation des routes » (déc. 2006)

Le coût de la viabilité hivernale est évalué à 6 500€ par kilomètre avec des variations entre réseaux qui se situent de 3 200€ à 11 200€ et des variations selon les années de +50 à -20%.

L'amplitude de la fourchette de coût s'étend donc de 16 000€/km pour les hivers rigoureux sur les réseaux exposés à 2 500€/km pour les hivers cléments sur les réseaux peu exposés.

On note ainsi sur le réseau concédé (anciennes SEMCA) qu'il existe une forte variabilité des coûts de la viabilité hivernale selon les conditions climatiques et les parties du réseau plus ou moins exposées

Avec le réchauffement climatique, il est possible que les surcoûts d'entretien dus aux périodes de canicule puissent être réduits, voire compensés totalement par la baisse des coûts de la viabilité hivernale. Bien entendu, cette hypothèse mériterait d'être étudiée et vérifiée sur la base d'observations précises et sur longue période.

L.2.4 Conclusion

Le LRPC de Nancy chiffre à -50% la baisse des dépenses d'entretien hivernal (moins de gel et de précipitations neigeuse etc.) et période de mobilisation sur le terrain plus réduite.

Cependant, la baisse des équipes de maintenance serait ralentie par la demande de plus de sécurité. En effet la DGITM/DIT reste prudente sur ce point. La décentralisation du réseau routier qui a eu pour effet de réduire le linéaire de routes nationales à entretenir ne semble pas entraîner de façon mécanique une réduction dans les mêmes proportions des dépenses de viabilité hivernale :

- le périmètre du réseau s'étant réduit, il est devenu difficile de mutualiser les moyens d'interventions sur le plan géographique dans un département ou une région comme cela se pratiquait antérieurement car il était rare d'être contraint d'intervenir sur tous les points du réseau au même moment ;
- en outre, la pression sociale augmente pour maintenir un bon état du réseau national et offrir un niveau de sécurité accru pendant la période hivernale : les départements faisant l'effort nécessaire pour intervenir sur leur réseau, les Préfets sollicitent les services de l'Etat pour maintenir une bonne accessibilité et une bonne qualité du réseau national en période hivernale.

L.3 Approche à partir des indices de qualité du réseau national non concédé (IQRN et IQOA)

(Source : DGITM/DIT/GRN et SETRA/CTOA)

L.3.1 La méthodologie IQRN est utilisée pour deux objectifs principaux

- Evaluer le coût de dépréciation des chaussées du réseau routier national non concédé dans le cadre de la valorisation du patrimoine routier ;
- 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.

Cette méthodologie repose sur trois notes :

- Une note du patrimoine N_p fonction du potentiel structurel de la chaussée (donc tient compte de la classe de trafic pour un type de structure donnée.) ;
- Une note surface N_s directement liée aux défauts de surface et au niveau d'adhérence ;
- Une note globale N_g qui fait la synthèse des deux précédentes.

Le système de notation basé sur un relevé visuel des dégradations de chaussée, des mesures de déformations transversales et des mesures d'adhérence sur l'ensemble du réseau a été mis en place, issu de l'expérience acquise par le réseau technique et les différents services gestionnaires.

L'entretien des chaussées consiste à conserver dans le temps la qualité initiale de service rendu à l'utilisateur. Toutefois, le besoin de qualité de service n'est pas le même en fonction du type de voie. Les travaux d'entretien sont plus ou moins conséquents en fonction de l'agressivité du trafic supporté et des contraintes d'exploitation (travail de nuit par exemple). Pour tenir compte de ces questions qui impliquent des moyens différents en fonction des types de voies, dès 1993, la Direction des Routes a mis en place une hiérarchie représentant à la fois les différences en termes de besoins de qualité, les différences en termes d'agressivité du trafic et les différences en termes de coût unitaires.

L.3.2 Réhabilitation des ouvrages d'art : Présentation simplifiée d'IQOA

Cinq classes d'état sont possibles dans la méthode IQOA :

- Classe 1 : l'ouvrage est en bon état apparent. Les désordres qu'il présente sont sans gravité et peuvent être éliminés par des actions d'entretien courant effectuées par la subdivision territoriale, avec ses moyens propres. Les ouvrages de cette classe ne grèvent donc pas en général le budget d'entretien de la Direction des Routes.
- Classe 2 : la structure porteuse de l'ouvrage est en bon état apparent ou présente des défauts mineurs, sans gravité ni caractères d'urgence à être éliminés. Par contre, les équipements du pont (garde-corps, joints et chaussées ...) ou éléments de protection (chape d'étanchéité, peinture ...) présentent des dégradations qui nécessitent pour être éliminées un entretien dit spécialisé (c'est-à-dire faisant intervenir une entreprise ou une équipe spécialisée), sans caractère d'urgence.

- Classe 2E : même cas que le précédent, avec une notion de risque d'évolution rapide des dégradations d'équipement ou d'éléments de protection vers des désordres de structure nécessitant à moyen terme une réparation plus lourde et donc plus coûteuse. L'élimination la plus imminente possible des désordres classés 2E par un entretien spécialisé présente donc un intérêt économique évident.
- Classe 3 : la structure porteuse de l'ouvrage est atteinte, sans nécessiter pour autant de travaux de réparation urgents, car ses désordres évoluent très lentement.
- Classe 3 U : la structure porteuse est atteinte, de façon apparemment préoccupante. Une inspection détaillée et des investigations complémentaires s'imposent pour établir un diagnostic sérieux et définir les travaux de réparation *a priori* urgents qui s'imposent, pour rendre à l'ouvrage sa capacité portante d'origine.

La méthode IQOA permet de répartir les ouvrages du patrimoine à gérer dans les différentes classes d'état pour définir les priorités d'intervention (actions d'entretien en général peu coûteuses et études de diagnostic et réparation de structure plus coûteuses).

Que ce soit au niveau local d'une CDOA en DDE (en DIR²⁵ maintenant) ou au niveau national pour la DIT (DGITM), une base de données, facile à exploiter, peut être créée à l'aide du logiciel IQOA. Elle est mise à jour tous les ans par tiers, puisque chaque ouvrage est réévalué tous les trois ans.

²⁵ Direction interrégionale des routes

L.4 Synthèse bibliographique sur l'impact du changement climatique et l'adaptation - Cas de la Suisse

(Source : ACADEMIE SUISSE DES SCIENCES NATURELLES, « *Les changements climatiques et la Suisse en 2050* », revue Constructions et infrastructures LCPC, rédaction Proclim, article en collaboration avec 15 auteurs. Synthèse DGITM/SAGS/EP)

L.4.1 Réseau routier

Le changement climatique aura sur le réseau routier des impacts similaires à ceux sur le réseau ferré. On peut s'attendre en principe à des conséquences de moindre ampleur pour les routes, car de par sa construction, le réseau routier est généralement moins sensible.

D'autres facteurs, par exemple une nouvelle élévation de la limite de poids des camions ou un nombre nettement plus élevé de véhicules lourds, auraient très probablement des conséquences plus marquées que le changement climatique attendu. Vu sa très forte densité, le réseau routier a en outre un avantage de flexibilité sur le réseau ferré : si un tronçon de route est menacé ou impraticable, il existe souvent des itinéraires de substitution.

Du point de vue des matériaux utilisés et de la construction, le réseau routier s'adaptera là où cela sera nécessaire aux nouvelles conditions, notamment en ce qui concerne la chaussée. Les facteurs climatiques d'influence les plus importants en ce qui concerne les routes seront les crues et les instabilités de pentes. En outre, des avalanches, tempêtes d'hiver et chute de grêle pourront porter atteinte au trafic routier.

L.4.2 Fortes précipitations / inondations

Les crues peuvent toucher des tronçons routiers aussi bien que des lignes de chemins de fer. Des masses d'eau exceptionnelles peuvent avoir pour effet de saper le soutènement de routes ou, dans les régions plus plates, des les inonder, si des cours d'eau et des lacs débordent. Dans les régions de montagne, les fortes précipitations provoquent souvent des glissements de terrains et des laves torrentielles.

D'autre part, des hivers pauvres en neige peuvent avoir des effets positifs sur le trafic routier : le risque d'accident est alors moins élevé et les routes demandent moins de travaux d'entretien.

L.4.3 Instabilité des pentes

Le risque de laves torrentielles et d'éboulements existe autant dans les transports routiers que ferroviaires.

Il menace avant tout les routes en altitude ou en des endroits exposés. Les éboulements ne tiennent pas forcément au changement climatique, mais peuvent avoir différentes causes. Entrent en ligne de compte comme facteurs initiaux : l'altération atmosphérique des roches, des quantités d'eau plus importantes jouant le rôle de lubrifiant, des effets de gel et dégel portant atteinte à la cohésion des roches, ou encore le dégel du pergélisol en raison de la hausse des températures (cf. Stabilité et sécurité des sillons ferroviaires).

Une combinaison de différents facteurs est aussi possible. La sensibilité du système de transport à l'égard des perturbations est aujourd'hui déjà très grande en raison de l'important volume du trafic et de l'aspiration à une mobilité quasi illimitée.

L.4.4 Avalanches

Tout comme le réseau ferré, les transports routiers peuvent aussi être perturbés par des avalanches ou le danger d'avalanches. Le changement climatique fera éventuellement augmenter ce risque à haute altitude, où les quantités de précipitations plus importantes en hiver peuvent tomber sous forme de neige.

L.4.5 Tempêtes d'hiver

Du fait de l'augmentation prévue des tempêtes d'hiver, il faudra s'attendre à ce que des arbres soient plus souvent déracinés. Si de tels arbres tombent sur la route, il en résulte un danger immédiat pour ses utilisateurs et il peut s'ensuivre des interruptions du trafic. Ce risque est néanmoins faible actuellement et ne devrait pas augmenter sensiblement à l'avenir.

L.4.6 Réseau ferroviaire

Les impacts du changement climatique sur le réseau ferroviaire tiennent avant tout à l'augmentation possible des événements météorologiques extrêmes.

Les fortes précipitations sont une menace pour la stabilité des sillons ferroviaires, les tempêtes et périodes de chaleur peuvent endommager les lignes de contact et les voies. Des contre-mesures permettent d'éviter une augmentation exponentielle du montant des dommages.

L.4.7 Stabilité et sécurité des sillons ferroviaires

Les voies ferrées sont aujourd'hui déjà exposées régulièrement aux dangers naturels, en premier lieu lors d'événements météorologiques exceptionnels tels que de longues périodes de pluie ou de fortes chutes de neige. C'est ainsi que de nombreuses gares ont été inondées lors des crues d'août 2005. De fortes précipitations peuvent avoir pour conséquence non seulement des inondations, mais aussi des glissements de terrain et des crachées boueuses. D'autres conséquences possibles sont des accumulations d'eau sur la voie, l'érosion des bords et des laves torrentielles.

L.4.8 Précipitations

L'augmentation pronostiquée des précipitations en hiver, qui tomberont davantage sous forme de pluie à basse altitude, ainsi que celle, attendue, des fortes précipitations d'hiver accroîtra la menace sur la stabilité des sillons ferroviaires. La stabilité des talus et des pentes est particulièrement mise en question. Lors de fortes précipitations, l'eau peut aussi saper le terrain sous la voie.

La fréquence future des instabilités et des problèmes d'évacuation de l'eau ne dépend pas seulement de la quantité et de l'intensité des précipitations. L'humidité du sol et la capacité des sols et empierrements à accumuler l'eau, ainsi que l'écoulement de l'eau dans des rigoles situées à proximité, sont aussi des facteurs d'influence importants. Ceci vaut notamment en été, saison durant laquelle les quantités totales de précipitations tendront à diminuer, mais où la pluie tombera plus souvent sur un sol desséché.

Il semble probable que l'instabilité des talus et des pentes croîtra avec l'augmentation des précipitations. Mis à part les lignes de chemins de fer longeant des pentes, les segments de voie aménagés en déblai sur une pente sur le Plateau et dans les Préalpes recèlent un potentiel non négligeable de glissement. Là aussi, les fortes précipitations peuvent détremper la voie, la rendre instable et conduire finalement à des glissements de terrain. Au-dessus de la limite des chutes de neige, les quantités importantes de précipitation en hiver peuvent entraîner une augmentation du danger d'avalanches ou entraver le fonctionnement des infrastructures (blocage d'aiguillages, limitation de la visibilité, amoncellement de neige sur la voie).

Les chemins de fer disposent d'un cadastre des couloirs d'avalanche qui peuvent être une menace pour le réseau. Dans les zones critiques, les sillons ferroviaires sont aujourd'hui déjà assurés par des galeries de protection ou surveillés de près pendant les fortes chutes de neige. La protection contre d'autres couloirs d'avalanche pourrait être, si nécessaire, réalisée assez facilement.

L.4.9 Température

Les conséquences de l'augmentation moyenne des températures, de même que celles de vagues de chaleurs qui surviendront probablement plus fréquemment, seront avant tout indirectes en ce qui concerne la stabilité et sécurité des sillons ferroviaires. Des effets sont possibles comme conséquences du dégel du pergélisol et éventuellement de modifications des processus de dégel et de gel.

L'été caniculaire de 2003 a montré les effets de températures élevées sur la stabilité des pentes. Pendant cet été exceptionnellement chaud, de nombreux éboulements et chutes de pierres ont été observés dans tout l'arc alpin, notamment à haute altitude et sur les pentes exposées au nord. Cette activité exceptionnelle en matière d'éboulements est interprétée comme indice selon lequel la déstabilisation due à la chaleur extrême se produit comme réaction presque immédiate. Etant donné que les régions à pergélisol sont situées très souvent à l'extérieur des zones d'habitation et d'infrastructures, le danger futur est limité.

Dans les régions critiques, les risques et les dommages peuvent être minimisés en renforçant les mesures de sécurité (p.ex. filets de sécurité, murs de protection, surveillance).

Il est possible que l'on assiste à une diminution des chutes de pierres dans les régions situées à plus basse altitude, où les températures seront plus souvent positives à l'avenir en raison du réchauffement.

L.4.10 Ouvrages de génie civil

En matière de construction, on ne s'attend pas à des problèmes liés au réchauffement climatique pour les ouvrages de génie civil tels que ponts, tunnels, passages en tranchée, etc. Normalement, une augmentation des températures de l'ordre de grandeur attendu peut être supportée sans conséquences par les ouvrages de génie civil. On ne s'attend pas non plus à des problèmes de statique en cas de tempêtes. Mais il est possible que les phénomènes d'affouillement et les problèmes d'écoulement augmentent au niveau des ponts et d'autres passages du fait de crues plus importantes.

L.4.11 Lignes de contact et rails

Du fait de l'augmentation attendue des tempêtes d'hiver, il faudra compter avec davantage d'arbres déracinés. Lorsque de tels arbres tombent sur des lignes de contact ou la voie ferrée, cela entraîne généralement des retards et interruptions du trafic ferroviaire et des dommages aux infrastructures. Environ un tiers des quelque 3000km de lignes du réseau des CFF est bordé d'un ou des deux côtés par des forêts.

Les CFF s'efforcent d'avoir sur tous les tronçons boisés un profil de forêt bien défini : des buissons et arbustes à proximité des voies et des arbres de plus grande taille à plus grande distance de ces dernières. Des arbres tombés ne peuvent ainsi plus guère causer de dommages. Cette manière de procéder est avantageuse du point de vue de la disponibilité et sécurité en cas de tempêtes, mais peu favorable en revanche en ce qui concerne l'ombrage des pentes lors de périodes de chaleur (microclimat des talus de voies ferrées).

L.4.12 Tendance des températures / extrêmes de chaleur

La montée des températures d'été a des impacts sur le réseau ferré. Des températures élevées persistant pendant plusieurs jours peuvent avoir pour effet de déformer les rails, vu que la dilatation thermique de ces derniers est empêchée du fait qu'ils sont soudés sans interstice l'un à la suite de l'autre. La pression qui en résulte peut entraîner un déplacement latéral des rails. Lors de la pose des rails, des mesures sont prises pour réduire cette pression et accroître la résistance latérale de la voie.

Pendant l'été caniculaire de 2003, de telles déformations des rails ont été en gros 50% plus fréquentes qu'au cours d'un été moyen. Pour ne pas risquer un déraillement, les trains doivent réduire leur vitesse en cas de déformations des rails ou renoncer même à utiliser les tronçons concernés. Compte tenu du fait que les périodes de forte chaleur deviendront nettement plus probables jusqu'en 2050, les exploitants de chemins de fer devront se prémunir contre des déformations de rails plus fréquentes. Moyennant un supplément de dépense, le processus de construction peut être adapté de manière à permettre aux rails de supporter sans dommages des températures plus élevées. Des exigences plus sévères sont appliquées aujourd'hui déjà au Tessin. Les rails sont soumis, lors de leur pose, à une température plus élevée, afin de prévenir des déformations futures.

L.4.13 Augmentation relative aux tempêtes d'été ?

Les orages de chaleur en été représentent aussi un risque potentiel pour les lignes de contact, étant donné que la foudre peut entraîner des perturbations de l'exploitation et des dommages aux installations. Mais comme aucun pronostic n'a encore pu être fait jusqu'ici au sujet des tempêtes d'été, il n'est pas possible pour l'heure d'estimer si ce risque se modifiera.

L.4.14 Evolution du montant des dommages

Selon une étude de l'Institut fédéral de recherche sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), qui montre l'évolution du montant des dommages de 1972 à 2005, la somme des coûts des dommages dus aux crues, glissements de terrain et laves torrentielles a augmenté presque linéairement au cours des trente années passées. Le rapport souligne que la hausse de la somme des coûts des dommages est nettement au-dessous d'une évolution proportionnelle à l'accroissement de la population, de la surface des zones d'habitation et de la densité des valeurs. L'ampleur des dommages dus aux phénomènes naturels est donc inférieure à ce que laisse attendre l'évolution des valeurs. Ceci tient surtout aux mesures de protection qui ont été prises. Au vu des changements attendus, il semble probable qu'une planification prévoyante et la mise en œuvre des mesures correspondantes pourra empêcher largement une augmentation exponentielle de la somme des dommages matériels.

L.5 Synthèse bibliographique sur l'impact du changement climatique et l'adaptation pour les infrastructures routières

(Source : rapport de synthèse de la DGEC – B. Reysset)

L.5.1 Introduction

L'examen de la littérature des impacts du changement climatique sur les infrastructures, met en évidence une grande majorité de publications consacrées aux effets des événements extrêmes (impact des tempêtes et inondations). C'est encore plus vrai quand on s'intéresse aux analyses quantitatives, souvent issues de chiffrage de la reconstruction post catastrophe (ouragan Katrina, etc.).

Hors de ces événements extrêmes, le lien entre changement climatique et infrastructures de transport est assez peu documenté et souvent à travers des approches empiriques ou des retours d'expérience. Certains auteurs jugent d'ailleurs qu'un rapport de référence comme celui de Stern est très peu approfondi sur ce thème des transports, en relation avec une documentation encore très éparse (Koetse et Rietveld, 2009).

Le cadre des hypothèses communes du groupe de travail (pas de prise en compte des facteurs tempêtes et inondations, économie constante) va restreindre encore le champ de référence. On propose donc de dresser une synthèse de la bibliographie collectée dans le cadre du groupe de travail pour les infrastructures routières.

Les études sur l'impact quantitatif du changement climatique, hors épisodes extrêmes, ont été presque uniquement identifiées pour des pays non européens et avec des contraintes climatiques parfois très éloignées de la France : Etats-Unis/Alaska (Larsen *et al.*, 2007), Royaume-Uni (DEFRA 2006a, ainsi que Hudson *et al.*, 2006), Australie (Austroads, 2004 et Cechet, 2004), Nouvelle-Zélande (Kinsella *et al.*, 2007). Ces études ne sont pas directement exploitables pour ce travail car :

- le cas de l'Alaska est basé sur une situation de permafrost ;
- le cas britannique est un éclairage territorial restreint géographiquement ;
- le cas australien est basé sur des simulations spécifiques à la structure du réseau routier australien et le modèle utilisé n'est pas dans le domaine public²⁶ ;
- le cas néo-zélandais repose sur des estimations assez expérimentales de coût de surdimensionnement des ouvrages à dire d'experts néo-zélandais dont la transposition au niveau français peut poser des questions.

Pour le cas français, deux documents qui ne sont pas des publications scientifiques internationales ont malgré tout pu être identifiés :

- une étude technique de l'impact du réchauffement climatique sur le dimensionnement des chaussées (Mauduit C. *et al.*, non daté) ;
- un document interne du Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements (SETRA) dressant un bilan qualitatif de l'impact de la canicule 2003 sur l'état du réseau routier.

²⁶ Le modèle combine des données d'entretien en fonction de variables climatiques ainsi que des scénarios d'impact de l'évolution démographique et urbaine du pays.

L.5.2 Chaussées

Les publications ayant cherché à modéliser l'impact direct des variables climatiques sur l'état de dégradation de la chaussée ont utilisé un indice composite, l'indice de Thornthwaite : cet indice combine précipitation et niveau d'évapotranspiration potentielle (ETP).

L'Australie et le Nouvelle Zélande attribuent à la baisse de valeur de cet indice une meilleure durabilité de la chaussée. L'indice ayant tendance à diminuer quand les précipitations diminuent et quand les températures augmentent, on estime que transposé au cas français, il aurait tendance à modéliser une baisse des coûts d'entretien de la chaussée. En effet, les travaux actuels de désagrégation des modèles climatiques du GIEC ont tendance à prévoir une baisse généralisée des précipitations estivales et une situation plus incertaine l'été selon les régions (Boë, 2007).

En Nouvelle-Zélande, partant du fait que les modèles prévoient une baisse des précipitations dans la moitié du pays, et une hausse sur l'autre, il est estimé de façon générale que le coût d'entretien national sera stable (compensation régionale des coûts).

Les études sur des régions britanniques ont utilisé des données budgétaires (surcoûts encourus en dépenses d'entretien durant la canicule de 2003) et ont projeté les coûts sur la base d'hypothèses de travail, sur la fréquence des canicules sur le siècle. L'approche est intéressante mais elle est circonscrite à une échelle territoriale très localisée (faute de données). Par ailleurs, dans le chiffrage annuel des impacts, l'étude estime que les coûts d'entretien hivernaux vont rester constants malgré le réchauffement climatique (maintien des équipes et des investissements, maintien d'une capacité de réaction en cas de crise, etc.) ce qui peut entraîner une critique de surestimation du coût. Elle estime que le surcoût d'entretien estival représenterait 15% des coûts d'entretien annuel. Ainsi cette méthodologie nous semble difficilement utilisable pour notre travail. Un chiffrage est cependant donné avec toutes les réserves qui s'y attachent.

L'étude sur les chaussées françaises n'a pas réalisé de calculs sur le plan national. Elle a uniquement quantifié d'un point de vue technique l'impact de la baisse de la rigueur hivernale sur le pays. La baisse de la rigueur hivernale entraînerait une baisse de coût de construction de l'ordre de 100 000€ par km pour les zones n'étant plus soumises au gel. Pour les frais d'entretien hivernaux, il est estimé qu'ils chuteraient de 50%, ce qui pour une route concédée pourrait représenter l'équivalent de 4 000€/km/an. L'impact de la chaleur n'a en revanche pas été étudié.

L'enquête interne SETRA-LCPC réalisée en 2003 auprès des antennes régionales a fait état de dégradations supplémentaires, mais à un niveau assez restreint et entrant dans la variabilité annuelle des frais d'entretien.

Enfin, il est à noter que le rapport d'une Mission d'audit de modernisation du réseau réalisée fin 2006 (Cazala *et al.*, 2006) estime qu'en moyenne 12% du coût d'entretien de la chaussée est lié aux dépenses d'entretien hivernal. Le montant unitaire peut même varier du simple à l'octuple selon le degré d'exposition à la rigueur hivernale. L'entretien d'été n'est pas différencié spécifiquement jusqu'en 2006 et il est inclus dans une rubrique générique de montant peu variable dans le temps.

Ce faisceau d'éléments bibliographiques laisse à penser que les coûts d'entretien du réseau routier ne devraient pas foncièrement augmenter en France du fait de l'évolution des variables températures et climat. Les modèles basés sur l'indice Thornthwaite anticipent une baisse des coûts : les coûts d'entretien hivernaux devraient réduire, et concernant les coûts estivaux, les constats faits en France après la canicule de 2003 ne semblent pas mettre en évidence un très fort impact financier (il ne semble pas apparaître non plus sur une longue période).

Plus globalement, l'expertise interne au sein du groupe « Infrastructures de transport, urbanisme et cadre bâti » estime que l'impact du changement climatique devrait rester secondaire en termes de dégradation des routes : le facteur de trafic, de charge et le degré d'entretien routinier seraient les variables structurellement à même de plus impacter la dégradation de la route que le climat (dans les conditions de calibrage actuel de la chaussée française). Néanmoins, la vigilance sur le réseau doit être maintenue car la hausse du climat devrait augmenter l'amplitude des variations de température du revêtement, ce qui pourrait peut-être influencer la durabilité de ce revêtement. Un exemple est donné ci-dessous avec une élévation de la température de l'air (courbes T2m ci-dessous) sur une chaussée en France (température de la chaussée : courbes Ts) :

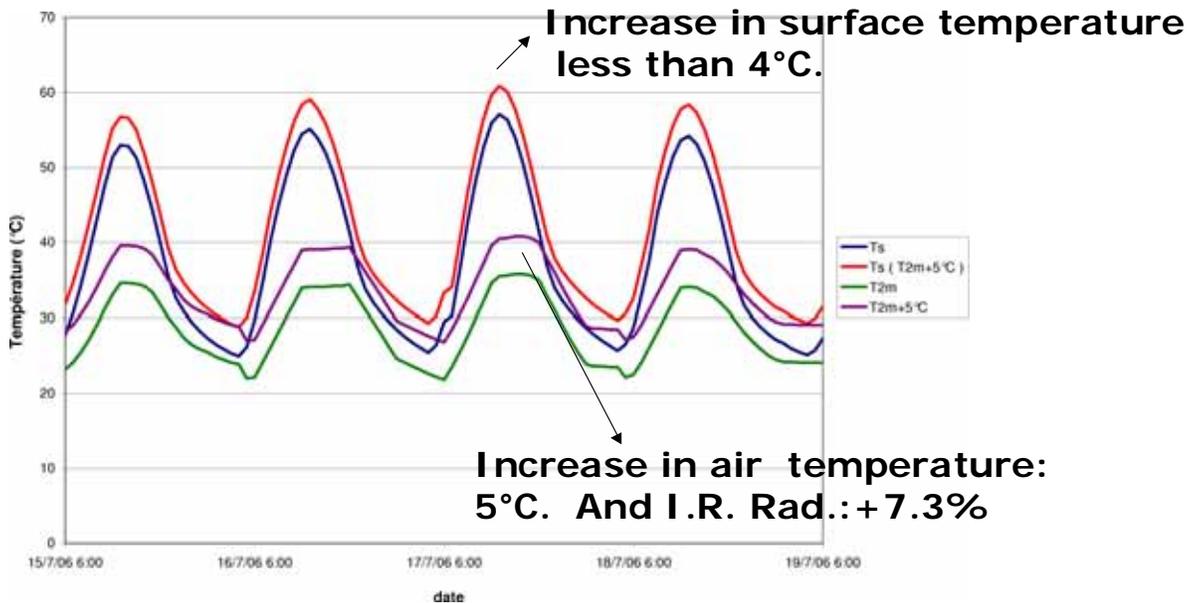


Figure 30 – Effet d'une élévation de la température de l'air sur une chaussée en France (projet RIMARROC, d'après L. Bouilloud)

L.5.3 Ouvrages

Les ouvrages réalisés en France ne sont pas spécifiquement sensibles *a priori* aux hautes températures : les spécifications techniques requièrent une gamme de tolérance à de fortes températures.

Très peu d'études ont pu être consultées sur le sujet. En termes quantitatif, seuls les travaux réalisés en Nouvelle Zélande ont pu être identifiés (Kinsella *et al.*, 2007). En l'absence de modèle précis de détermination de l'impact, ils posent une hypothèse expérimentale : pour adapter les ponts aux hausses de débits de pluie, il faut rallonger le tablier pour éviter la submersion et renforcer les fondations. Un coût à dire d'expert est chiffré à 10% du coût total du pont, sans distinction selon le type de pont. Pour les radiers, il est posé que le coût total est deux fois moindre, à dire d'expert.

Dans le cas français, nous n'avons pas pu récupérer la valeur des ouvrages, donc nous n'avons pas pu estimer l'impact au niveau français. Néanmoins, l'hypothèse précédente semble très expérimentale au vu de l'enjeu stratégique pour le réseau de ces ponts : une étude spécifique serait sans doute adaptée.

Il faut toutefois remarquer qu'aucun modèle climatique pour la France ne prévoit de hausse généralisée de la fréquence des inondations de débordement : l'utilisation de l'hypothèse de hausse des inondations semble donc assez délicate à extrapoler au cas français.

Un impact qui peut être à considérer en revanche est que la désagrégation des modèles projette une baisse drastique des écoulements des cours d'eau dans certaines parties du territoire (Boé, 2007). En cas d'impact et de baisse des nappes, il pourrait peut être se manifester un effet de déstabilisation des assises de certains ouvrages.

L.6 Evaluation du surcoût sur les infrastructures de transport en zone littorale

(Source : DGITM/SAGS/EP avec l'appui du CETMEF/DELCE)

EVALUATION DU SURCOUT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT EN ZONE LITTORALE

(SUBMERSION MARINE)

PROPOSITION DE METHODE EN MANCHE ET ATLANTIQUE

Cette note établie par la DGITM/SAGS/EP avec l'appui du CETMEF/DELCE, est une contribution à l'étude du surcoût du changement climatique (coût de l'inaction) sur les infrastructures de transport situées sur la bande littorale, dû à l'élévation globale du niveau marin.

Selon les hypothèses de base données par la DGEC, l'objectif est de déterminer, sur une durée de 40 ans (soit la période 2010 - 2050), le surcoût 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.

Le patrimoine se trouvant exposé à une probabilité de submersion accrue, le surcoût du changement climatique sera caractérisé par l'augmentation de sa vulnérabilité.

On aborde dans cette note le cadre théorique de l'analyse statistique de la variabilité du niveau de la mer puis l'on 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 ». Un des points de discussion est que le coût de submersion diffère selon que la submersion est intermittente ou permanente. L'appréciation quantifiée du patrimoine des infrastructures de transport dans les zones vulnérables fait quant à elle l'objet d'une étude particulière du CETMEF issue de l'étude « Vulnérabilité du territoire national aux risques littoraux », 2009.

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). Il est de plus supposé que la remontée du niveau moyen de la mer se traduit par une translation d'égale ampleur de la loi de distribution statistique du niveau marin.

Sous ces hypothèses, 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 (défini plus loin comme le niveau submergé avec certitude tous les ans, c'est-à-dire dont la période de retour est de 1 an) et +1m, pour lesquels le changement climatique conduit à une submersion permanente : le surcoût du changement climatique sera pris 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 le nouveau niveau centennal²⁷) : nous proposons 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'établit alors dans une fourchette qui varie de 100% (à 1 m) à 15% (à 1m50) 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 : nous proposons 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'établit dans une fourchette qui varie de 17% (à 1m50) à 0,1% (à 2m) 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. La formulation donnée à la fin des sections 2.2.1 et 2.2.2 en permet le calcul théorique.

Enfin les formulations présentées dans la 1^{ère} partie autorisent toute étude de sensibilité :

- à la valeur de la surélévation du niveau de la mer ;
- à la valeur du « h » local (défini ci-après) caractérisant la distribution statistique des niveaux marins, dont une valeur moyenne a été prise en compte sur le littoral de la Manche et de l'Atlantique ;
- au taux d'actualisation ;
- à la durée du calcul économique.

L.6.1 Cadre théorique et hypothèses de travail

1. Coût de submersion et cote de protection d'un élément de patrimoine

Nous considérons un élément de patrimoine (infrastructure de transport par exemple). Cet élément est soit implanté directement à une cote « n », soit protégé de la submersion par un ouvrage de protection arasé à la cote « n »²⁸. Dans les deux cas, on dira que la cote de protection de l'élément de patrimoine est « n ».

La submersion est ici caractérisée uniquement par un niveau marin statique (*Still Water Level*), ce qui est une hypothèse simplificatrice : on ne prend pas en compte le franchissement dû à la houle, ni la possibilité de rupture de l'ouvrage de protection quand il en existe.

2. Niveau (cote) zéro

On convient de comptabiliser les cotes « n » à partir d'un niveau « zéro » défini comme celui qui a une période de retour de 1 an, ou encore comme le plus haut niveau qui est submergé avec certitude tous les ans. La cote IGN ou NGF du niveau zéro ne peut quant à elle être déterminée que localement.

²⁷Le niveau extrême centennal correspond à l'aléa de submersion marine tel que défini dans le Guide méthodologique des plans de prévention des risques littoraux (MATE, 1997)

²⁸On suppose que l'ouvrage de protection est correctement dimensionné pour jouer son rôle de protection tant que la cote « n » n'est pas atteinte.

3. Probabilités de submersion annuelle

3.1. *Probabilité actuelle de submersion annuelle d'un niveau « n »*

On considère la succession des niveaux les plus hauts atteints par la mer chaque année (marée + surcotes/décotes) en modélisant la submersion d'une cote donnée par une succession de tirages annuels indépendants obéissant à une loi de Bernouilli. Cette modélisation simplifie le phénomène des montées et descentes biquotidiennes du niveau de la mer.

La probabilité de submersion du niveau « n » une année donnée est notée $p(n)$. La probabilité de submersion du niveau « zéro » et des niveaux inférieurs est égale à 1 : donc $p(0) = 1$, et $p(n) = 1$ pour $n \leq 0$.

Par définition, la période de retour T du niveau « n » de la mer est la moyenne du nombre d'années qui séparent deux dépassements successifs du niveau « n ». On démontre que :

$$T(n) = 1 / p(n)$$

Le niveau zéro est celui qui a une période de retour de 1 an.

Pour la description statistique des niveaux marins extrêmes, on se réfère à l'étude « Statistiques des niveaux marins extrêmes de pleine mer Manche et Atlantique » (SHOM-CETMEF, 2008) actualisant une étude antérieure de 1994. Les lois $p(n)$ sont de la forme :

$$p(n) = 10^{-n/h}$$

où h est un paramètre homogène à une longueur, qui varie localement selon la station de mesure. La forme de cette loi de probabilité signifie que toutes les fois que la cote s'élève de « h » mètres, la période de retour de submersion associée à cette cote est multipliée par 10.

3.2. *Nouvelle probabilité de submersion annuelle d'un niveau « n » avec le changement climatique*

Par simplification, l'effet de la remontée du niveau moyen de la mer est représenté par une translation de + 1,00m de la loi de probabilité. On note $p'(n)$ la nouvelle probabilité de submersion :

$$\text{Si } n < 1 \text{ m : } p'(n) = 1,00$$

$$\text{Si } n > 1 \text{ m : } p'(n) = 10^{-(n-1)/h} = p(n) \cdot 10^{1/h}$$

Cette translation est supposée intervenir « brutalement » en 2010.

4. Vulnérabilité et coût de submersion

La vulnérabilité est l'espérance du « coût de submersion ».

Le coût d'un dommage causé par un événement ponctuel est très loin du coût de destruction du bien. Aussi nous définissons, par simplification, deux approches contrastées pour les coûts de submersion :

- Approche 1 : coût de la submersion permanente, C_{perm} , assimilable à la valeur patrimoniale de l'élément ; vu le caractère très général de l'exercice de chiffrage demandé ici, on ne prendra pas en compte les coûts socio-économiques liés à la perte d'usage de l'infrastructure (seule une analyse au cas par cas permettrait de compléter le scénario de l'inaction : existence ou non d'itinéraires de substitution,

délai de reconstruction de l'infrastructure, nouveau niveau de protection choisi... ?) ;

- Approche 2 : coût annuel d'une submersion intermittente, C_{intr} , assimilable à la perte d'une fraction de la valeur patrimoniale augmentée de la perte d'usage pendant la durée effective (nombre moyen de jours) de chaque submersion ; ces coûts sont supposés se cumuler tout au long des 40 années au rythme des submersions. La durée de chaque submersion est supposée inchangée avec le changement climatique.

Bien entendu la réalité est plus complexe. Le fait de considérer un coût annuel dans le deuxième cas est la conséquence obligée de l'hypothèse simplificatrice plus haut qui modélise la submersion par une succession de tirages indépendants intervenant tous les ans.

5. Augmentation de la vulnérabilité annuelle

5.1. *Pour le patrimoine établi à une cote inférieure au niveau zéro + 1m*

La vulnérabilité annuelle actuelle V de l'élément de patrimoine caractérisé par la cote de protection « n » est :

$$V = C \cdot p(n)$$

La vulnérabilité annuelle de l'élément de patrimoine, qui se retrouve submergé en permanence tenant compte du changement climatique, est calculée selon l'approche 1 :

$$V = C_{perm}$$

5.2. *Pour le patrimoine établi à une cote supérieure au niveau zéro + 1m*

La vulnérabilité annuelle V actuelle de l'élément de patrimoine caractérisé par la cote de protection « n » est :

$$V = C \cdot p(n)$$

La vulnérabilité annuelle de l'élément de patrimoine tenant compte du changement climatique est :

$$V = C \cdot p'(n)$$

6. Surcoût du changement climatique (augmentation de la vulnérabilité sur 40 ans)

6.1. *Pour le patrimoine établi à une cote inférieure au niveau zéro + 1 m*

Le coût de submersion permanente domine largement le coût de submersion intermittente. La submersion est supposée intervenir la première année. Aussi, quelle que soit l'approche pertinente pour le choix d'un coût de submersion dans la situation actuelle, le surcoût du changement climatique pour un élément de patrimoine établi à une cote inférieure au niveau zéro + 1 m est assimilable à C_{perm} .

6.2. *Pour le patrimoine établi à une cote supérieure au niveau zéro + 1 m*

Les deux approches sont envisageables pour le calcul de C .

Pour calculer la vulnérabilité sur une durée de 40 ans (soit 2010 – 2050), on n'a pas le droit de multiplier le surcoût annuel par 40 car il faut actualiser les coûts (en valeur 2010) selon l'année à laquelle la submersion se produit, en mettant en œuvre un taux d'actualisation i net de l'inflation que l'on prend égal à 4%.

6.2.1. Première approche

Avec la première approche, celle de la destruction totale de l'infrastructure à la première submersion, l'année à laquelle la première submersion se produit suit une loi géométrique :

Probabilité que la première submersion se produise la k^{ième} année :

$$p(n) \cdot (1-p(n))^{k-1}$$

Coût actualisé à l'année 1 de la submersion totale se produisant la k^{ième} année (le coût est supposé supporté une seule fois) :

$$C / (1+i)^{k-1}$$

La vulnérabilité actuelle tenant compte de l'actualisation est donc :

$$V = C \cdot \left(\sum_{k=1}^{40} p(n) \cdot (1-p(n))^{k-1} / (1+i)^{k-1} \right) = C \cdot p(n) \cdot (1 - a^{40}) / (1 - a)$$

$$\text{où } a = (1 - p(n)) / (1 + i)$$

La vulnérabilité avec le changement climatique s'exprime de la même façon avec les nouvelles probabilités p'(n). D'où le surcoût du changement climatique, SCC :

$$SCC = C \cdot \left(p'(n) \cdot (1 - a'^{40}) / (1 - a') - p(n) \cdot (1 - a^{40}) / (1 - a) \right)$$

$$\text{Avec } a' = (1 - p'(n)) / (1 + i)$$

6.2.2. Deuxième approche

Avec la deuxième approche, celle de l'endommagement cumulatif, le nombre de submersions sur une durée de A années suit une loi binomiale B(A, p(n)) dont l'espérance est A . p(n). L'espérance du coût annuel de submersion (A = 1) est égale à C . 1 . p(n). La vulnérabilité actuelle, tenant compte de l'actualisation, est calculée en actualisant la série des espérances annuelles des dommages :

$$V = \sum_{k=1}^{40} p(n) \cdot C(k) = C \cdot p(n) \cdot \left(\sum_{k=1}^{40} b^{k-1} \right) = C \cdot p(n) \cdot (1 - b^{40}) / (1 - b)$$

$$\text{où } b = 1 / (1+i)$$

La vulnérabilité avec le changement climatique s'exprime de la même façon avec les nouvelles probabilités p'(n), d'où le surcoût du changement climatique :

$$SCC = C \cdot (p'(n) - p(n)) \cdot (1 - b^{40}) / (1 - b)$$

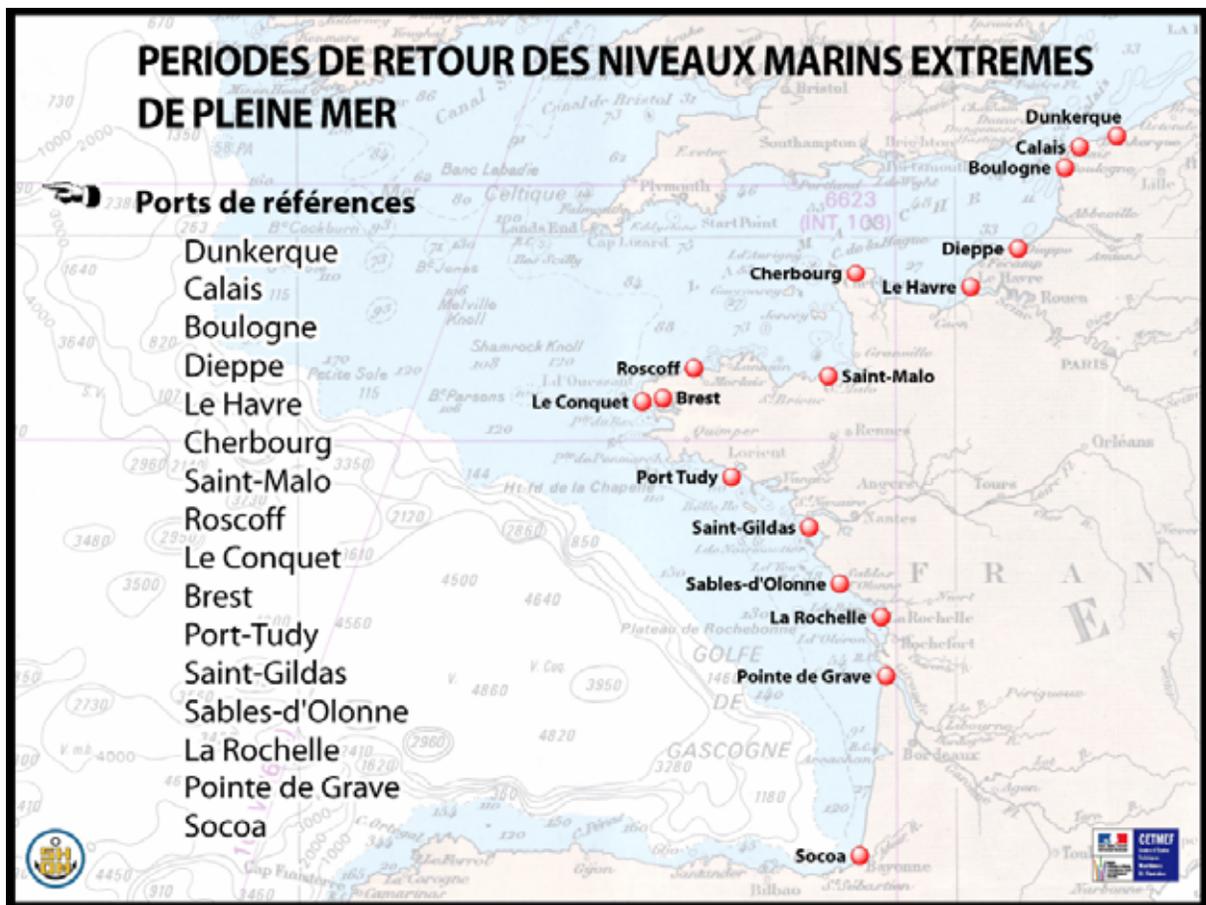
6.2.3. Orientation pour le choix d'une approche

La première approche pourrait être recommandée jusqu'à n = 1m50, niveau dont la période de retour est centennale. En dessous de cette période de retour, le patrimoine est en effet considéré comme soumis à l'aléa de submersion marine au sens des plans de prévention des risques. Au-delà du niveau zéro + 1m50, on recommanderait la seconde approche.

L.6.2 Application

1. Détermination des « h »

L'étude SHOM-CETMEF montre que le paramètre « h » varie, en Manche et Atlantique, dans une fourchette limitée, entre 0,2 et 0,3m (hors station de Socoa qui montre un « h » très bas de 0,14m) avec une moyenne sur les stations de mesure s'établissant à 0,24m, la dispersion étant plutôt modérée, autour de 12%.



Station	h (étude de 1994 – valeur donnée dans les tables)	h (étude de 2008 – valeur mesurée à la main sur les graphiques)	Station	h (étude de 1994 – valeur donnée dans les tables)	h (étude de 2008 – valeur mesurée à la main sur les graphiques)
Dunkerque	0,30	0,30	Brest	0,23	0,23
Calais	0,27	0,27	Port Tudy	0,22	0,22
Boulogne	0,25	0,27	Saint Gildas	0,235	0,23
Dieppe	0,24	0,25	Saint Nazaire	0,27	/
La Havre	0,27	0,30	Les Sables d’Ol.	/	0,24
Cherbourg	0,20	0,20	La Rochelle	manque	0,24
Saint Malo	0,24	0,22	Pte de Grave	0,24	0,22
Roscoff	0,20	0,20	Le Boucau	0,21	/
Le Conquet	0,225	0,22	Socoa	manque	0,14

« h »	étude de 1994	étude de 2008
Moyenne (hors « Socoa »)	0,24	0,24

Ecart type	0,0274	0,031
Coefficient de variation	11,4%	12,9%

Le niveau zéro + 2*h correspond à une période de retour centennale.

2. Surcoût du changement climatique

Pour la Manche et l'Atlantique, en retenant la valeur moyenne $h = 0,24\text{m}$, on en déduit la valeur du surcoût sur 40 ans du changement climatique pour 1 mètre de surélévation du niveau de la mer, pour un élément de patrimoine protégé à la cote « n » au-dessus du niveau de période de retour actuelle de 1 an.

2.1. Approche 1 (destruction totale de l'infrastructure à la première submersion)

Le surcoût CCC est exprimé en pourcentage du « coût de submersion » assimilé dans cette approche à la valeur patrimoniale de l'infrastructure C_{perm} .

Tableau 18 – Surcoût du changement climatique en % du coût de submersion

cote de protection « n » au-dessus du niveau de protection de période de retour 1 an	surcoût sur 40 ans pour 1 m de surélévation moyenne avec $h = 0,24$ m (Manche et Atlantique) en % de la valeur patrimoniale (valeur 2010 avec actualisation de 4%)	cote de protections « n » au-dessus du niveau de protection de période de retour 1 an	surcoût sur 40 ans pour 1 m de surélévation moyenne avec $h =$ 0,24 m (Manche et Atlantique) en % de la valeur patrimoniale (valeur 2010 avec actualisation de 4%)
De 0 à ~1	100	1,65	3,92
1	99,86	1,7	2,45
1,05	97,6	1,75	1,53
1,1	94,11	1,8	0,95
1,15	88,96	1,85	0,59
1,2	81,68	1,9	0,37
1,25	71,86	1,95	0,23
1,3	59,51	2	0,14
1,35	45,94	2,05	0,09
1,4	33,23	2,1	0,05
1,45	22,84	2,15	0,03
1,5	15,13	2,2	0,02
1,55	9,78	2,25	0,01
1,6	6,22	2,3	0,01

Pour $n \geq 2,4m$, $p(n)$ est faible et a' est équivalent à b ; une expression approchée (en %) est donc :

$$CCC \sim 100 \cdot 20 \cdot 10^{-(n-1)/0,24}$$

2.2. Approche 2 (cumul des coûts annuels provoqués par chaque submersion)

Les surcoûts calculés avec l'approche 2 sont présentés dans le tableau ci-dessous et les graphiques qui suivent à partir de $n = 1m$. Toutefois cette approche n'a de sens que pour un niveau de protection suffisamment élevé, supérieur à – typiquement – 1m50 qui correspond au niveau centennal en tenant compte du changement climatique.

Le surcoût est exprimé par rapport au coût C_{int} d'une submersion intermittente (coût annuel).

Tableau 19 – Surcoût lié au changement climatique exprimé par rapport au coût d'une submersion intermittente

cote de protection « n » au-dessus du niveau de protection de période de retour 1 an	surcoût sur 40 ans pour 1 m de surélévation moyenne avec $h = 0,24$ m (Manche et Atlantique) par rapport au coût annuel d'une submersion intermittente (en % à partir de 1 m 50) (valeur 2010 avec actualisation de 4%)	cote de protection « n » au-dessus du niveau de protection de période de retour 1 an	surcoût sur 40 ans pour 1 m de surélévation moyenne avec $h = 0,24$ m (Manche et Atlantique) en % au coût annuel d'une submersion intermittente (valeur 2010 avec actualisation de 4%)
1	20,583	1,7	2,49
1,05	12,740	1,75	1,54
1,1	7,886	1,8	0,96
1,15	4,881	1,85	0,59
1,2	3,021	1,9	0,37
1,25	1,870	1,95	0,23
1,3	1,157	2	0,14
1,35	0,716	2,05	0,09
1,4	0,443	2,1	0,05
1,45	0,274	2,15	0,03
		2,2	0,02
1,5	16,99	2,25	0,01
1,55	10,52	2,3	0,01
1,6	6,51		
1,65	4,03		

Pour $n \geq 2,4$ m, la même expression approchée ci-dessus reste valable (en %) :

$$CCC \sim 100 \cdot 20 \cdot 10^{-(n-1)/0,24}$$

Approche 1 (destruction totale de l'infrastructure à la première submersion)

**Surcoût du changement climatique sur 40 ans pour 1m de surélévation
moyenne**

(avec $h = 0,24\text{m}$)

en % de la valeur patrimoniale de l'infrastructure considérée

pour Manche et Atlantique

les cotes de protection étant exprimées en mètres

au-dessus du niveau de période de retour 1 an

(valeur 2010 avec actualisation de 4%)

surcoût chgt clim sur 40 ans

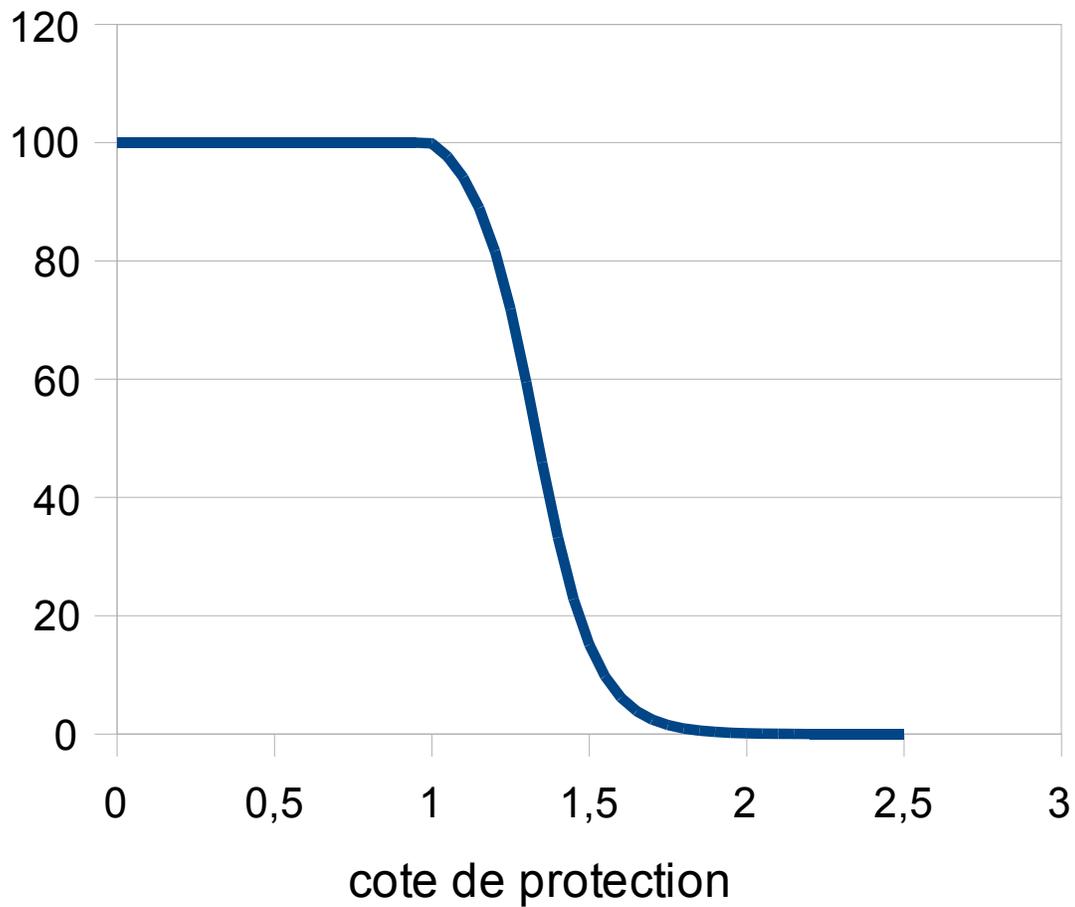


Figure 31 – Surcoût du changement climatique sur 40 ans pour 1m de surélévation moyenne, en % de la valeur patrimoniale de l'infrastructure considérée

Approche 2 : cumul des coûts annuels provoqués par chaque submersion

**Surcoût du changement climatique sur 40 ans pour 1 m de surélévation
moyenne**

(avec $h = 0,24$ m)

par référence au coût annuel d'une submersion intermittente

pour Manche et Atlantique

les cotes de protection étant exprimées en mètres

au-dessus du niveau de période de retour 1 an

(valeur 2010 avec actualisation de 4%)

surcoût du chgt clim sur 40 ans

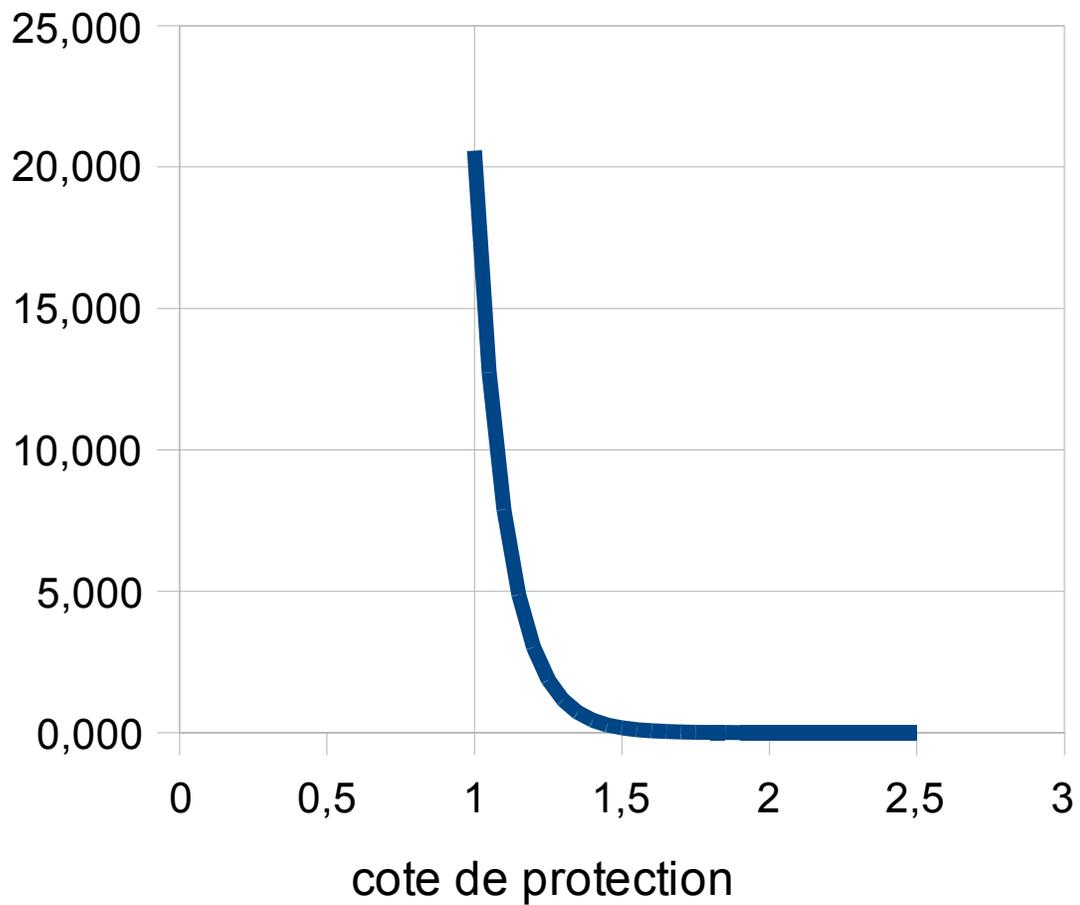


Figure 32 - Surcoût du changement climatique sur 40 ans pour 1 m de surélévation moyenne, par référence au coût annuel d'une submersion intermittente

Approche 2 : cumul des coûts annuels provoqués par chaque submersion
(ZOOM)

**Surcoût du changement climatique sur 40 ans pour 1 m de surélévation
moyenne**

(avec $h = 0,24$ m)

**en % du coût annuel d'une submersion intermittente
pour Manche et Atlantique**

**les cotes de protection étant exprimées en mètres
au-dessus du niveau de période de retour 1 an
(valeur 2010 avec actualisation de 4%)**

Surcoût du chgt clim sur 40 ans

zoom n > 1 m 50

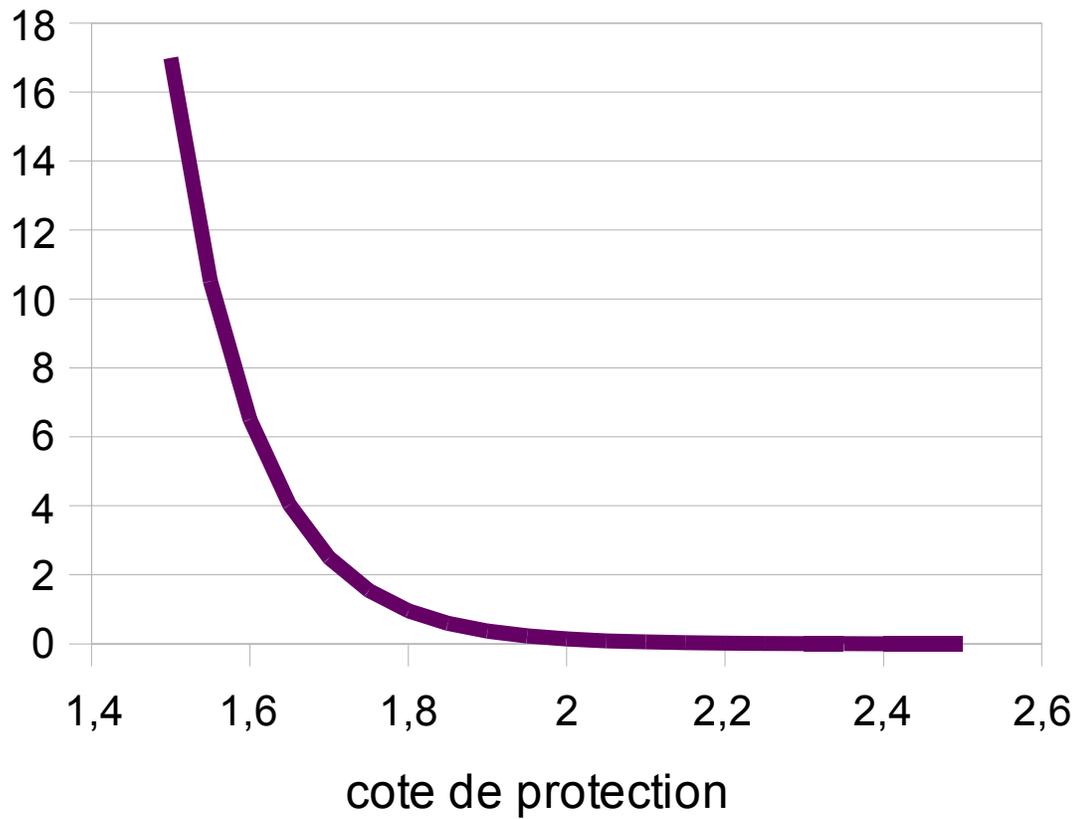


Figure 33 - Surcoût du changement climatique sur 40 ans pour 1 m de surélévation moyenne, en % du coût annuel d'une submersion intermittente

L.7 Linéaires d'infrastructures de transport situés dans les zones basses, par département

(Source : Vulnérabilité du territoire national aux risques littoraux, CETMEF, CETE de l'Ouest, CETE Méditerranée).

Nota :_Du fait de la méthode employée, les zones basses sont emboîtées. Les ouvrages situés dans la colonne « Sous Niveaux marins centennaux - 1m » sont tous inclus dans la colonne « Sous Niveaux marins centennaux ». Les ouvrages situés dans la colonne « Sous Niveaux marins centennaux » sont tous inclus dans la colonne « Sous Niveaux marins centennaux + 1m ».

Tableau 20 – Linéaire d'infrastructures de transport situées dans les zones basses, par département

	Sous Niveaux marins centennaux -1m	Sous Niveaux marins centennaux	Sous Niveaux marins centennaux +1m
Nord 59	Linéaire en km	Linéaire en km	Linéaire en km
<i>Autoroute</i>	30	57	62
<i>Route nationale</i>	17	24	24
<i>Route départementale</i>	334	399	416
<i>Autre voie routière</i>	1128	1414	1550
<i>Voie TGV</i>	2	2	2
<i>Voie ferrée principale</i>	41	66	72
<i>Autre voie ferrée</i>	76	159	195
<i>Aire de triage</i>	4 aires de 71 ha	7 aires de 98 ha	9 aires de 112 ha
Total Nord 59	1628	2121	2320
Pas de Calais 62			
<i>Autoroute</i>	52	72	76
<i>Route nationale</i>	2	8	9
<i>Route départementale</i>	231	284	323
<i>Autre voie routière</i>	866	1111	1286
<i>Voie TGV</i>	0	0	0
<i>Voie ferrée principale</i>	83	116	134
<i>Autre voie ferrée</i>	26	45	64
<i>Aire de triage</i>	4 aires de 58 ha	7 aires de 75 ha	10 aires de 78 ha
Total Pas de Calais 62	1259	1636	1891

Somme 80			
<i>Autoroute</i>	4	5	7
<i>Route nationale</i>	0	0	0
<i>Route départementale</i>	107	123	137
<i>Autre voie routière</i>	293	349	408
<i>Voie TGV</i>	0	0	0
<i>Voie ferrée principale</i>	42	60	60
<i>Autre voie ferrée</i>	7	8	10
<i>Aire de triage</i>	0	0	0
Total Somme 80	453	545	621

Seine-Maritime 76			
<i>Autoroute</i>	1	29	35
<i>Route nationale</i>	1	4	8
<i>Route départementale</i>	39	97	142
<i>Autre voie routière</i>	205	562	811
<i>Voie TGV</i>	0	0	0
<i>Voie ferrée principale</i>	4	14	36
<i>Autre voie ferrée</i>	27	131	195
<i>Aire de triage</i>	2 aires de 4 ha	10 aires de 36 ha	16 aires de 51 ha
Total Seine-Maritime 76	276	837	1226

Eure 27			
<i>Autoroute</i>	0	10	12
<i>Route nationale</i>	0	2	2
<i>Route départementale</i>	7	26	29
<i>Autre voie routière</i>	18	47	53
<i>Voie TGV</i>	0	0	0
<i>Voie ferrée principale</i>	0	1	6

<i>Autre voie ferrée</i>	0	0	0
<i>Aire de triage</i>	0	0	0
Total Eure 27	25	85	101

Calvados 14

<i>Autoroute</i>	0	1	4
<i>Route nationale</i>	3	9	10
<i>Route départementale</i>	18	74	133
<i>Autre voie routière</i>	79	241	416
<i>Voie TGV</i>	0	0	0
<i>Voie ferrée principale</i>	4	17	21
<i>Autre voie ferrée</i>	2	11	20
<i>Aire de triage</i>	0	3 aires de 7 ha	5 aires de 20 ha
Total Calvados 14	106	352	604

Manche 50

<i>Autoroute</i>	0	0	0
<i>Route nationale</i>	8	15	20
<i>Route départementale</i>	86	160	249
<i>Autre voie routière</i>	153	316	522
<i>Voie TGV</i>	0	0	0
<i>Voie ferrée principale</i>	9	20	30
<i>Autre voie ferrée</i>	5	6	10
<i>Aire de triage</i>	0	1 aire de 2 ha	1 aire de 2 ha
Total Manche 50	260	516	831

Ille-et-Vilaine 35

<i>Autoroute</i>	0	0	0
<i>Route nationale</i>	20	21	21

<i>Route départementale</i>	102	121	137
<i>Autre voie routière</i>	306	361	402
<i>Voie ferrée principale</i>	16	17	18
<i>Autre voie ferrée</i>	7	11	11
<i>Aire de triage</i>	1 aire de 6 ha	1 aire de 6 ha	1 aire de 6 ha
Total Ile-et-Vilaine 35	450	531	588
Côtes-d'Armor 22			
<i>Autoroute</i>	0	0	0
<i>Route nationale</i>	0	0	0
<i>Route départementale</i>	15	26	38
<i>Autre voie routière</i>	45	80	121
<i>Voie ferrée principale</i>	1	1	1
<i>Autre voie ferrée</i>	2	2	3
<i>Aire de triage</i>	0	0	0
Total Côtes-d'Armor 22	63	109	164
Finistère 29			
<i>Autoroute</i>	0	0	0
<i>Route nationale</i>	1	1	1
<i>Route départementale</i>	28	45	70
<i>Autre voie routière</i>	134	229	371
<i>Voie ferrée principale</i>	1	1	2
<i>Autre voie ferrée</i>	0	0	1
<i>Aire de triage</i>	0	1 aire de 2ha	1 aire de 2ha
Total Finistère 29	164	277	445
Morbihan 56			
<i>Autoroute</i>	0	0	0
<i>Route nationale</i>	0	0	4

<i>Route départementale</i>	31	56	94
<i>Autre voie routière</i>	153	272	442
<i>Voie ferrée principale</i>	0	0	14
<i>Autre voie ferrée</i>	3	5	6
<i>Aire de triage</i>	0	0	0
Total Morbihan 56	187	333	560

Loire Atlantique 44

<i>Autoroute</i>	0	0	1
<i>Route nationale</i>	14	25	44
<i>Route départementale</i>	108	182	288
<i>Autre voie routière</i>	498	852	1339
<i>Voie TGV</i>	0	0	0
<i>Voie ferrée principale</i>	12	41	69
<i>Autre voie ferrée</i>	32	52	74
<i>Aire de triage</i>	1 aire de 7 ha	8 aires de 41 ha	8 aires de 41 ha
Total Loire Atlantique 44	664	1153	1815

Vendée 85

<i>Autoroute</i>	0	0	0
<i>Route nationale</i>	0	0	0
<i>Route départementale</i>	398	537	592
<i>Autre voie routière</i>	968	1368	1597
<i>Voie TGV</i>	0	0	0
<i>Voie ferrée principale</i>	4	15	16
<i>Autre voie ferrée</i>	1	1	2
<i>Aire de triage</i>	0	0	0
Total Vendée 85	1371	1921	2208

Charente-Maritime 17

<i>Autoroute</i>	2	7	12
<i>Route nationale</i>	7	15	19
<i>Route départementale</i>	174	355	480
<i>Autre voie routière</i>	653	1311	1762
<i>Voie TGV</i>	0	0	0
<i>Voie ferrée principale</i>	24	47	65
<i>Autre voie ferrée</i>	8	9	10
<i>Aire de triage</i>	4 aires de 18 ha	5 aires de 20 ha	6 aires de 26 ha
Total Charente-Maritime 17	867	1744	2349

Deux-Sèvres 79

<i>Autoroute</i>	0	0	0
<i>Route nationale</i>	0	0	0
<i>Route départementale</i>	2	8	8
<i>Autre voie routière</i>	9	31	34
<i>Voie TGV</i>	0	0	0
<i>Voie ferrée principale</i>	0	0	0
<i>Autre voie ferrée</i>	0	0	0
<i>Aire de triage</i>	0	0	0
Total Deux-Sèvres 79	11	39	42

Gironde 33

<i>Autoroute</i>	19	45	61
<i>Route nationale</i>	2	4	9
<i>Route départementale</i>	110	242	367
<i>Autre voie routière</i>	458	910	1339
<i>Voie TGV</i>	0	0	0
<i>Voie ferrée principale</i>	33	57	86

<i>Autre voie ferrée</i>	22	54	69
<i>Aire de triage</i>	3 aires de 4 ha	10 aires de 17 ha	17 aires de 67 ha
Total Gironde 33	644	1311	1930
Landes 40			
<i>Autoroute</i>	0	0	0
<i>Route nationale</i>	0	1	1
<i>Route départementale</i>	17	30	43
<i>Autre voie routière</i>	18	76	162
<i>Voie TGV</i>	0	0	0
<i>Voie ferrée principale</i>	0	1	1
<i>Autre voie ferrée</i>	0	1	2
<i>Aire de triage</i>	0	0	0
Total Landes 40	36	110	210
Pyrénées-Atlantiques 64			
<i>Autoroute</i>	1	3	5
<i>Route nationale</i>	0	0	0
<i>Route départementale</i>	18	56	69
<i>Autre voie routière</i>	37	75	104
<i>Voie TGV</i>	0	0	0
<i>Voie ferrée principale</i>	6	19	24
<i>Autre voie ferrée</i>	5	9	10
<i>Aire de triage</i>	0	0	0
Total Pyrénées-Atlantiques 64	67	161	212
Pyrénées-Orientales 66			
<i>Autoroute</i>	0	0	0
<i>Route nationale</i>	0	0	0
<i>Route départementale</i>	2	15	33

<i>Autre voie routière</i>	20	101	244
<i>Voie TGV</i>	0	0	0
<i>Voie ferrée principale</i>	0	0	0
<i>Autre voie ferrée</i>	0	0	1
<i>Aire de triage</i>	0	1 aire de 1 ha	1 aire de 1 ha
Total Pyrénées-Orientales 66	23	116	279

Aude 11

<i>Autoroute</i>	0	0	0
<i>Route nationale</i>	0	0	0
<i>Route départementale</i>	9	17	41
<i>Autre voie routière</i>	48	133	248
<i>Voie TGV</i>	0	0	0
<i>Voie ferrée principale</i>	1	14	23
<i>Autre voie ferrée</i>	1	1	4
<i>Aire de triage</i>			
Total Aude 11	58	165	317

Hérault 34

<i>Autoroute</i>	51	72	76
<i>Route nationale</i>	2	8	9
<i>Route départementale</i>	231	284	323
<i>Autre voie routière</i>	866	1111	1286
<i>Voie TGV</i>	0	0	0
<i>Voie ferrée principale</i>	0	6	27
<i>Autre voie ferrée</i>	0	6	22
<i>Aire de triage</i>	0	1 aire de 4 ha	4 aires de 23 ha
Total Hérault 34	1150	1487	1742

Gard 30

<i>Autoroute</i>	0	0	0
------------------	---	---	---

<i>Route nationale</i>	0	0	0
<i>Route départementale</i>	0	37	78
<i>Autre voie routière</i>	5	92	169
<i>Voie TGV</i>	0	0	0
<i>Voie ferrée principale</i>	0	5	8
<i>Autre voie ferrée</i>	0	2	3
<i>Aire de triage</i>	0	0	0
Total Gard 30	5	137	258

Bouches du Rhône 13

<i>Autoroute</i>	0	0	4
<i>Route nationale</i>	2	8	11
<i>Route départementale</i>	3	101	176
<i>Autre voie routière</i>	22	282	454
<i>Voie TGV</i>	0	0	0
<i>Voie ferrée principale</i>	4	28	42
<i>Autre voie ferrée</i>	2	39	73
<i>Aire de triage</i>	0	3 aires de 7 ha	6 aires de 31 ha
Total Bouches du Rhône 13	32	459	760

Var 83

<i>Autoroute</i>	0	0	0
<i>Route nationale</i>	0	0	0
<i>Route départementale</i>	1	27	47
<i>Autre voie routière</i>	8	135	211
<i>Voie TGV</i>	0	0	0
<i>Voie ferrée principale</i>	0	1	6
<i>Autre voie ferrée</i>	0	4	6
<i>Aire de triage</i>	0	0	0

Total Var 83	9	167	270
Alpes Maritimes 06			
<i>Autoroute</i>	0	0	0
<i>Route nationale</i>	0	0	0
<i>Route départementale</i>	1	7	14
<i>Autre voie routière</i>	30	66	107
<i>Voie TGV</i>	0	0	0
<i>Voie ferrée principale</i>	0	8	9
<i>Autre voie ferrée</i>	0	4	5
<i>Aire de triage</i>	0	1 aire de 14 ha	1 aire de 14 ha
Total Alpes Maritimes 06	31	85	134

Corse du Sud 2A			
<i>Autoroute</i>	0	0	0
<i>Route nationale</i>	0	1	3
<i>Route départementale</i>	0	2	6
<i>Autre voie routière</i>	5	14	23
<i>Voie TGV</i>	0	0	0
<i>Voie ferrée principale</i>	0	1	2
<i>Autre voie ferrée</i>	0	0	0
<i>Aire de triage</i>	0	0	0
Total Corse du Sud 2A	5	17	34

Haute Corse 2B			
<i>Autoroute</i>	0	0	0
<i>Route nationale</i>	0	2	3
<i>Route départementale</i>	2	3	5
<i>Autre voie routière</i>	7	20	61
<i>Voie TGV</i>	0	0	0

<i>Voie ferrée principale</i>	0	3	3
<i>Autre voie ferrée</i>	0	0	0
<i>Aire de triage</i>	0	0	0
Total Haute Corse 2B	9	28	72